



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia de Produção



Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO E A CORRELAÇÃO COM A OCORRÊNCIA DE DEFEITOS NO FIO-MÁQUINA

Kellen Núbia Monteiro Fagundes

**João Monlevade, MG
2018**

Kellen Núbia Monteiro Fagundes

**ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE
LAMINAÇÃO E A CORRELAÇÃO COM A
OCORRÊNCIA DE DEFEITOS NO FIO-MÁQUINA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018**



ANEXO IX - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO E A CORRELAÇÃO COM A OCORRÊNCIA DE DEFEITOS NO FIO-MÁQUINA” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 18 de julho de 2018.

Kellen Níria Monteiro Fagundes

Nome completo do aluno



ATA DE DEFESA

Aos 06 dias do mês de julho de 2018, às 19:30 horas, na sala D203 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pelo (a) aluno (a) KELLEN NÚBIA MONTEIRO FAGUNDES, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Thiago Augusto de Oliveira Silva (Orientador), Neander Sousa de Andrade e Rafael Lucas Machado. O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO E A CORRELAÇÃO COM A OCORRÊNCIA DE DEFEITOS NO FIO-MÁQUINA. A comissão examinadora deliberou, pela:

Aprovação

Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções: _____

Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca: _____

Reprovação

do(a) aluno (a), com a nota 9,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP12/2015 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno(a).

João Monlevade, 06 de julho de 2018.

Thiago A. O. Silva

Thiago Augusto de Oliveira Silva

Professor(a) Orientador(a)

Neander Sousa de Andrade

Neander Sousa de Andrade

Convidado (a)

Rafael Lucas Machado

Rafael Lucas Machado

Convidado (a)

Kellen Nubia Monteiro Fagundes

Aluno (a): Kellen Núbia Monteiro Fagundes

Resumo

O processo de laminação em uma siderurgia conta com uma série de requisitos para chegar ao objetivo final, que é produzir um material dentro das especificações e de boa qualidade. Dessa forma, o presente estudo objetivou analisar as variáveis de uma linha de produção de aços longos, utilizando ferramentas estatísticas como a regressão logística binária, com apoio da análise de componentes principais (PCA), para buscar a correlação da má formação de rolo com as variáveis do processo de laminação a fim de contribuir para a redução do índice de produtos laminados com defeito. Por meio da pesquisa bibliográfica, foi possível identificar modelos semelhantes e pesquisas relacionadas que embasaram o estudo. Por fim, foi possível fazer uma análise de sensibilidade com os resultados obtidos para identificação de falsos positivos e negativos, verdadeiros positivos e negativos e suas probabilidades, obtendo uma quantidade de redução nos defeitos de aproximadamente 45% de acordo com a variação do ' α ' (0.1 a 1.0), para assim propor melhorias e ações para a empresa.

Palavras-chave: Processo de Laminação. Regressão Logística Binária. Análise de Resultados.

Abstract

The rolling process in a steel mill relies on a number of requirements to reach the ultimate goal, which is to produce a material within the specifications and good quality. Thus, the present study aimed to analyze the variables of a long steel production line, using statistical tools such as binary logistic regression, with the support of principal component analysis (PCA), to search for the correlation of poor roll formation with the variables of the rolling process in order to contribute to the reduction of the index of defective rolled products. Through the bibliographic research, it was possible to identify similar models and related research that supported the study. Finally, it was possible to make a sensitivity analysis with the results obtained to identify false positives and negatives, true positive and negative and their probabilities, obtaining a reduction amount in the defects of approximately 45 % according to the variation of ' α ' (0.1 to 1.0), in order to propose improvements and actions for the company.

Keywords: Rolling Process. Binary Logistic Regression. Results Analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo Simplificado de Produção na Siderurgia	6
Figura 2 – Processo Simplificado de Laminação e seus produtos finais	7
Figura 3 – Análise de Componentes Principais	10
Figura 4 – Processo de análise de dados para tomada de decisão	11
Figura 5 – Processo Produtivo da Usina	13
Figura 6 – <i>Layout</i> do Laminador 1	14
Figura 7 – Defeito Bolha	15
Figura 8 – Defeito Carepa	15
Figura 9 – Defeito Descarbonetação	16
Figura 10 – Defeito Dobra	16
Figura 11 – Defeitos Fora de Tolerância e Rebarba	16
Figura 12 – Defeito Má Formação de Rolo	17
Figura 13 – Defeito Palha	17
Figura 14 – Defeito Trinca	17
Figura 15 – Variáveis ao longo do Laminador 1	18
Figura 16 – Produção de Fio-Máquina por Bitola	19
Figura 17 – Ciclos de Resfriamento	19
Figura 18 – Causas de sucateamento no Fio-Máquina	20
Figura 19 – Diferença entre um rolo mal formado e um rolo bem formado	21
Figura 20 – Correlação entre variáveis e defeito	22
Figura 21 – Correlação entre variáveis e defeito - Continuação	23
Figura 22 – Histograma da distribuição de correlações	24
Figura 23 – Local das maiores correlações entre variáveis	24
Figura 24 – PCA para variáveis com correlação acima de 0.1	26
Figura 25 – Resultados Regressão Logística Binária - saída do <i>Software R</i>	27
Figura 26 – Total de redução nos defeitos	29
Figura 27 – Total de FP	29
Figura 28 – Erro total	30

Lista de tabelas

Tabela 1 – Matriz de confusão	12
Tabela 2 – Variáveis do Estudo	18
Tabela 3 – Correlação para cada variável	25
Tabela 4 – Matriz de confusão	27
Tabela 5 – Variação dos VP, VN, FP e FN de acordo com 'α'	28

Lista de abreviaturas e siglas

BDM - Bloco Desbastador Morgan;

CR - Ciclo de Resfriamento;

FL - Má Formação de Rolo;

FM - Fio Máquina;

NT - No Twist;

PCA - *Principal Component Analysis*;

VP - Verdadeiro Positivo;

VN - Verdadeiro Negativo;

FP - Falso Positivo;

FN - Falso Negativo.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo Geral	1
1.1.2	Objetivos Específicos	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Organização do trabalho	2
2	METODOLOGIA DE PESQUISA	3
2.1	Classificação da Pesquisa	3
2.2	Coleta e Extração de Dados	3
3	REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1	Gestão da Qualidade	4
3.2	Custos da Qualidade	4
3.3	Siderurgia	5
3.4	Laminação	6
3.5	Trabalhos Correlatos	7
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
4.1	Análise de Componentes Principais	9
4.2	Regressão Logística Binária	10
4.2.1	Sensibilidade e Especificidade	11
5	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	13
5.1	A empresa	13
5.2	Descrição do Processo do Laminador 1	13
5.3	Defeitos de Laminação	15
5.4	Apresentação das Variáveis	17
5.5	Descrição do problema	18
6	ANÁLISES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6.1	Correlações	22
6.2	PCA e Regressão Logística	26
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	31

REFERÊNCIAS 33

1 Introdução

A crise enfrentada nos últimos anos afetou não somente um setor específico mas sim todos os setores que impulsionam a economia, acarretando diversas mudanças estruturais nas empresas. Como resultado de tais transformações econômicas, as empresas brasileiras têm sido diretamente afetadas, tendo que maximizar sua competitividade e aperfeiçoar seus processos.

No setor siderúrgico não é diferente e alguns acontecimentos nas últimas décadas foram determinantes para mudanças nas estratégias dessas empresas. Um fator impactante, segundo o Setorial (2014) foi a produção da China que aproximou de 780 milhões de toneladas, o que representa quase 50% da produção mundial de 2013, sendo esse país o maior concorrente do Brasil.

Outra questão importante foi o crescimento de fusões e aquisições das empresas do setor siderúrgico, o que elevou o grau de concentração, contribuindo para uma busca intensa pela racionalização da produção e maximização da eficiência (FONSECA et al., 2010).

Devido a isso, é importante que as empresas otimizem seus planos estratégicos de forma a aumentar a competitividade dentro do setor siderúrgico, uma vez que a grande produtora de aço, a China, é autossuficiente, isto é, chega a consumir quase toda sua produção, não havendo necessidade de comprar aços de outros países ou companhias (FONSECA et al., 2010). Isso mostra como é importante a constante busca dos grupos multinacionais pela melhoria contínua dos processos, visando o aumento da qualidade final dos produtos, a fim de se alcançar maiores mercados e maior fidelização dos consumidores finais.

Nesse sentido, o foco do presente estudo é a análise das variáveis que influenciam a ocorrência de defeitos dentro da linha de produção de laminados em uma indústria siderúrgica, a fim de se estreitar o controle da qualidade do produto final.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar quais são as variáveis do processo de laminação que mais influenciam na ocorrência da má formação de rolo no fio-máquina, a fim de se buscar o menor índice de produtos laminados não conformes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar e caracterizar as principais não conformidades do produto laminado;
- ✓ Identificar as variáveis do processo produtivo;
- ✓ Estabelecer correlação entre defeito e variáveis do processo;

- ✓ Construir um modelo capaz de explicar a influência das variáveis na ocorrência do defeito;
- ✓ Estabelecer diretrizes para a predição de falha;

1.2 Justificativa

Diante da atual competitividade do mercado siderúrgico e da grande exigência por parte dos clientes, é imprescindível a busca pela qualidade e a tentativa de diferenciação em relação a outras empresas, gastando o mínimo de recursos possíveis. Com isso, a empresa se vê na situação de adotar práticas para melhoria contínua do desempenho operacional com foco na redução de custos e otimização da qualidade de produtos e processos.

Devido a isso, o estudo se justifica por identificar as variáveis que influenciam nas causas de não conformidade do fio-máquina e assim apresentar propostas de melhoria para os processos, com intuito de aumentar a competitividade da empresa, diminuir os desperdícios e retrabalhos, ocasionando a maximização da produtividade e do retorno financeiro.

1.3 Organização do trabalho

A estrutura do trabalho foi dividida da seguinte maneira: o Capítulo 1 mostra uma breve introdução do assunto, apresentando objetivos gerais e específicos, justificativa e organização do trabalho. O Capítulo 2 traz a metodologia de pesquisa utilizada para a elaboração do estudo. O Capítulo 3 se refere a revisão de literatura, que apresenta a base na qual o estudo foi escrito. No Capítulo 4 foi desenvolvida a fundamentação teórica acerca da regressão logística binária e análise de componentes principais (PCA). Ao longo do Capítulo 5 é apresentada a descrição da empresa bem como o processo produtivo, seguida do Capítulo 6 que são feitas as análises e as correlações necessárias. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais obtidas e sugestões de melhorias.

2 Metodologia de pesquisa

2.1 Classificação da Pesquisa

A classificação das pesquisas científicas em engenharia de produção pode ser um tópico com bastantes controvérsias. Porém, a escolha quanto à natureza, objetivos e abordagem se dá pelo foco escolhido pelo autor.

Para a realização do presente estudo, quanto à natureza, refere-se a uma pesquisa aplicada, uma vez que tem por objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática da empresa e trazer soluções para os problemas encontrados (GERHARDT; SILVEIRA, 2009) .

