

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS JARAGUÁ DO SUL – RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

ESDRA DELAFLORA MACALLI

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM FIOS ESMALTADOS DE
COBRE E ALUMÍNIO: UMA ANÁLISE PARA A DETERMINAÇÃO DE NOVO
MÉTODO DE ENSAIO DE QUALIDADE.

JARAGUÁ DO SUL

Novembro / 2021

ESDRA DELAFLORA MACALLI

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM FIOS ESMALTADOS DE
COBRE E ALUMÍNIO: UMA ANÁLISE PARA A DETERMINAÇÃO DE NOVO
MÉTODO DE ENSAIO DE QUALIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: William José Borges, Doutor.

JARAGUÁ DO SUL

Novembro / 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

M114a
Macalli, Esdra Delaflora
Aplicação da metodologia seis sigma em fios
esmaltados de cobre e alumínio: uma análise para a determinação
de novo método de ensaio de qualidade. / Esdra Delaflora
Macalli;
Prof. Doutor William José Borges (Orientador). -
Jaraguá do Sul, SC : IFSC, 2021.
62 p.: il.; PDF.
Monografia (Graduação) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul - Rau, Curso
Tecnologia em Fabricação Mecânica.
Seis sigma. 2. Ensaio de Concentricidade. 3. Ensaio de
abrasão. I. Título. II. Borges, William José.

CDD- 658.562

ESDRA DELAFLORA MACALLI

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM FIOS ESMALTADOS DE
COBRE E ALUMÍNIO: UMA ANÁLISE PARA A DETERMINAÇÃO DE NOVO
MÉTODO DE ENSAIO DE QUALIDADE.

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

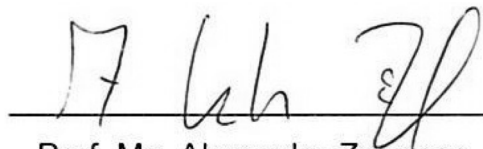
Jaraguá do Sul, 01 de dezembro de 2021



Prof. William José Borges, Doutor.

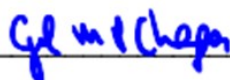
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Alexandre Zammar

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Dedico esta obra acadêmica à minha família, em especial à minha esposa, pois se cheguei até aqui foi por todo apoio que recebi e os valores que eles me passaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Fátima e à minha filha Mayanne por seu apoio contínuo.

O Professor William José Borges, por sua valiosa orientação que ajudou este projeto se tornar realidade.

A empresa na qual trabalho por ter disponibilizado os equipamentos para a realização do projeto.

E a Deus por ter me dado saúde e direcionado todo processo de formação e conclusão de curso.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi verificar a correlação entre os ensaios de abrasão unidirecional realizado no laboratório da Fábrica de Fios e as medições de concentricidade (espessura da camada de verniz) realizado no P&IT (Pesquisa e inovação Tecnológica) e propor um método de controle da concentricidade através do ensaio de abrasão unidirecional a fim de obter a economia de escopo. O motivo na realização deste trabalho foi permitir maior agilidade na avaliação de fios esmaltados, evitando retrabalhos e demais gastos desnecessários. Com a utilização da metodologia seis sigma, e de suas ferramentas para a otimização, o estudo foi realizado em uma multinacional da região especializada em fabricação de fios circulares esmaltados. Foram realizados testes, mapa de raciocínio, mapa do produto, árvore de amostragem, entre outros. Com o uso da metodologia Seis Sigma foi possível definir a tolerância de concentricidade através do ensaio de abrasão unidirecional, e o aprendizado sequencial, foi possível obter resultados almejados. Como resultado principal, eliminou-se a necessidade de retirada e envio de amostras para o P&IT, substituindo o processo pela nova atividade de medição – alterada – da abrasão unidirecional durante os ensaios de preparação.

Palavras-chave: Seis Sigma; Ensaio de Concentricidade; Ensaio de Abrasão.

ABSTRACT

The purpose of this study was to verify the correlation between the unidirectional abrasion tests performed in the Wire Factory laboratory and the concentricity measurements (thickness of the varnish coating) performed in the R&TI (Research and Technological Innovation) and to propose a method to control the concentricity through the unidirectional abrasion test to obtain economies of scope. The reason for this study was to allow a greater agility in the evaluation of enameled wires, avoiding rework and other unnecessary expenses. Using the Six Sigma methodology and its optimization tools, the research was carried out in a multinational company in the region specialized in manufacturing enameled circular wires. Tests were performed, reasoning maps, product maps, and sampling trees, among others. Using the Six Sigma methodology it was possible to define the concentricity tolerance through the unidirectional abrasion test, and the sequential learning, it was possible to obtain the aimed results. As a main result, the need to remove and send samples to the R&TI was eliminated, replacing the process by the new measurement activity – altered – of the unidirectional abrasion during the preparation tests.

Keywords: Six Sigma; Concentricity Testing; Abrasion Testing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Análise do processo	15
Figura 2 - Exemplos de performances na escala	16
Figura 3 - Exemplo de mapa de raciocínio	17
Figura 4 - Exemplo de Mapa de Produto de uma lavadora	18
Figura 5 - Exemplo de mapa de produto	19
Figura 6 - Variação associada a processos produtivos	20
Figura 7 - Causas especiais de variação e causas comuns.....	21
Figura 8 - Exemplo de mapa de processo.....	22
Figura 9 - Árvore de amostragem	23
Figura 10 - Exemplo de frequência de pontos	24
Figura 11 - Gráfico de frequência de pontos.....	24
Figura 12 - Marcações de ensaio de abrasão da amostra de fio.....	27
Figura 13 - Equipamento abrasão com amostra fixada para o ensaio	28
Figura 14 - Microscópio	28
Figura 15 - Equipamento de Abrasão.....	31
Figura 16 - Camada da película de esmalte	32
Figura 17 - Amostra de fio e alicate	32
Figura 18 - Espessura das camadas	33
Figura 19 - Experimentos planejados para validar a hipótese	34
Figura 20 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada alumínio grau 2	44
Figura 21 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada alumínio grau 3	44
Figura 22 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada cobre grau 2	45
Figura 23 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada de cobre grau 3.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Significado da escala seis sigma.....	16
Tabela 2 - Ensaio padrão da massa inicial (g).....	26
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 2.....	34
Tabela 4 - Massa inicial para avaliação de concentricidade através do ensaio de abrasão.....	37
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 2 proposto.....	38
Tabela 9 - Critério de aceitação	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

P&IT - Pesquisa e inovação Tecnológica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2 DESENVOLVIMENTO	14
2.1 Características gerais do seis sigma.....	14
2.2.1 Mapa de raciocínio	17
2.2.2 Mapa do produto.....	18
2.2.3 Mapa de processo	19
2.2.4 Estratégia de amostragem	22
2.2.5 Diagrama de frequência de pontos	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 Metodologia de pesquisa	25
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
4.1 Ensaio de abrasão e concentricidade	30
4.2 Preparação para o ensaio.....	32
4.3 Execução do ensaio.....	33
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50
ANEXO A Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 3 proposto	52
ANEXO B Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Cobre grau 2.....	55
ANEXO C Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Cobre grau 3.....	59

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz uma abordagem da administração da produção, com a utilização de ferramentas da qualidade. A ideia está centrada na leitura de que o uso do conhecimento científico pode acarretar em mudanças significativas nas empresas. Para isso, o tema aborda a correlação de ensaios de espessura de camada de verniz e abrasão unidirecional de fio circular esmaltado de cobre e alumínio, através da aplicação de ferramentas da metodologia seis sigma.

Dessa forma, o trabalho relaciona pontos de convergência teórica para a solução do problema de pesquisa. A correlação de ensaios (Concentricidade da espessura da camada de verniz), e (Abrasão que mede a resistência mecânica da camada de verniz), Abrasão unidirecional (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000), fio esmaltado de cobre e alumínio – Grau 2, Grau 3.

A formulação do problema aconteceu de forma prática e orientada pela empresa WEG S.A em função de processos de melhorias internos. Depois de identificar erros de concentricidade entre o fio nu e a camada de verniz aplicada, buscou-se uma solução a fim de otimizar o processo produtivo, além de garantir maior qualidade do produto aos clientes.

O cumprimento de otimizar a correlação entre os ensaios de abrasão unidirecional e as medições de concentricidade e propor um método de controle através do ensaios de abrasão unidirecional para medir a concentricidade, permite uma maior agilidade na avaliação de fios esmaltados que necessitam de teste de vida para controle da qualidade e que algumas vezes reprovam nesse teste devido ao erro de concentricidade entre o fio nu e a camada de verniz. Imediatamente, os usuários podem contar com a redução de tempo na medição de espessura de camada no P&IT, que sem o procedimento metodológico podem levar até 2 semanas.

Isso se faz relevante por uma questão de otimização de recursos, uma vez que o resultado, sendo entregue em 2 semanas, pode estar disponível depois que o fio entrou em produção e o processo precisou de adaptações desnecessárias. Com o procedimento proposto na presente análise, pode-se eliminar/reduzir a atividade de retirada e envio de amostras para o P&IT para medições de espessura de camada, substituindo o procedimento pela atividade de medição – alterada – da abrasão unidirecional durante os ensaios de preparação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a correlação entre os ensaios de abrasão unidirecional realizado no laboratório da Fábrica de Fios e as medições de concentricidade (espessura da camada de verniz) realizado no P&IT (Pesquisa e inovação Tecnológica) e propor um método de controle da concentricidade através do ensaio de abrasão unidirecional a fim de obter a economia de escopo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar se a correlação entre os ensaios de abrasão unidirecional e o ensaio de concentricidade;
- Analisar a medição da camada de esmalte na mesma direção que é realizado ensaio de abrasão unidirecional;
- Analisar a correlação entre os pontos de medição dos ensaios de abrasão unidirecional e o ensaio de concentricidade.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Características gerais do seis sigma

A ferramenta seis sigma tem sua filosofia centrada no trabalho para alcançar, maximizar e manter os resultados. A forma de se fazer esse movimento é por meio da compreensão das necessidades do cliente e do produto. Entende-se que o trabalho seja criar uma metodologia estruturada que incremente a qualidade por meio da melhoria contínua dos processos, produtos e serviços (ROTONDARO, 2002).

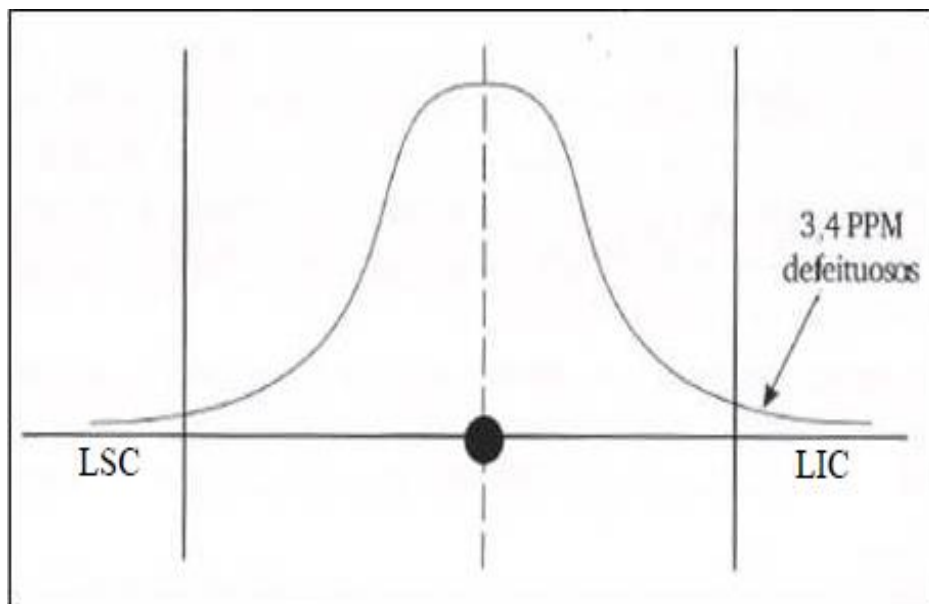
O seis sigma contribui com a diminuição de defeitos nos produtos/serviços que são entregues aos clientes, utilizando ferramentas, técnicas e análise estatística para medir e melhorar resultados quantitativos. Os seus procedimentos têm a capacidade de tratar de falhas e desperdícios e, no limite, agregar valor ao produto e ao processo (RODRIGUES, 2010).

