

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Paulo Leonardo Jacobussi Semeghini

REDUÇÃO DA REJEIÇÃO DE PRODUTOS COM PROBLEMAS DE
QUALIDADE EM UMA FÁBRICA DE FOLHAS DE ALUMÍNIO

São Carlos

2016

Paulo Leonardo Jacobussi Semeghini

REDUÇÃO DA REJEIÇÃO DE PRODUTOS COM PROBLEMAS DE
QUALIDADE EM UMA FÁBRICA DE FOLHAS DE ALUMÍNIO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

São Carlos

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S471r Semeghini, Paulo Laronardo J.
Redução da Rejeição de Produtos com Problemas de Qualidade em uma Fábrica de Folhas de Alumínio / Paulo Laronardo J. Semeghini; orientador José Benedito Marcomini. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Laminação. 2. Caster. 3. Qualidade. 4. Alumínio.
5. Folhas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

RESUMO

SEMEGHINI, P. L. J. **Redução da Rejeição de Produtos com Problemas de Qualidade em uma Fábrica de Folhas de Alumínio**. 2016. 57 f. Monografia (TCC) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O presente trabalho consiste em um estudo de forma a identificar oportunidades e propor ações de melhoria que levem à redução do índice de rejeição interna e externa de materiais produzidos com problemas de qualidade em uma fábrica de folhas de alumínio. Para tanto, primeiramente foram analisados os relatórios internos da fábrica, de maneira a identificar quais problemas de qualidade contribuem de forma significativa para aumentar o índice de rejeição de produtos. Uma vez identificados os problemas, realizou-se uma avaliação dos relatórios de análise de causa-raiz elaborados pela área de Qualidade e dos relatórios de não-conformidade recebidos pela área de Assistência Técnica da empresa, juntamente com a bibliografia consultada, de forma a identificar as principais causas responsáveis pela ocorrência dos problemas de qualidade, e assim possibilitar a proposta de ações corretivas ou preventivas para estes problemas. Por fim, buscou-se identificar o potencial de ganhos financeiros que a empresa pode ter com a adoção das ações de melhorias propostas por este trabalho.

Palavras-chave: Laminação. *Caster*. Qualidade. Alumínio. Folhas.

ABSTRACT

SEMEGHINI, P. L. J. Reduction of the Rejection of Products with Quality Problems in an Aluminum Foil Plant. 2016. 57 f. Monografia (TCC) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The present work consists of a study in order to identify opportunities and propose improvement actions that lead to the reduction of the internal and external rejection rate of materials produced with quality problems in an aluminum foil factory. In order to do so, it was first analyzed the internal reports of the plant, in order to identify which quality problems contribute in a significantly way to increase the rejection rate of those products. Once the problems were identified, the root cause analysis reports prepared by the Quality area and the non-compliance reports received by the company's Technical Assistance area, together with the bibliography consulted, were evaluated to identify the main causes responsible for the occurrence of quality problems, and thus be able to propose corrective or preventive actions for these problems. Finally, it was possible to identify the potential of financial gains that the company can have with the adoption of the improvements proposed by this work.

Keywords: Lamination. Caster. Quality. Aluminum. Foil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 O tema e sua importância	1
1.2 Alumínio	2
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Laminação	4
3.1.1 Laminadores.....	4
3.1.2 Laminação a quente	6
3.1.2 Laminação contínua (<i>Caster</i>).....	6
3.1.3 Laminação a frio	8
3.1.4 Laminação de folhas.....	9
3.2. Análise de Pareto	10
3.3 Manutenção Preditiva	10
3.4.1 Análise de vibrações.....	11
3.4.2 Análise de óleos lubrificantes.....	12
4. METODOLOGIA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA.....	13
4.1 Materiais	13
4.1.1 Folhas de alumínio	13
4.1.2 Relatórios analisados.....	14
4.2 Processo analisado	15
4.3 Metodologia	17
5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	18
5.1 Análise das rejeições internas	18
5.2 Análise das rejeições externas	19
5.3 Análise dos diagramas de Pareto.	20
5.4 Descrição dos problemas investigados	20
5.4.1 Molhabilidade	20
5.4.2 Poros e furos	21
5.4.3 Rugas	22
5.4.4 Telescopagem.....	23
5.5 Investigação dos defeitos significativos	24
5.5.1 Molhabilidade	24

5.5.2 Porosidade.....	24
5.5.3 Rugas	25
5.5.4 Telescopagem.....	26
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
6.1 Análise de Pareto	29
6.2 Análise dos problemas de qualidade	31
6.2.1 Molhabilidade	31
6.2.2 Porosidade.....	35
6.2.3 Rugas	38
6.2.4 Telescopagem.....	40
6.3 Manutenção Preditiva.....	41
6.3.1 Análise de vibrações.....	41
6.3.2 Análise de óleos.....	42
6.4 Potencial de redução do índice de material rejeitado	44
7. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 O tema e sua importância

O tema do presente trabalho consiste na redução do índice rejeição de produtos com problemas de qualidade dentro de uma fábrica de folhas de alumínio.

Segundo dados do Anuário Estatístico da ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), o faturamento das indústrias de alumínio instaladas no Brasil somou R\$ 56,4 bilhões em 2015. Este dado demonstra a importância desta indústria para a economia brasileira, cuja participação no Produto Interno Bruto (PIB) Industrial foi de 4,9%. Os produtos laminados planos de alumínio, cujas aplicações incluem os mercados de embalagens, transportes, construção civil, eletrônicos, bens de consumo e máquina e equipamentos, tem contribuição significativa para este número, sendo responsável por cerca de 50% de todo produto transformado de alumínio produzido em 2015. Neste mesmo ano, o mercado brasileiro consumiu cerca de 90 mil toneladas de folhas de alumínio.

Ainda que continue apresentando número relevantes, o desempenho do mercado interno de produtos de alumínio em 2015 refletiu a situação conjuntural do país, que enfrentou forte retração econômica. Com relação aos produtos transformados de alumínio, tanto a produção quanto o consumo doméstico registraram retração. A produção recuou 7,9% em relação ao ano anterior e terminou 2015 com 1.273 mil toneladas, enquanto o consumo doméstico recuou 8,5% e fechou 2015 com 1.308,5 mil toneladas consumidas.

As dificuldades encontradas pela indústria do alumínio, motivadas pela situação do mercado brasileiro, exigem que as empresas apresentem um processo produtivo bastante eficiente, aliado à redução dos custos operacionais das fábricas produtoras. A redução dos custos de fabricação pode ser obtida por meio de uma redução na quantidade de produtos refugados por problemas de qualidade. O custo da não qualidade é bastante prejudicial para o resultado financeiro de qualquer fábrica de produtos transformados, especialmente de alumínio, cujo processo, desde a obtenção é um dos mais custosos. Estes fatos, bem como a magnitude da contribuição desta indústria para a economia brasileira, justificam a escolha do tema para este trabalho.

1.2 Alumínio

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia. Possui baixo peso específico, ao passo que algumas de suas ligas apresentam resistências superiores às do aço. Apresenta alta resistência à corrosão na maioria das condições de trabalho, boa condutividade térmica e elétrica, além de alta refletividade, tanto para calor, como para a luz. Pode ainda ser facilmente trabalhado em qualquer forma e aceita uma grande variedade de acabamentos superficiais.

O alumínio comercialmente puro tem resistência à tração de aproximadamente 90 MPa, porém sua resistência pode ser praticamente dobrada com a aplicação de trabalho a frio. Aumentos maiores na sua resistência podem ser obtidos com a adição de elementos de liga. É possível obter uma grande variedade de características mecânicas em ligas de alumínio, através das combinações de trabalho a frio e de tratamento térmico, tanto que hoje algumas ligas podem ter resistência à tração de aproximadamente 700 MPa.

O alumínio e suas ligas apresentam um decréscimo em sua resistência mecânica em temperaturas mais elevadas, embora algumas ligas conservem boa resistência entre 200°C e 260°C. Em temperaturas abaixo de zero, por outro lado, sua resistência aumenta sem perder a ductilidade, haja vista que o alumínio é um metal particularmente utilizado em aplicações a baixas temperaturas.

Quando o alumínio é exposto à atmosfera, forma-se imediatamente uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. A menos que seja exposto a uma determinada substância ou condição agressiva que destrua essa película de óxido de proteção, o metal fica totalmente protegido contra a corrosão.

O fato do alumínio apresentar características de não toxicidade ao organismo humano permite sua utilização em utensílios domésticos e nas industriais alimentícias. É a mesma característica que permite às folhas de alumínio serem utilizadas em contato direto com os alimentos no caso das embalagens.

Em função de sua elevada condutibilidade elétrica é muito utilizado como condutor de eletricidade. A condutibilidade elétrica de um condutor na liga 1350 é de cerca de 62% IACS (*International Annealed Copper Standart*). A alta condutibilidade térmica do alumínio o torna um importante meio de transferência de energia térmica, tanto

no aquecimento quanto no resfriamento, o que faz com trocadores ou dissipadores de calor sejam comuns na indústria alimentícia, química, petrolífera e aeronáutica.

O alumínio tem uma refletividade acima de 80%, a qual permite uma grande utilização em luminárias e coberturas de edificações. O metal não é magnético, sendo portanto frequentemente utilizado em equipamentos eletrônicos. Também não produz faíscas, sendo dessa forma utilizado em estocagem de substância inflamáveis ou explosivas.

Estas são as características que dão ao alumínio uma extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características são de interesse. Por exemplo, o baixo peso combinado com alta resistência o especialmente útil em aeronaves, vagões ferroviários, caminhões e outros equipamentos de transporte. A alta resistência a corrosão e elevada condutibilidade térmica são importantes para equipamentos na indústria química e petrolífera, enquanto a não toxicidade é interessante para a indústria alimentícia. Sua aparência atraente aliada a alta resistência às intempéries e baixos requisitos de manutenção proporcionam uma vasta utilização na construção civil. Em resumo, muitas aplicações podem se aproveitar da extrema versatilidade que o alumínio possui [1].

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral, a análise dos relatórios produzidos pelas áreas de qualidade e assistência técnica de uma fábrica de produtos laminados planos de alumínio e, a partir desta análise, propor melhorias de processo que possam contribuir para a redução do índice de rejeição interna e externa dos produtos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, que servirão como base para as análises que buscam atender ao objetivo geral do trabalho, estão listados abaixo.

- Identificar os defeitos que apresentam maior índice de rejeição dos produtos;
- Identificar e sugerir melhorias no processo de fabricação e/ ou no procedimento de inspeção, com o intuito de reduzir o índice de rejeição supracitado;
- Estimar o potencial de ganho financeiro com a implantação das ações sugeridas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Laminação

A laminação é um processo de deformação plástica, no qual o material é forçado a passar entre dois rolos (cilindros) que rodam em sentido oposto, com a mesma velocidade periférica, e estão distanciados entre si de um valor inferior a espessura do material que vai ser deformado [2].

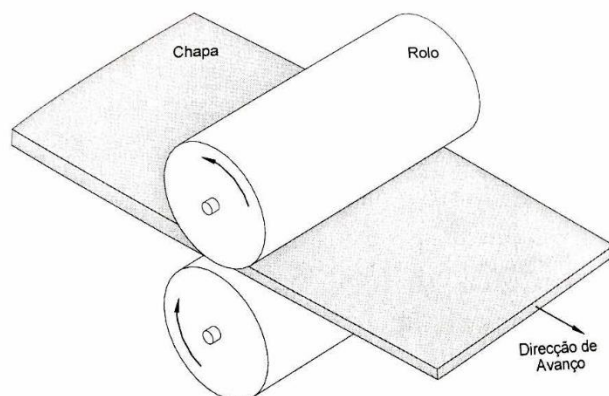


Figura 1 – Processo básico de laminação de produtos planos [2].

A laminação é um importante processo de manufatura, uma vez que cerca de 90% dos materiais metálicos utilizados na indústria transformadora são submetidos a alguma operação de laminação, seja ela destinada a produção de produtos planos, como chapas finas e grossa, ou a produção de produtos não planos, como tubos, barras, perfis e varões. [2]

3.1.1 Laminadores

Um laminador é composto basicamente por cilindros de trabalho, cilindros de apoio, um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação e uma carcaça ou quadro para fixar todas as partes. É necessário o uso de motores potentes e uma estrutura bastante rígida, visto que as forças de laminação podem chegar a ordem de milhares de toneladas [1].

Os laminadores comuns podem ser constituídos por variadas disposições de cilindros de laminação, as quais são apresentadas na figura 2. A disposição mais simples é constituída por dois cilindros de eixos horizontais, colocados verticalmente um sobre o outro, e é chamada de laminador duo – que pode ser reversível ou não. No laminador duo

não reversível o sentido de giro dos cilindros não pode ser invertido, enquanto no reversível a inversão da rotação do cilindro permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos. [1]. O laminador trio é constituído por três cilindros laminadores dispostos verticalmente, onde o cilindro superior e o inferior giram no mesmo sentido, enquanto o cilindro intermediário gira em sentido oposto, sendo que o material passa entre os cilindros superior e médio e retorna para passar entre os cilindros inferior e médio [2]. Os laminadores de quatro rolos são constituídos por quatro cilindros colocados verticalmente uns sobre os outros, sendo que os rolos de trabalho possuem um diâmetro menor que os rolos de apoio. Esta concepção tem o objetivo de minimizar os efeitos da flexão dos rolos de laminação, e explica a razão pela qual os laminadores de quatro rolos são muito utilizados na fabricação de chapas finas a frio, onde são exigidas tolerâncias dimensionais apertadas e seção transversal uniforme [2]. Os laminadores Sendzimir são compostos por uma montagem onde os cilindros de trabalho são apoiados em todas as direções, sendo utilizados quando os rolos possuem espessura bastante reduzida, ficando sujeitos aos efeitos fletivos tanto na horizontal quanto na vertical. Os laminadores podem ainda ser destinados a fabricação de não-planos, onde a laminação é realizada de forma progressiva, passando o material por sucessivos conjuntos de rolos durante o seu movimento longitudinal [2].

