



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia da Qualidade 4.0



EDSON GONÇALVES NUNES JÚNIOR
ELI EDERSON DE DEUS DA SILVA
ELVIS RODRIGUES BATISTA
JESSICA PEREIRA GONÇALVES
JÚLIO CÉSAR GONÇALVES

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS:
REDUÇÃO DA VARIAÇÃO NA FORÇA RADIAL**

CURITIBA
2024

EDSON GONÇALVES NUNES JÚNIOR
ELI EDERSON DE DEUS DA SILVA
ELVIS RODRIGUES BATISTA
JESSICA PEREIRA GONÇALVES
JÚLIO CÉSAR GONÇALVES

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS:
REDUÇÃO DA VARIAÇÃO NA FORÇA RADIAL**

Trabalho apresentado como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Qualidade 4.0 - Certificado Black Belt. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Egon Walter Wildauer

**CURITIBA
2024**

RESUMO

A força radial é a força perpendicular ao eixo de rotação do pneu e é essencial para avaliar a uniformidade e o balanceamento, influenciando diretamente o conforto e a segurança do veículo. Durante a fabricação de pneus, observa-se uma variação significativa na força radial, resultando em produtos que não atendem às especificações de qualidade e requisitos do cliente. Essa variação representa um desafio, pois compromete a qualidade, aumenta os custos de retrabalho e gera problemas relacionados à logística reversa e ao descarte adequado dos pneus não conformes, e o descarte inadequado pode causar impactos ambientais negativos e custos elevados. Para abordar estas questões, o presente estudo analisa relatórios históricos de rejeição de pneus nos últimos anos de empresa parceira, e utiliza a metodologia DMAIC, além de ferramentas como: Estatística Descritiva, Regressão Linear de Múltiplas Variáveis, tendo como principal objetivo identificar os principais fatores que afetam a variabilidade da força radial, permitindo o desenvolvimento de estratégias para otimizar o processo de fabricação. Com o estudo realizado, foi possível identificar que uma das principais causas de efeito, era a despadronização da velocidade de extrusão, e como uma das medidas de melhoria a padronização da velocidade dos equipamentos a 27 Hz estabilizou parâmetros críticos, com intervenções precisas nas variáveis críticas da região do talão, resultando em uma redução de 25,64% nas rejeições por uniformidade, correspondente à 594 pneus. A aplicação da Regressão Linear de Múltiplos Fatores, com R^2 de 89,14%, garantiu a robustez dos resultados. Observou-se a eficácia da metodologia utilizada, ao obter-se uma redução significativa de refugos de pneus e consequentes impactos ambientais, alcançando 93,95% da meta financeira proposta, com apenas 10/12 meses da melhoria implantada, alinhando o processo às expectativas do mercado e requisitos do cliente.

Palavras-chave: DMAIC, Força Radial, Pneus, Talão, Regressão Linear de Múltiplas Variáveis.

LISTA DE ABREVIATURAS

DMAIC - *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*

SIPOC - *Supplier, Input, Process, Output e Customer*

QDF - *Quality Function Deployment*

VEs - *Veículos Elétricos*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparativo de Força Radial Ideal x Força Radial Alterada.....	8
Figura 2 - Quadro QFD – Telhado e Correlações	8
Figura 3 - Evolução das rodas e pneus ao longo da História	10
Figura 4 - Pneu Banda de Rodagem	11
Figura 5 - Pneu Radial X Pneu Diagonal	12
Figura 6 - Fluxograma da Fabricação de Pneus	13
Figura 7 - Casa da Qualidade.....	21
Figura 8 - Quadro QFD – Telhado e Correlações	44
Figura 9 - SIPOC - Fabricação de Pneus.....	46
Figura 10 - Histórico de Rejeitos de Pneus - Quadriênio	47
Figura 11 - Estratificação de Rejeição de Pneus em 2023.....	47
Figura 12 - GAP Analyses - Definição de Meta.....	48
Figura 13 - Distribuição de meta por competências - 2024	49
Figura 14 - Saving Potencial do Projeto.....	49
Figura 15 - Gráfico de Dispersão.....	50
Figura 16 - Teste de Normalidade de Anderson-Darling	51
Figura 17 - Cota do Pneu	52
Figura 18 - Coeficientes.....	53
Figura 19 - Sumário do Modelo	53
Figura 20 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados	54
Figura 21 - Cotas Influentes Identificadas.....	54