O tema “Sigma” é a 18ª letra do alfabeto grego, sendo utilizado pela estatística como medida de variação essencial ao processo (desvio padrão). Quando o resultado do desvio-padrão de um processo é elevado, indica-se que há desigualdade e variação do processo medido. Porém, quando o valor do desvio-padrão é baixo,

indica-se igualdade no processo com pouca variação entre os resultados. Dessa forma, quanto menor for o desvio padrão de um processo padronizado, melhor para o processo como um todo (WERKEMA, 2002).

Nas análises preliminares da empresa desenvolvedora do procedimento (Motorola nos anos 80), o engenheiro Bill Smith avaliou e estudou os dados de produção para compreender os motivos de falhas na fabricação. A Motorola e seus cientistas, durante um período aproximado de 10 anos, alinharam ferramentas que tinham na época, e usando a metodologia Seis Sigma e as técnicas estatísticas avançadas, para atingir o nível de qualidade 3,4 defeitos por milhão (PPM), conforme a Figura 1 (onde LSC e o limite superior de controle e LIC é o limite inferior de controle) (ROTONDARO, 2002)

Figura 1 - Análise do processo



Fonte: Rotondaro (2002).

Ao alinhar ferramentas de qualidade com o processo de melhoria contínua nas organizações, o “seis sigma” contribui com o processo de gestão ao identificar pontos da manufatura que poderiam ser corrigidos. Werkema (2002) exemplifica esse procedimento (descrito na Tabela 1), o conjunto de dados que apresenta uma taxa de erro elevada resultará em maior defeito por milhão e um número baixo na escala sigma. Por outro lado, quanto maior a taxa de acerto do processo, maior a escala sigma. Isso indica que o seis sigma tem o poder de induzir uma leitura coerente das falhas.







Tabela 1 - Significado da escala seis sigma

Taxa de Acerto	Taxa de Erro	Defeitos por Milhão de oportunidades (DPMO)	Escala Sigma
30,9%	69,1%	691.462	1,0
69,1%	30,9%	308.807	2,0
93,3%	6,7%	66.807	3,0
99,38%	0,62%	6.210	4,0
99,977%	0,023%	233	5,0
99,99966%	0,000034%	3,4	6,0

Fonte: Werkema (2002).

De forma complementar, a Figura 2 demonstra exemplos de desempenho na escala seis sigma em diversos setores da economia. Observa-se que a maior escala do valor sigma tem a capacidade de elevar de forma substancial o padrão da qualidade. Assim, a estratégica e a gerencial pode ser utilizada de forma complementar na gestão da organização.

Figura 2 - Exemplos de performances na escala

Quatro Sigma (99,38% conforme)		Seis Sigma (99,99966% conforme)
Sete horas de falta de energia elétrica por mês		Uma hora de falta de energia elétrica a cada 34 anos
5.000 operações cirúrgicas incorretas por semana		1,7 operação cirúrgica incorretas por semana
3.000 cartas extraviadas para cada 300.000 cartas postadas		Uma carta extraviada para cada 300.000 cartas postadas
Quinze minutos de fornecimento de água não potável por dia		Um minuto de fornecimento de água não potável a cada sete meses
Um canal de TV 1,68 horas fora do ar por semana		Um canal de TV 1,8 segundos fora do ar por semana
Uma aterrissagem de emergência no aeroporto de Guarulhos por dia		Uma aterrissagem de emergência em todos os aeroportos do Brasil a cada cinco anos

Fonte: Werkema (2002).

No decorrer do tempo, novas ferramentas foram desenvolvidas utilizando o seis sigma, sendo que as principais são: Mapa de raciocínio, mapa de produto, mapa de processo, cartas de controle, estudos de variação (COV), diagramas de relação entre

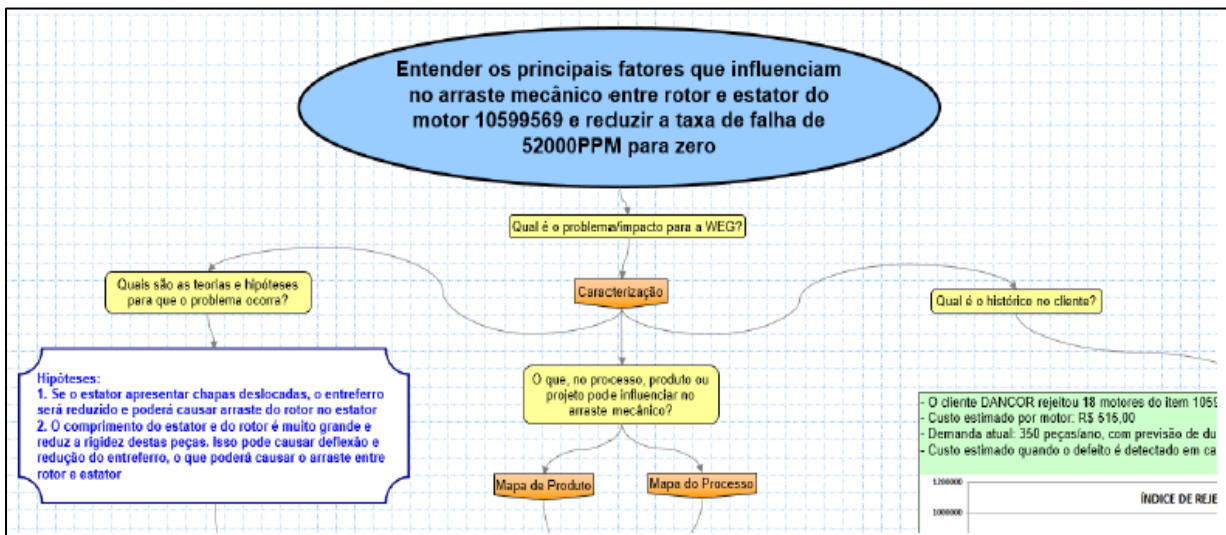
fatores (FRD), planejamento de experimentos (DOE), entre outras (HILD, 1998). No entanto, o foco dado, na presente pesquisa, foi para os elementos mapa de raciocínio, produto, processo, estratégia de amostragem e diagrama de frequência de pontos.

2.2.1 Mapa de raciocínio

Trata-se de documentar o processo de investigação do conhecimento existente. Para se obter êxito nesta etapa é fundamental que a qualidade das perguntas seja respondida ao longo do projeto, o conhecimento obtido durante a realização do trabalho (HILD, 1998).

O mapa de raciocínio tem uma lógica voltada para o planejamento e deve ser respeitada ao longo do projeto. Dessa forma, as questões levantadas devem ser discutidas com a equipe de trabalho para que estas sejam respondidas, assim o ciclo se repete até a finalização do projeto (WERKEMA, 2002). A Figura 3 exemplifica o mapa de raciocínio, evidenciando o caminho lógico das perguntas e respostas.

Figura 3 - Exemplo de mapa de raciocínio



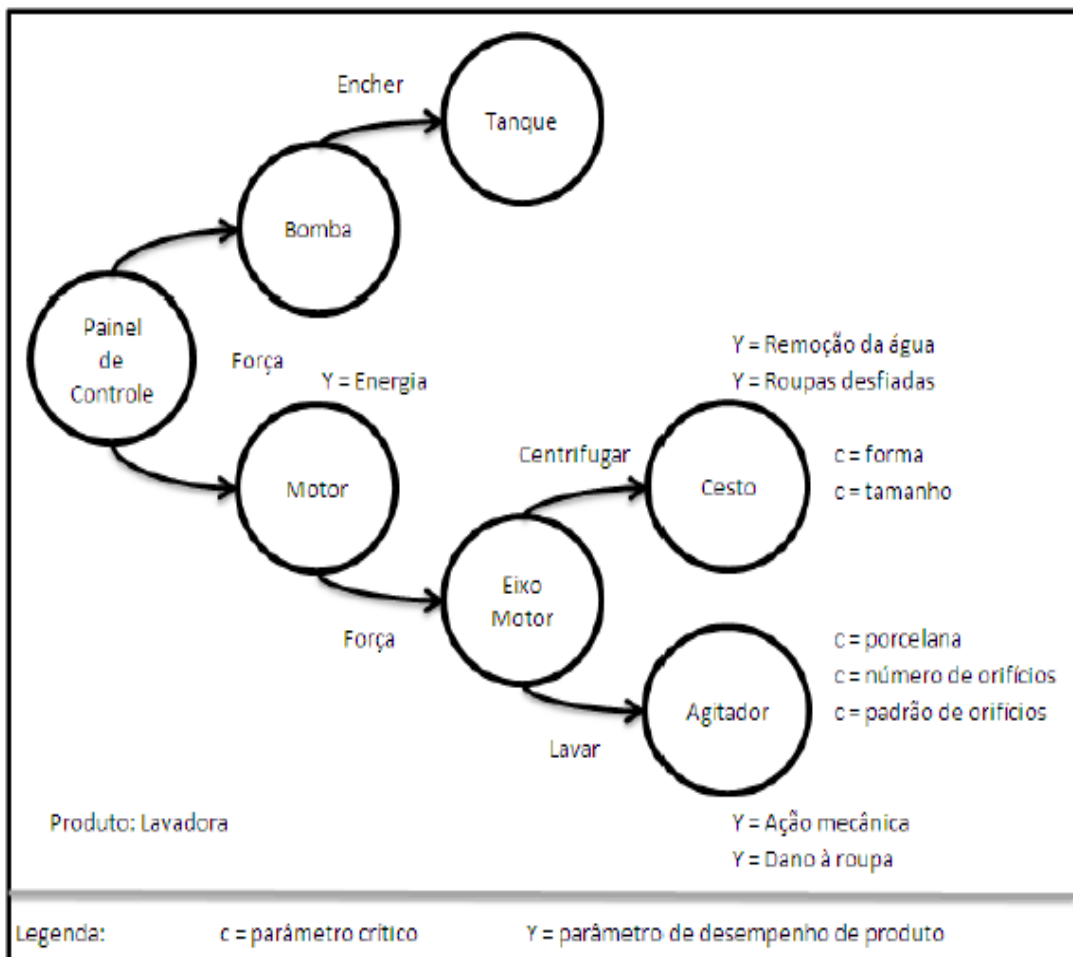
Fonte: Piucco et al. (2019).

O mapa de raciocínio, portanto, é um documento vivo que possibilita ser atualizado conforme o andamento do projeto. Isso permite uma visão geral do tema, mas também firma entendimento sobre todo o conhecimento gerado fica registrado em um único documento.

2.2.2 Mapa do produto

O mapa do produto é uma forma de facilitar o entendimento das relações existentes dos componentes de um modo que auxilie nas informações básicas. Como é difícil conhecer todas as características de um produto, o Mapa de Produto pode ajudar nessa tarefa, conforme apresentado na Figura 4 (WERKEMA, 2002).