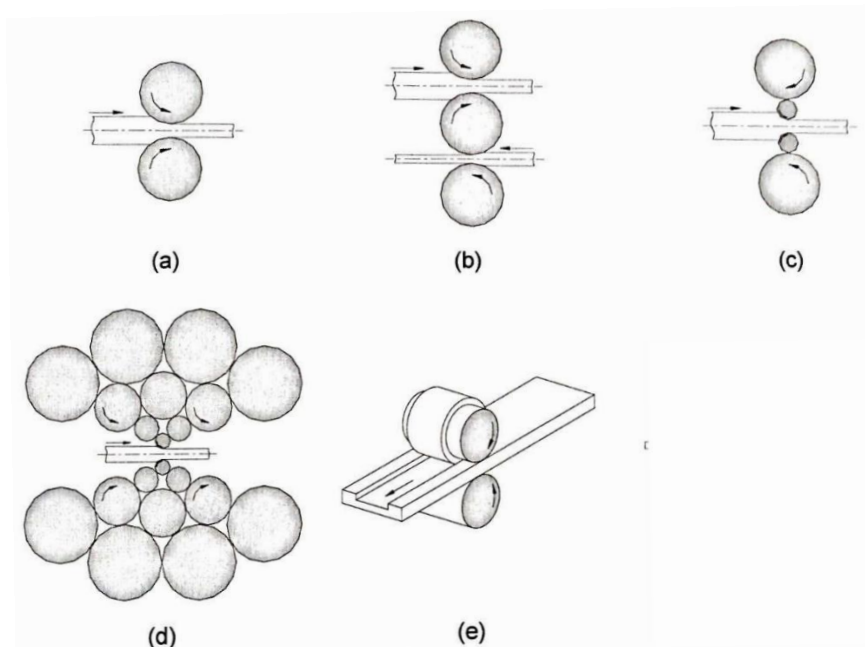


Figura 2 – Representação esquemática dos tipos de laminadores industriais; a) laminador duo; b) laminador trio; c) laminador de quatro rolos; d) laminador Sendzimir; e) laminador de produtos não-planos [2].

3.1.2 Laminação a quente

A laminação a quente usualmente é a etapa inicial do processo de laminação, onde a redução de espessura das placas é realizada a uma temperatura no mínimo igual a temperatura de recristalização do material. Esta condição permite que o metal apresente elevada ductilidade e que haja uma recristalização dinâmica durante a deformação plástica. A laminação a quente é processada normalmente em laminadores reversíveis de dois ou quatro rolos, e o metal é deslocado, a cada passada, por entre os cilindros, sendo que a abertura entre os mesmos define a espessura do passe. A redução da espessura por passe depende da natureza da liga que está sendo laminada, e após o último passe o material apresenta espessuras da ordem de 6 mm, sendo então enrolado ou cortado em chapas planas, constituindo matéria prima para um subseqüente processo de laminação a frio. [1]

3.1.2 Laminação contínua (*Caster*)

O processo de laminação contínua, também conhecido como *caster*, tem por objetivo produzir chapas que serão utilizadas como matéria-prima para a laminação a frio. Este processo elimina a etapa de laminação a quente, sendo que neste caso o metal fundido é solidificado entre dois cilindros refrigerados, que giram em torno de seus eixos produzindo chapas com seção retangular e espessura aproximada de 6 mm. Esta chapa é posteriormente enrolada, obtendo-se assim um produto similar a aquele obtido pela laminação a quente, porém com uma estrutura bruta de fusão, bastante refinada pelo uso de refinadores de grão durante o vazamento [1]. A figura 3 mostra um esquema do processo de laminação contínua.

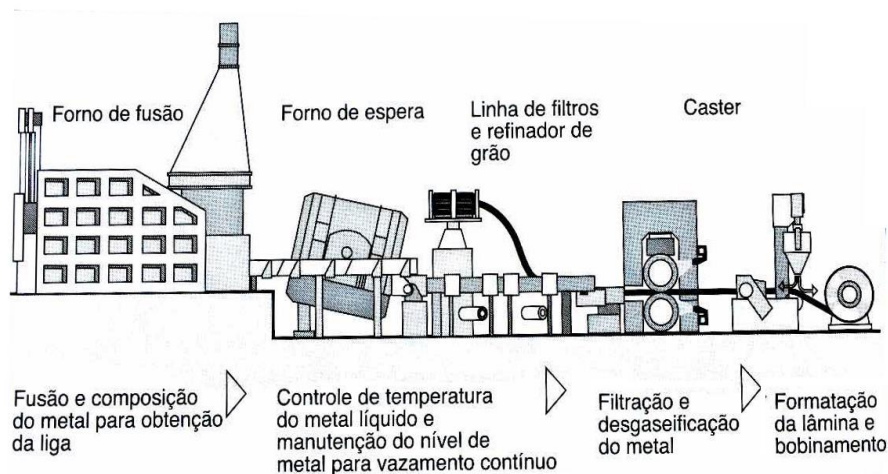


Figura 3 – Processo esquemático da laminação contínua [1]

No processo de *caster*, a nucleação de grãos ocorre nos limites entre as fases líquida e sólida do alumínio, através da extração livre do calor latente da fase fundida. Os grãos crescem de maneira equiaxial até entrarem em contato com a frente de solidificação, onde há a extração do calor pelos cilindros refrigerados. Neste ponto, a taxa de extração de calor aumenta consideravelmente e o padrão de crescimento dos grãos passa a ser uniaxial na direção perpendicular à frente de solidificação. Desta forma, pode-se esperar a uma estrutura apresentando regiões dendríticas grosseiras. O tamanho de grão é controlado primariamente pela presença de refinadores de grãos, mas pode também ser influenciado pela extensão de regiões subrefrigeradas do fundido, a força motriz de nucleação e gradiente de temperatura no fundido – fatores que são sensíveis aos parâmetros de fundição do material [5].

Devido às maiores taxas de solidificação atingidas no processo de *caster*, a microestrutura dos materiais produzidos neste processo difere daquela encontrada na laminação a quente, exibindo uma alta concentração de precipitados de elementos de ligas e presença de partículas sólidas intermetálicas nas estruturas dendríticas formadas [4]. Os elementos de liga retidos na solução sólida são obstáculos para a o movimento das discordâncias durante a laminação a frio, o que leva a formação de uma rede densa de discordâncias na microestrutura. Durante o recozimento, pode ocorrer a nucleação de dispersóides nesta rede de discordâncias que se estabilizam em uma estrutura subgranular e dificultam a recristalização [5].

A figura 4 mostra a estrutura dendrítica formada na laminação de chapas pelo processo de *caster*. A figura 5 mostra a presença de partículas retidas na solução sólida do alumínio. A figura 6 demonstra a microestrutura com tamanho de grão grosseiro típica das chapas de alumínio produzidas pelo processo de *caster*.

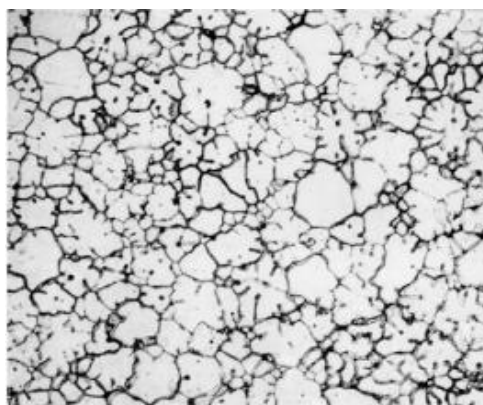


Figura 4 – Microestrutura dendrítica típica do processo de *caster* [3]

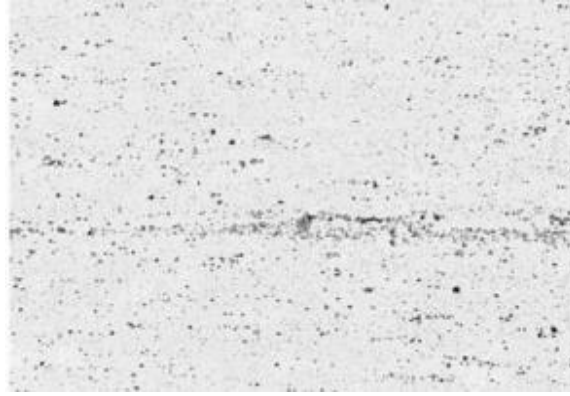


Figura 5 – Particulados retidos na solução sólida da microestrutura típica do alumínio produzido pelo processo de *caster* [4].

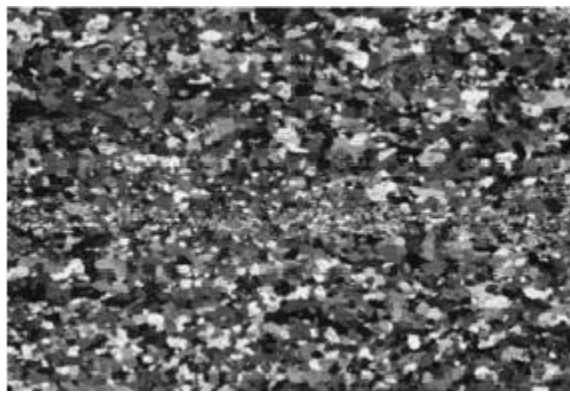


Figura 6 - Microestrutura com tamanho de grão grosseiro típica das chapas de alumínio produzidas pelo processo de *caster* [4].

3.1.3 Laminação a frio

A laminação a frio é um processo de laminação realizado a temperaturas inferiores àquela da recristalização dos materiais metálicos utilizados, e cuja matéria prima são as chapas oriundas da laminação a quente ou laminação contínua. A laminação a frio é capaz de produzir materiais com diversos acabamentos, desde o acabamento comum (sem brilho reflexivo) até acabamento brilhante. O processo resulta em um encruamento do material, ou seja, aumento dos limites de resistência a tração e de escoamento com diminuição do alongamento. Recozimentos intermediários podem ser aplicados para a recristalização e amolecimento do material, de forma a facilitar posterior laminação ou determinar têmperas específicas [1].

A laminação é geralmente executada em laminadores de quatro rolos não-reversíveis. O número de passes depende da espessura inicial da matéria-prima, espessura

final, liga e têmpera do produto desejado. Os laminadores são dimensionados para redu es de se es entre 30% e 70% por passe [1].

3.1.4 Lamina o de folhas

Os laminados planos de alumínio, com se o transversal retangular e espessura (e) uniforme máxima de 0,15 mm são denominadas folhas. As folhas podem ser classificadas como grossas, m dias e finas, conforme abaixo.

- Folha Fina: $e \leq 0,020$ mm
- Folha Média: $0,020 \text{ mm} < e \leq 0,050$ mm
- Folha Grossa: $0,050 \text{ mm} < e \leq 0,150$ mm

A matéria-prima utilizada   proveniente de um processo anterior de lamina o a frio e possuem espessuras da ordem de 0,4 mm. Para a produ o de folhas finas, inicialmente a matéria-prima   laminada em um laminador desbastador, que produz folhas grossas. Em seguida,   laminada em um laminador intermediário, que produz a folha média. As folhas finas são produzidas em laminadores específicos, que realiza as opera es em folhas dupladas, ou seja, com duas camadas de folhas posicionadas uma sobre a outra, sendo posteriormente separadas em uma máquina denominada separadeira. A folha pode ainda ser submetida a um processo de recozimento, dependendo da sua aplica o final. A figura 7 mostra um esquema do processo de lamina o de folhas [1].

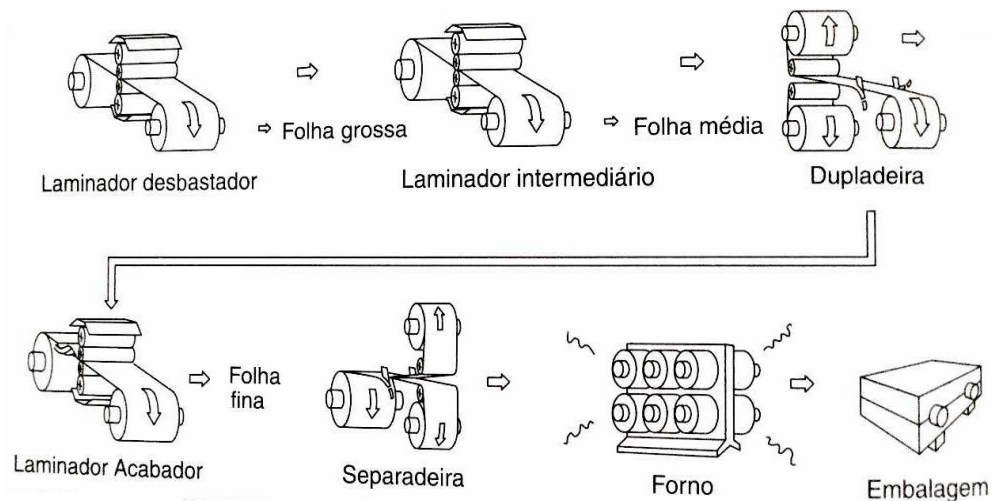


Figura 7 – Processo esquemático da lamina o de folhas [1].

3.2. Análise de Pareto

O método da análise de Pareto é uma ferramenta de análise de dados utilizado para determinar as principais causas para um dado problema [6]. O método baseia-se no princípio de Pareto, o qual foi sugerido por Joseph Juran com base nos estudos de Vilfredo Pareto, que havia observado que 80% da renda da Itália provinha de apenas 20% da população. Juran aplicou este conceito a área de gestão da qualidade, onde verificou que a grande maioria dos problemas de um processo são produzidas apenas por algumas causas essenciais [7].

Este método busca diferenciar, através da análise de um diagrama de Pareto, as poucas causas significativas para um problema das outras várias que contribuem para este problema de forma trivial.

O procedimento para a aplicação deste método pode ser descrito conforme abaixo [6].

- i) Identificar um problema e suas respectivas causas
- ii) Reunir dados relacionados as causas do problema
- iii) Ordenar os dados da maior categoria para menor
- iv) Calcular a porcentagem do total que cada categoria representa
- v) Construir as barras para cada categoria em ordem decrescente, com a o eixo vertical esquerdo apresentando a escala de porcentagem relativa de cada categoria, e o eixo vertical direito apresentando a escala de porcentagem acumulada dos dados.
- vi) Analisar o gráfico para determinar as causas que tem contribuição significativa para o problema

3.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva tem como estratégia determinar a condição de um ativo enquanto o mesmo está operando. Essa técnica é baseada no fato de que em sua maioria, cada componente de uma máquina emite um tipo de aviso ou sinal antes de falhar. A manutenção preditiva deve ser apoiada nos variados ensaios e técnicas não destrutivas disponíveis. [8]

Um grande benefício da gerência preditiva de manutenção é a otimização da vida útil dos ativos. Ao monitorar a condição em tempo real dos equipamentos, a probabilidade

desse operar em alguma condição fora do normal é muito menor que em qualquer outra política de manutenção [8]. Além disso, a partir deste processo é possível determinar antecipadamente a necessidade de manutenção em um equipamento específico, eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção e aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos [9]. A manutenção preditiva permite ainda o monitoramento real e contínuo dos principais equipamentos, de forma a determinar o comportamento da máquina em qualquer momento [8].

A medição de vibração é a mais importante análise, pois em diversos casos, de todos os ensaios não destrutivos que podem ser realizados para determinar as condições de um ativo que possua partes móveis, a assinatura de vibração apresenta as informações mais precisas sobre as peças internas e estado do equipamento internamente. Outra atividade presente no escopo da manutenção preditiva é a análise química de óleo dos ativos, especialmente para equipamentos críticos para a planta. Esse tipo de análise pode indicar se existem corpos estranhos, ou partes próprias, circulando pela máquina e se o óleo utilizado possui a composição adequada para operação [8].