	4
Figura 22 - Ishikawa	55
Figura 23 - Frequência de Extrusão 35 Hz x Pesos das Amostras	56
Figura 24 - Frequência de Extrusão 40 Hz x Pesos das Amostras	56
Figura 25 - Frequência de Extrusão 27 Hz x Pesos das Amostras	56
Figura 26 - Corte e Medidas de Peso do Talão.....	57
Figura 27 - Comparativo Meta Calculada vs Atingimento	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variável x Coeficiente x Valor-p	33
Quadro 2 - Variável x Coeficiente x Erro x t x Valor-p	34
Quadro 3 - Metas Prioritárias	55

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	7
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	7
1.3	JUSTIFICATIVA	9
1.4	OBJETIVO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	DO COURO À BORRACHA - FABRICAÇÃO DE PNEUS	10
2.1.1	Pneus Sólidos	10
2.1.2	Pneus Pneumáticos	10
2.1.3	Pneus de Banda de Rodagem Removível e Pneus Radial	11
2.1.4	Pneus Inteligentes	12
2.2	PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS – BANDA DE RODAGEM	13
2.2.1	Misturação	14
2.2.2	Extrusão	14
2.2.3	Calandragem	15
2.2.4	Construção do Pneu - (Verde)	15
2.2.5	Cura ou Vulcanização	15
2.2.6	Inspeção da Qualidade	15
2.2.7	Força Radial	16
2.2.8	Descarte ou Reutilização	16
2.3	DMAIC	17
2.3.1	Fases do DMAIC	19
3	METODOLOGIA	42
3.1	FASE DEFINIR	42
3.2	FASE MEDIR	42
3.3	FASE ANALISAR	42
3.4	FASE MELHORAR	42
3.5	FASE CONTROLAR	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO MAPA DE RACIOCÍNIO	43
5	CONCLUSÕES	59

5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A indústria de fabricação de pneus desempenha um papel crucial no setor automotivo, atendendo a demandas crescentes por inovação, qualidade e sustentabilidade. Neste contexto, fatores como a uniformidade e o desempenho técnico dos pneus se tornaram primordiais para garantir a segurança, o conforto e a eficiência dos veículos modernos. Um aspecto técnico de grande relevância é a força radial, característica diretamente associada à qualidade e à confiabilidade do produto.

A pesquisa apresentada neste trabalho se insere nesse cenário, investigando a variabilidade da força radial no processo de fabricação de pneus, um desafio que afeta tanto a satisfação dos clientes quanto a eficiência produtiva.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

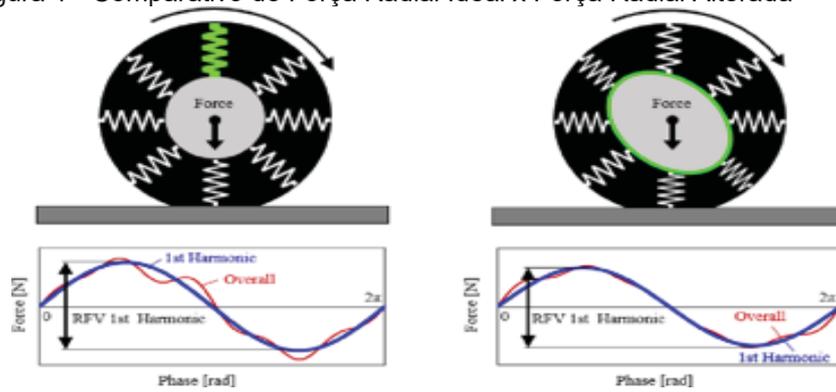
A indústria de pneus movimenta cerca de 261 bilhões de dólares anualmente, com grandes empresas como Bridgestone, Michelin, Goodyear e Continental, dentre outras. Contudo, enfrenta desafios devido à eletrificação dos veículos, que demandam pneus capazes de suportar maior peso e diferentes padrões de desgaste, por conta do torque instantâneo. A McKinsey & Company projeta que, até 2030, os veículos elétricos (VEs) representarão cerca de 30% das vendas de automóveis globalmente, exigindo inovação no setor.

Dado o cenário atual, este trabalho visa explorar a evolução da fabricação de pneus, analisar o impacto da eletrificação e discutir a relevância da força radial no processo de fabricação, contribuindo para a otimização do processo produtivo utilizado atualmente, nos âmbitos, operacionais, financeiros e ambientais.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No processo de fabricação de pneus para automóveis, observa-se uma variação significativa na força radial das peças produzidas, conforme ilustrado pela Figura 1.