Figura 4 – Exemplo de mapa de Produto de uma lavadora



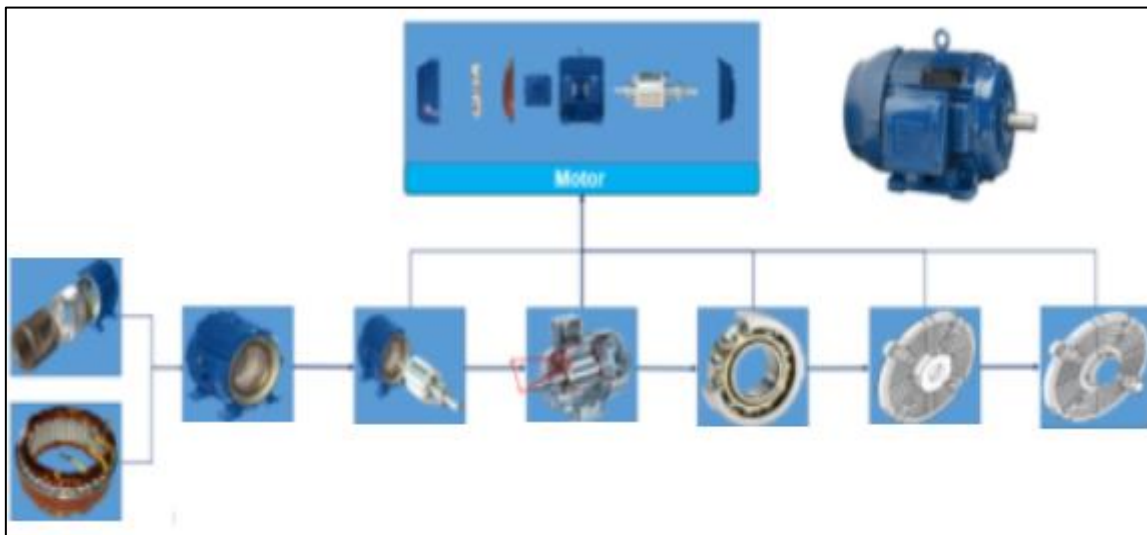
Fonte: Werkema (2002).

O mapa de produto pode ser muito útil para atender uma série de necessidades, como, encontrar oportunidades de otimização do produto, características críticas de um projeto, variação do produto, registrar sugestão para projetos futuros de produto semelhantes, e definir níveis de fatores para o DOE. Ou seja, a ideia do mapa de produto é que cada item tenha parâmetros (x) que resultem em variáveis de saída (y1) com interação direta na variável de resposta em evidência (y2). Na elaboração do

mapa de produto, segue-se uma mecânica muito parecida com a elaboração do mapa de processo.

Com isso, obtêm-se dados como os objetivos do produto (Y 's), as funções de cada componente (y's), as variáveis que afetam a função de cada componente (x's), a classificação das variáveis independentes (x's) como controlável (C) e ruído (N), definir as variáveis que são críticas para o produto. Assim como todos os dados, estes também devem ser atualizados no decorrer do projeto, toda vez que necessário. A Figura 5 demonstra esse fluxo (PIUCCO *et al.*, 2019).

Figura 5 - Exemplo de mapa de produto



Fonte: Piuccio et al. (2019).

2.2.3 Mapa de processo

O mapa de processo é uma forma gráfica de apresentar uma sequência detalhada do processo, com dados de cada atividade, aspectos de entrada (x), e processamento de saída (y) (WERKEMA, 2004). O mapa de processo faz o mapeamento de uma operação de manufatura que transforma matéria bruta em um produto acabado, incluindo qualquer atividade ou conjunto de atividades que geram valor agregado. Existem também os fatores de variação de causa comum que podem influenciar no resultado final do processo, essas devem ser identificadas e quantificadas, dessa forma é possível propor melhorias eficazes para o processo.

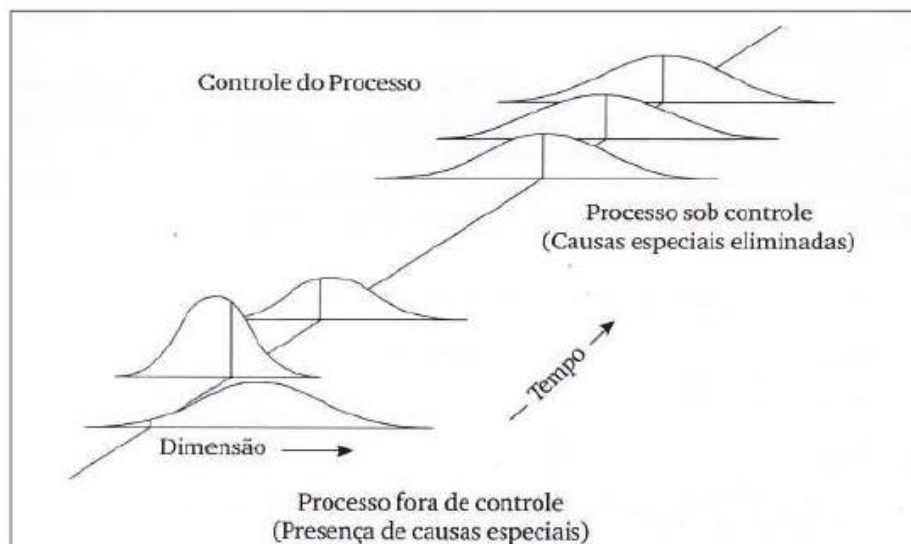
É importante entender o processo e contribuir para que o objetivo seja atingido. Existe também fonte de variação de causa comum que pode afetar o resultado final

de um processo. Por este motivo todas as fontes de variação devem ser identificadas e quantificadas, isso facilita no desenvolvimento do projeto, na organização e padronização das tarefas.

Segundo Paladini (2005) uma tarefa dentro de um processo que leva um período de tempo irregular para completar, pode causar tanta confusão na linha de produção como a irregularidade das medidas de uma peça, uma hora vai ser grande demais e outra hora pequena demais.

Cabe salientar que, segundo Montgomery (2004), não existem duas unidades de um mesmo produto que sejam idênticos, portanto, a variação sempre existirá em um sistema produtivo. A variação é inerente ao produto e processo, dessa forma é importante que sejam identificadas as causas de variação, usando técnicas para controlar. A fonte de variação associada a processos produtivos sendo originalmente chamadas por Deming (1986) de especiais e comuns de variação. A variação no processo, como é possível verificar na Figura 6, exhibe a variação existente usando curvas normais para representá-las.

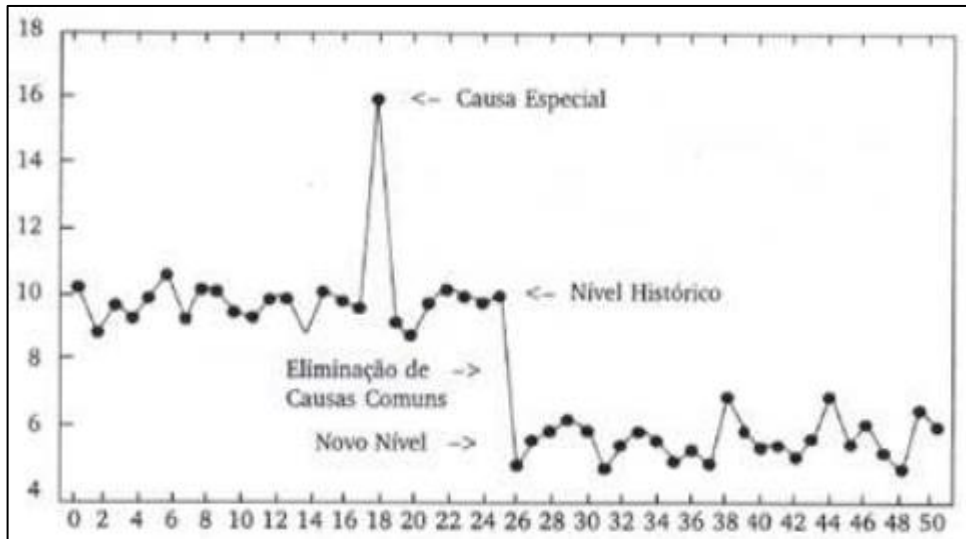
Figura 6 - Variação associada a processos produtivos



Fonte: Werkema (2002).

As causas comuns e especiais estão presentes nos processos/produtos, segundo Rotondaro (2002), sendo uma fonte de variação que afeta todos os valores individuais de um projeto. Ou seja, estes fatores sendo as causas especiais podem afetar a qualidade do produto, elas produzem resultados destoantes aos demais valores. Na Figura 7 um exemplo de causa especial e de causas comuns.

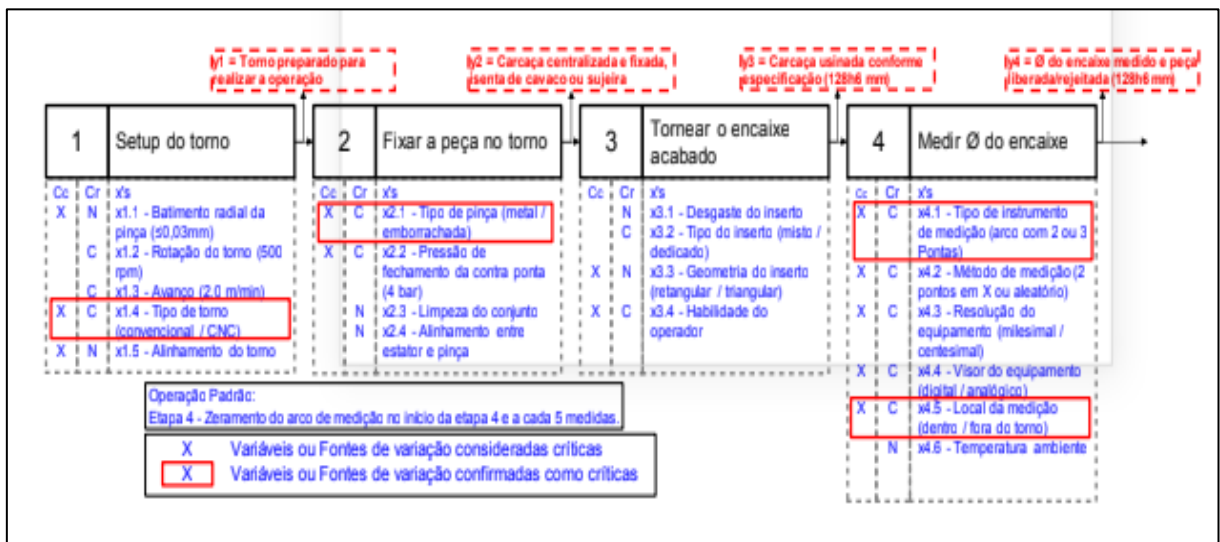
Figura 7 - Causas especiais de variação e causas comuns



Fonte: Rotondaro (2002).

Depois de criado o mapa de processo, deve estar sempre atualizado, dessa forma facilita o decorrer do projeto, e por este motivo caracteriza como uma ferramenta viva. É fundamental que nesse mapa de processo esteja o objetivo principal do processo (Y), Etapas do processo fluxograma, descrever os objetivos secundário de cada etapa (variáveis dependentes y's), e identificar fontes de variação de cada etapa (variáveis dependentes x's), e classificar as variáveis independentes (x's) em controlada (C), ruído (N) e operação padrão (SO). Um exemplo de mapa de processo pode ser consultado na Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de mapa de processo



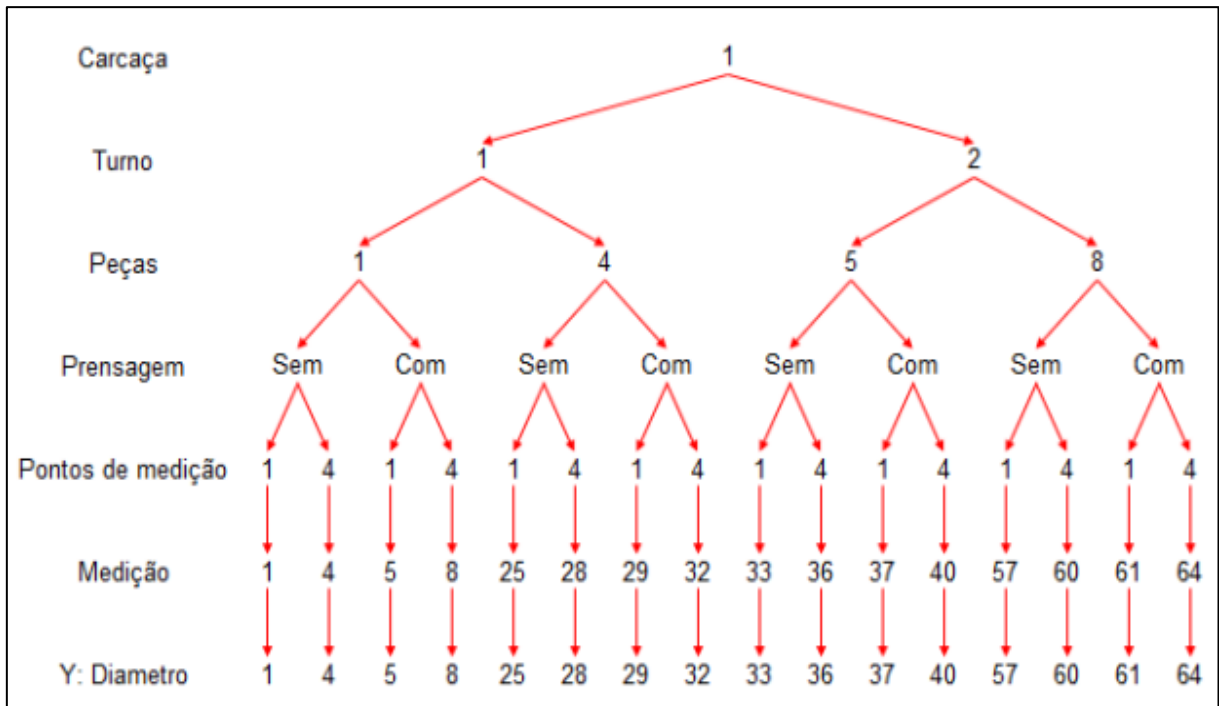
Fonte: Piucco et al. (2019).