3.4.1 Análise de vibrações

O ensaio para vibrações mecânicas é um método de detecção prematura de anomalias de operação em virtude de problemas como falta de balanceamento das partes rotativas, desalinhamento de juntas e rolamentos, excentricidade, interferência e ressonância. É particularmente útil na monitoração de operação mecânica de máquinas rotativas; na detecção e reconhecimento da deterioração de rolamentos; e no estudo de mau funcionamento típicos em máquinas com regime cíclico de trabalho, como laminadores e prensas [9].

O princípio de análise baseia-se na ideia de que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos dão origem a sinais vibratórios, cuja frequência é igual à dos agentes excitadores. Se captadores de vibrações forem colocados em pontos definidos da máquina, eles captarão as vibrações recebidas por toda a estrutura. O registro das vibrações e sua análise permitem identificar a origem dos esforços presentes em uma máquina operando [9].

Através da medição e análise das vibrações de uma máquina em serviço normal de produção é possível detectar com antecipação a presença de rolamentos deteriorados

ou desalinhados, rotores desbalanceados ou empenados, eixos deformados ou desgastados e lubrificação deficiente [9].

Os medidores de vibração de nível global são instrumentos capazes de medir o valor global de vibração, em uma extensa faixa de frequência, que depende das normas e padrões aplicáveis. Pelo seu funcionamento, este instrumento mede a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração, dentro da faixa considerada. As medições são comparadas com padrões gerais (normas) ou valores de referências estabelecidos para cada máquina. A condição da máquina é assim avaliada no campo, com o mínimo de dados [9].

3.4.2 Análise de óleos lubrificantes

A análise de óleos lubrificantes consiste em uma ferramenta útil para determinar as tendências do desgaste que ocorre dentro de um equipamento, e um histórico rigoroso de acompanhamento desta análise pode permitir a detecção precoce de problemas e assegurar a qualidade lubrificante do óleo. A forma mais eficiente de determinar a condição do óleo lubrificante é conduzir uma análise espectroquímica e um teste de propriedades físicas. Outros testes indicados para ser realizados são o de formação de espuma no óleo, contagem de partículas ópticas e teste de oxidação do óleo. [10]

A análise espectroquímica mede a quantidade dos diversos elementos em uma amostra de óleo lubrificante. Permite identificar a presença de metais de desgaste, contaminantes como sujeira, areia ou graxa, bem como a presença em excesso de aditivos do óleo [10].

Os testes de propriedades físicas consistem em uma série de testes relacionados para determinar a classificação, contaminação e degradação de um lubrificante. Os testes mais comuns para esta análise incluir avaliar a diluição do combustível, presença de água no óleo, viscosidade, índice de viscosidade, densidade, ponto de fulgor e teste de formação de espuma [10].

4. METODOLOGIA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

4.1 Materiais

4.1.1 Folhas de alumínio

As folhas de alumínio analisadas neste trabalho apresentam-se nas formas de folhas finas, folhas intermediárias e folhas grossas. A fabricação destas folhas pode ser em espessuras variadas, as quais são apresentadas na tabela 1. Estas folhas podem ser produzidas também com variadas larguras, onde a menor largura produzida por esta fábrica é 540 mm e a maior largura é 1626 mm.

Classificação	Espessura
Folha fina	6,3 μm
	7 μm
	8 μm
	9 μm
	12 μm
	13 μm
	15 μm
18 μm	
Folha Intermediária	21 μm
	25 μm
	30 μm
	35 μm
	40 μm
Folha Grossa	50 μm

Tabela 1 – Dimensões das folhas produzidas pela fábrica analisada

Estas folhas são produzidas a partir da liga de alumínio 8011, cuja composição química pode ser visualizada na tabela 2. A tabela 3 mostra as propriedades mecânicas que as folhas podem apresentar quando fabricadas nos diferentes tipos de têmpera aplicados no processo produtivo da fábrica analisada.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros		Alumínio
								Cada	Total	
0,50 - 0,90 %	0,60 - 1,0 %	0,10%	0,20%	0,05%	0,05%	0,10%	0,08%	0,05%	0,15%	Restante

Tabela 2 – Composição química da liga 8011 [11].

Liga	Têmpera	Espessura (mm)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento Mínimo (%)
8011	O	$0,006 \leq e \leq 0,020$	120 (máx)	2
		$0,20 < e \leq 0,040$		4
		$0,040 < e \leq 0,090$		8
		$0,90 < e \leq 0,150$		12
	H14 / H24	$0,006 \leq e \leq 0,150$	120 – 170	1
	H16 / H26	$0,006 \leq e \leq 0,150$	130 – 190	1
	H18 / H19	$0,006 \leq e \leq 0,150$	170 (mín)	-

Tabela 3 – Limite de resistência a tração e alongamento mínimo de folhas da liga 8011 sob diferentes têmperas [1].

4.1.2 Relatórios analisados

a) Relatório de rejeição interna da fábrica

O relatório de rejeição interna da fábrica mantém um registro de todo material rejeitado ou descartado na linha de produção da fábrica. Este relatório contém as informações referentes às rejeições planejadas (provenientes do processo produtivo) e não planejadas (provenientes de não-conformidades no material). Serão analisadas neste trabalho as rejeições não planejadas provenientes de problemas de qualidade, desconsiderando portanto aquelas devido a problemas dimensionais ou de manuseio.

b) Relatório de devoluções externas

O relatório de devoluções externas resume as informações a respeito dos motivos das rejeições por parte dos clientes dos materiais fornecidos pela fábrica, as quais incluem dados sobre ligas, espessura e largura dos materiais devolvidos, bem como volume de material rejeitado. Neste trabalho serão analisadas as devoluções por motivos de qualidade, desconsiderando portanto as que ocorreram por motivos comerciais, administrativos ou de transporte.

c) Relatórios de análise de causa raiz (ACR)

Os relatórios de análise de causa raiz consistem em análises realizadas pela fábrica toda vez que ocorre uma rejeição significativa de material por um problema de qualidade. Este relatório é composto por uma análise da causa-raiz do problema, bem como indica as condições as quais o equipamento estava submetido e o em quais etapas do processo a falha ocorreu.

d) Relatórios de não-conformidade (RNC)

Os relatórios de não conformidade consistem em formulários enviados pelos clientes para a fábrica relatando os problemas encontrados nos materiais fornecidos. Estes formulários são analisados pela fábrica, que estabelece uma análise das causas que levaram ao aparecimento da não-conformidade, bem como das ações que serão tomadas para evitar a reincidência do problema, e então encaminha a resposta ao cliente.

4.2 Processo analisado

O processo de laminação de folhas adotado pela fábrica analisada possui um fluxo distinto para a produção das folhas finas, intermediárias e grossas. As folhas são fabricadas a partir das chapas produzidas pelo processo de laminação contínua (*caster*), dispensando portanto o processo de laminação a quente. A primeira parte do processo ocorre para qualquer que seja a espessura final desejada (figura 8). São produzidas bobinas de chapas com espessura de 5 mm, as quais são direcionadas a Laminador 1, que lamina estas chapas até uma espessura de 0,43 mm. Durante este processo, as bobinas podem, ao atingirem a espessura de 2,2 mm, serem direcionadas a um forno para um recozimento intermediário.

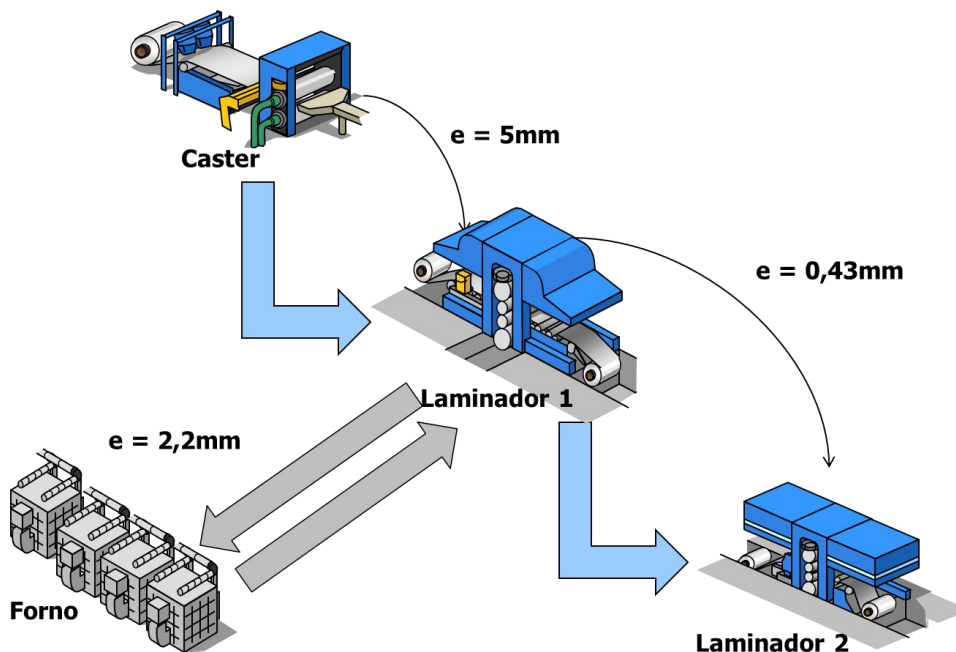


Figura 8 – Processo esquemático da primeira etapa do processo de laminação.

As bobinas são então direcionadas ao laminador 2. Para a produção de folhas grossas (figura 9), as bobinas têm sua espessura reduzida no Laminador 2 até a espessura final, quando são direcionadas a uma refiladeira, responsável por cortar as laterais da bobina até a largura desejada. Após esta etapa, as bobinas são levadas até o forno de acabamento, onde permanecem por algumas horas, com o intuito principal de permitir a evaporação dos óleos de laminação utilizados no processo.

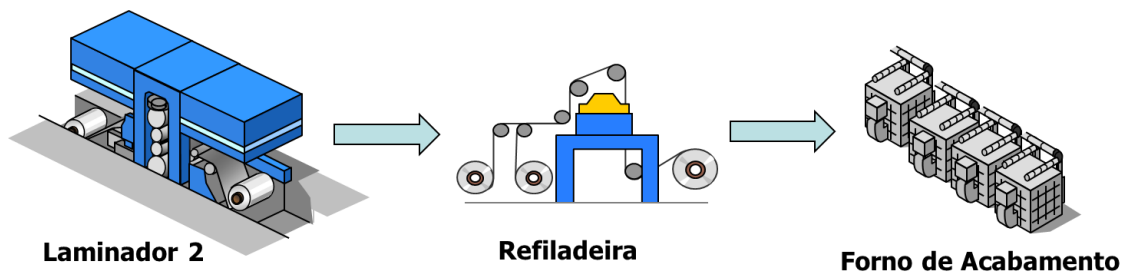


Figura 9 – Processo esquemático da produção de folhas grossas

No fluxo de produção de folhas intermediárias (figura 10), as folhas são laminadas no Laminador 2 até uma espessura igual a aproximadamente o dobro da espessura final desejada. As bobinas são então direcionadas ao Laminador 3, onde são laminadas até a espessura final. Após esta etapa, o material passa por uma refiladeira, responsável por cortar as laterais da bobina até a largura desejada, e por fim são levadas até o forno de acabamento.

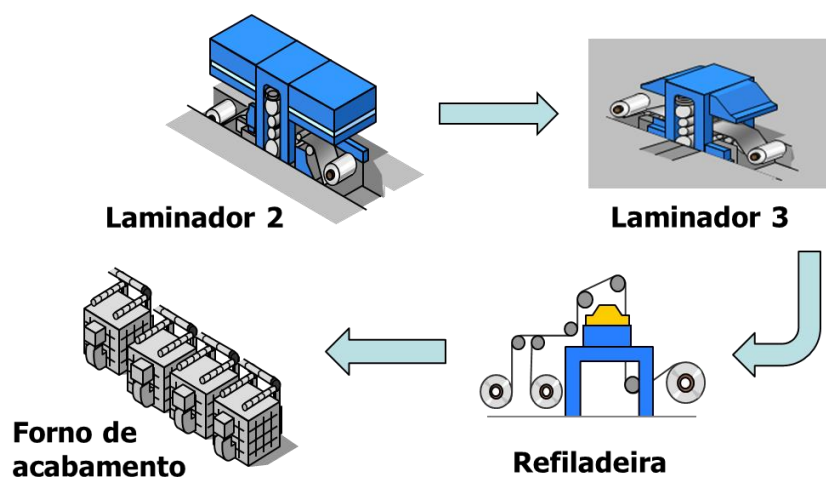


Figura 10 – Processo esquemático da produção de folhas intermediárias

Para o fluxo de produção das folhas finas (figura 11), as folhas têm sua espessura reduzida no Laminador 2 para 0,085 mm, e são levadas ao Laminador 3 para serem laminadas até uma espessura de 0,020 mm. A partir deste ponto, as bobinas são direcionadas à Dupladeira, responsável por posicionar as folhas de duas bobinas uma sobre a outra, permitindo que estas sejam laminadas em conjunto de forma a obter uma maior redução de espessura na próxima etapa do processo. A bobina duplada é então laminada no Laminador 4 até uma espessura equivalente ao dobro da espessura final desejada. Após esta etapa, as folhas dupladas são separadas na Separadeira, a partir da qual é possível obter duas bobinas já com a espessura final, que são levadas à refiladeira e posteriormente aos fornos de acabamento.

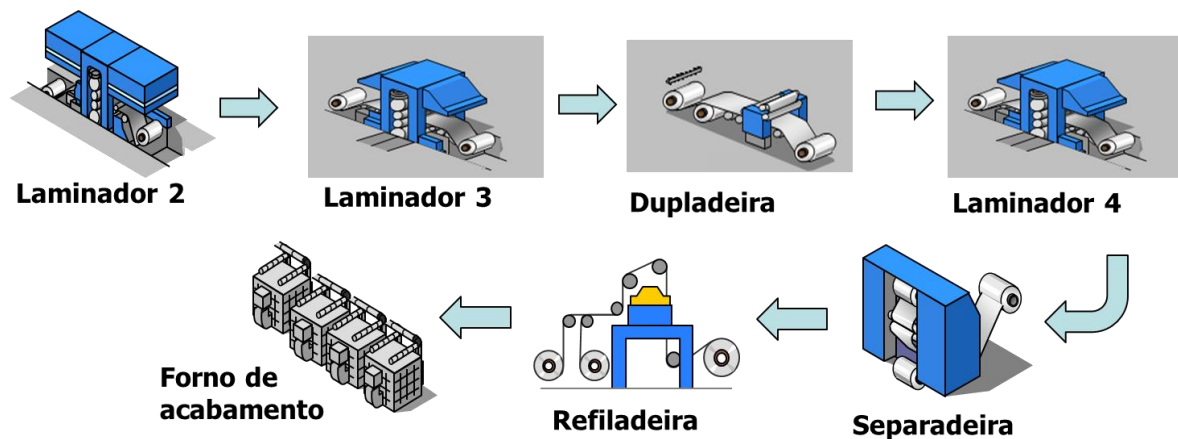


Figura 11 – Processo esquemático da produção de folhas finas.