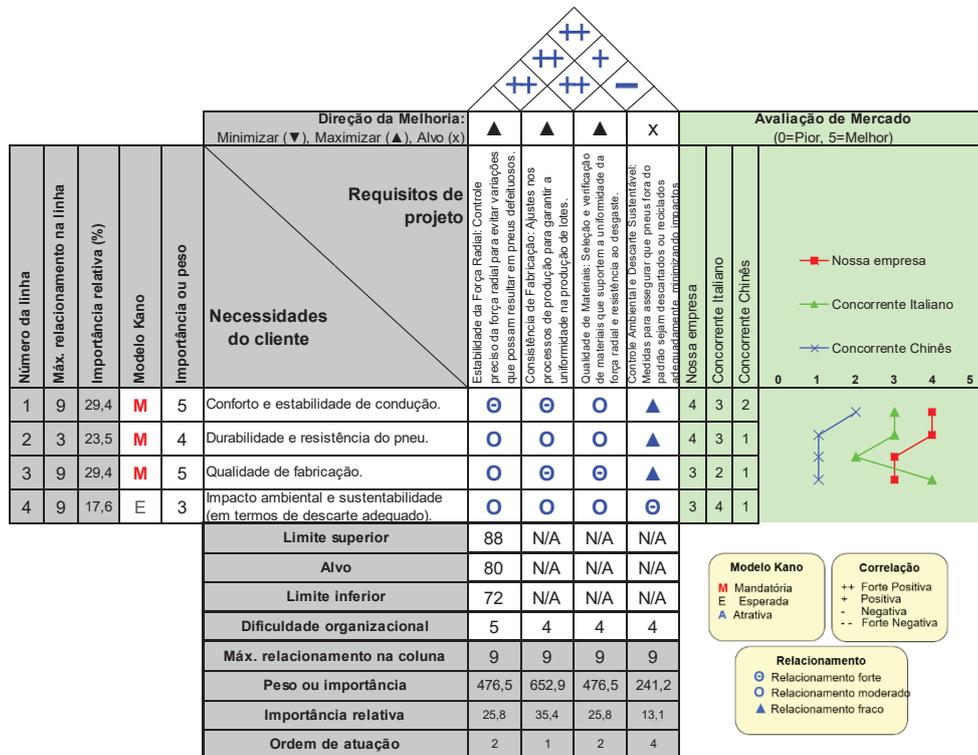
Figura 1 - Comparativo de Força Radial Ideal x Força Radial Alterada



FONTE: A Linguagem da Borracha, E.I. Du Pont de Nemours & Co, adaptado 2009

Isso se traduz também em pneus que não atendem as especificações de qualidade e de requisitos do cliente (QFD), pneus com força radial fora dos limites aceitáveis são rejeitados ou necessitam de retrabalho, acarretando aumento de custos, desperdício de materiais e processos adicionais para descarte ou reciclagem. Esses desafios também afetam a reputação da empresa no mercado, especialmente em um setor competitivo, onde os clientes valorizam confiabilidade e desempenho, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Quadro QFD – Telhado e Correlações



FONTE: Adaptado pelos AUTORES (2024)

1.3 JUSTIFICATIVA

A variação da força radial representa um desafio significativo, que impacta diretamente a qualidade dos pneus e elevando os custos de retrabalho, por ser um fator de reprovação do cenário produtivo. Além disso, questões relacionadas à logística reversa e ao descarte adequado dos pneus não conformes adicionam frequentemente, custos consideráveis, ao processo, o que reforça a necessidade de soluções eficazes e sustentáveis, evitando impactos ambientais negativos, para enfrentar esses problemas no setor.

1.4 OBJETIVO

Mapear e identificar qual etapa do processo tem maior influência nas medidas de uniformidade durante a montagem do pneu, com o intuito de realizar propostas de otimização e redução da variabilidade das medidas de força radial, que reprovam os pneus.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste estudo apresenta as bases teóricas e os avanços científicos relacionados ao tema da otimização do processo de fabricação de pneus, com ênfase na redução da variação da força radial. Inicia-se com uma abordagem histórica sobre a evolução dos pneus, destacando as principais inovações tecnológicas e as mudanças no processo produtivo ao longo do tempo. Em seguida, são discutidas as etapas do processo produtivo de pneus e suas inter-relações, com especial atenção às variáveis críticas que impactam a qualidade do produto final. A seção também explora a aplicação de metodologias como o DMAIC e ferramentas estatísticas, fundamentais para o desenvolvimento e a análise do presente trabalho, consolidando as conexões entre os fundamentos teóricos e a aplicação prática.