2.2.4 Estratégia de amostragem

A estratégia de amostragem é a melhor forma de avaliar a capacidade de um processo sem medir 100% das peças, facilitando os custos. Todo processo tem suas variáveis e a estratégia de um plano de amostragem deve ser analisada e escolhida com base no mapa de processo.

A ferramenta de variação (COV – Componente de Variação), classifica e filtra os componentes (WHEELER, 1992). A ferramenta considera o processo como uma amostragem criada na análise. A ramificação ou ramos desta árvore pode ser independente ou dependente da camada anterior (WERKEMA, 2011). Para obter êxito no projeto precisa-se de um bom COV e uma estratégia de amostragem bem planejada, dessa forma garante a integridade dos resultados finais, conforme Figura 9 apresentada como um exemplo.

Figura 9 - Árvore de amostragem



Fonte: Piucco et al. (2019).

É fundamental que todas as variáveis do processo sejam identificadas na construção do plano de amostragem, levando em consideração o conhecimento adquirido e a capacidade de medir e controlar. Ou seja, se tiver alguma alteração é importante que seja evidenciada no momento da decisão. Dessa forma, a organização das variáveis deve ter estratégia de acordo com as restrições e a casualização. O resultado obtido dessa organização pode ser um plano de amostragem 100% hierárquico, 100% cruzado ou misto. Desse modo, a forma de analisar os dados muda de um tipo de amostragem para outro (PIUCCO *et al.*, 2019).

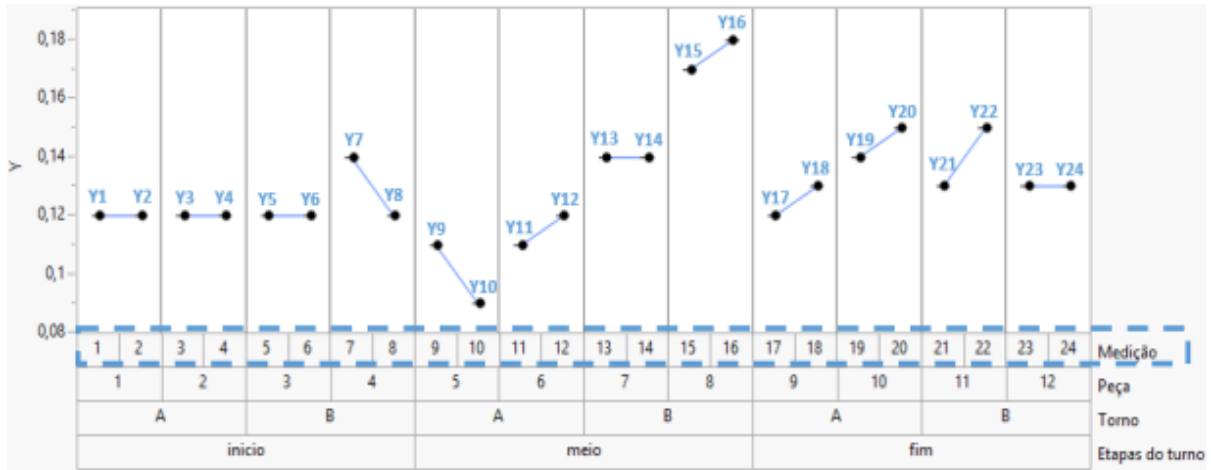
2.2.5 Diagrama de frequência de pontos

O planejamento de um experimento é fundamental e é necessário analisar os dados e extrair o conhecimento através deste. A forma que estes dados são analisados podem fazer toda a diferença na tomada de decisões e de onde concentrar a energia para os próximos passos.

Uma ferramenta de análise de dados, descrita de Diagrama de Frequência de Pontos, também conhecida por *Variabilit, Multivariate Charts e Dot Frequency Diagram*. Os gráficos gerados por esta ferramenta facilitam e mostram todos os valores coletados de tal forma que os mesmos são dispostos de acordo com o plano

de amostragem e os subgrupos que foram utilizados. Desse modo, para quem vai analisar os dados fica mais fácil o entendimento, e correlação de cada pontos dispostos no gráfico. Pode-se verificar um exemplo de frequência de pontos na Figura 10.

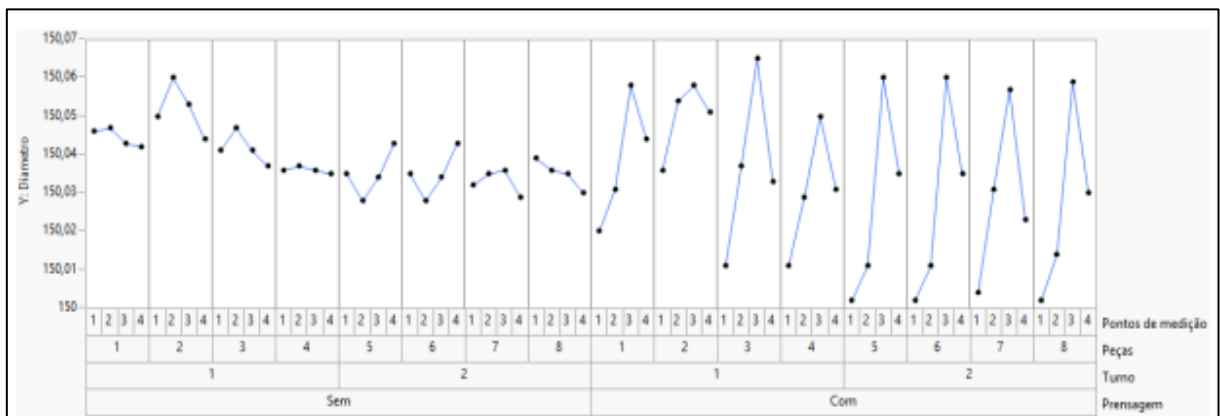
Figura 10 – Exemplo de frequência de pontos



Fonte: Piucco et al. (2019).

Desse modo, com os dados da coleta consegue-se realizar uma análise gráfica bastante prática por meio do *Variability*. Os dados conforme planejamento de amostragem são dispostos e utilizados para gerar um gráfico de frequência de pontos, conforme Figura 11.

Figura 11 - Gráfico de frequência de pontos



Fonte: Piucco et al. (2019).

O *Variability* tem uma vantagem significativa pelo fato de analisar os pontos da maneira que achar necessário. Desse modo, pode-se alterar a disposição dos componentes de variação de acordo com o que se deseja visualizar, assim como retirar alguma variável para chegar no objetivo e nas conclusões que achar necessário (PIUCOO *et al.*, 2019).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para efetuar a aplicação dos ensaios. Também será demonstrado os materiais e equipamentos utilizados para a execução dos ensaios.

3.1 Metodologia de pesquisa

A presente pesquisa, centrada na área de Administração da produção, é do tipo quantitativa e tem como foco propor um método de controle da concentricidade a fim de otimizar o uso de recursos na fábrica. Atualmente, utiliza-se um equipamento de abrasão para analisar a resistência da película do esmalte que recobre o fio condutor. Este ensaio é realizado em toda preparação de fio, ou seja, em toda troca de diâmetro utiliza-se uma grandeza diferente, conforme Tabela 2.

A variação da concentricidade é determinada a partir do ensaio de abrasão unidirecional, e calculada por meio da equação (1) dos dados obtidos.

$$C = \frac{\text{Máximo} - \text{Mínimo}}{\text{Mínimo}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

C: Concentricidade[%]

Máximo: Maior valor obtido do ensaio de abrasão unidirecional

Mínimo: Menor valor obtido do ensaio de abrasão unidirecional

O fio circular esmaltado grau 2 e grau 3 podem ser analisados como o objeto de nossa análise. Ambos têm como condutor o cobre e o alumínio e são utilizados nos motores da linha de produção da WEG S.A. A tipologia grau 2 é utilizada em motores que não demandam alta pressão, já a tipologia grau 3 é utilizada para motores com inversor de frequência.

Tabela 2 - Ensaio padrão da massa inicial (g)

MASSA INICIAL PARA AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE ABRASÃO UNIDIRECIONAL (g)				
DIÂMETRO DO CONDUTOR (mm)	COBRE		ALUMÍNIO	
	Grau 2	Grau 3	Grau 2	Grau 3
0,250	374	463		
0,265	400	495		
0,280	400	495	195	
0,300	432	526	203	
0,315	432	526	203	
0,335	464	562	224	
0,355	464	562	239	295
0,400	495	607	239	315
0,450	531	648	257	335
0,475	572	693	275	345
0,500	572	693	275	345
0,530	612	747	293	378
0,560	612	747	293	378
0,600	657	801	315	405
0,630	657	801	315	405
0,670	702	850	337	432
0,710	702	850	337	432
0,750	756	900	365	459
0,800	756	900	365	459
0,850	810	958	387	475
0,900	810	958	387	490
0,950	864	1021	414	510
1,000	864	1021	414	535
1,060	918	1089	441	545
1,120	918	1089	441	545
1,180	990	1165	473	473
1,250	990	1165	473	
1,320	1062	1237	491	
1,400	1062	1237	491	
1,500	1134	1327	527	
1,600	1134	1327	527	
1,700	1215		585	
1,800	1215		585	
1,900	1296		626	
2,000	1296		626	
2,120	1386		666	
2,240	1386		666	
2,360	1478		711	
2,500	1476		711	
2,588	1476		711	

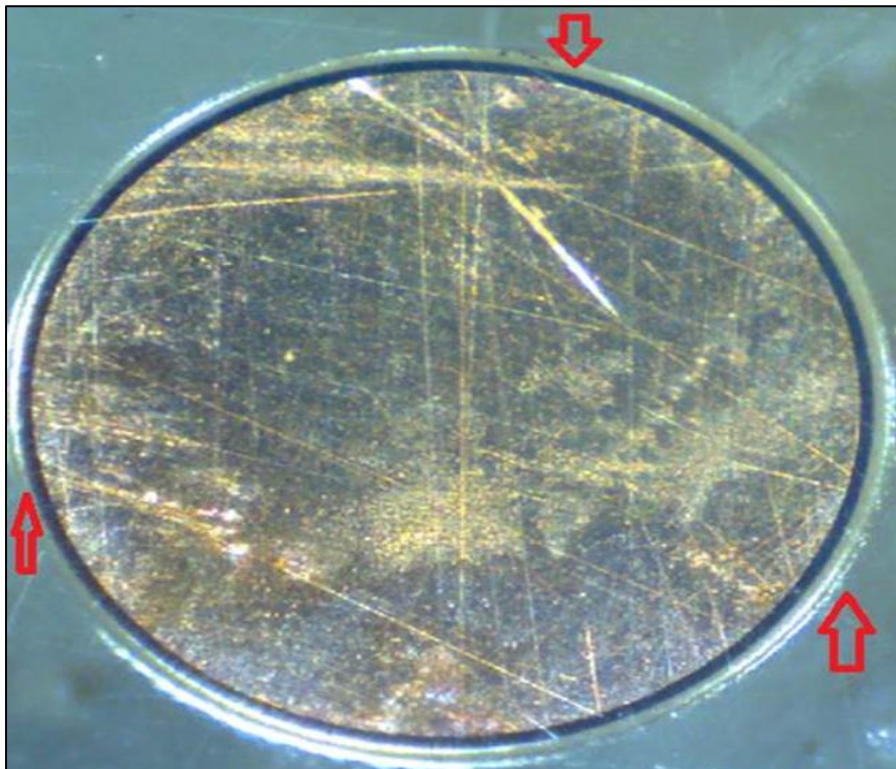
Fonte: Dados primários da linha de produção da WEG S.A. (2021).