Quanto aos objetivos, classifica-se como explicativa-normativa, já que as análises visam identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos e está interessada em desenvolver políticas, estratégias e ações para aperfeiçoar os resultados disponíveis na literatura (TURRIONI; MELLO, 2012).

Outra classificação, é a forma de abordar o problema, sendo uma pesquisa quantitativa, o que significa traduzir em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las, com utilização de recursos e de técnicas estatísticas (TURRIONI; MELLO, 2012).

Do ponto de vista dos métodos, a pesquisa utiliza da modelagem e simulação, pois deseja experimentar, através de um modelo, um sistema real, determinando-se como este sistema responderá a modificações propostas (TURRIONI; MELLO, 2012).

2.2 Coleta e Extração de Dados

Para a realização do trabalho foi necessário a coleta e extração de dados relacionados ao processo produtivo de laminação da empresa. O período estudado se concentra entre dezembro de 2016 e março de 2017.

Para coleta e extração de dados foi utilizado o *Software* MES (*Manufacturing Execution System*) e o PIMS (*Process Information Management Systems*). Para a análise, foram utilizados informações e dados de 204 corridas (aproximadamente 11.220 bobinas) do período citado e também 67 variáveis do processo de laminação, com seus respectivos valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão. Além disso, foi feito o delta entre algumas variáveis (todas as velocidades das cadeiras de laminação), totalizando 297 variáveis. Essas informações foram todas processadas em uma única planilha do Excel para a realização dos estudos através do *Software* R, para a aplicação da análise de componentes principais e o modelo de regressão logística binária.

3 Revisão de literatura

3.1 Gestão da Qualidade

Atualmente, existem diversos conceitos sobre o que é Qualidade, em que cada autor expressa de sua maneira, mas todos conectados a aplicação de melhorias, seja ela no produto, no processo ou no serviço, de forma a cumprir a sua função de modo eficiente.

De acordo com a ABNT (2015) a implantação do sistema de gestão da qualidade nas organizações é tomada como uma estratégia para a melhoria do desempenho global e também para a construção de uma base sólida voltada para a sustentabilidade.

Segundo Carvalho e Paladini (2012), a Gestão da Qualidade é considerada uma série de atividades controladas para dar suporte e direção para as empresas em relação à qualidade, planejamento, controle e garantia da qualidade.

Já Falconi (1999), define qualidade, de um produto ou serviço, como aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo às necessidades do cliente.

Ainda segundo Falconi (1999) não se pode imaginar a Garantia da Qualidade sem que haja a participação dos setores e pessoas praticando o controle da qualidade. Esse controle da qualidade é abordado com 3 objetivos: a) planejar a qualidade desejada pelos clientes; b) manter a qualidade desejada pelos clientes cumprindo padrões e atuando na causa dos desvios; c) melhorar a qualidade desejada pelo cliente, localizando resultados indesejáveis.

Paladini (2000) ainda afirma que é necessário a Gestão da Qualidade no processo, definida como um alinhamento das ações do processo produtivo para o total atendimento aos requisitos do cliente, podendo ser agrupada em 3 etapas: a) a eliminação dos defeitos, garantindo um produto em condições de ser efetivamente utilizado; b) a eliminação das causas dos defeitos, garantindo uma maior confiabilidade ao produto; e por fim, c) a otimização do processo, garantindo um produto com máxima eficácia e eficiência.

3.2 Custos da Qualidade

Para Carvalho e Paladini (2012), nos dias de hoje, a relação entre a qualidade e os custos é muito importante na busca de maior competitividade nas organizações. Juran e DeFeo (2015) definem os custos da má qualidade como os custos que desapareceriam se os produtos e processos fossem perfeitos e não gerassem desperdícios.

Segundo Carvalho e Paladini (2012) os custos da qualidade podem ser classificados como custos de conformidade e não conformidade. Os custos de conformidade estão relacionados a produção ou fornecimento dos produtos em conformidade com a qualidade, ou seja, dentro das

especificações corretas e os custos de não conformidade estão ligados às falhas do processo que tem como resultado o desperdício do material, acarretando gastos de mão de obra e capacidade.

Ainda se referindo as classificações de custo da qualidade, Feigenbaum (1994 apud WERNKE; BORNIA, 2000) o separa como custos do controle e custos na falha do controle. Os custos do controle são objetivados aos custos da prevenção e avaliação dos defeitos no processo. Já os custos na falha do controle se resumem nos custos de falhas internas e externas.

Partindo para uma nova conceituação, Juran (1988 apud MATTOS; TOLEDO, 1998) defende que os custos podem ser divididos como evitáveis e inevitáveis. Os custos evitáveis estão relacionados aos defeitos e falhas identificados dentro da empresa e aqueles identificados fora da empresa. Por outro lado, os custos inevitáveis são aqueles ligados a prevenção e avaliação do processo.

3.3 Siderurgia

A metalurgia é a ciência de extração de metais a partir dos minérios para transformação e em seguida utilização industrial. Dentro da metalurgia, é encontrada a Siderurgia, um caso particular do ferro (SILVA, 2011).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2015) as usinas siderúrgicas classificam-se de acordo com o processo produtivo em: a) integradas: operam redução, refino e laminação; b) semi-integradas: operam refino e laminação; e c) não integradas: dispõem de unidade de redução ou processamento. O estudo está relacionado a usina integrada ,

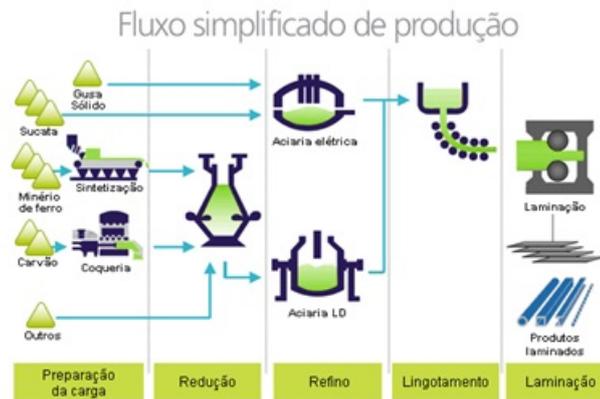
Segundo o Instituto Aço Brasil (2015), a Siderurgia se dá por diversas etapas para a transformação do minério de ferro em aço ou ferro. Essas transformações foram definidas na Revolução Industrial, com a criação dos fornos de aquecimento que tinham por objetivo corrigir impurezas no material e também somar propriedades específicas como resistência ao desgaste, corrosão, dentre outros.

As etapas de transformação do minério de ferro são divididas em 4, definidas abaixo e através da ilustração da Figura 1.

1. Preparação da carga: produção de sinter, através de minério de ferro, cal e finos de coque. Assim, é processado o carvão na coqueira e transformado em coque;
2. Redução: a matéria prima é carregada no alto forno e soprada através de oxigênio a uma temperatura de 1000°C, que em contato com o carvão, produz calor e funde a carga metálica, gerando a redução do minério de ferro em metal líquido, o Ferro –Gusa, que é uma liga de ferro e carbono com alto teor de carbono;
3. Refino: ocorre em aciarias a oxigênio ou elétricas para transformar o gusa (líquido ou sólido) em aço líquido e também remover o carbono juntamente com impurezas. O aço líquido é solidificado através do lingotamento contínuo, que é transformado em semiacabados, lingotes e blocos;

4. Laminação: Semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos laminadores e ocorre a transformação do material de acordo com a especificação e composição química.

Figura 1 – Fluxo Simplificado de Produção na Siderurgia



Fonte – Instituto Aço Brasil (2015)

3.4 Laminação

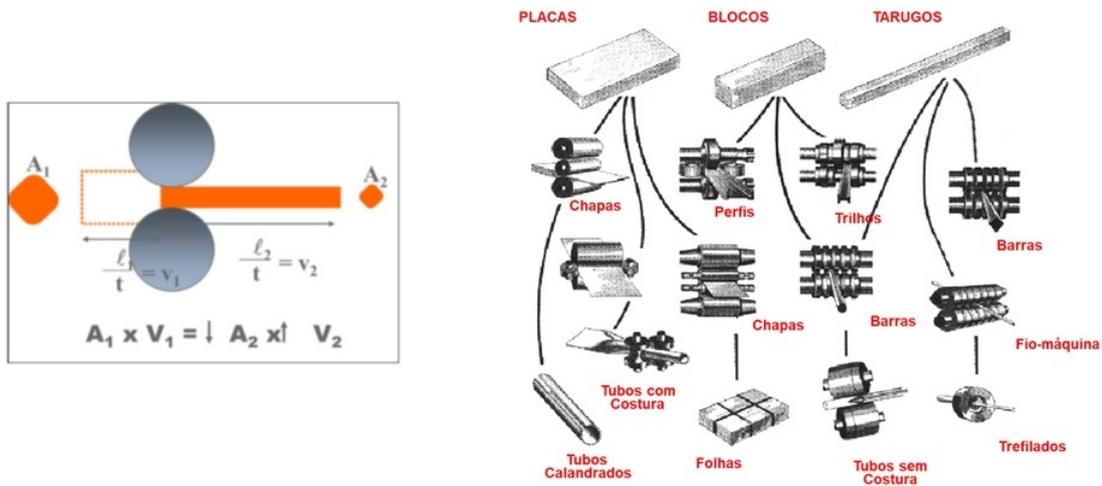
De acordo com a Medeiros et al. (2008), a laminação é um processo de conformidade na qual o material é forçado a passar entre dois cilindros que giram em sentidos opostos e tem praticamente a mesma velocidade. Esse material é deformado ao longo de cada cilindro, com objetivo de se diminuir a espessura e aumentar o comprimento, e largura podendo ou não ser aumentada.

Coda (2018) conceitua laminação como um processo de conformação mecânica executado por compressão direta, sem retirada de material, visando obter deformações plásticas no material, mantendo sua massa.

A Figura 2 mostra parte do processo de laminação e os exemplos dos produtos finais, relacionados às três diferentes formas intermediárias, citadas abaixo.

1. Placas (*Slabs*): geralmente com seção retangular de 10" x 1.5". Laminados com objetivo de produzir placas grossas, chapas, chapas finas, etc.
2. Blocos (*Blooms*): geralmente com seção transversal 6" x 6". Laminados com objetivo de produzir perfis estruturais.
3. Tarugos (*Billets*): geralmente com seção retangular 1.5" x 1.5". Laminados com objetivo de produzir hastes, barras, vergalhões, fio-máquinas, etc.

Figura 2 – Processo Simplificado de Laminação e seus produtos finais



Fonte – Adaptado de Assunção et al. (2009)

3.5 Trabalhos Correlatos

Dado o processo de investigação sobre a influência das variáveis do processo de laminação na ocorrência de defeitos em fio-máquina, existem autores na literatura que já estudaram sobre esse tema ou tema relacionado.