2.1 DO COURO À BORRACHA - FABRICAÇÃO DE PNEUS

Figura 3 - Evolução das rodas e pneus ao longo da História



FONTE: ANIP (2018)

2.1.1 Pneus Sólidos

A história da fabricação de pneus é marcada por inovações tecnológicas e avanços significativos na engenharia de materiais. Desde o surgimento do primeiro pneu até os modelos mais avançados da atualidade, essa indústria tem sido fundamental para o desenvolvimento da mobilidade e do transporte global. Os primeiros pneus, conhecidos como "pneus sólidos," eram fabricados de tiras de couro ou ferro e eram usados principalmente em carruagens e bicicletas no século XIX. (RUBBER, 1985)

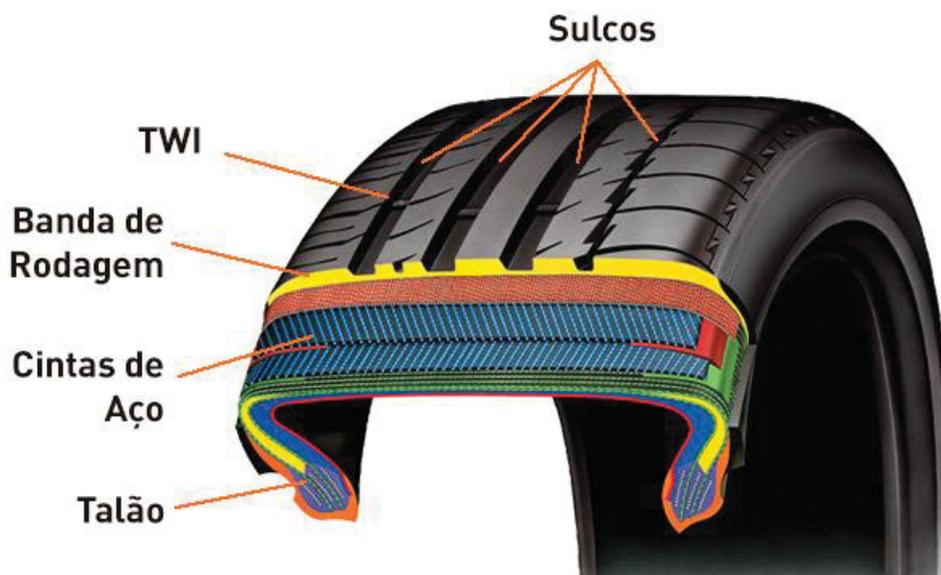
2.1.2 Pneus Pneumáticos

No entanto, a verdadeira revolução começou com a invenção do pneu inflável. Em 1845, Robert William Thomson, um engenheiro escocês, inventou e patenteou o primeiro pneu pneumático. Seu design consistia em um tubo de borracha preenchido com ar, envolvido por uma camada de couro. No entanto, devido à falta de borracha e à limitada infraestrutura de estradas na época, o invento de Thomson não foi comercialmente bem-sucedido. Foi então quando em 1888, John Boyd Dunlop, um veterinário escocês, redescobriu o conceito do pneu pneumático enquanto tentava proporcionar uma viagem mais confortável para a bicicleta de seu filho. Dunlop patenteou sua invenção e fundou a Dunlop Rubber Company, que rapidamente popularizou o uso de pneus pneumáticos em bicicletas e, eventualmente, em veículos motorizados. proporcionando maior conforto e segurança. (RUBBER, 1985)

2.1.3 Pneus de Banda de Rodagem Removível e Pneus Radial

Em 1908, Frank Seiberling, fundador da Goodyear Tire & Rubber Company, desenvolveu o pneu de banda de rodagem removível, que permitia a substituição apenas da parte desgastada do pneu, economizando tempo e recursos. Na Figura 4, pode-se conhecer os itens que formam o pneu de bada de rodagem removível.

Figura 4 - Pneu Banda de Rodagem



FONTE: <https://www.ctborracha.com> (2024)

Já em 1920 a Michelin introduziu no mercado o pneu radial, este modelo usava cordas de aço dispostas radialmente, proporcionando maior durabilidade, melhor desempenho em altas velocidades e menor resistência ao rolamento, impactando diretamente na economia de combustível, ou seja, eficiência. Na Figura 5 encontra-se ilustrado os pneus radial e diagonal. (RUBBER, 2004).