4.3 Metodologia

A partir dos relatórios de rejeição interna e externa da fábrica, foi elaborada uma base de dados contendo as informações referentes às rejeições por motivos de qualidade de 2014 e 2015. Esta base de dados foi submetida a uma análise de Pareto, de forma a estabelecer dois diagramas de Pareto – um para as rejeições internas e um para as devoluções externas – para assim identificar quais defeitos têm contribuição significativa no problema de rejeição de materiais na fábrica.

Os relatórios de causa raiz foram analisados de forma a identificar os principais fatores responsáveis pelo aparecimento dos problemas apontados pela análise de Pareto como significantes para a rejeição de materiais. Esta análise, em conjunto com as informações obtidas no estudo da bibliografia relacionada ao tema e dos materiais de

consulta internos da fábrica, possibilitou identificar oportunidades de melhoria e propor soluções que busquem reduzir a rejeição dos produtos por estes problemas de qualidade.

Após a constatação destas oportunidades de melhoria, foi realizado um estudo de forma a identificar o potencial de ganho que a fábrica pode ter com a implementação das ações propostas. Para tanto, será realizada uma análise gráfica do histórico de rejeição interna e externa da fábrica pelos problemas estudados, buscando identificar as tendências históricas que podem ser adotadas como metas condizentes para a redução da rejeição da fábrica. O período adotado para a análise foi de janeiro/2014 a junho/2016.

5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

5.1 Análise das rejeições internas

No processo produtivo da fábrica de folhas, os materiais são submetidos a um procedimento de inspeção final por amostragem que busca verificar se as bobinas apresentam características, dimensões e propriedades dentro das especificações. As bobinas identificadas como problemáticas são na maioria dos casos destinadas a sucata, e podem retornar ao processo após serem fundidas junto aos lingotes que originam as chapas utilizadas na primeira etapa do processo.

Os relatórios internos da fábrica apontam que 5% de todo o volume produzido acaba sendo descartado por conta da ocorrência de defeitos. Este descarte de material representa um alto custo para a empresa, visto que todo o gasto com a fabricação não pode ser reavido. Uma redução no índice de rejeição de materiais implicará na diminuição dos gastos relacionados aos recursos investidos na manufatura do material e por consequência um aumento do faturamento da planta, uma vez que uma maior parcela do material produzido poderá ser de fato comercializado.

De forma a atuar na redução do volume de rejeição da fábrica, foi elaborado um estudo sobre as causas que levam os materiais a serem descartados. O primeiro passo deste estudo foi identificar quais defeitos contribuem de forma significativa para a rejeição de material. Para tanto, foi elaborada uma análise de Pareto a partir dos dados obtidos nos relatórios de rejeição interna da fábrica.

Nesta primeira análise, foi identificado como problema a rejeição interna de materiais da fábrica, e como causas os defeitos identificados na inspeção final das

bobinas. Os dados utilizados nesta análise foram obtidos a partir dos relatórios internos da fábrica, que continham as informações relacionadas a classificação do defeito, bem como das ligas e dimensões das folhas, e o volume de material rejeitado para cada ocorrência. Assim, foi possível quantificar o volume de material rejeitado por cada defeito e calcular sua contribuição para o problema, de forma a elaborar um diagrama de Pareto das rejeições internas desta planta.

5.2 Análise das rejeições externas

Os procedimentos de inspeção final da fábrica não são capazes de identificar todos os materiais fora de especificação, os quais podem ser entregues ao cliente com defeitos, e por consequência serem rejeitados e devolvidos para a fábrica. Os materiais devolvidos por problemas de qualidade são sucateados e cabe ao fornecedor arcar com os custos relativos ao frete do material, o que acaba representando um alto custo para a empresa, além de causar transtornos para o cliente. Sendo assim, uma redução na rejeição externa de materiais representa um grande ganho para a empresa.

Há duas maneiras para atuar nos problemas que levam os clientes a devolver as bobinas entregues a eles. O primeiro delas é explorar as oportunidades de melhoria de processo de forma a reduzir o aparecimento destes problemas. Esta abordagem garante uma economia de tempo, mão de obra e custo de frete. A segunda abordagem é atuar nos procedimentos de inspeção de maneira a evitar que os materiais fabricados com problemas sejam faturados e cheguem aos clientes. Essa atuação pode evitar os custos relativos ao frete de entrega e coleta das bobinas, e ainda evitar um possível desgaste comercial com o cliente.

Será realizado portanto um estudo buscando encontrar as oportunidades de atuação e propor melhorias que levem a diminuição do índice de material rejeitado externamente. A primeira etapa deste estudo consiste na aplicação de uma análise de Pareto a partir das informações coletadas nos relatórios internos da assistência técnica da empresa, que possibilitará identificar quais são as causas que contribuem de maneira significativa para a rejeição dos materiais.

Para esta análise de Pareto, foi identificado como problema a rejeição externa de materiais pelos clientes e como causas os defeitos não identificados na inspeção final das bobinas. Os dados utilizados nesta análise foram obtidos a partir dos relatórios internos da assistência técnica da fábrica, que contém as informações relacionadas a classificação

do defeito, ligas e dimensões da folha, bem como o volume de material rejeitado para cada ocorrência. Desta forma foi possível quantificar o volume de material rejeitado devido a cada defeito, e calcular sua contribuição para o problema. Com essas informações foi elaborado um diagrama de Pareto das rejeições externas pelos clientes, mostrado nos resultados deste trabalho.

5.3 Análise dos diagramas de Pareto.

As análises de Pareto elaboradas permitem identificar quais são os principais problemas de qualidade que contribuem para a rejeição interna e externa das bobinas produzidas. A análise do relatório de rejeições internas revela que a maioria do volume descartado é devido à 3 problemas - telescopagem, rugas e furos. De maneira análoga, a análise referente a ao relatório de rejeições externas de materiais indica que a maioria do material devolvido se deve também à 3 problemas - molhabilidade, rugas e porosidade.

Deste modo, é possível inferir que uma maneira eficiente de agir na redução da perda de material consiste em identificar as oportunidades e propor melhorias de processo e inspeção que tenham foco nas causas significativas para o aumento dos índices de rejeição interna e externa da fábrica.

O desenvolvimento do trabalho foi executado portanto através investigação das descrições, causas-raiz, e ações de correção de 5 defeitos, sendo eles:

- i) Molhabilidade
- iv) Porosidade / Furos
- iii) Rugas
- iv) Telescopagem

5.4 Descrição dos problemas investigados

5.4.1 Molhabilidade

A molhabilidade de uma folha de alumínio indica o grau de eliminação de óleo e outros fluídos lubrificantes remanescentes do processo de laminação [12]. É um importante indicador, uma vez que a presença deste fluídos na superfície da folha prejudica a aderência de tintas, vernizes e de outros materiais que podem ser laminados junto ao alumínio para a fabricação de produtos convertidos, como filmes plásticos e papel cartão.

Pode ser definida como a capacidade que uma folha possui de permitir a formação na sua superfície de uma película contínua a partir de uma solução de água e álcool em determinadas proporções [12].

O procedimento para medir a molhabilidade de uma bobina consiste em eliminar as espiras externas até uma profundidade de 2 mm a 3 mm e suportar uma das superfícies da folha a um ângulo de 30° em relação a horizontal. Em seguida deve-se dirigir um jato uniforme e horizontal da solução através de toda a largura da folha, e então observa-se a superfície por 3 segundos, para assim verificar se há a formação de gotas ou descontinuidades na película do líquido [12].

A molhabilidade pode então ser medida qualitativamente, uma vez que quanto maior o volume de etanol necessário para que a solução de origem as descontinuidades na película do líquido, pior o nível de molhabilidade no produto. O grau de molhabilidade é classificado pelas letras A,B,C,D e E, segundo a tabela 4.

Grau	% em volume de água destilada	% em volume de álcool anidro
A	100	0
B	90	10
C	80	20
D	70	30
E	60	40

Tabela 4 - Classificação da molhabilidade em função do volume de água e álcool na solução [12].

5.4.2 Poros e furos

Poros consistem em orifícios das folhas de alumínio com dimensão máxima de 200 µm, enquanto furos consistem de orifícios com dimensão superior a 200 µm [12]. A porosidade máxima (número de furos e poros em uma determinada área) para a folha de alumínio depende da aplicação para a qual o material será destinado.

Aplicações que exigem de uma elevada característica de barreira do alumínio, ou seja, que exijam uma grande resistência a passagem de ar, água e luz, especificam uma porosidade máxima de 200 poros por m², enquanto aplicações mais simples especificam uma porosidade máxima de até 2000 poros por m².

A medição da porosidade em folhas de alumínio deve ser realizada a partir de sua colocação sobre uma mesa com vidro translúcido e iluminação por baixo, da ordem de 1000 lux a 1500 lux, a qual deve estar em uma sala com baixa iluminação, da ordem de 20 lux a 50 lux [12].

O procedimento consiste em colocar a folha de alumínio sobre a caixa de luz com a face fosca para cima, de forma a cobrir toda a superfície de vidro. A amostra não deve ter uma área menor que 1 dm², e deve ser observada de uma distância aproximada de 0,5 m. O resultado deve ser citado como o número de poros por unidade de área [12].

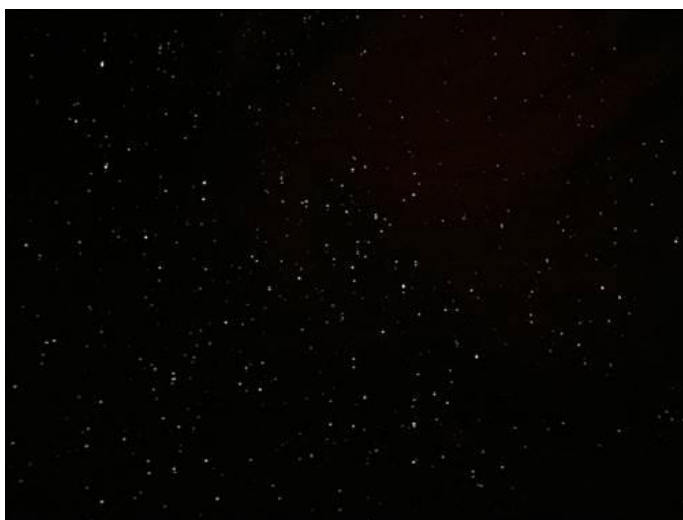


Figura 12 – Folha de alumínio com excesso de poros visualizada em uma mesa de lux.

5.4.3 Rugas

Segundo o *book* de defeitos interno da fábrica analisada, as rugas consistem em dobras do alumínio presentes ao longo da largura da folha. Constituem um problema principalmente para os materiais destinados a fabricação de embalagens flexíveis, pois prejudicam o aspecto estético dos produtos produzidos a partir das folhas de alumínio. Além disso podem se romper durante o processo de conversão dando origem a cortes na folha, que podem levar a quebras durante o processo.

Entre as possíveis causas para este defeito estão o desnivelamento dos rolos de pressão utilizados no processo de laminação, planicidade ruim do material, cilindro de apoio da laminadora fora de especificação, ou ainda se a força aplicada no material

durante o processo de bobinamento não for suficiente para manter folha tracionada, de forma a evitar as dobras.



Figura 13 – Bobinas com a presença de rugas

5.4.4 Telescopagem

O fenômeno da telescopagem ocorre quando há um deslizamento entre as espiras da bobina, ocasionando seu deslocamento lateral [13]. O material passa a apresentar espiras corridas, saindo pelo lado da bobina, conforme figura 10. A efeito telescópico é um problema pois gera instabilidades no processo de desbobinamento, podendo dar origem a rugas, vincos e quebras na folha de alumínio.



Figura 14 – Bobinas apresentando telescopagem

Segundo o *book* de defeitos interno da fábrica, a telescopagem de bobinas é causada na maioria dos casos pela vibração dos rolos durante o processo de bobinamento

ou por um desalinhamento dos cilindros de trabalho da laminadora. A vibração dos rolos por sua vez pode ser causada por uma falha de ajuste de compensação de peso dos rolos, falha na expansão do eixo fixador, espula empenada e quando o conjunto eixo-espula está desalinhado.

5.5 Investigação dos defeitos significativos

5.5.1 Molhabilidade

O problema de molhabilidade ruim nas folhas de alumínio constitui uma parcela importante das devoluções externas de materiais, porém não representa um problema significativo para as rejeições internas da fábrica. Este fato pode ser atribuído a diferentes fatores. Em primeiro lugar o volume de material produzido com problemas de molhabilidade não é muito alto, no entanto, a presença deste defeito tem grande impacto no processo de adesão da folha a outros materiais, fazendo que quase todo material que apresenta esse problema seja rejeitado pelos clientes. Além disso, esta é uma não-conformidade de difícil detecção, uma vez que o método de medição da molhabilidade descrito pela norma ABNT NBR 8310:2008 e adotado pela fábrica avalia apenas as camadas externas das bobinas, sendo que é comum o problema ocorrer apenas nas camadas internas da bobina.

O *book* de defeitos da fábrica aponta que os problemas de molhabilidade são causados exclusivamente pela presença de excesso de óleo na superfície da folha. Uma análise dos relatórios de causa-raiz e não-conformidade relacionados a este problema apontam duas causas para este excesso de óleo – excesso dos fluídos de laminação e contaminação por resíduos de óleo externos ao processo. Foi estabelecida também uma análise de forma a identificar quais os materiais são mais propensos a apresentar problemas de molhabilidade no que diz respeito a suas dimensões e têmperas. A partir desta análise foram elaborados gráficos que permitem visualizar a frequência da incidência deste defeito nas diferentes larguras, espessuras e têmperas das folhas.

5.5.2 Porosidade

A presença de poros e furos tem grande contribuição para o volume de material rejeitado tanto internamente quanto externamente. A porosidade das bobinas é inerente ao processo produtivo da fábrica, uma vez que todo material produzido contém uma determinada quantidade de poros e furos. A intensidade de poros por uma determinada

área da folha é o que define se ela está apta a ser utilizada na aplicação exigida por cada cliente. Ainda que não seja possível eliminar totalmente a presença destes defeitos, é possível tomar ações que diminuam a ocorrência dos poros durante a laminação no *caster*, bem como atuar nos fatores externos que intensificam a ocorrência do problema.

Para identificar os fatores externos que podem intensificar a porosidade da folha, foi realizado uma análise dos relatórios de causa-raiz produzidos pela fábrica, a partir dos quais foi constatar que o principal fator externo identificado como causa para o aumento da porosidade são as marcas de cilindro causadas por acabamento ruim do cilindro ou da presença de corpos estranhos junto aos cilindros de trabalho, que acabam por furar a folha a cada passada. A presença das imperfeições causadas pelos cilindros é facilmente identificada pois gera furos de mesmas dimensões e com uma distância regular entre eles, equivalente ao perímetro do cilindro. A tabela 3 apresenta uma relação das causas identificadas nos relatórios como responsáveis pela presença de partículas estranhas junto aos cilindros.