Primeiramente, Mattos (2013) apresenta um estudo que tem por objetivo relacionar as variáveis do processo de laminação com cada ocorrência de defeitos no fio-máquina, determinando quais as variáveis de maior impacto, sendo utilizado um total de 29 variáveis. No desenvolvimento de seu trabalho, Mattos (2013) apresenta os principais defeitos ocorridos na época de estudo, em 2013. Diante disso, a autora utiliza a regressão logística binária, através do Minitab para fazer as correlações e apresentar os resultados de cada defeito, além da utilização da ferramenta PDCA ao longo do estudo e posteriormente propostas de melhoria para a empresa.

Soares (2009), apresenta um estudo relacionado. O autor descreve o processo de laminação a quente e a frio, as fases posteriores a essas laminações e todos os defeitos que podem ocorrer ao longo do processo produtivo. Nesses materiais são feitas as análises visuais e os testes metalográficos no laboratório. Ao decorrer do estudo, Soares (2009) apresenta o controle de qualidade da empresa, o estudo da qualidade das bobinas e mostra também onde os defeitos podem se originar. Ao final, ele apresenta as considerações acerca da pesquisa, destacando que conhecer os defeitos dos materiais é essencial para evitar o surgimento dos mesmos e que esta compreensão do processo produtivo pode trazer estratégias adequadas para a análise e detecção dessas ocorrências.

Ribeiro e Miranda (2011), por sua vez, apresentaram aplicações de ferramentas da qualidade com objetivo de minimizar os defeitos em tiras de cobre laminadas a frio. O estudo mostra o índice de má qualidade gerado no processo e como utilizar formas de reduzir esse número. No desenvolvimento, foi utilizado a gestão da qualidade e o ciclo PDCA. Com isso, os autores

apontaram aspectos que deveriam ter uma maior importância no estudo, como problemas de manutenção, variações nos parâmetros do processo, dentre outros. Como resultado, Ribeiro e Miranda (2011) concluíram que mudanças na conduta de trabalho são fatores importantes para o maior controle das variáveis do processo, ou seja, a equipe de trabalho ter uma sistemática de inspeções, checagem de parâmetros como rotina, manutenções preventivas planejadas, dentre outras ações, tornaria factível reduzir o índice de má qualidade do processo.

4 Fundamentação Teórica

4.1 Análise de Componentes Principais

Atualmente, em vários estudos, há uma gama de dados a serem tratados e acabam por si só, tendo um alto grau de dificuldade devido seu tamanho. Com o avanço da tecnologia e das pesquisas, métodos estatísticos vem mostrando sua eficácia nesses trabalhos para a redução da complexidade das informações.

A análise de componentes principais é uma técnica da estatística multivariada que tem por objetivo transformar um conjunto de dados originais em outro conjunto de dados de mesma dimensão denominados de componentes principais (VARELLA, 2008). Essas componentes principais apresentam características importantes, como:

- Cada componente é uma combinação linear de todos os dados originais;
- São independentes entre si;
- São estimados com o propósito de reter o máximo de informação contida nos dados.

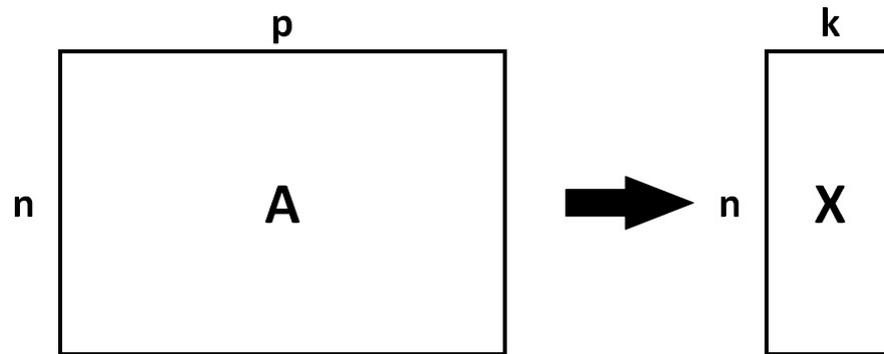
A análise de componentes principais agrupa os dados de acordo com sua variância dentro do seu grupo de origem, ou seja, de acordo com suas características (VARELLA, 2008).

No mesmo sentido, Neto e Moita (1997) definem que a análise de componentes principais constitui-se em reescrever as n -variáveis originais, através de suas combinações lineares, n -componentes principais, em que sua principal característica, além da ortogonalidade, é que são gerados em ordem decrescente de máxima variância explicada.

Mingoti (2007) apresenta que o objetivo principal da PCA é justificar a estrutura de variância e covariância de um vetor qualquer, de p -variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais e que não são correlacionadas entre si. Geralmente, essas combinações (k) são menores que p ($k < p$).

A Figura 3 ilustra bem o objetivo da análise de componentes principais, demonstrando um conjunto de p -variáveis aleatórias que são transformadas em k variáveis linearmente independentes e que podem ter informações a cerca de todo o conjunto de variáveis.

Figura 3 – Análise de Componentes Principais



Fonte – Adaptado de Prati (2018)

4.2 Regressão Logística Binária

Ao se estudar um fenômeno, deve-se coletar dados e informações sobre o mesmo, para a partir disso, aplicar modelos matemáticos e estatísticos para realização de análises e obtenção de resultados. De acordo com Montgomery e Runger (2009) a análise de regressão é um método estatístico que tem por objetivo modelar e identificar a relação entre duas ou mais variáveis.

Para a regressão, existem diferentes formas de análises que podem variar de acordo com a natureza das variáveis do estudo e com a quantidade de variáveis. Essas análises dependem também do modelo criado, que é capaz de desenvolver a relação que vincula essas variáveis. Caso englobe apenas uma variável independente é chamada de regressão simples, caso contrário, se existem várias, se trata de uma regressão múltipla (AYÇAGUER; UTRA, 2004).

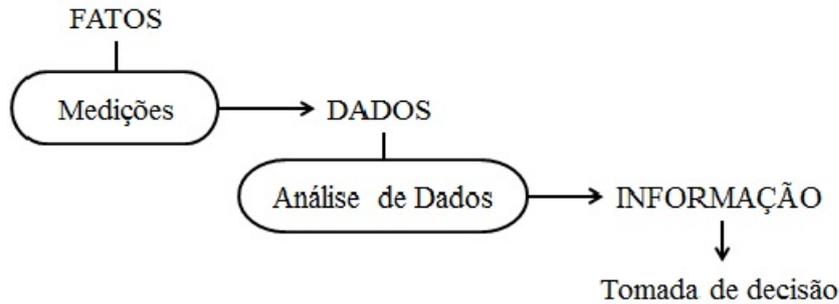
Nesse estudo, usaremos a Regressão Logística Binária, que segundo Hair et al. (2009) é um método diferenciado de regressão que utiliza um modelo para explicar e prever uma variável categórica binária (0 ou 1) e não uma medida dependente métrica.

Esse tipo de regressão pode ser caracterizado como simples ou múltipla. No presente estudo é semelhante a múltipla, uma vez que a natureza das informações é mais complexa e apenas uma variável independente não é suficiente para resolver o problema. É importante destacar também, que a variável resposta expressa o sucesso ou não do modelo e no caso desse trabalho, é objetivado estabelecer relações entre a ocorrência do defeito no fio-máquina com as variáveis do processo (AYÇAGUER; UTRA, 2004).

De acordo com Hosmer e Lemeshow (2000) para o estudo da Regressão Logística é importante entender que o objetivo da análise utilizando o método é o mesmo que várias outras maneiras de estudos estatísticos: encontrar o melhor modelo e que seja mais parcimonioso, e ainda, que seja um modelo razoável para descrever a relação entre a variável resposta e um conjunto de variáveis independentes.

A Regressão Logística, utiliza de métodos para tratar os dados e assim dar suporte para a tomada de decisões, como mostra a Figura 4 e também como mostra a formulação da Regressão Logística 4.1.

Figura 4 – Processo de análise de dados para tomada de decisão



Fonte – Bissacot (2015)

$$Z_i = \left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right) = B_0 + B_1 X_{1i} + \dots + B_k X_{ki} \quad \forall Y_i \in 0; 1 \quad (4.1)$$

Sendo:

 i = Cada caso de uma amostra de tamanho n ; Y_i = Variável dependente dicotômica (Ocorrência = 1 e Não-Ocorrência = 0); Z_i = Logito; p_i = Probabilidade de ocorrência; $1 - p_i$ = Probabilidade de não ocorrência; B_0 = Constante; B_k = Coeficientes de regressão; X_{ki} = Variável independente k (preditor) métrica ou dicotômicas.

4.2.1 Sensibilidade e Especificidade

Para os resultados da Regressão Logística, é importante verificar as probabilidades condicionais, chamadas sensibilidade e as especificidade dos dados. Estas medidas vão determinar a eficiência do modelo em detectar a verdade.

A sensibilidade (s) é definida como a probabilidade de o teste ser positivo, dado que o objeto testado é realmente positivo (verdadeiro positivo). Já a especificidade (e) é definida como a probabilidade de o teste ser negativo, dado que o objeto testado é realmente negativo (verdadeiro negativo) (COLOSIMO, 2011). A Tabela 4 apresenta a tabela de contigência que representa essa análise.

Tabela 1 – Matriz de confusão

		VALOR OBSERVADO	
		Y = 0	Y = 1
VALOR PREDITO	Y = 0	VN (verdadeiro negativo)	FN (falso negativo)
	Y = 1	FP (falso positivo)	VP (verdadeiro positivo)

Fonte – Elaborado pelo autor

5 Apresentação da Empresa

5.1 A empresa

A empresa de estudo é uma das maiores produtoras de aços longos e trefilados no Brasil, tendo seu know-how na produção de fio-máquina para aplicações na indústria automotiva, construção civil, trefilados e uso geral. Atualmente, sua capacidade no Brasil é de 3,8 milhões de toneladas de aço bruto por ano. As operações da empresa estão presentes em Minas Gerais e São Paulo.

A unidade estudada será uma usina situada em Minas Gerais, que é a principal produtora do grupo de longos. Seu processo produtivo é integrado, desde a extração do minério de ferro na mina (mais ou menos 11 km da usina e que faz parte do grupo) até as etapas intermediárias e finais, como Sinterização, Redução em Auto Forno, Refino do Aço na Aciaria, Lingotamento Contínuo, Laminação, Controle de Qualidade e Expedição.

A Figura 5 ilustra o processo produtivo da Usina em questão.

Figura 5 – Processo Produtivo da Usina



Fonte – Apostila de Treinamento de Laminação (2009) - Adaptado pelo autor.

O produto final da Usina é o fio-máquina, que é produzido para aplicações principalmente de Molas Helicoidais (indústria automotiva) e *Steel Cord*, cordonéis de aço para reforço de pneus, que são materiais de alto valor agregado e de grande utilização tanto para importação quanto exportação, fazendo da unidade uma das melhores empresas nesse segmento.