Na Tabela 2 pode-se observar os diâmetros dos condutores (cobre e alumínio) e a massa (g) que é utilizada nos ensaios de abrasão unidirecional e distribuída conforme o diâmetro do fio e o seu respectivo grau. A diferença entre o grau 2 e grau 3 é a camada de esmalte (película), depositada sobre o fio condutor (isolante). Dessa forma, constata-se que o de grau 3 possui a maior camada, conseqüentemente a maior massa (g) também.

Após os ensaios realizados segrega-se uma amostra de fio para análise no P&IT, onde é realizado o ensaio de concentricidade. A amostra de fio, encaminhada no dia seguinte para análise, tinha seu resultado aferido e disponibilizado três dias depois do recebimento das mesmas. Comumente, o material apresentava concentricidade fora do especificado. Obviamente, isso acarretava retrabalho e desperdício de tempo e material, pois ao planejar a intervenção o produto não estava mais em linha.

O ensaio de abrasão é realizado utilizando uma grandeza para cada diâmetro de fio específico, o ensaio é realizado em três pontos no fio (nos ângulos de 0°, 120° e 240 °), conforme Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Marcações de ensaio de abrasão da amostra de fio



Fonte: Dados primários da linha produtiva da WEG S.A. (2021).

Figura 13 - Equipamento abrasão com amostra fixada para o ensaio



Fonte: Dados primários da linha produtiva da WEG S.A. (2021).

Já o ensaio de concentricidade é analisado através de microscópio (Figura 14), identificando a camada mínima e máxima e, em seguida, realizando a medição de ambas as camadas da película de esmalte.

Figura 14 - Microscópio



Fonte: Dados primários da linha produtiva da WEG S.A. (2021).

A hipótese criada foi de que se o processo considerasse o aumento da carga utilizada na abrasão, seria possível avaliar a concentricidade do fio através do mesmo equipamento, sem precisar de dois processos separados. Dessa forma, o desenho metodológico utilizou os dados da Tabela 2, que é referência no ensaio de abrasão proposto, juntamente uma nova carga que será definida ao considerar a hipótese de que ao alocar uma carga maior sobre os fios, poder-se-ia avaliar a concentricidade por ensaio de abrasão.

Os novos ensaios, utilizando novas cargas para teste de abrasão a fim de correlacionar os valores com o teste concentricidade (utilizando o seis sigma). Assim, com o intuito de validar a hipótese, partiu-se do pressuposto de que o menor valor de abrasão apresentaria, também, o menor valor de espessura de camada, através da aplicação de ferramentas da metodologia seis sigma.

A análise foi feita correlacionando massa (g), bitola do fio (mm) e resistência da película do esmalte. Os três pontos foram avaliados para averiguar a correlação direta dos dados de ensaios de abrasão em uma planilha e também os dados de medição de concentricidade em outra planilha. É importante frisar que a medição realizada de concentricidade foi na mesma direção do ponto de ensaio de abrasão, por motivo de padronização da análise. Isso permitiu testar a hipótese de que o menor valor encontrado na abrasão tem relação com o menor valor encontrado na medição de concentricidade.

Em seguida, a ferramenta JMP (*software* de análises estatísticas) foi utilizada para relacionar os Diagrama de Frequência de Pontos, também conhecida por *Variability, Multivariate Charts e Dot Frequency Diagram*. Os gráficos gerados por essa ferramenta, apresentam todos os valores coletados de tal forma que os mesmos são dispostos de acordo com o plano de amostragem e os subgrupos utilizados para coletar os dados. Dessa forma, o JMP estabelece uma análise através de ferramentas gráficas e numéricas que permite estabelecer correlações entre variáveis de um processo ($x'1$) e as suas respectivas respostas ($y'1$).

Variability, por sua vez, foi uma ferramenta utilizada do JMP, pelo fato de facilitar o entendimento do efeito de uma variável sobre resposta em estudo, graficamente. Um ponto relevante de sua utilização foi o fato de poder analisar os números e alterar a disposição dos componentes de variação de acordo com o que se deseja visualizar. Da mesma forma, a ferramenta permitiu a retirada de variáveis para chegar a outras conclusões e entendimentos importantes.

O próximo passo metodológico foi selecionar as grandezas da amostragem para a ferramenta *Variability*. Nesse momento, optou-se pela seguinte seleção: Eixo Y1 (dados dos ensaios de Abrasão), Eixo Y2 (dados dos ensaios de Concentricidade) e Eixo X do abrasão (Tipo do fio, Matéria-prima, Alinhamento, Bitola, Massa, Amostra e Posição de Corte). A relação dos itens evidenciou a relação direta da hipótese gerada.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Faz-se uma exposição da análise obtida nos resultados da pesquisa, bem como uma discussão crítica a respeito deles.

4.1 Ensaio de abrasão e concentricidade

A resistência à abrasão é determinada como a força máxima que pode ser mantida quando um fio de aço raspa ao longo do fio sob uma força progressivamente crescente. Este ensaio simula os esforços mecânicos que podem incidir sobre o esmalte de uma peça ao longo do processo de bobinagem e montagem do motor.

Para realizar o ensaio de abrasão é necessário um corpo de prova de aproximadamente 380 mm de comprimento. Decapar a superfície de uma das extremidades do corpo de prova, utilizando o sistema de decapagem de fio ou estilete. No momento do teste, o corpo de prova deve ser fixado nas duas garras do aparelho, primeiro no lado direito (referência 6 da Figura 15) e depois no lado esquerdo (ref. 5 da Figura 15). Em seguida, para que o fio fique tensionado, deve-se prendê-lo com o manipulo levantado e somente depois baixá-lo (ref.4 da Figura 15).

Figura 15 - Equipamento de Abrasão



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

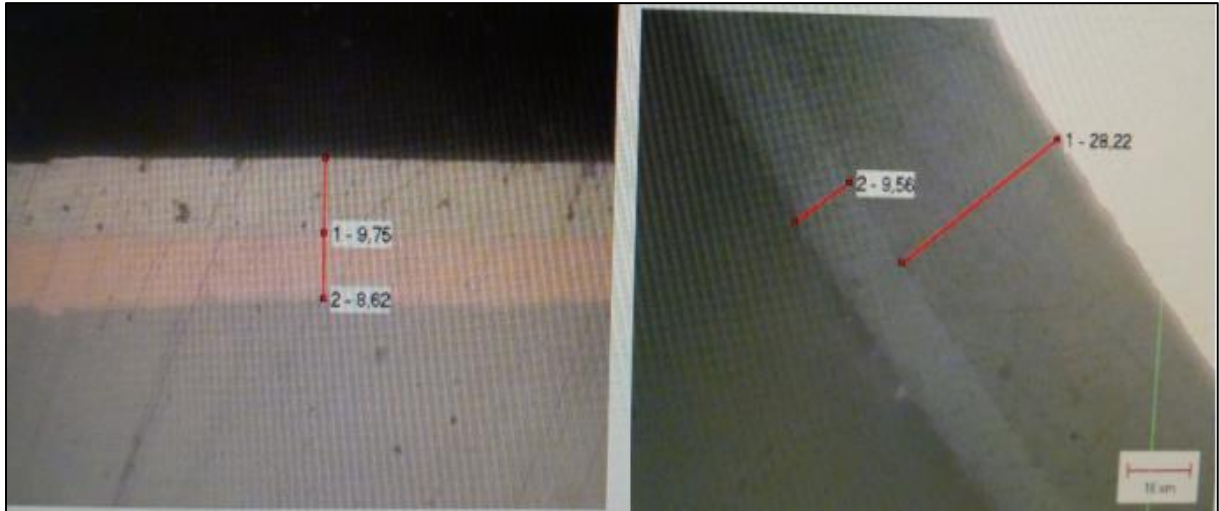
A massa a ser utilizada de acordo com as normas (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000) e colocar sobre o suporte das massas (ref. 2 da Figura 15). Em seguida, deve-se baixar o dispositivo de raspagem do aparelho girando o botão operacional no sentido horário até posição operante (ref. 3 da Figura 15). Aguardar o avanço do dispositivo, até a parada, ao ocorrer contato “FAULT” acender, indicando que houve falha (ref.1 Figura 15).

Em seguida, é necessário fazer a leitura da escala no ponto em que o dispositivo de raspagem parou. Retornar o dispositivo, girando o botão operacional no sentido anti-horário até posição “RESET” (ref.3 da Figura 15). Repetir o ensaio por mais duas vezes no mesmo corpo de prova, girando o fio em torno do seu próprio eixo em 120° a cada repetição. Para girar, deve-se mover simultaneamente os dois manípulos (ref. 4 e 7 da Figura 15), até se ouvir um clique, o que indica que houve 120° de rotação. Multiplicar cada valor lido pela massa inicial escolhida, e anotar o menor valor (abrasão mínima) e a média dos 3 resultados (abrasão média).

A espessura de camada pode ser compreendida como a dimensão dos revestimentos de superfícies, metálicas ou orgânicos, utilizados com a finalidade decorativa de isolamentos elétrico, resistência à corrosão e/ou resistência ao desgaste. O material utilizado pode ser depositado por processos de imersão, pintura eletrodeposição, aspersão térmica etc. A Figura 16 ilustra a medição de espessura de

camada de cobre e estanho, na esquerda, e a medição de espessura de camada de esmalte em fio de cobre na direita.

Figura 16 - Camada da película de esmalte

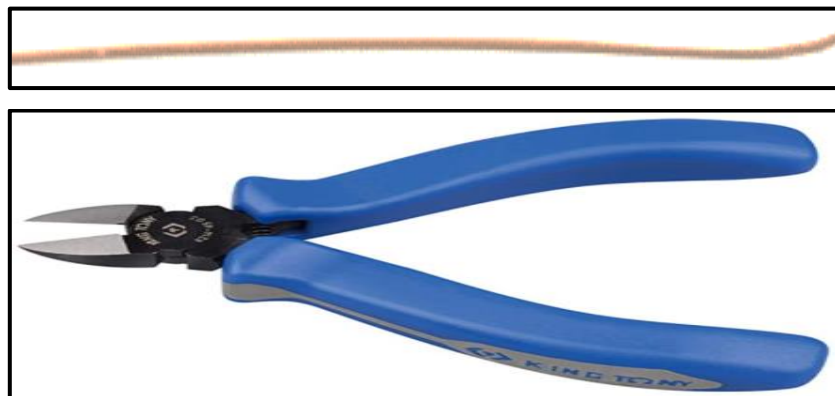


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 Preparação para o ensaio da espessura da camada de esmalte

Definir a amostra de fio a ser ensaiada, e cortar a mesma com alicate (de acordo com a Figura 17), avaliar se as características superficiais da amostra não foram alteradas no corte. Lubrificar a superfície interna do molde de embutimento com vaselina sólida, e embutir a amostra intercalando entre as faces a serem analisadas. Extrair o corpo de prova do molde e lixar o corpo de prova embutido na lixadeira tipo cinta com lixa nº 50, até nivelar o mesmo com a superfície da resina, lavando-o intercaladamente com água, para não haver aquecimento.