Problema	Causa
Furos de Cilindro	Desgaste ou deformação do cilindro devido ao tempo de uso
Furos de Cilindro	Presença de partículas sólidas no óleo de lubrificação
Furos de Cilindro	Presença de escória ou sujeira no alumínio fundido
Furos de Cilindro	Presença de fases solidificadas no alumínio fundido

Tabela 5 – Relação entre as causas e os problemas dos motivos significativos para a ocorrência de marcas de cilindro.

5.5.3 Rugas

O aparecimento de rugas tem alta contribuição tanto para as rejeições internas quanto para as rejeições externas de materiais. As rugas são um problema principalmente para os clientes que utilizam as folhas em aplicações que exigem um bom aspecto estético do alumínio, especialmente os fabricantes de embalagens. As bobinas produzidas com rugas podem ser retornadas ao processo produtivo como sucata nos casos mais severos ou ser vendida para outro cliente que utilize a folha em uma aplicação que aceite um problema leve de rugas.

Segundo o *book* de defeitos elaborado pela fábrica, o aparecimento de rugas pode estar ligado a uma planicidade ruim do material, desregulagem na tração aplicada às folhas durante o processo da separadeira, deficiência na aplicação do óleo de duplagem utilizado entre as folhas no último passe da laminação, ou ainda pelo uso de cilindros fora de especificação, que podem apresentar problemas de nivelamento, rugosidade, desgaste ou deformações.

Para identificar quais destes motivos contribuíram de maneira mais expressiva para ocorrência de rugas durante o processo produtivo, foi realizado um levantamento e análise dos relatórios de causa-raiz elaborados pela fábrica. Este levantamento indicou que, entre todos os problemas estudados nos dois últimos anos, dois deles aparecem de forma recorrente – planicidade ruim do material e falha no sistema de aplicação do óleo de duplagem.

Tendo identificado quais são os problemas que contribuíram de forma significativa para a ocorrência de rugas nos últimos dois anos, buscou-se identificar quais foram as causas que culminaram nestes problemas, as quais estão resumidas na tabela 6.

Problema	Causa
Planicidade ruim do material	Cilindro com acabamento superficial inadequado / Cilindro deformado
	Força de tração na bobinadeira insuficiente
Falta de óleo de duplagem devido a falha no sistema de aplicação	Temperatura do óleo de laminação abaixo do necessário
	Pressão de ar comprimido de trabalho abaixo do necessário
	Presença de partículas de alumínio nos bicos

Tabela 6 – Relações entre causa e problema dos motivos significativos para a ocorrência de rugas.

5.5.4 Telescopagem

A telescopagem é principal causa da rejeição interna da fábrica por problemas de qualidade. As bobinas telescopadas dificilmente conseguem ser utilizadas pelos clientes sem a ocorrência de problemas, uma vez que causa instabilidades durante o desbobinamento que levam à ocorrência de quebras nas folhas. Dessa forma, as bobinas que apresentarem telescopagem devem retornar ao processo como sucata, e todos os recursos investidos na manufatura das folhas terão sido desperdiçados.

É possível notar que a telescopagem tem uma grande contribuição para a rejeição interna de materiais, porém não contribui significativamente com a rejeição externa. Esta diferença é devido ao fato de a telescopagem ser facilmente detectada mediante uma inspeção visual simples. Sendo assim, a investigação será baseada nos motivos que levam ao aparecimento deste problema durante a produção das bobinas.

Segundo o *book* de defeitos elaborado pela fábrica, o aparecimento da telescopagem está relacionado principalmente à vibração nos equipamentos, utilização de rolos de pressão fora das especificações, empenamento da espula, ou por uma inclinação alta dos cilindros de trabalho.

Para identificar os motivos que tiveram uma maior contribuição para a ocorrência da telescopagem nos dois últimos anos, realizou-se um levantamento e análise dos relatórios de causa-raiz elaborados pela fábrica. Esta análise apontou que o principal problema que leva ao aparecimento do efeito telescópico foi a ocorrência de vibração nos equipamentos. As principais causas para esta ocorrência estão listadas na tabela 7.

Problema	Causa
Vibração no equipamento	Espula empenada
	Falha no ajuste de compensação de peso dos rolos
	Conjunto eixo - espula descentralizado
	Rolo de contato e suporte excêntricos
	Cilindro desalinhado ou descentralizado
	Cilindro deformado ou desgastado

Tabela 7 – Relações entre problema e causa para a ocorrência telescopagem.

5.5 Análise do potencial de redução para rejeição de materiais pelos defeitos estudados

A estimativa do potencial de redução de rejeição da fábrica envolveu a análise do histórico de rejeição devido aos problemas qualidade. A quantidade de material rejeitado por cada um destes defeitos foi quantificada para cada semestre do período analisado. A comparação entre o volume rejeitado a cada semestre foi realizada através de um fator que mensura a proporção de materiais rejeitado com relação ao total produzido neste

período. O índice adotado foi o PPM (partes por milhão), que é calculado conforme a fórmula abaixo.

$$PPM = \frac{\text{Volume de material rejeitado}}{\text{Volume de material produzido pela fábrica}} * 1.000.000$$

Foram portanto elaborados dois gráficos – um para as rejeições internas e outro para as rejeições externas – onde constavam os índices de PPM referentes a soma das rejeições pelos problemas de molhabilidade, porosidade, rugas e telescopagem durante cada semestre dividido pelo volume total de materiais produzidos pela fábrica naquele semestre. A partir da análise destes gráficos é possível propor uma meta de redução do volume de materiais rejeitados, condizente com o histórico de devoluções e a realidade da fábrica analisada. Uma vez estabelecida esta meta, será possível estimar o ganho financeiro que as ações propostas pelo este trabalho podem representar para a fábrica.

Com esta análise será possível estimar a possível economia que a fábrica pode obter com a meta de redução estabelecida para rejeições internas. Para tanto, devemos levar em consideração que o alumínio proveniente dos materiais defeituosos pode retornar ao processo, porém os custos referentes ao processo produtivo e a perda do lucro com a venda podem representar um grande impacto financeiro para a empresa. O preço dos produtos laminados para o mercado envolve três fatores: o custo do metal; o custo da produção; e lucro da venda, e pode ser calculado pela soma destes fatores.

Para esta estimativa, iremos considerar um valor médio para cada um dos fatores, desconsiderando que as folhas possuem um custo de produção e uma margem de lucro que varia para cada tipo de produto. Temos que o valor médio de venda dos produtos da fábrica analisada é de R\$15/Kg. O valor do alumínio depende de uma cotação internacional em dólar (*LME – London Metals Exchange*) e da cotação do dólar do período de compra da material. Para esta análise consideraremos um valor aproximado de R\$7/Kg, proposto a partir da média do índice LME e a cotação média do dólar de 2015. Sendo assim, podemos aproximar os custos com a rejeição interna de materiais para um valor de R\$8/Kg.

Para esta estimativa, foram considerados como referência da situação atual da fábrica os índices PPM e o volume de material produzido apresentados no primeiro semestre de 2016, qual foi o último período concluído antes desta análise. Os possíveis ganhos financeiros semestrais podem então ser estimados a partir da multiplicação de três

fatores: a diferença do entre o índice PPM adotado como meta e aquele apresentado pela fábrica no primeiro semestre de 2016; o volume de material produzido pela fábrica no primeiro semestre de 2016; e o valor aproximado para perdas com rejeição interna.

De maneira análoga podemos estimar a possível economia que a fábrica pode obter com a meta de redução estabelecida para rejeições externas. Contudo, para esta análise devemos considerar dois fatores adicionais. Em primeiro lugar, o custo referente a devolução de materiais deve incluir o preço do frete de retorno do material do cliente para a fábrica. Além disso, devemos levar conta que nem todo alumínio devolvido pelo cliente pode retornar ao processo, visto que parte dele pode ter sido utilizada ou descartada pelo cliente.

Para esta análise, o custo médio do frete de retorno do material adotado foi de R\$1/Kg. A análise dos relatórios internos da fábrica revelou que cerca de 20% do material fornecido com problemas aos clientes podem voltar ao processo produtivo após o retorno destes à fábrica. Considerando o custo da matéria-prima de R\$7/Kg, devemos considerar um custo adicional de R\$1,40/Kg para a estimativa do valor dos gastos com a rejeição externa de materiais, o que resulta em um valor de R\$10,40/Kg de material devolvido.

Os possíveis ganhos financeiros semestrais podem então ser estimados a partir da multiplicação de três fatores: a diferença do entre o índice PPM adotado como meta e aquele apresentado nas devoluções do primeiro semestre de 2016; o volume de material produzido pela fábrica no primeiro semestre de 2016; e o valor aproximado para perdas com rejeição externa.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Análise de Pareto

A análise de Pareto elaborada a partir dos dados obtidos dos relatórios de rejeição interna deu origem ao diagrama mostrado na figura 15.

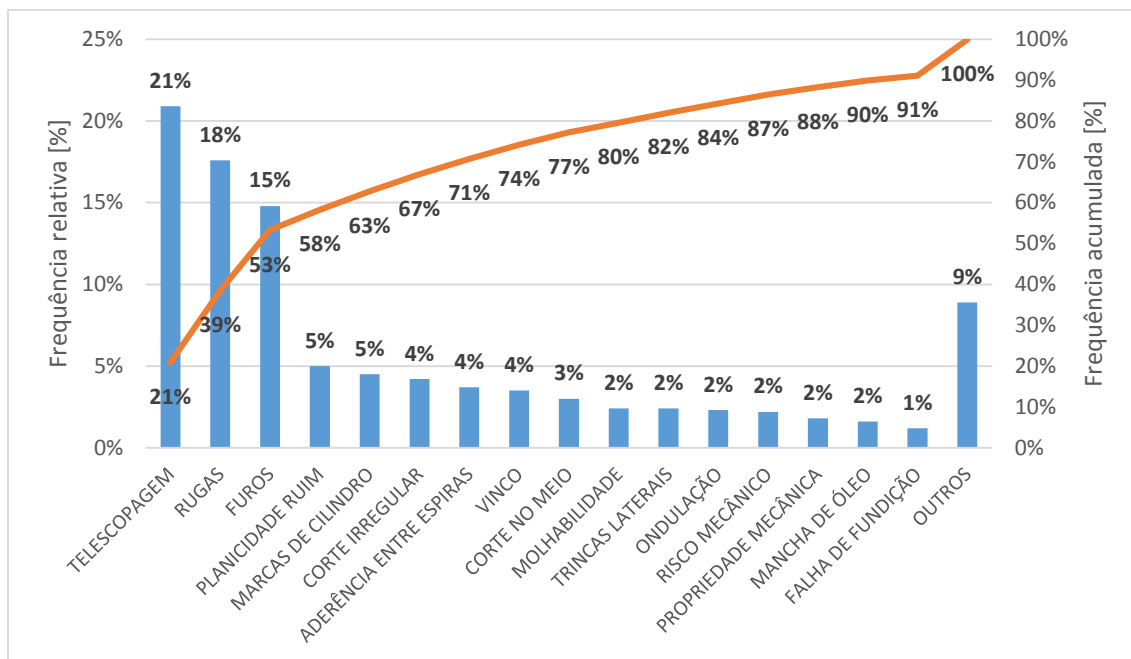


Figura 15 – Diagrama de Pareto das rejeições internas da fábrica

A análise do diagrama de Pareto evidencia que três problemas são responsáveis por mais da metade do volume de material rejeitado. A telescopagem, responsável por 21% das rejeições; as rugas, responsáveis por 18% das rejeições; e o problema com furos e porosidade, responsável por 15% das rejeições têm uma contribuição consideravelmente maior que a dos demais defeitos, os quais são responsáveis por no máximo 5% das rejeições cada um. Desta forma, é possível considerar estes três problemas como significativos para a rejeição interna da fábrica.

A partir da análise de Pareto dos dados obtidos dos relatórios de rejeições externas foi possível elaborar o diagrama de Pareto mostrado na figura 16.

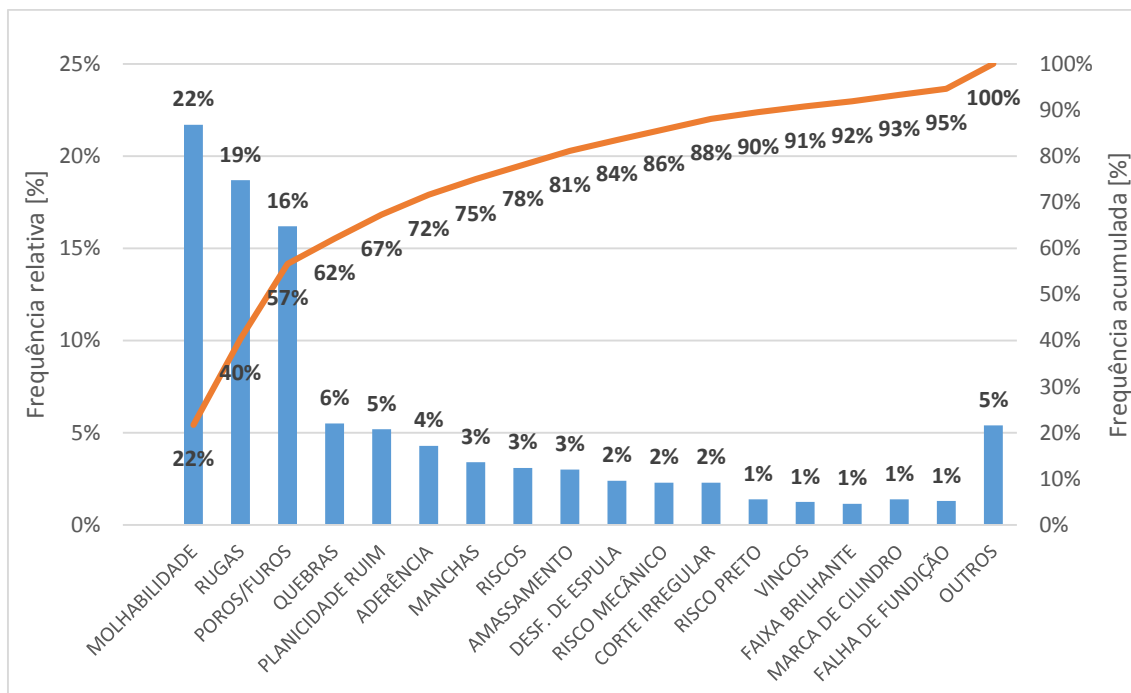


Figura 16 – Diagrama de Pareto para as rejeições externas da fábrica

A análise deste diagrama de Pareto evidencia que novamente três problemas são responsáveis por mais da metade do volume de material rejeitado. A molhabilidade, responsável por 22% das rejeições; as rugas, responsáveis por 19% das rejeições; e o problema com furos e porosidade, responsável por 16% das rejeições tem uma contribuição consideravelmente maior que a dos demais defeitos, os quais são responsáveis por no máximo 6% das rejeições cada. Pode-se inferir portanto que estes três problemas são os significativos para as devoluções externas da fábrica.