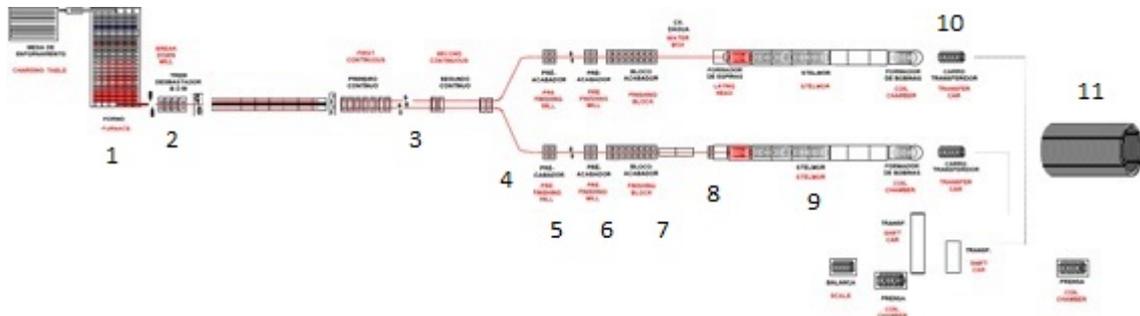
A Usina conta com 3 Laminadores, sendo o Trem Laminador 1, que tem pouco mais de 50 anos e opera com 2 linhas de laminação e será nosso objeto de estudo. O Trem Laminador 2, um pouco mais moderno, com foco em produção de Molas Helicoidais e por fim, o Trem Laminador 3, desenvolvido recentemente e que está em fase de testes.

5.2 Descrição do Processo do Laminador 1

O Trem Laminador 1 foi inaugurado no dia 26 de março de 1968 e foi o primeiro laminador da Usina. Desde então, seu processo produtivo tem passado por modernizações até chegar ao ponto atual. Anteriormente, o Trem Laminador 1, contava com 3 linhas de laminação e após alguns anos foi reestruturado para somente 2 linhas de laminação (Linha A e Linha B).

A Figura 6 mostra como é o Trem de Laminação 1 atualmente.

Figura 6 – Layout do Laminador 1



Fonte – Apostila de Treinamento de Laminação (2009) - Adaptado pelo autor.

O Laminador 1 é dividido da seguinte maneira:

- Forno Davy Soleira Caminhante – Capacidade de 120 toneladas/hora (1);
- BDM Horizontal/Vertical – Cadeiras Housing Less (2);
- Trem Contínuo com Aparelhos de Torção – Cadeiras Convencionas (3);
- Laço 1A e Laço 1B – Separação para Linha A e Linha B (4);
- 2 Blocos Pré-Acabadores em cada linha – Cadeiras Cantilever (5);
- 1 Bloco Acabador No Twist (NT) em cada linha – Cadeiras Cantilever (6);
- 1 Mini-Bloco em cada linha (7);
- Caixas D'água (entre 5 e 7);
- Formador de Espiras (8);
- Stelmor Standard Cooling – Esteiras para resfriamento do material através de ventiladores (9);
- Formador de Bobinas (10);
- Compactador de Bobinas (11).

A capacidade produtiva atual do Laminador 1 é de 720.000 toneladas/ano. A matéria prima do processo é o tarugo, este possui seção quadrada que varia de 150mm x 150mm x 10,40m a 155mm x 155mm x 12m e peso de 2,2 toneladas. Esse material passa pelo reaquecimento no forno Davy e é introduzido nas primeiras cadeiras de laminação chamadas desbastadoras (BDM), que começam a dar o formato redondo ao tarugo. Logo após é feita a conformação pelo

primeiro e segundo contínuos, em que são seções redondas pares e ovais ímpares. A partir do Laço 1, é separada as linhas em A e B e se dá início ao acabamento do material pelos blocos pré-acabadores, acabadores e mini-blocos, chegando a uma velocidade final de aproximadamente 92m/s. Nesta parte, se dá início ao processo de resfriamento do material através das caixas d'água e posteriormente, o Stelmor, em que há o funcionamento de ventiladores. Ao final, encontra-se o formador de bobinas, seguido dos carros transpostadores e compactadores.

O material produzido no Laminador 1 varia de bitolas entre 4.75mm até 8.00mm, sendo sua grande maioria laminadas na bitola de 5.50mm. O aço de aplicação final de maior destaque nesse laminador é o *Steel Cord*, produzido para pneus radiais, mas são produzidos também materiais para lâ de aço, fixadores, molas, eletrodos, dentre outros.

5.3 Defeitos de Laminação

Como todo processo produtivo, a laminação é passível de problemas de qualidade, seja por erros humanos ou falhas inerentes ao processo. Por isso, é sempre importante realizar a inspeção do material e identificar as variáveis que influenciam nessas ocorrências de defeitos. Os defeitos do fio-máquina mais frequentes no processo são:

- **Bolha (BO):** são erupções que aparecem na superfície da carepa do fio-máquina, na parte não resfriada ou por falha no resfriamento (geralmente, cabeça e cauda do material), ilustrado na Figura 7 (LIMA, 2012).

Figura 7 – Defeito Bolha



Fonte – Lima (2012)

- **Carepa (CA):** é um constituinte importante para a proteção da superfície do fio-máquina. Quando essa carepa começa a soltar do material, já que o ferro do aço exposto reage com o oxigênio do ar, uma oxidação é formada. Com isso, tem-se um material “descoberto” de sua proteção e ocasiona a oxidação precoce, ilustrado na Figura 8 (LIMA, 2012).

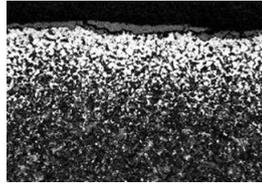
Figura 8 – Defeito Carepa



Fonte – Lima (2012)

- **Descarbonetação (DC):** é gerado pela perda superficial do carbono do aço em contato com o oxigênio da atmosfera de combustão. Quanto maior o tempo de exposição do tarugo à atmosfera de combustão maior a camada descarbonetada, ilustrado na Figura 9 (LIMA, 2012).

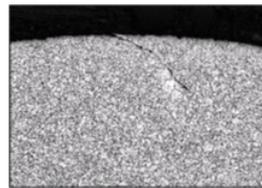
Figura 9 – Defeito Descarbonetação



Fonte – Lima (2012)

- **Dobra (DB):** são descontinuidades que vão da superfície do material até o interior do fio-máquina, penetrando obliquamente e mantendo-se geralmente paralelas ao seu eixo longitudinal, ilustrado na Figura 10 (LIMA, 2012).

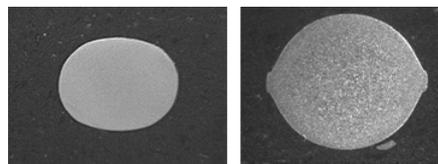
Figura 10 – Defeito Dobra



Fonte – Lima (2012)

- **Fora de Tolerância e Rebarba (FT e RB):** é a diferença entre a largura e altura do material, ocasionada na maioria das vezes por uma falta de regulagem nos discos de laminação, ilustrado na Figura 11 (LIMA, 2012).

Figura 11 – Defeitos Fora de Tolerância e Rebarba



Fonte – Lima (2012)

- **Má Formação dos Rolos e Espiras (FL e FE):** são defeitos gerados por variações em muitas partes do laminador e que geram rolos com problemas de espiras salientes, corcovas, rolo bambo, dentre outros, ilustrado na Figura 12 (LIMA, 2012).

Figura 12 – Defeito Má Formação de Rolo



Fonte – Lima (2012)

- **Palha (PC, PB, P2):** são lascas, relativamente delgadas, em forma de escamas, incompletamente aderidas à superfície do fio-máquina. O espaço entre a palha e o fio-máquina é geralmente preenchido por carepa, ilustrado na Figura 13 (LIMA, 2012).

Figura 13 – Defeito Palha



Fonte – Lima (2012)

- **Trinca (TR):** são descontinuidades, mais comumente retilíneas, partindo da superfície do fio-máquina e que penetram perpendicularmente ou oblíquas ao eixo longitudinal, ilustrado na Figura 14 (LIMA, 2012).

Figura 14 – Defeito Trinca



Fonte – Lima (2012)

5.4 Apresentação das Variáveis

No processo de laminação, é possível identificar muitas variáveis que podem influenciar nas ocorrências de defeitos em fio-máquina. Cada parte do laminador tem suas peculiaridades e

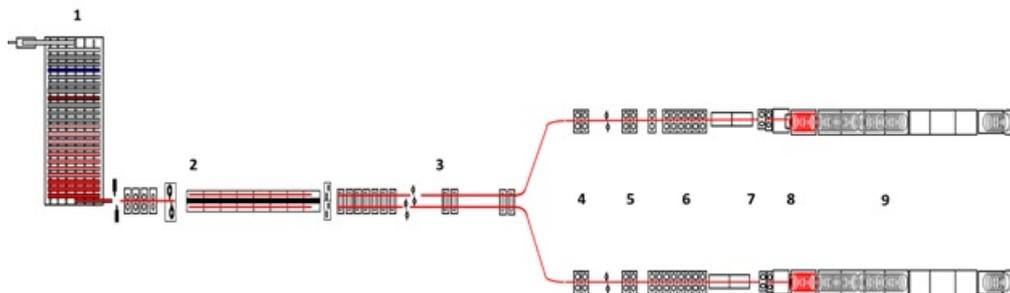
o bom funcionamento de cada equipamento mostra um bom resultado do todo. As variáveis são pontos importantes de atenção para o bom desenvolvimento de maneira sustentável. A Tabela 2 mostra as variáveis que serão analisadas durante o estudo e relaciona com a Figura 15 em qual parte do laminador essa variável se encontra.

Tabela 2 – Variáveis do Estudo

Variáveis	Local no Laminador	Variáveis	Local no Laminador	Variáveis	Local no Laminador
v1	1 - Forno de reaquecimento	v23	4, 5, 6 e 7 - Pré acabadores, bloco acabadores e mini-blocos	v44	8 - Formador de espiras
v2		v24		v45	
v3		v25		v46	
v4		v26		v47	
v5	2 - BDM e mesa coberta	v27		v48	
v6		v28		v49	
v7		v29		v50	
v8		v30		v51	
v9	3 - 1º e 2º trem contínuos	v31		9 - Stelmor	v52
v10		v32			v53
v11		v33			v54
v12		v34			v55
v13		v35			v56
v14		v36			v57
v15		v37			v58
v16		v38			v59
v17		v39	v60		
v18		v40	v61		
v19		v41		v62	
v20		v42		v63	
v21		v43		v64	
v22				v65	
				v66	10
				v67	

Fonte – Elaborado pelo autor

Figura 15 – Variáveis ao longo do Laminador 1



Fonte – Assunção et al. (2009)

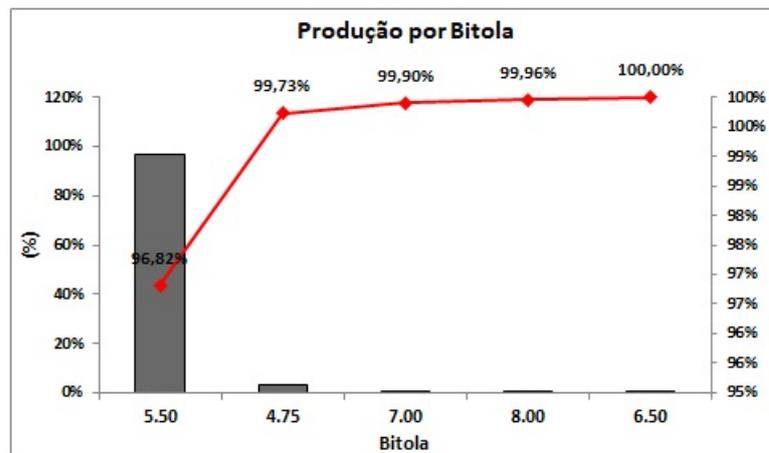
5.5 Descrição do problema

Para o estabelecimento dos objetivos propostos, foi necessário identificar e definir um problema de pesquisa, isto é, um resultado indesejável dentro da empresa para que este seja estudado e sejam feitas propostas de melhoria.