Figura 17 – Amostra de fio e alicate



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em seguida, deve-se fazer o acabamento da superfície, lixando o corpo de prova de modo que a camada a ser analisada seja lixada de fora para dentro, ou seja, da periferia para o centro do corpo de prova e utilizar lixas na seguinte sequência nº 240, 600, 1000 ou 1200.

Ao efetuar o polimento do corpo de prova, deve ser realizado somente quando todos os riscos deixados pela lixa anterior tiverem desaparecido. Efetuar o polimento do corpo de prova, posicionando-o para que a camada a ser analisada seja polida de fora para dentro, mantendo o pano de polimento sempre umedecido com álcool etílico hidratado, utilizando como abrasivo pasta de diamante de 0 a 2 μm .

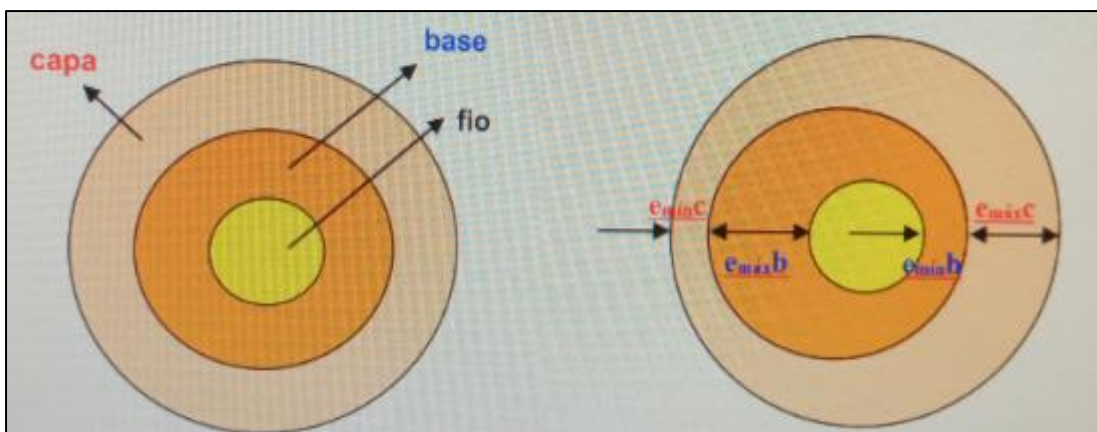
Para fios de cobre esmaltados circulares, o polimento do corpo de prova deve ser realizado através de movimentos circulares. Limpar o corpo de prova com álcool etílico p.a. Retirar o corpo de prova, umedecido em álcool etílico, p.a e secar com papel absorvente e um jato de ar quente.

4.3 Execução do ensaio da espessura da camada de esmalte

Inicialmente, foi necessário posicionar a amostra no microscópio e focalizar na região da camada, realizando a captura da imagem no software (Digimet Plus V4) de análise de imagens, e realizar a medição da camada em análise.

A medição de espessura de camada de fios esmaltados (cálculo do desvio de concentricidade) de cobre ou alumínio é feita em duas etapas: primeiramente mede-se a camada com menor espessura para os recobrimentos interno (base) e externo (capa) e, em seguida, medir a região com maior espessura das camadas, conforme ilustra a Figura 18.

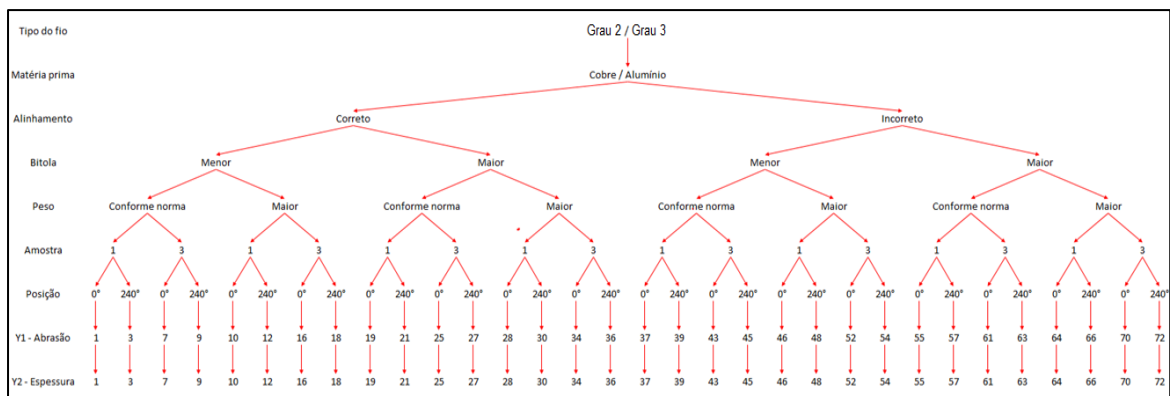
Figura 18 - Espessura das camadas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A hipótese (Figura 19) criada foi de que se o processo considerasse uma carga conforme a norma e aumento da carga utilizada no abrasão, seria possível avaliar a concentricidade do fio através do mesmo equipamento, sem precisar de dois processos separados. A metodologia usou os dados da norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000), que é referência no ensaio de abrasão proposto, com uma nova carga que será definida ao considerar a hipótese de que alocando uma carga maior sobre os fios, poder-se-ia avaliar a concentricidade por meio do ensaio de abrasão.

Figura 19 - Experimentos planejados para validar a hipótese



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na tabela 3 apresentam-se a estratificação dos ensaios realizados do condutor de Alumínio grau 2 usando Abrasão unidirecional como referência a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000). Para validar a hipótese, simulou-se, em testes, com a massa (g) conforme a norma o erro proposital de se utilizar uma massa (g) de alumínio igual à norma e maior que a norma estabelecida (fio de grau 2). Assim, foi utilizado a carga (peso) de grau 3 para a realização do teste. Como resultado, dispostos na tabela 3, todos os resultados de abrasão foram iguais ao máximo e não houve variação grifada em amarelo. Isso quer dizer que para o fio de alumínio, a norma estabelecida não identifica os problemas de fios de alumínio.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 2

Alumínio Grau 2								
Tipo do fio	Matéria prima	Alinhamento	Bitola (mm)	Massa (g)	Amostra	Posição	Y1 - Abrasão Fios	Y2 - Espessura P&IT
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	0°	2	CONFIDENCIAL WEG
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	120°	2	
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	240°	2	

Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 432	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma / 387	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 490	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior /490	3	240°	2

Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma / 337	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 432	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma / 387	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	2	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma /387	3	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	1	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 490	1	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	1	240°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	2	0°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	2	120°	2
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	2	240°	2

Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	3	0°	2	
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	3	120°	2	
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior /490	3	240°	2	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ao racionalizar os testes e compreender os padrões dos resultados (Tabela 3), observou-se que a proximidade dos testes estava no material condutor da eletricidade (cobre). Assim, a pesquisa estabeleceu uma nova estratificação, considerando uma nova carga para o condutor de Cobre e Alumínio, corrigindo as proporções de materiais ao considerar a massa (g) e o grau dos fios. Na tabela 4 a seguir está a estratificação da nova carga proposta para o condutor de Cobre e Alumínio grau 2 e grau 3 usando Abrasão unidirecional como referência a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000). O aumento do grau proporcionou uma maior sensibilidade para encontrar erros na concentricidade.

Dessa forma, foi criado um novo nível de grau para avaliação de concentricidade através do ensaio de abrasão unidirecional (g) para os fios circulares esmaltados de cobre e alumínio. A partir do valor de referência utilizado nos ensaios de abrasão unidirecional, descritos na metodologia, utilizou-se para o fio grau 2 a massa (g) do fio grau 3. Para o fio grau 3, que já estava sendo mensurado com o nível máximo da tabela, foi utilizado uma referência. O cálculo dessa referência foi Grau 3 [novo] = Grau 3 [antigo] + (Grau 3 [antigo] - Grau 2).

Tabela 4 - Massa inicial para avaliação de concentricidade através do ensaio de abrasão

MASSA INICIAL PARA AVALIAÇÃO DE CONCENTRICIDADE ATRAVÉS DO ENSAIO DE ABRASÃO UNIDIRECIONAL (g)		
DIÂMETRO DO CONDUTOR (mm)	COBRE / ALUMÍNIO	
	GRAU 2	GRAU 3 (novo)
0,250	463	552
0,265	495	590
0,280	495	590
0,300	526	620
0,315	526	620
0,335	562	660
0,355	562	660
0,400	607	719
0,450	648	765
0,475	693	814
0,500	693	814
0,530	747	882
0,560	747	882
0,600	801	945
0,630	801	945

0,670	850	998
0,710	850	998
0,750	900	1044
0,800	900	1044
0,850	958	1106
0,900	958	1106
0,950	1021	1178
1,000	1021	1178
1,060	1089	1260
1,120	1089	1260
1,180	1165	1340
1,250	1165	1340
1,320	1237	1412
1,400	1237	1412
1,500	1327	
1,600	1327	
1,700	1399	
1,800	1399	
1,900	1399	
2,000	1399	
2,120	1399	
2,240	1399	
2,360	1476	
2,500	1476	
2,588	1476	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 5 apresenta-se a estratificação dos ensaios realizados do condutor de Alumínio grau 2, bitola (mm) menor e maior e o alinhamento correto e incorreto. A massa (g) conforme a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000) do fio de cobre e massa maior conforme Tabela 4. Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de abrasão unidirecional sendo em três posições, (0°, 120° e 240°). No eixo Y1 apresentam-se as medidas de abrasão realizadas. Estas amostras foram identificadas, e na mesma direção de onde foi realizado o ensaio de abrasão foi feita a medição da espessura da camada no P&IT Y2.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 2 proposto

Alumínio Grau 2 Proposto											
Tipo do fio	Matéria prima	Alinhamento	Bitola (mm)	Massa (g)	Amostra	Posição	Y1 - Abrasão Fios	Y2 - Espessura P&IT	Tolerância de camada mínima (µm)	Variação pela mínima camada	Variação por abrasão
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	0°	1,82	CONFIDENCIAL WEG		19%	10%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	120°	2				

Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	0°	2	4%	25%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	120°	1,6		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	0°	2	27%	0%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	120°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	1	0°	1,48	12%	35%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	1	120°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	1	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	2	0°	1,4	19%	43%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	2	120°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	2	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	3	0°	1,52	24%	32%
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	3	120°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Menor /0,670	Maior / 850	3	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	0°	2	7%	0%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	120°	2		
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	240°	2		

Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	0°	2		23%	0%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	120°	2			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	240°	2			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	0°	1,8		13%	6%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	120°	1,8			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	240°	1,9			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	1	0°	1,52		14%	7%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	1	120°	1,5			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	1	240°	1,6			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	2	0°	1,75		10%	13%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	2	120°	1,8			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	2	240°	1,6			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	3	0°	1,58		11%	3%
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	3	120°	1,55			
Grau 2	Alumínio	Correto	Maior /0,900	Maior / 958	3	240°	1,6			
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	0°	1,45		17%	20%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	120°	1,65			
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	1	240°	1,74			
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	0°	2		22%	21%

Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	120°	1,75		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	2	240°	1,65		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	0°	1,8	28%	11%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	120°	1,72		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Conforme norma Cobre / 702	3	240°	1,62		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	1	0°	1,2	30%	32%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	1	120°	1,5		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	1	240°	1,58		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	2	0°	1,4	28%	24%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	2	120°	1,55		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	2	240°	1,25		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	3	0°	1,6	15%	24%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	3	120°	1,29		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Menor /0,670	Maior / 850	3	240°	1,3		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	0°	1,62	48%	23%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	120°	1,9		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	1	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	0°	1,8	15%	30%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	120°	1,54		

Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	2	240°	2		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	0°	1,6	6%	13%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	120°	1,8		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Conforme norma Cobre / 810	3	240°	1,65		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	1	0°	1,45	32%	21%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	1	120°	1,7		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	1	240°	1,4		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	2	0°	1,45	11%	17%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	2	120°	1,32		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	2	240°	1,55		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	3	0°	1,54	37%	18%
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	3	120°	1,3		
Grau 2	Alumínio	Incorreto	Maior /0,900	Maior / 958	3	240°	1,42		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No Anexo A apresenta-se a estratificação dos ensaios realizados do condutor de Alumínio grau 3, bitola (mm) menor e maior e o alinhamento correto e incorreto. A massa (g) conforme a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000) do fio de cobre e massa maior conforme tabela 4. Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de abrasão unidirecional sendo em três posições, (0°, 120° e 240°). No eixo Y1 apresentam-se as medidas de abrasão realizadas. Estas amostras foram identificadas, e na mesma direção de onde foi realizado o ensaio de abrasão foi feita a medição da espessura da camada no P&IT Y2.