6.2 Análise dos problemas de qualidade

6.2.1 Molhabilidade

O problema de molhabilidade ruim nas folhas de alumínio constitui uma parcela importante das devoluções externas de materiais, porém não representa um problema significativo para as rejeições internas da fábrica. Este fato pode ser atribuído a diferentes fatores. Em primeiro lugar o volume de material produzido com problemas de molhabilidade não é muito alto, no entanto, a presença deste defeito tem grande impacto no processo de adesão da folha à outros materiais, fazendo com que quase todo material que apresenta esse problema seja rejeitado pelos clientes. Além disso, esta é uma não-conformidade de difícil detecção, uma vez que o método de medição da molhabilidade descrito pela norma ABNT NBR 8310:2008 e adotado pela fábrica avalia

apenas as camadas externas das bobinas, sendo que é comum o problema ocorrer apenas nas camadas internas da bobina.

O *book* de defeitos da fábrica aponta que os problemas de molhabilidade são causados exclusivamente pela presença de excesso de óleo na superfície da folha. Uma análise dos relatórios de causa-raiz e não-conformidade relacionados a este problema apontam duas causas para este excesso de óleo – excesso de fluídos de laminação na folhas e contaminação do óleo por outros fluídos do processo

O processo de laminação das folhas de alumínio inclui a aplicação de óleos lubrificantes entre as etapas do processo. Estes fluidos têm alta volatilidade e se desprendem do alumínio com o passar do tempo e com a aplicação de calor. Por este motivo as bobinas produzidas na fábrica são submetidas a algumas horas dentro dos fornos de acabamento de forma a garantir que todo o óleo residual evapore.

A presença de óleo nas bobinas após a passagem pelos fornos de acabamento indica que o tempo de forno não foi suficiente para a eliminação dos fluidos de laminação, ou que ocorreu uma contaminação com outros óleos utilizados no processo. Levando em conta que a maior parte dos materiais são produzidos sem o problema de molhabilidade, é possível entender que o problema de excesso de óleo não está relacionado ao tempo estabelecido como padrão para o processo, sendo mais provável que o óleo esteja apresentando uma variação na sua temperatura de volatilização, causada pela degradação natural do óleo, o que resultaria em uma eliminação mais lenta dos fluídos durante o tempo nos fornos de acabamento. Já a contaminação dos óleos utilizados para lubrificar as folhas durante a laminação por outros óleos externos ao processo pode resultar na presença de fluidos que, mesmo em uma menor concentração, podem causar um agravamento dos problemas de aderência do material.

É possível atuar em ambos os problemas citados acima através do estabelecimento de procedimentos de manutenção preditiva nos óleos de laminação. Estes procedimentos permitem que haja um monitoramento das características físicas do óleo, de forma a identificar variações no ponto de fulgor ou outros indícios de deterioração do óleo, além da indicação presença de contaminação ou sujeira. A implantação da manutenção preditiva para os óleos do processo será discutida posteriormente.

Os problemas com excesso de óleo nas folhas acabadas podem ser relacionados também a presença de rugas ou porosidade excessiva nas folhas. Estes defeitos podem

resultar em barreiras que retém o óleo, dificultando sua evaporação. Desta forma, as ações sugeridas por este trabalho para reduzir a ocorrência destes problemas podem levar a uma consequente diminuição na devolução de materiais por problemas de molhabilidade.

De forma a buscar oportunidades de melhorias nos procedimentos para identificação de materiais apresentando problemas de molhabilidade, foi estabelecido uma análise buscando identificar quais materiais são mais propensos a apresentar problemas de molhabilidade no que diz respeito a suas dimensões. A partir desta análise foram elaborados gráficos que permitem visualizar a frequência da incidência deste defeito nas diferentes larguras (figura 17), espessuras (figura 18) das folhas.

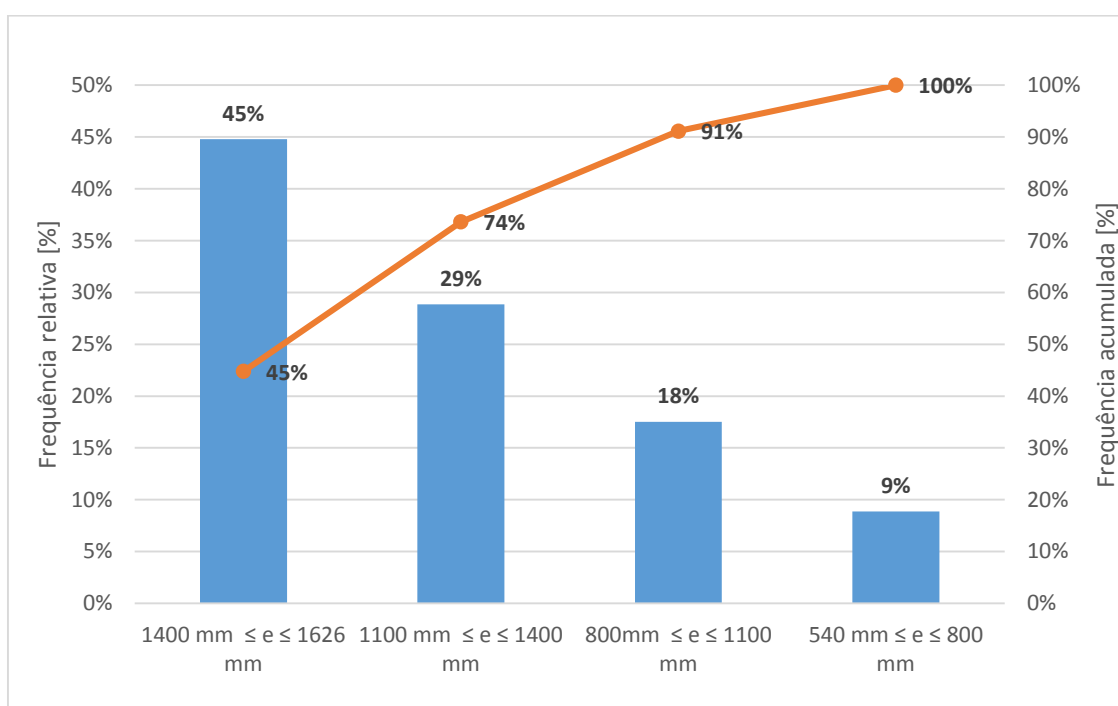


Figura 17 – Classificação das devoluções por molhabilidade quanto a largura da bobina.

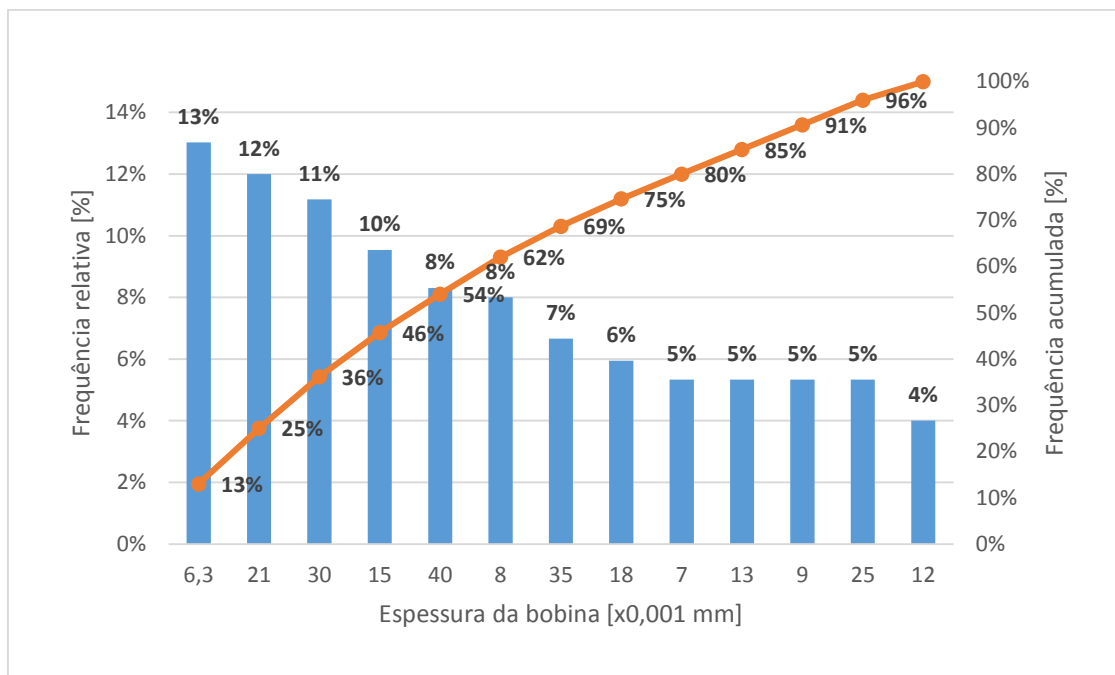


Figura 18 – Classificação das devoluções por molhabilidade quanto a espessura da bobina.

O gráfico apresentado na figura 17 classifica as devoluções por molhabilidade quanto a largura da bobina. A análise deste gráfico indica que, quanto maior a largura da folha, mais frequente é a devolução devido ao problema analisado. Este fenômeno pode ser atribuído fato de que as folhas mais largas impõem uma maior restrição à evaporação dos resíduos de óleos lubrificantes durante o tempo de forno de acabamento, visto que há uma maior distância entre o centro e as laterais da bobina, por onde os vapores destes resíduos são eliminados. O gráfico representado na figura 18 por sua vez classifica as devoluções por molhabilidade quanto a espessura da folha. É possível notar que não há uma grande variação nas frequências referentes aos diferentes valores de espessura, e não há uma ordenação lógica que indique que a espessura das folhas esteja diretamente relacionada ao aparecimento das características ruins de molhabilidade. Desta forma, é possível inferir que não há uma relação clara e direta entre a espessura da folha e a ocorrência deste defeito.

Sendo assim, é possível perceber que as devoluções por molhabilidade ocorrem principalmente nas folhas de maior largura. Tendo em vista que o ensaio utilizado para mensurar a molhabilidade das folhas tem sua eficiência comprometida pelo fato de atingir somente as camadas internas das bobinas, é possível se aproveitar deste fato para melhorar os procedimentos de inspeção neste tipo de material. É sugerido portanto que

os bobinas que apresentem maior largura tenham uma atenção especial do durante a inspeção. Uma possível ação consiste em estabelecer um procedimento de coleta periódica de amostras dos materiais largos, as quais devem ser direcionadas a uma análise laboratorial para identificar resíduos de óleos. É possível ainda que se estabeleça um plano de amostragem para as bobinas mais largas onde algumas delas tenham as espiras externas removidas de forma a aplicar o ensaio estabelecido em norma em uma altura mais próxima da espula.

6.2.2 Porosidade

O levantamento das análises de causa-raiz elaboradas pela fábrica indicou que as rejeições internas pelo excesso de poros e furos muitas vezes está relacionada a intensificação do problema devido a ocorrência de furos de cilindro. Estes furos podem estar relacionados a problemas de desgaste ou deformação do cilindro de trabalho pela presença de partículas de alta dureza retidas na superfície destes cilindros, as quais podem ocorrer devido a contaminação dos óleos de laminação, presença de escória ou sujeira no alumínio fundido ou ainda partículas duras provenientes de um desgaste dos equipamentos utilizados no processo.

No caso dos problemas decorrentes do desgaste do cilindro, recomenda-se a elaboração de um procedimento que possibilite detectar a necessidade de troca do cilindro antes que este problema leve à produção de materiais com problemas de porosidade. Este conhecimento pode ser obtido através da implementação de procedimentos de manutenção preditiva por análise de vibrações, a qual será discutida posteriormente. Para evitar a presença de partículas de escória ou sujeira no alumínio fundido, é recomendado que seja elaborado um plano de inspeção mais eficiente para os filtros utilizados no processo, ao ainda que seja estudada a aquisição de filtros mais eficientes.

Os problemas relacionados a presença de partículas duras na superfície do cilindro podem ainda estar relacionados a contaminação do óleo de lubrificação utilizado no processo. Este problema pode resultar em diversos prejuízos ao processo além do aumento da contagem furos, tais como acelerar o desgaste dos equipamentos ou piorar o aspecto estético do produto. Sendo assim, é recomendado que haja uma verificação periódica dos óleos utilizados no processo, de forma a saber quando houver a necessidade de troca dos mesmos antes que as a presença de contaminantes contribua para o problema

de porosidade das folhas. Esta verificação pode ser garantida também através da implantação da manutenção preditiva para os óleos utilizados no processo.

O aumento da porosidade das folhas pode também estar associada à presença de partículas grosseiras na microestrutura do material produzido no *caster*, as quais podem dar origem a fissuras que são intensificadas durante o processo de laminação. A microestrutura dos tarugos de ligas de alumínio de baixa qualidade é bastante heterogênea, podendo apresentar segregações de elementos de liga e de alumínio em estruturas dendríticas, as quais são constituídas a partir das primeiras porções solidificadas de material fundido e apresentam baixa concentração dos elementos de ligas, porém com uma alta concentração destes elementos em seu contorno. Tendo em vista que os elementos que compõem as ligas de alumínio são menos solúveis na fase sólida do que na fase líquida, a presença destas estruturas dendríticas leva ao aparecimento de constituintes de segunda fase na microestrutura dos tarugos. Estas partículas devem ser dissolvidas durante o processo de homogeneização, e em geral quanto mais grosseira a estrutura dendrítica, maior a segregação e mais difícil a homogeneização, uma vez que as distâncias que devem ser vencidas pela difusão dos átomos tornam-se mais longas. É possível observar na figura 19 um exemplo da diferença estrutura dendrítica do alumínio recozido em a 580°C por 15 minutos e 60 minutos. Nota-se nessa imagem que um maior tempo no forno resulta em uma microestrutura mais homogênea.

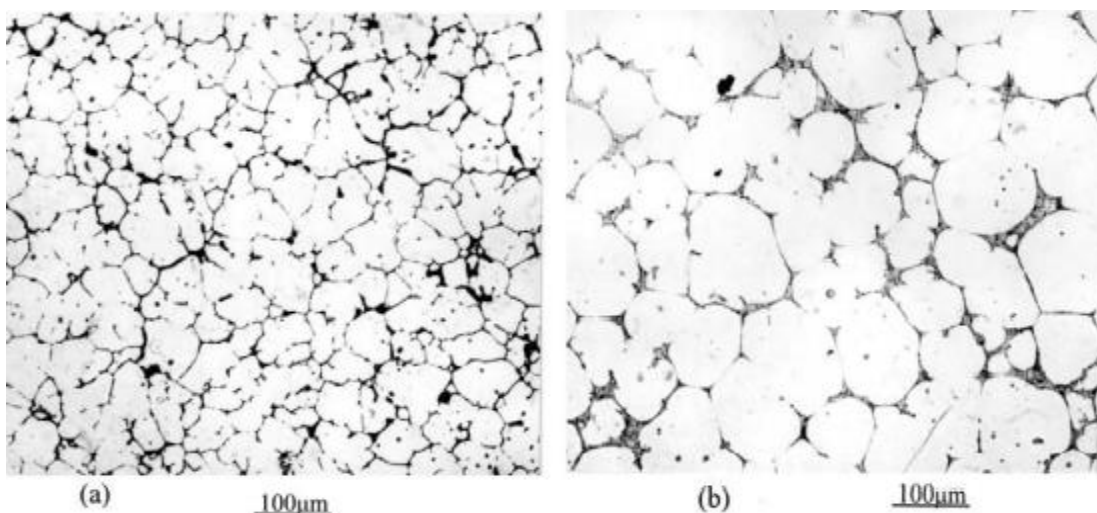


Figura 19 – Microestrutura de uma liga de alumínio submetida a um tratamento de forno a 580°C por (a) 15 minutos e (b) 60 minutos.