Dessa forma, foram realizadas estratificações para definir o foco do estudo. Como citado anteriormente, o material de destaque no Trem Laminador 1, é o *Steel Cord*. É neste material que iremos iniciar nossos testes, pois é neste segmento que se concentram os aços de maior qualidade e valor agregado para a empresa. É importante fazer uma separação por bitolas nesses materiais, pois cada tipo de bitola é uma variação e especificação diferente para o processo produtivo.

Como mostra o gráfico da Figura 16, a maior quantidade de material produzido é na bitola de 5.50mm, representando um total de aproximadamente 97% e nele seguiremos os estudos.

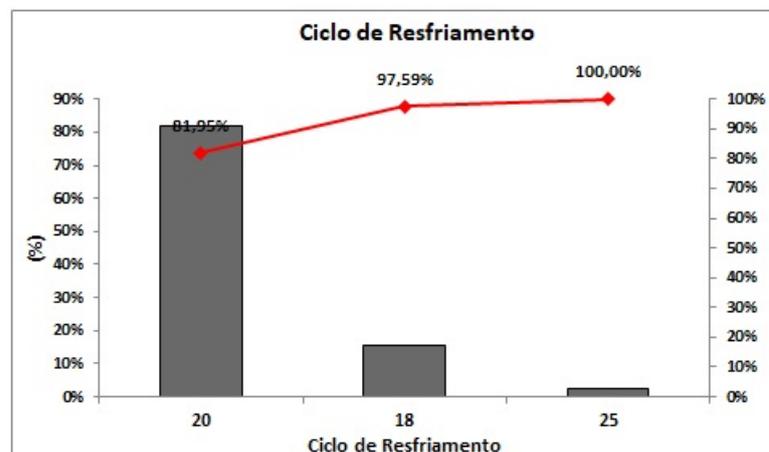
Figura 16 – Produção de Fio-Máquina por Bitola



Fonte – Empresa de estudo - Adaptado pelo autor.

Para o Ciclo de Resfriamento (CR), é importante fazer uma comparação, pois nele também há diferenças para cada ciclo, como temperaturas de resfriamento e velocidades finais, influenciando nos resultados. De acordo com o gráfico da Figura 17, será dado o foco no CR 20, com aproximadamente 82% da produção total da bitola de 5.50mm.

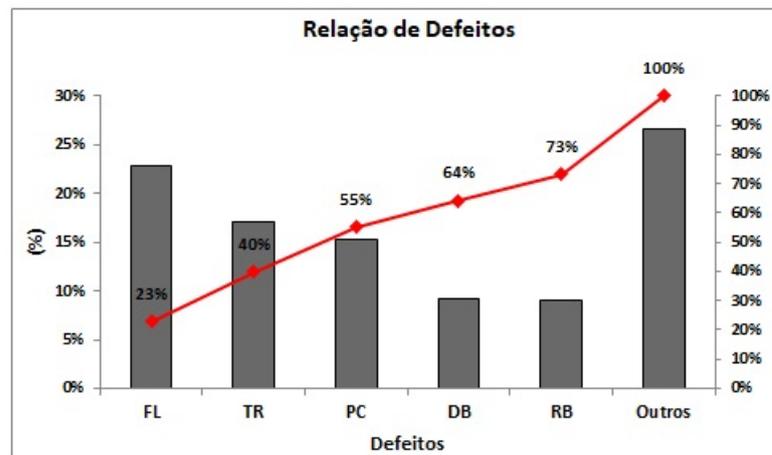
Figura 17 – Ciclos de Resfriamento



Fonte – Empresa de estudo - Adaptado pelo autor.

Por fim, como observado, o material de bitola 5.50mm e com CR 20, são os mais produzidos no Laminador 1, então é preciso definir quais as maiores ocorrências de defeitos no fio-máquina. Essas ocorrências de defeitos foram separadas apenas o material sucateado, ou seja, que não foi possível reaproveitar, tendo uma perda de 100% e também a perda total do custo de produção. O gráfico da Figura 18, mostra que a grande perda do Laminador 1 é o defeito chamado de Má Formação de Rolos (FL), com 23% do total de rejeitos e devido a isso será prioridade na análise de dados e na proposição de soluções para a empresa.

Figura 18 – Causas de sucateamento no Fio-Máquina



Fonte – Empresa de estudo - Adaptado pelo autor.

A má formação de rolos (FL) é um dos defeitos que mais causam impactos negativos não só no Laminador, mas em toda a usina e também no cliente. A exemplo dos prejuízos na empresa tem-se o aumento do índice de retrabalho, que são os rolos que necessitam de serem recuperados para uma possibilidade de voltarem a conformidade; a maior exposição ao risco do operador, por ter que atuar diversas vezes quando há ocorrências; perda do custo de produção; dentre outros. Já no cliente, tem-se o risco de queda de bobinas devido ao FL e não encaixe correto das mesmas nos equipamentos de processamento; embolamentos; dentre outros. A Figura 19 ilustra um rolo mal formado e um rolo com boa formação:

Figura 19 – Diferença entre um rolo mal formado e um rolo bem formado



Fonte – Lima (2012) e Assunção et al. (2009)

6 Análises, Resultados e Discussões

6.1 Correlações

Com objetivo de verificar as mais altas correlações entre as variáveis do processo de laminação e a ocorrência do defeito de má formação de rolo, foram feitas análises estatísticas utilizando PCA e a regressão logística binária, através do *Software R*. Após fazer o mínimo, máximo, média e desvio padrão de todas as variáveis do processo de laminação e o delta das velocidades, totalizando 297 variáveis, foram colocados os dados na planilha de Excel e identificado através de uma nova coluna quais das 204 corridas ocorreram algum tipo de defeito FL (identificação binária, 0 para não defeituosa ou 1 para defeituosa) e assim jogados no *Software R* a fim de se dar início as análises.

Ao início foi realizada uma análise de correlação entre o defeito FL e as variáveis de estudo, obtendo-se o resultado apresentado nas Figuras 20, 21.

Figura 20 – Correlação entre variáveis e defeito

```

vmax_1   vmin_1   vmed_1   vsd_1   vmax_2   vmin_2
[1,] -0.02868789 -0.09053171 -0.09049936 0.08517136 0.0979434 -0.003892282
vmed_2   vsd_2   vmax_3   vmin_3   vmed_3   vsd_3
[1,] 0.05523824 0.06700058 -0.04447701 -0.03274424 -0.09578668 0.09848509
vmax_4   vmin_4   vmed_4   vsd_4   vmax_5   vmin_5
[1,] 0.03404986 0.01368024 0.04709572 0.05260344 -0.04434747 -0.15463
vmed_5   vsd_5   vmax_6   vmin_6   vmed_6   vsd_6
[1,] -0.1082062 0.1532638 0.07604998 -0.1831718 -0.07120171 0.2167985
vmax_7   vmin_7   vmed_7   vsd_7   vmax_8   vmin_8
[1,] 0.08404827 -0.1825161 0.006377156 0.1871412 0.127377 -0.09270679
vmed_8   vsd_8   vmax_9   vmin_9   vmed_9   vsd_9
[1,] 0.01909833 0.1562747 0.03127311 -0.1895462 -0.05435327 0.07441964
vmax_10  vmin_10  vmed_10  vsd_10  vmax_11  vmin_11
[1,] -0.2627977 -0.2089886 -0.2964929 0.2172709 -0.1915305 -0.2163379
vmed_11  vsd_11  vmax_12  vmin_12  vmed_12  vsd_12  vmax_13
[1,] -0.3067826 0.2412606 -0.2377846 -0.1703669 -0.2839726 0.19203 -0.2845358
vmin_13  vmed_13  vsd_13  vmax_14  vmin_14  vmed_14  vsd_14
[1,] -0.1942167 -0.3401128 0.2066946 -0.2753952 -0.2063593 -0.3033515 0.2023108
vmax_15  vmin_15  vmed_15  vsd_15  vmax_16  vmin_16
[1,] -0.2784785 -0.2213377 -0.3249287 0.2213967 -0.2854255 -0.2214242
vmed_16  vsd_16  vmax_17  vmin_17  vmed_17  vsd_17  vmax_18
[1,] -0.3274673 0.2204748 -0.2849771 -0.237741 -0.3211926 0.217682 -0.2627154
vmin_18  vmed_18  vsd_18  vmax_19  vmin_19  vmed_19  vsd_19
[1,] -0.2386354 -0.3115627 0.2238731 -0.2689738 -0.2065933 -0.3035009 0.2094751
vmax_20  vmin_20  vmed_20  vsd_20  vmax_21  vmin_21  vmed_21
[1,] -0.2438468 -0.1574256 -0.2724335 0.1654168 -0.2576656 -0.136263 -0.2790369
vsd_21  vmax_22  vmin_22  vmed_22  vsd_22  vmax_23  vmin_23
[1,] 0.1428011 -0.276029 -0.1478162 -0.2958414 0.1474988 -0.2197158 -0.07672927
vmed_23  vsd_23  vmax_24  vmin_24  vmed_24  vsd_24
[1,] -0.1310994 -0.0005204631 -0.1828042 -0.01605138 -0.158534 -0.04492986
vmax_25  vmin_25  vmed_25  vsd_25  vmax_26  vmin_26
[1,] -0.1858827 -0.02520521 -0.1558719 -0.05116902 -0.04607414 -0.06438269
vmed_26  vsd_26  vmax_27  vmin_27  vmed_27  vsd_27
[1,] -0.08910462 0.0614183 0.06303016 -0.09653689 0.009803726 0.1350861
vmax_28  vmin_28  vmed_28  vsd_28  vmax_29  vmin_29
[1,] -0.2592825 -0.185438 -0.2717666 0.04766807 0.009413538 -0.1047905
vmed_29  vsd_29  vmax_30  vmin_30  vmed_30  vsd_30  vmax_31
[1,] -0.0614047 0.103229 -0.05101919 -0.1212551 -0.2018704 0.139636 0.1616314
vmin_31  vmed_31  vsd_31  vmax_32  vmin_32  vmed_32
[1,] -0.05825647 -0.0168764 0.08786055 0.05641685 0.03832862 0.04662603
vsd_32  vmax_33  vmin_33  vmed_33  vsd_33  vmax_34
[1,] -0.02138476 -0.03772633 -0.1199799 -0.2070521 0.1359646 0.2127416
vmin_34  vmed_34  vsd_34  vmax_35  vmin_35  vmed_35
[1,] 0.02440212 0.02066582 0.1357748 0.03835101 0.02440212 -0.08079439
vsd_35  vmax_36  vmin_36  vmed_36  vsd_36  vmax_37  vmin_37
[1,] 0.02419369 0.1309722 0.04348265 0.1512411 0.02765028 0.08606457 0.0248333
vmed_37  vsd_37  vmax_38  vmin_38  vmed_38  vsd_38
[1,] 0.1737164 -0.0200202 -0.1926848 -0.1332762 -0.178171 -0.05190533