No Anexo B apresenta-se a estratificação dos ensaios realizados do condutor de cobre grau 2, bitola (mm) menor e maior e o alinhamento correto e incorreto. A massa (g) conforme a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000) do fio de cobre e massa maior conforme tabela 4. Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de abrasão unidirecional sendo em três posições, (0°, 120° e 240°). No eixo Y1 apresentam-se as medidas de abrasão realizadas. Estas amostras foram identificadas, e na mesma

direção de onde foi realizado o ensaio de abrasão foi feita a medição da espessura da camada no P&IT Y2

No Anexo C apresenta-se a estratificação dos ensaios realizados do condutor de cobre grau 3, bitola (mm) menor e maior e o alinhamento correto e incorreto. A massa (g) conforme a norma (IEC 60851-3 e NEMA MW 1000) do fio de cobre e massa maior conforme tabela 4. Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de abrasão unidirecional sendo em três posições, (0°, 120° e 240°). No eixo Y1 apresentam-se as medidas de abrasão realizadas. Estas amostras foram identificadas, e na mesma direção de onde foi realizado o ensaio de abrasão foi feita a medição da espessura da camada no P&IT Y2.

A partir dos resultados demonstrados, e a partir da fórmula de concentricidade por abrasão unidirecional, considerou-se que o material estaria conforme/aprovado se estivesse dentro dos limites de especificações na Tabela 6. Para a definição de tolerância dos graus 2 e 3, considerou-se por aproximação os valores 20% e 25%. Isso significa que em 100% dos casos de medições (reprovadas) o grau de tolerância respeitou as marcações da referida Tabela 6.

Tabela 6 - Critério de aceitação

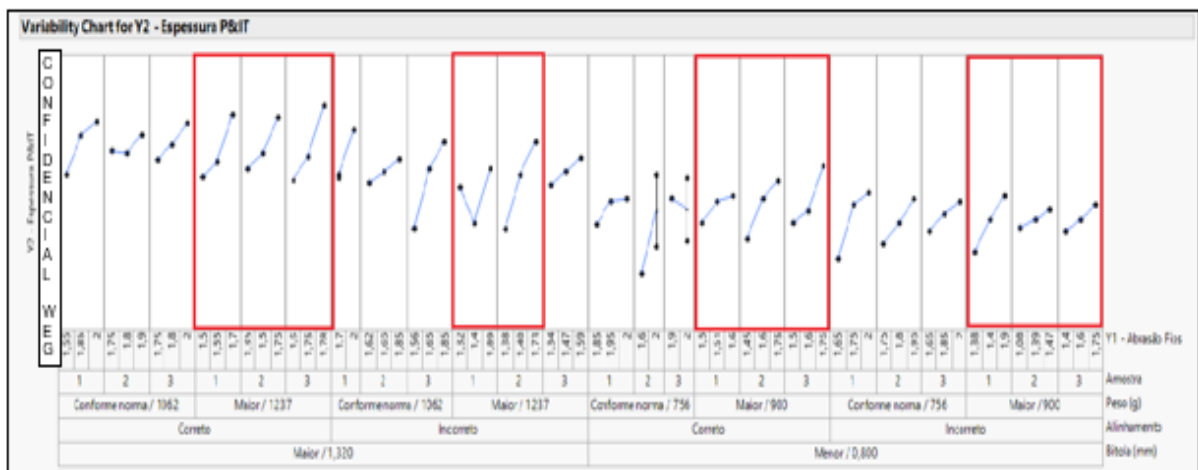
Tipo do fio	Tolerância de variação no teste de concentricidade por abrasão
Grau 2	Menor que 25%
Grau 3	Menor que 20%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A massa (g) de abrasão proposta (grau 3), com a mesma massa (g) usado no fio de cobre, foi atribuída para ensaios nos fios de alumínio grau 2 proposto. Os dados da Tabela 5 representam a estratificação dos ensaios realizados. O Y1 representa os ensaios realizados por abrasão e o Y2 representa os ensaios realizados da espessura da camada de esmalte. Portanto, foi possível identificar que existe uma relação direta entre os ensaios de Abrasão com maior massa (g) e a espessura de camada isolante, ou seja, um menor valor de abrasão apresenta também um menor valor de espessura de camada conforme Figura 20.

A massa (g) de abrasão proposta, com a mesma massa (g) usado no fio de cobre grau 3, foi atribuída para ensaios nos fios de cobre grau 2. Os dados do Anexo B representam a estratificação dos ensaios realizados. O Y1 representa os ensaios realizados por abrasão e o Y2 representa os ensaios realizados da espessura da camada de esmalte. Portanto, foi possível identificar que existe uma relação direta entre os ensaios de Abrasão com maior massa (g) e a espessura de camada isolante, ou seja, um menor valor de abrasão apresenta também um menor valor de espessura de camada conforme Figura 22.

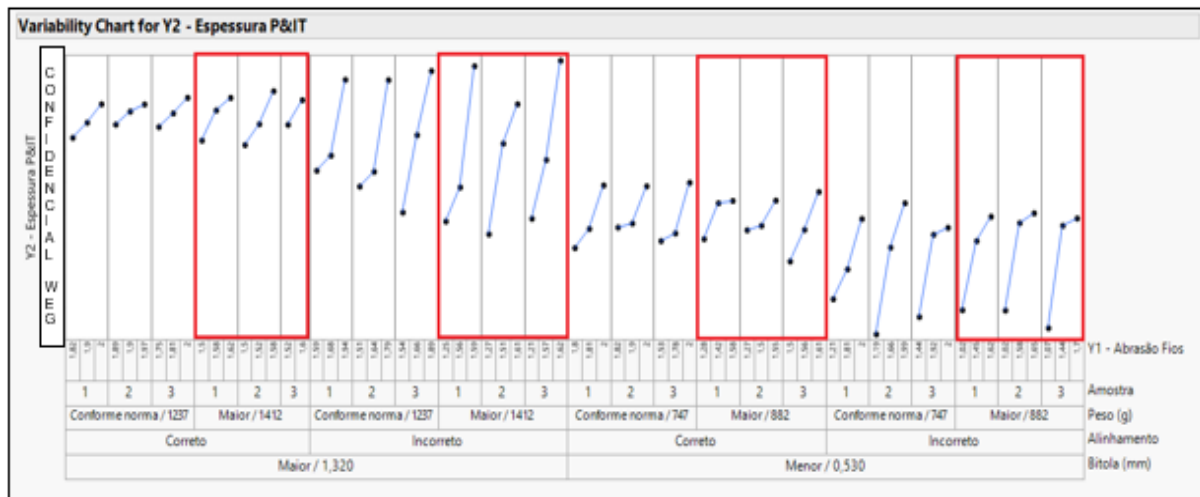
Figura 22 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada cobre grau 2



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A massa (g) de abrasão proposta foi criada uma massa (g) para usar em fio de cobre grau 3. E foi atribuída para ensaios nos fios de cobre grau 3. Os dados do Anexo C representam a estratificação dos ensaios realizados. O Y1 representa os ensaios realizados por abrasão e o Y2 representa os ensaios realizados da espessura da camada de esmalte. Portanto, foi possível identificar que existe uma relação direta entre os ensaios de Abrasão com maior massa (g) e a espessura de camada isolante, ou seja, um menor valor de abrasão apresenta também um menor valor de espessura de camada conforme Figura 23.

Figura 23 - Gráfico Abrasão x Espessura de camada de cobre grau 3



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando os resultados foi possível identificar que existe uma relação direta entre os testes de Abrasão unidirecional e a espessura de camada isolante, ou seja, um menor valor de abrasão apresenta também um menor valor de espessura de camada. O planejamento inicial e o conhecimento do processo ajudaram na elaboração do projeto. O mapa de raciocínio tem uma lógica voltada para o planejamento e foi respeitado ao longo dos estudos. Dessa forma, as questões levantadas, em teoria, foram discutidas e adaptadas pela metodologia para que fossem respondidas (WERKEMA, 2002).

Com o uso da metodologia Seis Sigma definiu-se a tolerância de concentricidade através do ensaio de abrasão unidirecional, e o aprendizado sequencial permitiu alcançar os resultados almejados, sem que onerasse custos financeiros para a empresa. E eliminando o envio de amostras de fio para análise no P&IT. Segundo Paladini (2005) um processo instável num período de tempo, pode causar tanta confusão na linha de produção como a irregularidade das medidas de uma peça, uma hora vai ser grande demais e outra hora pequena demais.

O que se constatou na análise, foi que os ensaios de concentricidade nos fios circulares esmaltadas são realizados quando o produto tem início no processo produtivo, além de resolver o problema em questão, diminuindo o tempo de espera de ensaios que era de até 3 dias para 5 minutos após o recebimento da amostra. A ferramenta, em questão, considera o processo como uma árvore de amostragem criada na análise.

Já a ramificação, ou ramos desta árvore, pode ser independente ou dependente da camada anterior (WERKEMA, 2011). Para obter êxito no projeto precisou-se de um bom planejamento inicial e uma estratégia de amostragem bem planejada. Com o novo método, de ensaios de concentricidade por abrasão, foi eliminado o envio de amostras de fios para ensaios de concentricidade. E os ensaios começaram a ser realizados no momento da troca de fio, ou seja, se for encontrado algum erro de concentricidade acima da especificação da tabela 6, os responsáveis pelo processo produtivo são imediatamente avisados e a nova amostra é ensaiada até atender as especificações exigidas.

Essa forma de condução é coerente com a literatura apresentada, pois entende-se que todas as variáveis do processo sejam identificadas na construção do plano de amostragem, levando em consideração o conhecimento adquirido e a capacidade de medir e controlar. O projeto demonstrou que se houver alguma alteração é importante que seja evidenciada no momento da decisão, o que confirma a hipótese de Piucco *et.al.* (2019), para as restrições e casualização.

Contudo, a tomada de decisão na organização passou a considerar um novo conjunto de informações, onde o fio circular esmaltado com a concentricidade por abrasão, ao respeitar os limites de especificações do presente trabalho, tem a característica de ficar mais estável e mais padronizado. Ressalta-se que o projeto reduziu a quantidade de ensaios no processo produtivo. Antes das novas especificações eram realizados 984 ensaios/ano no P&IT e a partir do novo método os ensaios foram reduzidos a 0 uma vez que apenas um procedimento na própria linha produtiva é capaz de encontrar os possíveis problemas.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho contemplou a utilização de experimentos para analisar a correlação entre os ensaios de abrasão unidirecional e ensaio de concentricidade. A partir dos resultados obtidos foi possível definir um novo método de ensaio. Para chegar a esse resultado, o projeto utilizou a metodologia seis sigma. O bom planejamento inicial, para coleta de dados e a validação dos mesmos e interpretação dos resultados, foi fundamental para o encontro das novas técnicas do método implementado no ensaio de concentricidade da película de esmalte do fio circular esmaltado.