A presença das partículas no alumínio já homogeneizado que é submetido ao processo de *caster* indica que o tempo de forno utilizado neste tratamento não foi suficiente para a dispersão das segregações do alumínio utilizado. Sendo assim, é possível atuar neste problema estabelecendo um maior tempo de homogeneização para os materiais que apresentem uma microestrutura mais grosseira. Para tanto, deve-se estabelecer um procedimento de inspeção rotineiro para as matérias-primas, onde para cada lote recebido sejam retiradas amostras para submissão a um ensaio metalográfico, de forma a identificar os materiais que exigem um maior tempo de homogeneização.

A porosidade excessiva nas folhas pode estar relacionada a microestrutura da matéria-prima utilizada no processo também no que diz respeito ao tamanho de grão apresentado. Um tamanho de grão elevado favorece a formação de vazios no alumínio fundido no processo de *caster*, os quais podem dar origem aos poros durante as etapas subsequentes do processo. É possível portanto reduzir o problema de porosidade nas folhas através da utilização de materiais com uma microestrutura mais refinada. Para atuar neste problema, devemos levar em consideração que, no caso do alumínio, um tamanho de grão reduzido pode ser induzido através da introdução de refinadores nas ligas de alumínio. O titânio, quando utilizado como elemento de liga no alumínio, atua como refinador de grão, facilitando a formação de uma estrutura com tamanho de grão reduzido durante a solidificação do alumínio fundido. Sendo assim, uma possível solução para reduzir a ocorrência de poros nas folhas do alumínio é a fábrica estudar a viabilidade de aumentar a concentração de titânio na liga utilizada no processo. A figura 20 mostra duas microestruturas de folhas de uma mesma liga de alumínio, uma produzida pelo processo de laminação a quente e apresentando tamanho de grão refinado, e outra produzida pelo processo de *caster*, apresentando uma microestrutura grosseira.

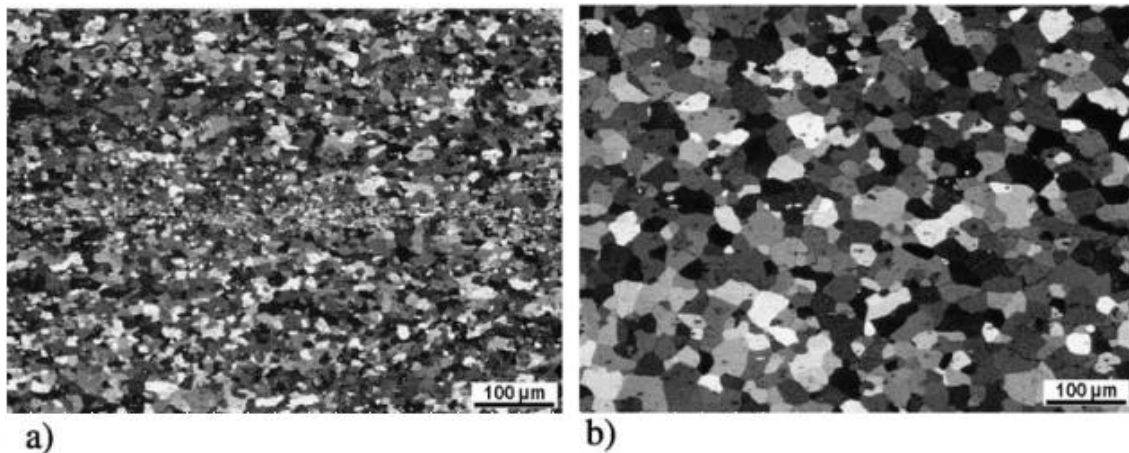


Figura 20 – Folha de alumínio produzida por (a) laminação a quente e (b) laminação contínua [4].

6.2.3 Rugas

O levantamento das análises de causa-raiz registradas pela fábrica para averiguação dos motivos que culminaram no aparecimento de rugas nas bobinas produzidas aponta dois problemas com grande influência para o aparecimento do defeito. São eles a planicidade ruim do material de entrada no equipamento e a falta do óleo lubrificante que é aplicado entre as folhas dupladas durante o processo.

A planicidade ruim aparece como o principal problema para o aparecimento das rugas. Segundo a análise dos relatórios de causa-raiz, este problema pode ser causado pelo uso de cilindros deformados ou com acabamento superficial inadequado, uma vez que isto pode levar a uma redução significativa das forças de atrito entre a folha e o cilindro, fazendo com que o material não seja completamente tracionado, ficando assim propenso a apresentar uma planicidade inadequada que pode dar origem às rugas.

As análises estabelecidas pela fábrica apontam que muitas vezes os cilindros, que são enviados periodicamente a um prestador de serviços responsável pela retificação dos mesmos, chegam a fábrica já apresentando um acabamento superficial ruim. Neste caso, recomenda-se que a fábrica identifique os valores de rugosidade que são mais adequados ao processo, e discuta com o prestador de serviços a possibilidade de utilizar uma tolerância mais apertada para o acabamento superficial dos cilindros. Além disso, é adequado que a fábrica estabeleça um procedimento de inspeção de todos os cilindros trabalhados pelos prestadores de serviço, de forma a garantir que o acabamento superficial esteja de acordo com a tolerância estabelecida. Por fim, se após estas ações o problema

persistir, é plausível procurar um novo prestador para este tipo de serviço, que está apto a fornecer os cilindros dentro das especificações.

Os problemas com o cilindro podem estar relacionados também ao desgaste natural devido ao uso, proveniente das altas solicitações mecânicas inerentes ao processo produtivo. Neste caso, recomenda-se a elaboração de um procedimento que possibilite detectar a necessidade de troca do cilindro antes que este problema leve a produção de materiais com problemas de rugas. Conforme mencionado para o problema de porosidade, essa informação pode ser obtida através manutenção preditiva pela análise de vibrações, que será discutida posteriormente.

O problema de planicidade ruim do material pode ser causado também pelo uso de uma força de tração insuficiente aplicado sobre a folha pela bobinadeira. A aplicação de forças trativas no material durante o processo de rebobinagem das folhas garante que o material permaneça esticado e plano, evitando o aparecimento de rugas. Devemos levar em conta que a ação corretiva para este problema não pode ser simplesmente aumentar a tração aplicada as folhas, visto que uma grande solicitação pode implicar em quebras no material.

As análises da fábrica apontam que este problema ocorre com maior frequência nas primeiras voltas das bobinas, e diminui gradativamente conforme a altura da bobina aumenta. Esta condição pode ser explicada pelo fato de que, quanto maior a altura da bobina, maior serão os efeitos de tração impostos ao material, de forma que a partir de uma determinada altura as forças de tração atingem valores adequados à correção da planicidade do material. Sendo assim, uma possível solução para manter os valores de tração corretos qualquer que seja a altura da bobina seria estabelecer, ao invés de um valor fixo de tração do processo, diversos patamares elaborados em função da variação da altura da bobina. Desta forma, a bobinadeira pode aplicar uma força de tração maior enquanto a bobina estiver com altura baixa, de forma a propiciar uma boa planicidade ao material, e da mesma maneira aplicar uma força de tração menor quando a bobina apresentar altura maior, evitando que o material seja solicitado excessivamente e apresente quebras.

O segundo problema identificado no levantamento das análises de causa-raiz é a aplicação insuficiente de óleo de laminação devido a uma falha no sistema de aplicação por *spray*. Este óleo é aplicado de modo a lubrificar a superfície de contato entre as folhas, assim contribuindo para evitar o aparecimento das rugas durante a laminação das folhas

finas. As análises para este problema indicam que as falhas no sistema de *spray* do óleo de duplagem são causadas normalmente por três fatores – utilização do óleo em uma temperatura abaixo da necessária, pressão do ar comprimido utilizado no *spray* abaixo da necessária; e presença de partículas de alumínio nos bicos do *spray*. De forma a atuar neste problema é proposto a instalação de um sensor com alarme sonoro ou visual que controle a temperatura do óleo de duplagem e a pressão do ar comprimido, de forma que seja possível interromper a produção quando estes parâmetros atingirem valores críticos, evitando o aparecimento das rugas. Além disso a elaboração de um plano de manutenção preditiva para os óleos pode garantir que seja detectada a presença de partículas sólidas no fluído, indicando a necessidade da troca do óleo ou do filtro, para que esta seja realizada antes que este problema leve a produção de materiais com rugas.

O problema de rugas pode ainda ser atribuído ao tamanho de grão do alumínio laminado, visto que um tamanho de grão elevado pode levar a redução do limite de escoamento e aumento do alongamento que intensificam o aparecimento de rugas. O processo de laminação contínua da origem a um material com estrutura bruta de fusão, com tamanho de grão superior por exemplo aos materiais produzidos pelo processo de laminação a quente. É possível portanto atuar no aparecimento de rugas nas folhas através da utilização de uma matéria-prima com uma microestrutura mais refinada. Assim como no caso da porosidade, devemos levar em consideração que o titânio, quando utilizado como elemento de liga no alumínio, atua como refinador de grão, facilitando a formação de uma estrutura com tamanho de grão reduzido durante a solitação do alumínio fundido. Sendo assim, uma possível solução para reduzir a ocorrência de rugas nas folhas do alumínio é a elaboração de um estudo buscando analisar a viabilidade do aumento da concentração de titânio na liga utilizada no processo.

6.2.4 Telescopagem

O levantamento das análises de causa-raiz registradas pela fábrica para as causas que levam ao aparecimento do efeito de telescopagem nas bobinas fabricadas apontam que o principal responsável por este fenômeno é a vibração no equipamento. Segundo o *book* de defeitos da fábrica, o efeito de vibração do equipamento é prejudicial quando afeta a unidade responsável por rebobinar a bobina, pois pode fazer com que as camadas das folhas deslizem umas sobre as outras, levando ao aparecimento da telescopagem.

As análises de causa-raiz para a ocorrência de vibração nos equipamentos apontam que as possíveis causas para este problema foram o empenamento da espula, que pode ocorrer por diferentes motivos, como falta de óleo lubrificante ou presença de partículas estranhas; uma falha no ajuste de compensação de peso dos cilindros; utilização do conjunto eixo-espula descentralizado ou do conjunto rolo de contato-suporte apresentando excentricidade.

A aplicação de um procedimento de inspeção preditiva baseado na análise das vibrações do equipamento pode ter grande valor para a redução da produção de materiais com telescopagem. Em um primeiro momento, a medição constante da intensidade das vibrações permitiria a interrupção do processo quando o equipamento atingir frequências de vibração suficientes para causar a telescopagem. Além disso, é possível relacionar alterações conhecidas nas vibrações ao problema que as causou, permitindo atuar nas causas destes distúrbios, conforme será discutido a seguir.

6.3 Manutenção Preditiva

A consolidação de procedimentos de manutenção preditiva na fábrica pode trazer benefícios relacionados a redução do aparecimento dos quatro problemas estudados neste trabalho. Além disso, a obtenção de uma base dados relacionada ao comportamento dinâmico de cada máquina pode favorecer a identificação de outros problemas do processo que podem causar a ocorrência de problemas de qualidade no material.

6.3.1 Análise de vibrações

É recomendado que a fábrica estabeleça os procedimentos necessários para que seja realizado uma análise de vibrações contínua nos equipamentos envolvidos no processo de laminação. Vale ressaltar que as necessidades deste tipo de análise identificadas neste trabalho não exigem investimentos iniciais em equipamentos sofisticados de análise. Basta a implantação de medidores que forneçam informações sobre níveis de vibração do equipamento e eventuais variações no espectro de vibrações que a máquina pode apresentar.

O conhecimento em tempo real dos picos de vibração dos equipamentos tem especial importância na redução da incidência de telescopagem, visto que principal fator que leva ao aparecimento deste problema é a vibração excessiva do equipamento durante o processo de rebobinagem das folhas. A partir dos sensores de vibração, pode-se

estabelecer empiricamente quais as faixas de vibrações são adequadas ao equipamento e não favorecem o aparecimento da telescopagem. Com o monitoramento constante, é possível identificar quando a máquina atinge níveis inadequados de vibração, e dessa forma interromper o processo para averiguação do problema antes que sejam produzidas bobinas telescopadas.

A partir das medições dos padrões de vibração das máquinas, é possível estabelecer referências em normas dos padrões que indicam a um bom funcionamento dos equipamentos. Da mesma maneira, é possível catalogar os padrões apresentados pelos equipamentos que estejam apresentando problemas como rolos desalinhados ou descentralizados, desgaste ou deformação dos cilindros de trabalho, eixos empenados, falta de lubrificação ou problemas nos motores. A partir destas informações é possível identificar um problema que a máquina possa apresentar antes que este acarrete na produção de bobinas não-conformes.

A identificação precoce dos cilindros desgastados, deformados, desalinhados ou descentralizados é de grande interesse para a proposta deste trabalho. A realização de trocas e manutenção nos cilindros que apresentam desgaste ou deformações antes que estes atinjam um estado crítico pode levar a uma redução dos níveis de porosidade dos materiais, visto que evita a presença de deformações superficiais que possam furar as folhas. Evitando o uso de cilindros com grandes deformações, é possível reduzir a produção de materiais com planicidade ruim, que leva ao aparecimento das rugas. Além disso, o desalinhamento e desnivelamento dos cilindros são as principais causas da intensificação das vibrações que levam ao aparecimento da telescopagem.

6.3.2 Análise de óleos

É também recomendado à fábrica o estabelecimento de procedimentos para a análise dos óleos utilizados no processo. A utilização de um equipamento de análise espectroquímica permite identificar os diversos elementos presentes em uma amostra de óleo lubrificante, bem como quantificar a presença de partículas sólidas e a contaminação por outro fluídos do processo. A partir das informações obtidas nesta análise, pode-se identificar quando um óleo apresenta uma grande concentração de partículas sólidas, sendo assim possível realizar a troca do óleo e dos filtros utilizados no processo antes que estas partículas levem ao aparecimento de materiais com problemas.