```

Fonte – Elaborado pelo autor

Figura 21 – Correlação entre variáveis e defeito - Continuação

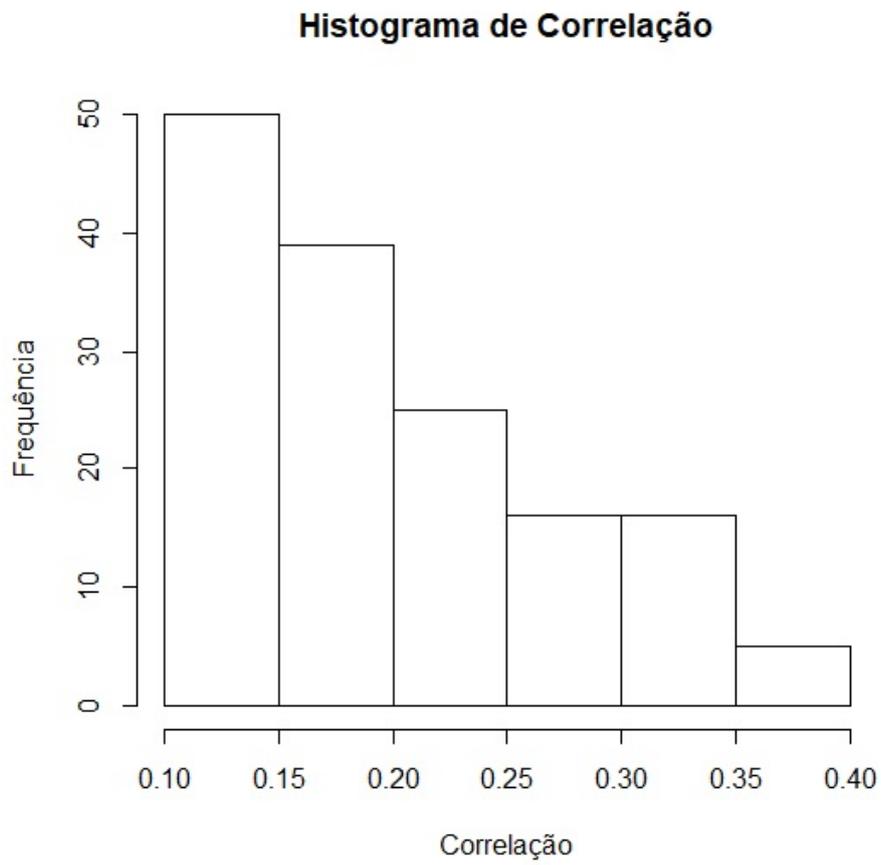
[1,]	vmax_39	vmin_39	vmed_39	vsd_39	vmax_40	vmin_40
[1,]	-0.09246919	-0.06496957	-0.07327319	-0.01640911	0.2341151	-0.02748955
	vmed_40	vsd_40	vmax_41	vmin_41	vmed_41	vmax_42
[1,]	0.02660947	0.1253452	0.06777865	-0.1396031	-0.09699548	0.2113847
	vmin_42	vmed_42	vsd_42	vmax_43	vmin_43	vmed_43
[1,]	-0.01398169	0.1453432	0.2258863	0.1203385	-0.1573861	-0.04908808
	vmax_44	vmin_44	vmed_44	vsd_44	vmax_45	vmin_45
[1,]	-0.1687993	-0.090739	-0.1449829	-0.02384817	-0.1818841	-0.09263811
	vmed_45	vsd_45	vmax_46	vmin_46	vmed_46	vmax_47
[1,]	-0.1469021	-0.05661277	-0.1802965	-0.06821658	-0.1605537	-0.0275308
	vmin_47	vmed_47	vsd_47	vmax_48	vmin_48	vmax_49
[1,]	-0.1897753	-0.13134	-0.1667905	-0.02431708	0.111447	-0.04443575
	vmed_48	vsd_48	vmax_49	vmin_49	vmed_49	vsd_49
[1,]	0.006952155	0.07418353	0.03281515	-0.1021725	-0.01416183	0.1342945
	vmax_50	vmin_50	vmed_50	vsd_50	vmax_51	vmin_51
[1,]	0.1133228	0.0548601	-0.06462228	-0.002905835	0.02564163	0.06545912
	vmed_51	vsd_51	vmax_52	vmin_52	vmed_52	vsd_52
[1,]	-0.103543	-0.0196992	0.01121329	-0.1099047	-0.1344067	0.1048772
	vmax_53	vmin_53	vmed_53	vsd_53	vmax_54	vmin_54
[1,]	-0.00169641	-0.1435631	-0.08443588	0.1022919	-0.08879218	-0.102384
	vmed_54	vsd_54	vmax_55	vmin_55	vmed_55	vsd_55
[1,]	-0.1517608	0.07610967	-0.05289753	-0.1484763	-0.09643013	0.08035773
	vmax_56	vmin_56	vmed_56	vsd_56	vmax_57	vmin_57
[1,]	-0.07434243	-0.1264579	-0.1586537	0.101616	-0.04719781	-0.1641333
	vmed_57	vsd_57	vmax_58	vmin_58	vmed_58	vsd_58
[1,]	-0.09996901	0.1008307	0.02935428	-0.06958771	-0.02576441	0.1134521
	vmax_59	vmin_59	vmed_59	vsd_59	vmax_60	vmin_60
[1,]	0.003861455	-0.1069893	-0.01275137	0.05025204	0.02288401	-0.07197212
	vmed_60	vsd_60	vmax_61	vmin_61	vmed_61	vsd_61
[1,]	-0.02959044	0.1085532	-0.006631294	-0.1108992	-0.01634586	0.03316003
	vmax_62	vmin_62	vmed_62	vsd_62	vmax_63	vmin_63
[1,]	0.02257962	-0.03435411	0.02305967	0.08873052	-0.008944539	-0.08207727
	vmed_63	vsd_63	vmax_64	vmin_64	vmed_64	vsd_64
[1,]	0.03278302	0.01095633	0.0346487	-0.03316901	-0.009839317	0.07014138
	vmax_65	vmin_65	vmed_65	vsd_65	vmax_66	vmin_66
[1,]	0.01293543	-0.03806365	0.01048248	0.04092755	0.1097362	0.09054267
	vmed_66	vsd_66	vmax_67	vmin_67	vmed_67	vsd_67
[1,]	0.1010221	0.08537567	0.1186638	0.1127639	0.1137514	0.03888852
	v6_v7	v7_v8	v8_v9	v9_v10	v10_v11	v11_v12
[1,]	0.07323027	0.02213836	-0.07584122	-0.191702	-0.1675003	-0.07758646
	v12_v13	v13_v14	v14_v15	v15_v16	v16_v17	v17_v18
[1,]	-0.324535	-0.08756709	-0.3048248	-0.2508572	-0.253077	-0.247144
	v19_v20	v20_v21	v21_v22	v22_v23	v22_v24	v23_v26
[1,]	-0.09320045	-0.2702547	-0.2999975	0.01692576	0.06912835	-0.04506246
	v24_v25	v25_v27	v26_v28	v27_v38	v28_v39	v38_v46
[1,]	-0.1005435	0.03560156	-0.2606952	-0.1681191	-0.002065842	0.1706165
	v39_v47					
[1,]	-0.002171685					

Fonte – Elaborado pelo autor

Dentre os valores de correlações encontrados, foram selecionados os valores absolutos maiores que 0.1 para se fazer uma análise gráfica. Foi feito um histograma, com intuito de facilitar a análise. Na Figura 22, está o histograma dos dados de uma amostra de tamanho 151. É possível observar que as maiores frequências estão entre 0.1 a 0.30, que são correlações relativamente baixas. Porém, é observado também que as correlações mais altas estão entre 0.30 a 0.40, com frequências mais baixas mas com possíveis impactos para o problema.

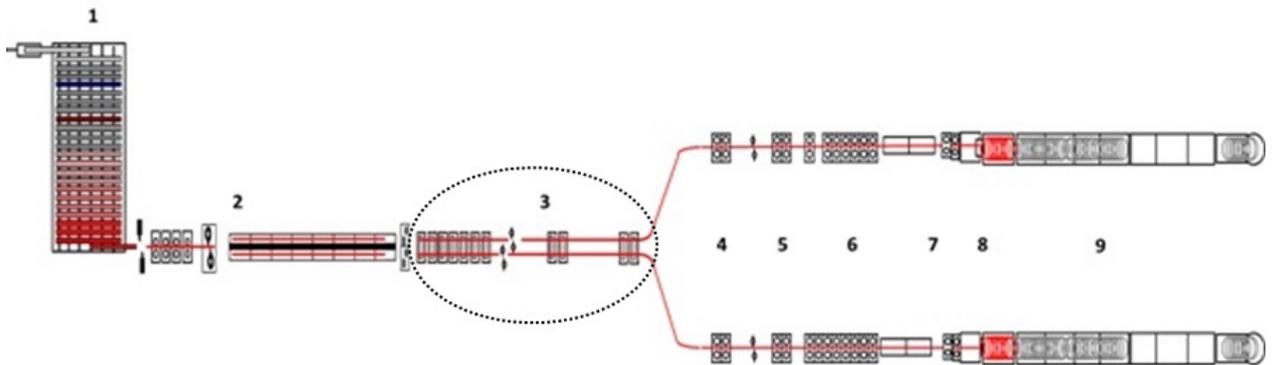
Selecionando as maiores correlações absolutas (0.3 a 0.4), foi possível analisar as variáveis que obtiveram esses valores. A Tabela 3 mostra as variáveis de maior correlação e a Figura 23 mostra onde se encontram essas variáveis, que é chamado de 1^o e 2^o contínuos da laminação.