O planejamento associado à árvore de amostragem possibilitou a estratificação das amostras para realização dos ensaios. O objetivo geral deste projeto foi alcançado, sendo que foi proposto e alterado o ensaio de concentricidade para o ensaio de concentricidade por abrasão unidirecional, isso só foi possível devido aos resultados da correlação entre os ensaios onde o menor valor para concentricidade também foi o menor valor no ensaio de abrasão unidirecional por concentricidade.

Dessa forma, os ensaios passaram a ser realizados na fábrica de fios no momento em que o produto é iniciado na linha produtiva. Esse procedimento tornou possível a economia de escopo, pois eliminou-se o problema em questão, diminuindo o tempo de espera de ensaios e agilizando o processo de medição no mesmo espaço de trabalho. Além disso, foi criado também os limites de especificações para facilitar a tomada de decisão no momento do ensaio, o que antes se mostrava inviável pelo tempo de ensaio em outro departamento (P&IT).

As maiores dificuldades foram no momento da realização do ensaio de concentricidade no P&IT, pois estes ensaios foram realizados na mesma direção e na mesma amostra que foi realizado o ensaio de concentricidade por abrasão unidirecional anteriormente. Caso houvesse qualquer erro ou dúvida na posição do ensaio, uma nova amostra precisava ser ensaiada. Estas amostras foram cuidadosamente identificadas e embutidas. As medidas foram sempre com a presença de duas pessoas, conferindo a direção das 432 amostras do estudo.

Quanto à limitação do ensaio de abrasão unidirecional por concentricidade, pode-se considerar que a não visualização das películas de esmalte (que estão deslocadas por se tratar de um ensaio mecânico), possibilita saber que existe um problema com a amostra, mas não é possível saber qual película está deslocada. A

partir do trabalho elaborado, uma nova amostra possibilidade de pesquisa surge. Entende-se que, com a utilização da metodologia para o desenvolvimento, seria possível realizar novas correlações do ensaio de concentricidade por abrasão unidirecional com o teste de vida dos fios, por exemplo.

Contudo, entende-se que a estrutura produtiva da empresa analisada foi criada com a função de transformar matéria-prima em produto acabado de forma inovadora. O desenvolvimento observado na empresa foi eficiente ao longo do período observado, além de se mostrar aberto para a incorporação de novas técnicas que melhorem o desempenho e, como consequência, melhorassem o atendimento das demandas dos clientes. A técnica se mostrou válida ao coletar, interpretar e propor soluções baseadas na ciência, o que otimizou o processo de melhoria descrito no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair, JOHNSTON, Robert. Administração da produção. Tradução de Daniel Vieira. 2018.

IEC 60851-3: 1997 MOD Winding wires **Test methods Part 3: Mechanical Properties** p.19, 20.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004

NEMA MW 1000 magnet wire. In: **Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo**, 2005. IEEE, 2005. p. 216

PIUCCO, R.O. et al. **Material Didático Six Sigma Yellow Belt. WEG. 2019.**

PALADINI, E. P.; CARVALHO, M. M. **Gestão da qualidade: teoria e casos.** Rio de Janeiro: Elsevier: Campos, 2005.

RODRIGUES, M. V. **Ações para a qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade.** 3. Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

RONTONDORO, R. G.; RAMOS, A.W.; RIBEIRO, C. O.; MIYAKE D.I.; MAKANO, D.; LAURINDO, F.J.B.; LEE HO, L.; CARVALHO, M.M.; BRAZ, M.A.; BALESTRASSI, P.P. **Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços.** São Paulo: Atlas, 2002.

HILD, C. R.; SANDERS, D.; ROSS, B. **The Thought Map.** To appear in Quality Progress. 1998

SLACK, Nigel et al. Administração da produção. São Paulo: Atlas, 2009.

WERKEMA, MCC. **Criando a cultura do Seis Sigma.** v. 1. Belo Horizonte: Werkema Editora., 2002.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino, **Criando a Cultura Seis Sigma.** Nova Lima, MG: Werkema Ed., 2004

WERKEMA, Maria Cristina Catarino, **Avaliação de Sistemas de Medição.** Nova Lima, MG: Werkema Ed., 2011

WHEELER, Donald J., **Understanding Statistical Process Control.** SPC Press, 1992.

ANEXOS

Anexo A - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Alumínio grau 3 proposto.

Alumínio Grau 3 Proposto											
Tipo do fio	Matéria prima	Alinhamento	Bitola (mm)	Massa (g)	Amostra	Posição	Y1 - Abrasão Fios	Y2 - Espessura P&IT	Tolerância de camada mínima (µm)	Variação pela mínima camada	Variação por abrasão
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	0°	1,66	CONFIDENCIAL WEG		12%	28%
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	120°	2				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	240°	1,56				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	0°	2			9%	20%
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	120°	1,67				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	240°	1,72				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	0°	1,83			5%	9%
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	120°	2				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	240°	2				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	1	0°	1,35			5%	13%
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	1	120°	1,2				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	1	240°	1,36				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	2	0°	1,4			7%	6%
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	2	120°	1,34				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	2	240°	1,32				
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	3	0°	1,42			12%	4%

Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	3	120°	1,45		
Grau 3	Alumínio	Correto	Menor / 0,600	Maior/945	3	240°	1,39		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	0°	1,75	11%	9%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	120°	1,77		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	240°	1,62		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	0°	1,6	14%	7%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	120°	1,6		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	240°	1,72		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	0°	1,72	15%	8%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	120°	1,65		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	240°	1,78		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	0°	1,46	13%	13%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	120°	1,65		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	240°	1,55		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	0°	1,45	11%	14%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	120°	1,43		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	240°	1,63		
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	0°	1,63	16%	3%
Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	120°	1,67		

Grau 3	Alumínio	Correto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	240°	1,68			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	0°	2		14%	6%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	120°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	1	240°	1,89			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	0°	2		11%	0%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	120°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	2	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	0°	2		8%	23%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	120°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Conforme norma Cobre/801	3	240°	1,62			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	1	0°	2		8%	38%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	1	120°	1,45			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	1	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	2	0°	1,53		2%	31%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	2	120°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	2	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	3	0°	2		11%	38%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	3	120°	1,45			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Menor / 0,600	Maior/945	3	240°	2			

Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	0°	1,54		24%	32%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	120°	1,52			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	1	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	0°	2		14%	34%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	120°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	2	240°	1,49			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	0°	1,64		17%	24%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	120°	1,61			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma Cobre/1237	3	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	0°	1,25		21%	13%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	120°	1,29			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	1	240°	1,41			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	0°	1,23		14%	63%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	120°	1,4			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	2	240°	2			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	0°	1,24		28%	14%
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	120°	1,41			
Grau 3	Alumínio	Incorreto	Maior / 1,320	Maior/1412	3	240°	1,3			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Anexo B - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Cobre grau 2

Cobre Grau 2											
Tipo do fio	Matéria prima	Alinhamento	Bitola (mm)	Massa (g)	Amostra	Posição	Y1 - Abrasão Fios	Y2 - Espessura P&IT	Tolerância de camada mínima (µm)	Varição pela mínima camada	Varição por abrasão
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	0°	1,85	CONFIDENCIAL WEG		8%	8%

Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	120°	1,95		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	240°	2		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	0°	2	37%	25%
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	120°	1,6		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	240°	2		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	0°	2	21%	5%
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	120°	1,9		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	240°	2		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	0°	1,6	8%	7%
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	120°	1,5		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	240°	1,51		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	0°	1,45	19%	21%
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	120°	1,6		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	240°	1,75		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	0°	1,5	18%	17%
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	120°	1,6		
Grau 2	Cobre	Correto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	240°	1,75		
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	0°	1,55	14%	29%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	120°	1,85		
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	240°	2		
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	0°	1,9	5%	9%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	120°	1,8		
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	240°	1,75		

Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	0°	1,75		10%	14%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	120°	1,8			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	240°	2			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	0°	1,5		17%	13%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	120°	1,7			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	240°	1,55			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	0°	1,35		14%	30%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	120°	1,75			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	240°	1,5			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	0°	1,5		21%	19%
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	120°	1,75			
Grau 2	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	240°	1,78			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	0°	1,75		23%	21%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	120°	2			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	1	240°	1,65			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	0°	1,75		15%	11%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	120°	1,8			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	2	240°	1,95			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	0°	1,65		10%	21%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	120°	1,85			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Conforme norma / 756	3	240°	2			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	0°	1,4		20%	38%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	120°	1,38			

Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	1	240°	1,9		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	0°	1,47	6%	36%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	120°	1,39		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	2	240°	1,08		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	0°	1,6	9%	25%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	120°	1,75		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Menor / 0,800	Maior / 900	3	240°	1,4		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	0°	2	13%	18%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	120°	1,7		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	1	240°	1,7		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	0°	1,65	7%	14%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	120°	1,62		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	2	240°	1,85		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	0°	1,65	28%	19%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	120°	1,56		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1062	3	240°	1,85		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	0°	1,4	17%	43%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	120°	1,32		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	1	240°	1,89		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	0°	1,73	28%	25%
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	120°	1,38		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	2	240°	1,48		
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	0°	1,34	8%	19%

Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	120°	1,47			
Grau 2	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1237	3	240°	1,59			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Anexo C - Resultados dos ensaios de abrasão e espessura de camada Cobre grau 3

Cobre Grau 3											
Tipo do fio	Matéria prima	Alinhamento	Bitola (mm)	Massa (g)	Amostra	Posição	Y1 - Abrasão Fios	Y2 - Espessura P&IT	Tolerância de camada mínima (µm)	Variação pela mínima camada	Variação por abrasão
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	0°	2	CONFIDENCIAL WEG		29%	11%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	120°	1,8				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	240°	1,81				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	0°	2			17%	10%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	120°	1,82				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	240°	1,9				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	0°	1,53			26%	31%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	120°	1,78				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	240°	2				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	0°	1,58			17%	23%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	120°	1,28				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	240°	1,42				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	0°	1,55			13%	22%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	120°	1,5				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	240°	1,27				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	0°	1,5			34%	7%
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	120°	1,56				
Grau 3	Cobre	Correto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	240°	1,61				

Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	0°	1,9		10%	10%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	120°	1,82			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	240°	2			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	0°	1,9		6%	4%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	120°	1,97			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	240°	1,89			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	0°	2		9%	14%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	120°	1,81			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	240°	1,75			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	0°	1,5		13%	8%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	120°	1,58			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	240°	1,62			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	0°	1,52		17%	5%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	120°	1,5			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	240°	1,58			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	0°	1,52		7%	5%
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	120°	1,6			
Grau 3	Cobre	Correto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	240°	1,52			
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	0°	1,21		48%	65%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	120°	1,81			
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	1	240°	2			
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	0°	1,19		100%	67%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	120°	1,66			

Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	2	240°	1,99		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	0°	2	60%	39%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	120°	1,44		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Conforme norma / 747	3	240°	1,92		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	0°	1,45	60%	59%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	120°	1,62		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	1	240°	1,02		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	0°	1,02	63%	62%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	120°	1,65		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	2	240°	1,58		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	0°	1,7	80%	59%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	120°	1,07		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Menor / 0,530	Maior / 882	3	240°	1,44		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	0°	1,59	31%	22%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	120°	1,68		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	1	240°	1,94		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	0°	1,64	38%	19%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	120°	1,79		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	2	240°	1,51		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	0°	1,54	56%	23%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	120°	1,66		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Conforme norma / 1237	3	240°	1,89		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	0°	1,25	64%	27%

Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	120°	1,56		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	1	240°	1,59		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	0°	1,27	56%	27%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	120°	1,61		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	2	240°	1,51		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	0°	1,21	64%	34%
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	120°	1,62		
Grau 3	Cobre	Incorreto	Maior / 1,320	Maior / 1412	3	240°	1,57		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.