A medição periódica da concentração de partículas sólidas no óleo pode levar a uma redução dos materiais produzidos com excesso de porosidade, uma vez que irá reduzir a quantidade de partículas que são transportadas pelos fluídos até serem retidas nos cilindros de trabalho, e que acabam por furar o material. Esta medição pode também levar a uma redução do aparecimento de rugas no material, visto este problema muitas vezes é causado pela aplicação insuficiente de óleo de duplagem devido aos entupimentos dos bicos injetores pelas partículas estranhas presentes no óleo.

Da mesma maneira, o uso de equipamentos que possibilitem a medição das propriedades físicas dos óleos, permitirá saber quando há um desgaste ou contaminação que implique na necessidade de troca dos óleos empregados no processo. A medição periódica da temperatura de volatilização é de especial interesse para a redução do volume de materiais produzidos com problemas de molhabilidade. É possível através dessas análises estabelecer qual a faixa de valores para o ponto de evaporação dos óleos que permitem uma evaporação completa durante o processo de acabamento em forno o qual as bobinas são submetidas. Desta forma, é possível também evitar o uso de óleos contaminados que permaneçam nas bobinas após o acabamento, e assim reduzir a incidência de problemas de molhabilidade nas folhas produzidas.

A tabela 8 mostra um resumo dos problemas, índice de rejeição, causa e proposta de melhoria.

Problema	Índice de Rejeição Interna	Índice de rejeição externa	Causa	Proposta de Melhoria
Molhabilidade	2%	22%	Excesso de óleo nas bobinas acabadas	Manutenção Preditiva - Análise de Óleos
			Presença de rugas ou porosidade excessiva	Ações para redução do aparecimento destes defeitos
Porosidade	15%	16%	Furos de Cilindro	Manutenção Preditiva - Análise de Óleos e Análise de Vibrações
			Microestrutura grosseira da matéria-prima	Aumenta tempo de homogeneização
			Tamanho de grão	Estuda da alteração da composição da liga utilizada
Rugas	18%	19%	Utilização de cilindros fora de especificação	Manutenção Preditiva - Análise de Vibrações
			Aplicação insuficiente de tração nas folhas durante o rebobinamento das folhas	Revisão do <i>setup</i> do equipamento
			Aplicação insuficiente de óleos de laminação	Manutenção Preditiva - Análise de Óleos / Instalação de sensores no equipamento
			Tamanho de grão	Estuda da alteração da composição da liga utilizada
Telescopagem	21%	< 1%	Vibração no Equipamento	Manutenção Preditiva - Análise de Vibrações

Tabela 8 – Resumo dos problemas, índice de rejeição, causa e proposta de melhoria elaboradas no trabalho.

6.4 Potencial de redução do índice de material rejeitado

O gráfico referente ao histórico de rejeições semestrais internas da fábrica por conta dos problemas de molhabilidade, porosidade, rugas e telescopagem durante os períodos analisados é mostrado na figura 21.

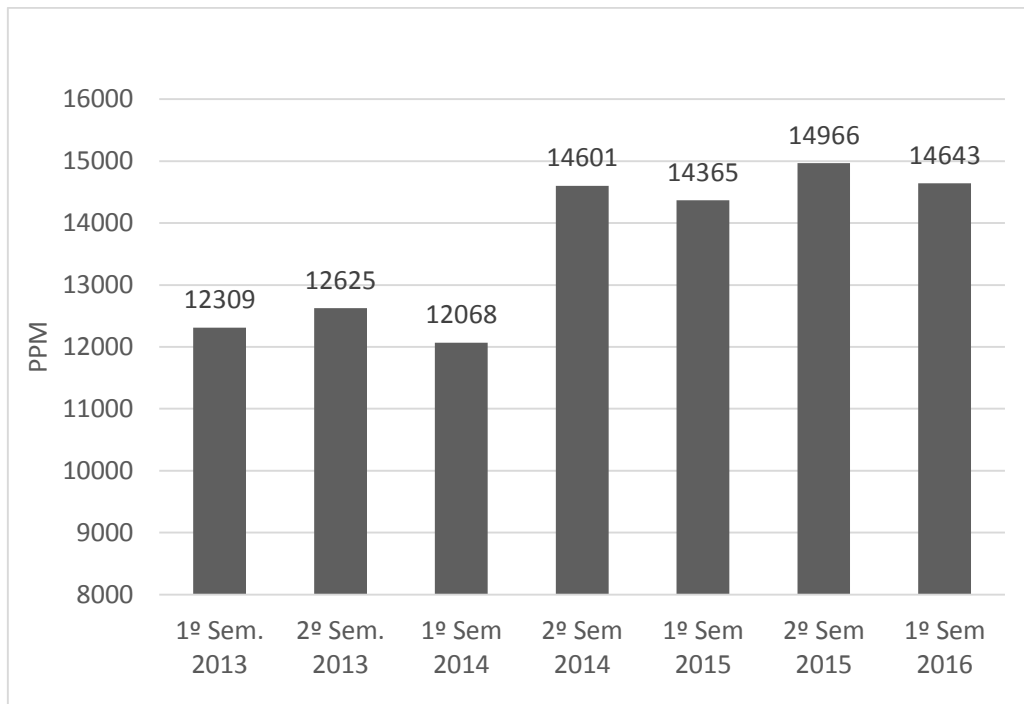


Figura 21 – Evolução semestral do PPM de rejeições internas da fábrica por molhabilidade, porosidade, rugas e telescopagem

A análise do gráfico mostrado na figura 21 permite notar a presença de duas situações diferentes e bem definidas. Os três primeiros semestres apresentaram valores de PPM bastante próximos, com uma média de 12304 partes por milhão. Os três últimos semestres apresentaram da mesma forma valores de PPM bastante próximos, porém com uma média de 14644 partes por milhão. É esperado que a consolidação de ações de melhoria que atuam na incidência dos problemas analisados resulte em uma redução gradual no volume de materiais rejeitados semestralmente até atingir valores próximo ao patamar exibido nos três primeiros semestres. Sendo assim, é possível estimar como meta para a redução das rejeições internas a diferença entre as médias dos patamares apresentados no gráfico, que equivalente a 2340 partes por milhão.

O gráfico referente ao histórico de rejeições semestrais externas da fábrica é por sua vez mostrado na figura 22.

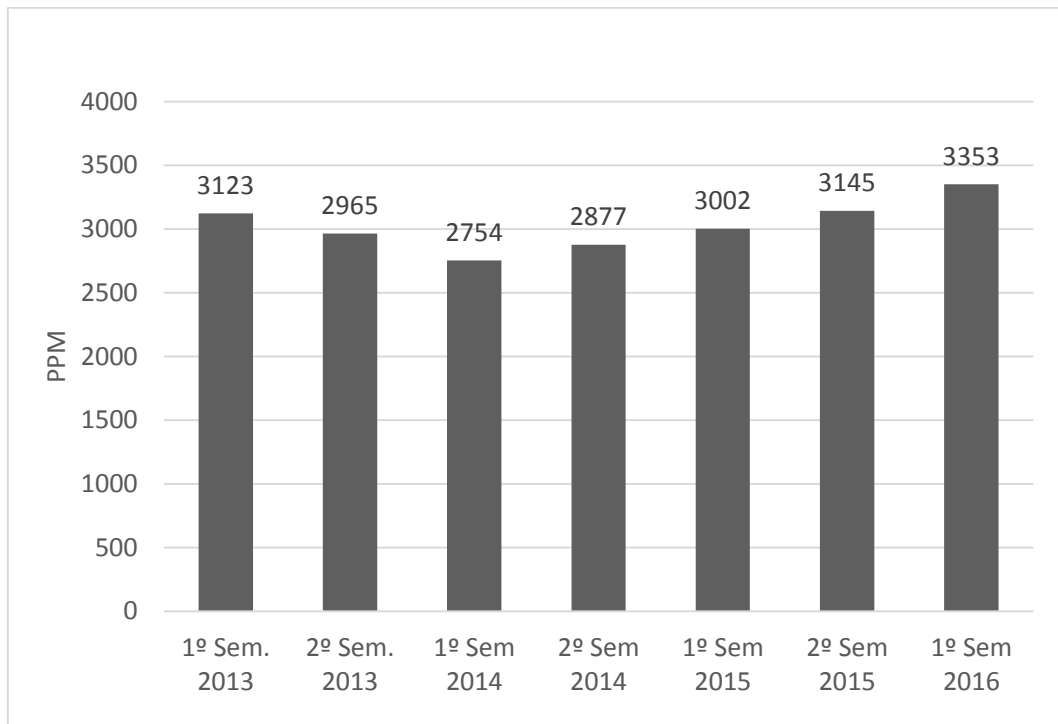


Figura 22 – Evolução semestral do PPM de rejeições externas da fábrica por molhabilidade, porosidade, rugas e telescopagem

Uma análise do gráfico representado na figura 22 mostra que a partir do 1º semestre de 2013 a frequência de devolução de materiais pelos defeitos estudados apresentou uma tendência de queda até atingir um valor mínimo no 1º semestre de 2014. A partir de então, passou a apresentar uma tendência de crescimento até atingir o valor máximo do período, no 1º semestre de 2016. Comparando este gráfico com o referente às devoluções internas apresentado na figura 21, pode-se notar que os períodos que apresentaram uma tendência de crescimento no volume de material devolvido coincidem com os períodos em que a rejeição interna pelos problemas analisados se encontravam com uma média elevada. Esta relação é um indicativo de que, reduzindo a ocorrência dos problemas durante o processo produtivo é possível reduzir o volume de materiais devolvidos ao nível mínimo apresentando no 1º semestre de 2014. Sendo assim, é coerente estimar como meta para a redução das rejeições externas a diferença entre o valor do 1º semestre de 2016 e do valor do 1º semestre de 2014, que equivale a uma redução de 599 partes por milhão.

A estimativa para o potencial de redução no volume de materiais rejeitados é, portanto, de 2340 ppm para a rejeição interna e 599 para a rejeição externa. A partir destes valores é possível então calcular a partir das relações estabelecidas no desenvolvimento

do projeto o potencial de ganho financeiro que as ações propostas neste trabalho podem trazer para a empresa. O potencial de ganhos com a redução das rejeições internas pode ser calculado conforme abaixo.

$$\text{Potencial de Ganhos} = \frac{PPM}{1000000} * \text{Volume de material fabricado} * R\$ 8,00$$

Considerando que a fábrica produza um volume de materiais da ordem de 125.000.000 Kg em um período de seis meses, um PPM de 2340 resulta em um potencial de ganhos financeiros de R\$ 2.340.000 por semestre. Da mesma, pode-se calcular o potencial de ganhos com a redução das rejeições internas conforme abaixo.

$$\text{Potencial de Ganhos} = \frac{PPM}{1000000} * \text{Volume de material fabricado} * R\$ 10,40$$

Considerando que a fábrica produza um volume de materiais da ordem de 125.000.000 Kg em um período de seis meses, uma redução do PPM em 599 partes por milhão resulta em um potencial de ganhos financeiros de R\$ 778.700 por semestre. Além disso, é adequado levar em consideração que uma redução no fornecimento de materiais defeituosos aos clientes podem trazer benefícios para a imagem da empresa e uma confiança dos consumidores nos produtos da fábrica, aspectos que posteriormente podem ser explorados comercialmente pela empresa.

7. CONCLUSÃO

A elaboração deste trabalho permitiu avaliar quais problemas de qualidade presentes nas bobinas produzidas contribuem de forma significativa para o volume de materiais rejeitados pela fábrica analisada. Foi possível também identificar através da análise dos relatórios internos da fábrica quais as principais causas que levam a ocorrência destes problemas. Concluiu-se que há diversas oportunidades de melhoria para o processo produtivo da fábrica, as quais podem resultar em uma redução do índice de materiais rejeitados. Foi possível concluir ainda que a implementação destas ações, que podem ser simples como melhorar os métodos de inspeção dos produtos ou mais complexas como mudanças no processo e composição da liga, podem trazer grandes benefícios para a empresa, tanto no que diz respeito a resultados financeiros, da ordem de 6 milhões de reais por ano, quanto no que condiz com a imagem que os produtos da fábrica possuem frente ao consumidor.

Por fim, é possível concluir que este trabalho atingiu os objetivos propostos, e que pode servir como guia para orientar as ações que a fábrica deve tomar para reduzir o volume dos materiais rejeitados. Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um trabalho baseado no estudo dos processos da fábrica, visto que este trabalho concentrou suas análises nos relatórios produzidos pelos departamentos de Qualidade e Assistência Técnica da fábrica. Além disso, se as ações propostas por este trabalho forem de fato implementadas, recomenda-se a realização de um trabalho de melhoria contínua voltado a monitorar os resultados reais das ações propostas.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: Laminação.** São Paulo: ABAL, 2004.
- [2] RODRIGUES, Jorge; MARTI, Paulo. **Tecnologia Mecânica Vol. 2: Tecnologia da Deformação Plástica.** São Paulo: Escolar Editora, 2010
- [3] DONG, J. et al. Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075. **Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 345, n. 1-2, p.234-242, mar. 2003. Elsevier BV.
- [4] SLÁMOVÁ, M et al. Differences in microstructure and texture of Al–Mg sheets produced by twin-roll continuous casting and by direct-chill casting. **Materials Characterization**, [s.l.], v. 49, n. 3, p.231-240, out. 2002. Elsevier BV.
- [5] BERG, B.s. et al. Gauge reduction in Twin-Roll Casting of an AA5052 aluminium alloy: The effects on microstructure. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 53, n. 1-2, p.65-74, ago. 1995. Elsevier BV.
- [6] CÉSAR, Francisco I. Giocondo. **Ferramentas Básicas da Qualidade.** São Paulo: Biblioteca 24 Horas, 2011.
- [7] FELIPE MORAIS MENEZES. **Metodologia de Análise e Solução de Problemas.** Porto Alegre: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2013.
- [8] SALOMÃO FILHO, Luís Felipe. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Festão de Ativos.** 2013. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de

Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

[9] LAGO, Daniel Fabiano. **Manutenção Preditiva de um Redutor Usando Análise de Vibrações e de Partículas de Desgaste**. In: Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nº 16, 2006, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

[10] BENEDUZZI, Anderson Henrique. **Procedimentos de Coletas de Óleo para Análise Preditiva de Turbinas à Gás**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2012.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 209:2007**: Alumínio e suas ligas - Classificação da composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8310:2008**: Alumínio e suas ligas - Folhas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008

[13] NAKAO, Rogerio Rikaru. **Automação de Enroladeiras de Bobinas de Papel**: Um estudo de caso. 2013. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2013.

[14] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Volume 2**: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. 9. ed. Ohio: ASM, 1979.

[15] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Volume 9**: Metallography and Microstructures. 9. ed. Ohio: ASM, 1985.

[16] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Volume 11**: Failure Analysis and Prevention. 9. ed. Ohio: ASM, 1986.

[17] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Volume 14**: Forming and Forging. 9. ed. Ohio: ASM, 1988.

[18] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Volume 15**: Casting. 9. ed. Ohio: ASM, 1988.