Figura 22 – Histograma da distribuição de correlações



Fonte – Elaborado pelo autor

Figura 23 – Local das maiores correlações entre variáveis



Fonte – Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Correlação para cada variável

ABS	VARIÁVEIS
0,38	Velocidade G4
0,37	Velocidade G7
0,37	Velocidade G6
0,36	Delta G4 e G3
0,36	Velocidade G8
0,35	Velocidade G9
0,35	Velocidade G5
0,34	Velocidade G2
0,34	Velocidade G10
0,34	Max Velocidade G4
0,34	Delta G6 e G5
0,33	Max Velocidade G7
0,33	Max Velocidade G6
0,33	Max Velocidade G5
0,32	Max Velocidade G8
0,32	Velocidade G3
0,31	Velocidade 18 a 25
0,31	Velocidade G13
0,31	Velocidade G1
0,31	Delta G13 e G12
0,30	Max Velocidade G1
0,30	Velocidade G11
0,30	Max Velocidade 18 a 25
0,30	Max Velocidade G9
0,30	Max Velocidade G10
0,30	Velocidade G12
0,30	Delta G9 e G8

Fonte – Elaborado pelo autor

Fazendo-se uma análise crítica do real problema dentro da empresa e os estudos feitos até o momento, tem-se duas vertentes diferentes no que diz respeito aos parâmetros que influenciam na ocorrência de FL. Uma acredita que os parâmetros do final do processo, velocidade final, vibração do formador de espiras e velocidades do stelmor são as mais significativas. Já a outra teoria, é que as variáveis do processo envolvendo os equipamentos do 1º e 2º contínuos são as mais significativas, mas ambas sem nenhum estudo detalhando e comprovando tais influencias.

As relações de correlação apresentadas nesse estudo, podem-se dizer verdadeiras, pois, um laminador estabilizado propaga a correta forma de utilização de parâmetros ao longo da laminação, sem a ocorrência de nenhuma alteração e/ou interferência, sejam externas através da atuação dos operadores ou através da própria capacidade de cada gaiola de laminação para suas respectivas velocidades. Porém, quando há uma desestabilidade logo no início da laminação, essa desestabilização age como um efeito dominó, ou seja, impulsiona ao erro desde o princípio da produção.

De acordo com o estudo, as velocidades no 1º e 2º contínuos causam um efeito chicote,

ou seja, um fenômeno que pode interromper o fluxo harmônico da cadeia produtiva ao longo da laminação, ocasionando uma maior instabilidade entre os parâmetros e resultando em uma dificuldade que é a má formação das espiras ao longo do stelmor, devido o material chegar nesta parte já influenciado pelas interferências do início da laminação.

6.2 PCA e Regressão Logística

O próximo passo foi realizar a PCA para reduzir o número de variáveis do estudo a fim facilitar as análises. Com isso, foram selecionadas todas as variáveis com correlação maior que 0.1. Os resultados são apresentados na Figura 24. Pode-se observar que de um banco de dados com 297 variáveis, foi possível reduzir para 52 variáveis linearmente independentes através da PCA.

Figura 24 – PCA para variáveis com correlação acima de 0.1

Importance of components:								
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6		
Standard deviation	519.0742	335.6373	245.0551	196.7891	144.50053	70.60106		
Proportion of Variance	0.5295	0.2214	0.1180	0.0761	0.04103	0.00979		
Cumulative Proportion	0.5295	0.7508	0.8688	0.9449	0.98597	0.99577		
	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12		
Standard deviation	32.92778	21.28878	17.55746	10.95642	6.94152	5.62880		
Proportion of Variance	0.00213	0.00089	0.00061	0.00024	0.00009	0.00006		
Cumulative Proportion	0.99790	0.99879	0.99939	0.99963	0.99972	0.99979		
	PC13	PC14	PC15	PC16	PC17	PC18	PC19	
Standard deviation	4.81175	4.49811	4.24638	3.68944	3.60913	3.12311	1.98059	
Proportion of Variance	0.00005	0.00004	0.00004	0.00003	0.00003	0.00002	0.00001	
Cumulative Proportion	0.99983	0.99987	0.99991	0.99993	0.99996	0.99998	0.99999	
	PC20	PC21	PC22	PC23	PC24	PC25	PC26	PC27
Standard deviation	1.72403	1.492	0.7313	0.6189	0.5231	0.365	0.3113	0.2734
Proportion of Variance	0.00001	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
Cumulative Proportion	0.99999	1.000	1.0000	1.0000	1.0000	1.000	1.0000	1.0000
	PC28	PC29	PC30	PC31	PC32	PC33	PC34	
Standard deviation	0.2284	0.201	0.1647	0.1543	0.1041	0.09699	0.08082	
Proportion of Variance	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000	
Cumulative Proportion	1.0000	1.000	1.0000	1.0000	1.0000	1.00000	1.00000	
	PC35	PC36	PC37	PC38	PC39	PC40	PC41	
Standard deviation	0.07727	0.06386	0.04047	0.02747	0.02223	0.01943	0.01566	
Proportion of Variance	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
Cumulative Proportion	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	
	PC42	PC43	PC44	PC45	PC46	PC47		
Standard deviation	0.01419	0.01207	0.01025	0.009552	0.009267	0.008145		
Proportion of Variance	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000	0.000000	0.000000		
Cumulative Proportion	1.00000	1.00000	1.00000	1.000000	1.000000	1.000000		
	PC48	PC49	PC50	PC51	PC52			
Standard deviation	0.007602	0.007347	0.006145	0.00451	0.004033			
Proportion of Variance	0.000000	0.000000	0.000000	0.00000	0.000000			
Cumulative Proportion	1.000000	1.000000	1.000000	1.00000	1.000000			

Fonte – Elaborado pelo autor

A partir da PCA, foi decidido utilizar as 4 primeiras principais componentes para dar continuidade ao estudos e realizar o modelo de Regressão Logística, pois elas são capazes de explicar aproximadamente 95% da variabilidade contida nas informações.

Utilizando PC1, PC2, PC3 e PC4 foi montado o modelo (sendo necessário especificar as variáveis explicativas e a variável resposta do modelo) de Regressão Logística, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 25. Como observado, a principal componente 3 é a de maior importância no modelo.

Figura 25 – Resultados Regressão Logística Binária - saída do *Software R*

```

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.0828 -0.4645 -0.3698 -0.3174  2.5469

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.3414394  0.2673709  -8.757 < 2e-16 ***
PC1          -0.0006139  0.0004018  -1.528  0.12656
PC2          -0.0001315  0.0006909  -0.190  0.84905
PC3           0.0027376  0.0009590   2.855  0.00431 **
PC4          -0.0004847  0.0010233  -0.474  0.63574
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
    
```

Fonte – Elaborado pelo autor

Tabela 4 – Matriz de confusão

VALOR PREDITO	VALOR OBSERVADO		
		Y = 0	Y = 1
	Y = 0	VN (verdadeiro negativo)	FN (falso negativo)
Y = 1	FP (falso positivo)	VP (verdadeiro positivo)	

Fonte – Elaborado pelo autor

Após a Regressão Logística binária, foi realizada uma análise de sensibilidade para verificar os falsos positivos (FP), falsos negativos (FN), verdadeiros positivos (VP) e verdadeiros negativos (VN) que tem maior impacto para o problema e assim identificar as probabilidades de ocorrência do defeito. A Tabela 4 mostra o significado de cada valor e a Tabela 5 mostra a variação dos valores de acordo com o ' α '. Esse ' α ' é o classificador baseado no desempenho do modelo, ou seja, para um ' α ' baixo, tem-se uma boa classificação de VP's, mas, com muitos FP's, já para um ' α ' mais alto, tem-se uma boa classificação de VP's, mas com o aumento dos FN's .

Fazendo-se uma explicação da Tabela 4 em concordância com o estudo, temos o VN, como os valores que realmente não têm ocorrência de defeitos, o FN, como os valores que supostamente não tem ocorrência de defeitos, porém na realidade ocorre o defeito, o FP, como os valores que supostamente têm defeitos, mas na realidade não têm e por fim, o VP, como os valores que realmente têm a ocorrência de defeitos.

Tabela 5 – Variação dos VP, VN, FP e FN de acordo com 'α'

α = 0.10		0	1	α = 0.30		0	1
	0	127	8		0	178	16
	1	55	14		1	4	6
α = 0.15		0	1	α = 0.35		0	1
	0	151	13		0	181	17
	1	31	9		1	1	5
α = 0.20		0	1	α = 0.40		0	1
	0	161	14		0	181	21
	1	21	8		1	1	1
α = 0.25		0	1	α = 0.45 até 1.00		0	1
	0	168	14		0	182	22
	1	14	8		1	0	0

Fonte – Elaborado pelo autor

Com os dados da Tabela 5 é possível identificar o total de defeitos, que é dado pela Equação 6.1 e será constante para qualquer valor de 'α', sendo a soma do FN (valor que é supostamente não defeituoso, porém na realidade é defeituoso) e o VP (valor que é realmente defeituoso). O resultado é aproximadamente 11%.

$$\frac{FN + VP}{TOTAL} \quad (6.1)$$

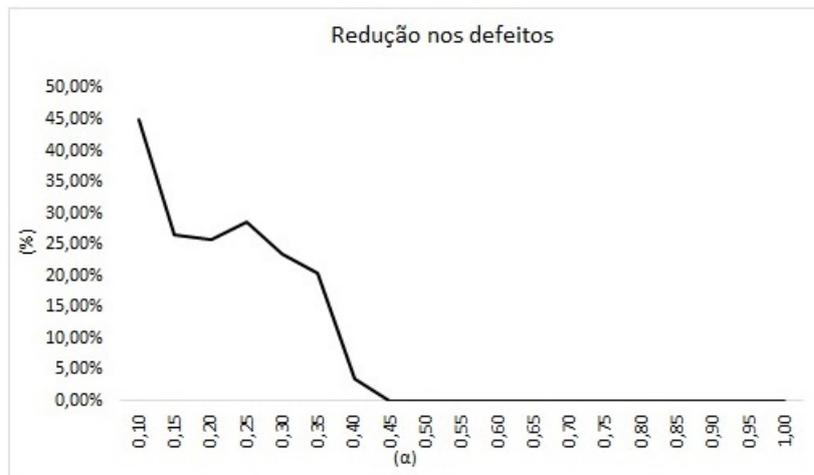
Uma vez que as corridas identificadas como defeituosas (VP+FP) serão inspecionadas e, portanto, o defeito será evitado, o percentual de defeitos que irá ocorrer é a razão entre o FN e a soma (VN+FN). O Gráfico 26 representa a redução percentual na taxa de defeitos, que é dado pela Equação 6.2 de acordo com a variação do 'α'.

$$1 - \frac{FN \times TOTAL}{(VN + FN) \times (FN + VP)} \quad (6.2)$$

Outra análise realizada foi a quantidade de FP's encontrados a cada variação do 'α', representado pelo Gráfico 27 e que foi calculado de acordo com a Equação 6.3. Esses valores são de extrema importância para a empresa, pois são os Falsos Positivos (que é predito de se ter um defeito, mas na realidade não tem), ou seja, através dele é realizado as inspeções e conseqüentemente é gerado um custo muito além do esperado, por passar por uma inspeção mais rigorosa e ter um maior cuidado com todo o processo de produção, ocasionando um maior gasto com mão de obra.

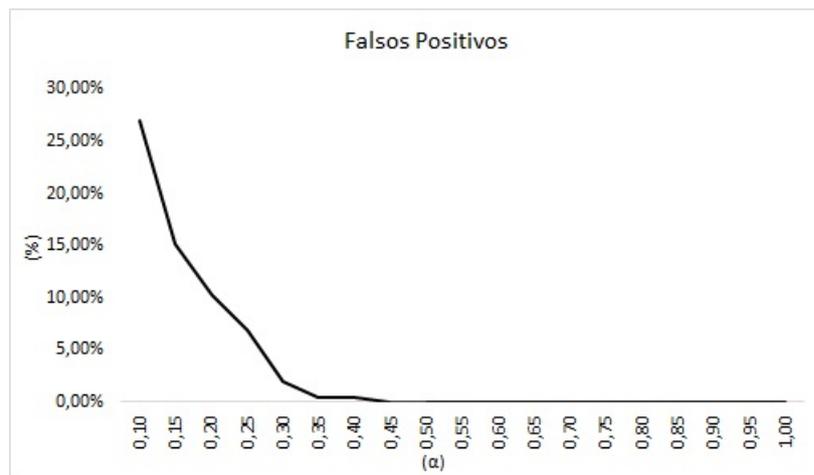
$$\frac{FP}{TOTAL} \quad (6.3)$$

Figura 26 – Total de redução nos defeitos



Fonte – Elaborado pelo autor

Figura 27 – Total de FP

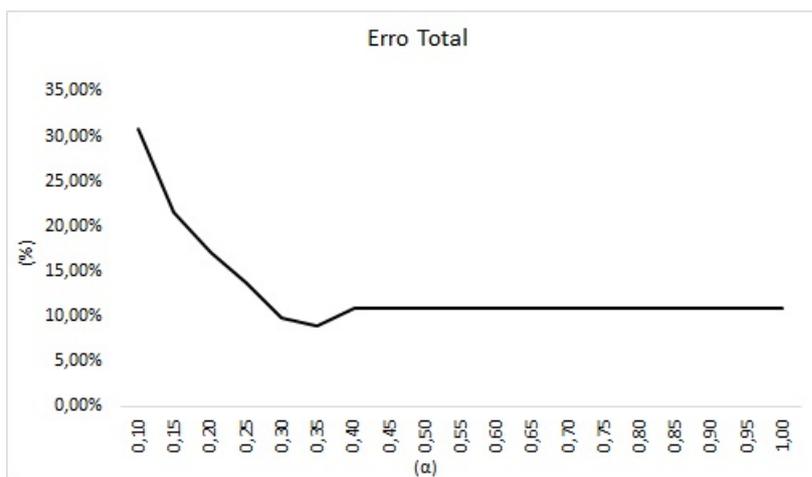


Fonte – Elaborado pelo autor

Já o Gráfico 28 representa o Erro Total do modelo, são os chamados falsos negativos e falsos positivos, gerando variações de erro de acordo com o 'α'. A Equação 6.4 representa o cálculo realizado para chegar aos resultados.

$$\frac{FP + FN}{TOTAL} \tag{6.4}$$

Figura 28 – Erro total



Fonte – Elaborado pelo autor

7 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo identificar as principais características do processo produtivo que influenciavam na ocorrência do defeito FL, a principal causa de perdas no Laminador 1, para a partir daí, ter a capacidade de realizar um controle de processo mais efetivo e assim, buscar melhorias para a empresa em estudo.

Em um primeiro momento foi realizado o levantamento de parâmetros que poderiam influenciar na ocorrência de defeito FL e também quais desses parâmetros eram quantificados através do *Software* que a empresa utiliza. Daí foram coletados um total de 297 variáveis para o início dos estudos e todas as corridas da laminação no período de dezembro de 2017 a março de 2018. Para a aplicação das ferramentas estatísticas utilizadas foi necessário um embasamento teórico aprofundado sobre a regressão logística e a análise de componentes principais. Além disso, foi muito estudado as ferramentas da qualidade e a empresa, mais especificamente o setor da Laminação do Trem Laminador 01. Desde o início da produção até a formação total dos rolos, foi possível perceber a interrelação de todos os componentes para a melhor execução da produção do fio-máquina.

A partir das informações extraídas e da utilização do *Software R*, foi possível dar início as primeiras formas do modelo, observar as correlações das variáveis com a ocorrência do defeito FL e analisar se fazem algum sentido. Como citado ao longo do trabalho, é possível dizer que o tratamento de dados realizado pode ser de grande impacto para a empresa. A pesquisa realizada evidencia a necessidade de entender e mensurar o processo de laminação e juntamente com ele todas as variáveis do estudo.

Nas análises realizadas, foi percebido as maiores correlações nos 1º e 2º contínuos da laminação, o que se faz pertinente. De acordo com os cálculos, essa parte do laminador está correlacionada com a ocorrência dos defeitos de FL entre 30% e 40%, uma quantidade considerável e interessante de uma avaliação aprofundada a equipe da área, para rearranjar os parâmetros e utilizar de testes para chegar aos valores mais aproximados da conformidade.

Além das correlações, é importante verificar as probabilidades para a regressão logística. Como mostrado nos resultados e discussões, é possível diminuir aproximadamente 45% nos defeitos, de acordo com a variação do ' α ', diminuir os custos de inspeção devido aos falsos positivos e ainda calcular o erro total da probabilidade.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho se preocupou em analisar as correlações da má formação de rolo com as variáveis do processo de laminação e além disso, propor algumas ações para trabalhos futuros. Dentre essas ações é importante se fazer um estudo das variáveis do 1º e 2º contínuos, pegando não somente as velocidades em si mas também outros parâmetros, como por exemplo, o Fator

R (fator de redução dos passes de laminação de cada cadeira) entre as cadeiras de laminação, utilizando testes para encontrar o ponto ótimo deste parâmetro e fazer um estudo para a utilização de laços entre as cadeiras, que tem por objetivo reduzir o impacto do Fator R.

Outro ponto importante a ser analisado posteriormente, é a qualidade do material laminado, ou seja, as diferenças de parâmetros para materiais com composições químicas diferentes, fazendo a comparação entre eles e quais as interferências seriam necessárias para cada tipo de material.

É fundamental se fazer um estudo com um maior período de tempo, coletando informações de pelo menos 1 ano de pesquisa para comprovar as relações e ter um maior embasamento dos dados e também realizar uma adaptação do modelo para ao invés de analisar corridas, fazer a análise de cada peça, o que poderia reduzir o erro do modelo e gerar conclusões mais pontuais.

Por fim, será dada continuidade ao trabalho para que seja montado um modelo matemático de otimização para encontrar o ' α ' ótimo.

Referências

- ABNT, A. B. d. N. T. *ABNT NBR ISO 9001:2015*. [S.l.]: ABNT, 2015.
- ASSUNÇÃO, A.; REIS, L.; LAMAS, M.; GOUVEIA, W. *Treinamento em Processos Siderurgicos*. [S.l.]: ArcelorMittal Monlevade, 2009.
- AYÇAGUER, L. C. S.; UTRA, I. M. B. *Regression logistica*. [S.l.]: Editora La Muralla, 2004.
- BISSACOT, A. C. G. *Estudo Comparativo entre Regressão Logística Binária e Redes Neurais Artificiais na Avaliação dos Resultados Classicos de Hosmer, Lemeshow e Sturdivant*. 106 p. Monografia (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Itajuba, Itajuba, 2015.
- CARVALHO, M. M. d.; PALADINI, E. P. *Gestão da Qualidade*. [S.l.]: Editora ELSEVIER, 2012.
- CODA, R. *Treinamento Qualidade Laminação*. [S.l.]: COPAR Engenharia, 2018.
- COLOSIMO, E. A. *Bioestatística F*. 2011. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/~enricoc/pdf/Bioestatistica_F/bio_aula6.pdf>. Acesso em: 18 maio 2018.
- FALCONI, V. *Controle da Qualidade Total*. [S.l.]: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.
- FEIGENBAUM, A. V. *Controle da qualidade total: gestão e sistemas*. [S.l.]: Makron Books, 1994.
- FONSECA, P. S. M.; CARVALHO, P. S. L.; SILVA, M. M. d. Investimentos na siderurgia brasileira. *Perspectivas do Investimento 2010-2013*, BNDES, 2010.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Metodos de Pesquisa*. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2009.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. *Análise Multivariada de Dados*. [S.l.]: Editora Bookman, 2009.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. *Applied Logistic Regression*. [S.l.]: Editora John Wiley, 2000.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. *Processo Siderurgico*. 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 18 maio 2018.
- JURAN, J. M. *Quality control handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988.
- JURAN, J. M.; DEFEO, J. A. *Fundamentos da Qualidade*. [S.l.]: Editora Bookman, 2015.
- LIMA, M. M. *Defeitos em Produtos Longos*. [S.l.]: ArcelorMittal Monlevade, 2012.
- MATTOS, J. C. d.; TOLEDO, J. C. d. Custos da qualidade: Diagnostico nas empresas com certificação iso 9000. *Gestão e Produção*, v. 5, n. 3, p. 312–324, 1998.
- MATTOS, M. C. V. *A influência das variáveis do processo de laminação na ocorrência de defeitos em fio-máquina*. 45 p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Produção) — Instituto de ciências exatas e aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2013.

- MEDEIROS, E.; PEREIRA, G.; FILHO, H.; FILHO, L. Estudo prospectivo do setor siderúrgico. 2008.
- MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada*. [S.l.]: Editora UFMG, 2007.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. [S.l.]: Editora Grupo Editorial Nacional, 2009.
- NETO, J. M. M.; MOITA, G. C. Uma introdução a análise exploratória de dados multivariados. *Química Nova*, v. 21, n. 4, p. 467–469, 1997.
- PALADINI, E. P. *Gestão da Qualidade*. [S.l.]: Editora ATLAS S.A., 2000.
- PRATI, R. *Análise de Componentes Principais*. 2018. Disponível em: <<http://professor.ufabc.edu.br/~ronaldo.prati/DataMining/PCA.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2018.
- RIBEIRO, D. E.; MIRANDA, G. W. A. Aplicação de ferramentas da qualidade na busca da melhoria de defeitos em tiras de cobre laminadas a frio. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, 2011.
- SETORIAL, A. e Comitê de A. *Perspectivas do investimento 2015-2018 e panoramas setoriais*. BNDES, 2014.
- SILVA, J. N. S. *Siderurgia*. [S.l.]: Escola Técnica do Brasil, 2011.
- SOARES, C. M. *Análise de Bobinas de Aço em Serviços Siderúrgicos*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Porto, 2009.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. *Apostila do curso de Especialização em Qualidade e Produtividade*. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2012.
- VARELLA, C. A. A. *Análise de Componentes Principais*. [S.l.]: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.
- WERNKE, R.; BORNIA, A. C. Considerações acerca dos conceitos e visões sobre os custos da qualidade. *FAE*, v. 3, n. 2, p. 77–88, 2000.