FONTE: reviewauto.com.br (2024)

Mas, foi durante a Segunda Guerra Mundial, onde houve escassez de borracha natural, e investiu-se o desenvolvimento de borracha sintética, que as grandes fabricantes da época como Goodyear, Firestone e B.F. Goodrich foram as primeiras a produzir os pneus sintéticos, utilizando polímeros derivados de petróleo. Este avanço permitiu a produção em massa de pneus e a redução da dependência de borracha natural, e desmatamento. Tendo seu apogeu nas décadas de 50 e 60 com o aperfeiçoamento do modelo Radial, utilizando compostos de borracha avançados, em diferentes proporções de borracha sintética e natural. Em 1965, a Michelin lançou o pneu radial XAS, que oferecia estabilidade aprimorada em altas velocidades.

2.1.4 Pneus Inteligentes

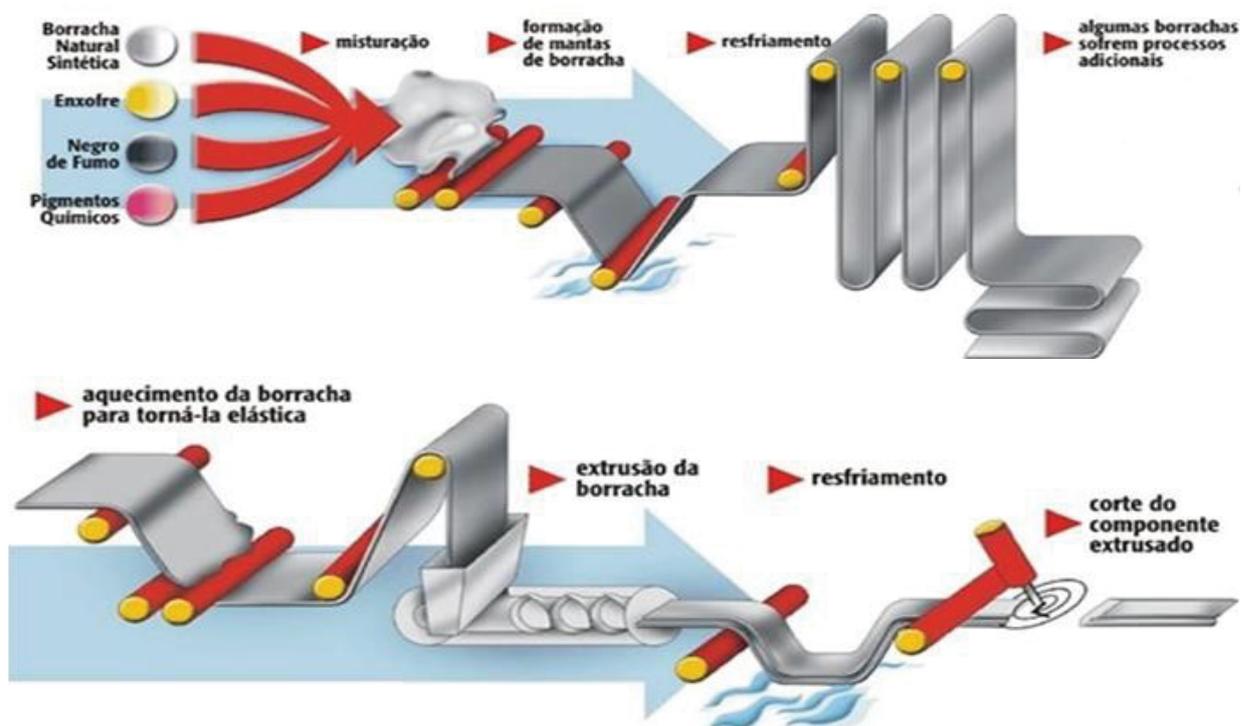
A tecnologia de pneus evoluiu significativamente com o advento de novos materiais e métodos de produção. Os pneus mais modernos da atualidade são produzidos com uma combinação de materiais avançados, incluindo polímeros de alto desempenho, fibras de kevlar e compostos de sílica. O uso de nanotecnologia permitiu a criação de pneus que se autorreparam e ajustam sua pressão automaticamente, melhorando a durabilidade e a performance (CONTINENTAL, 2023).

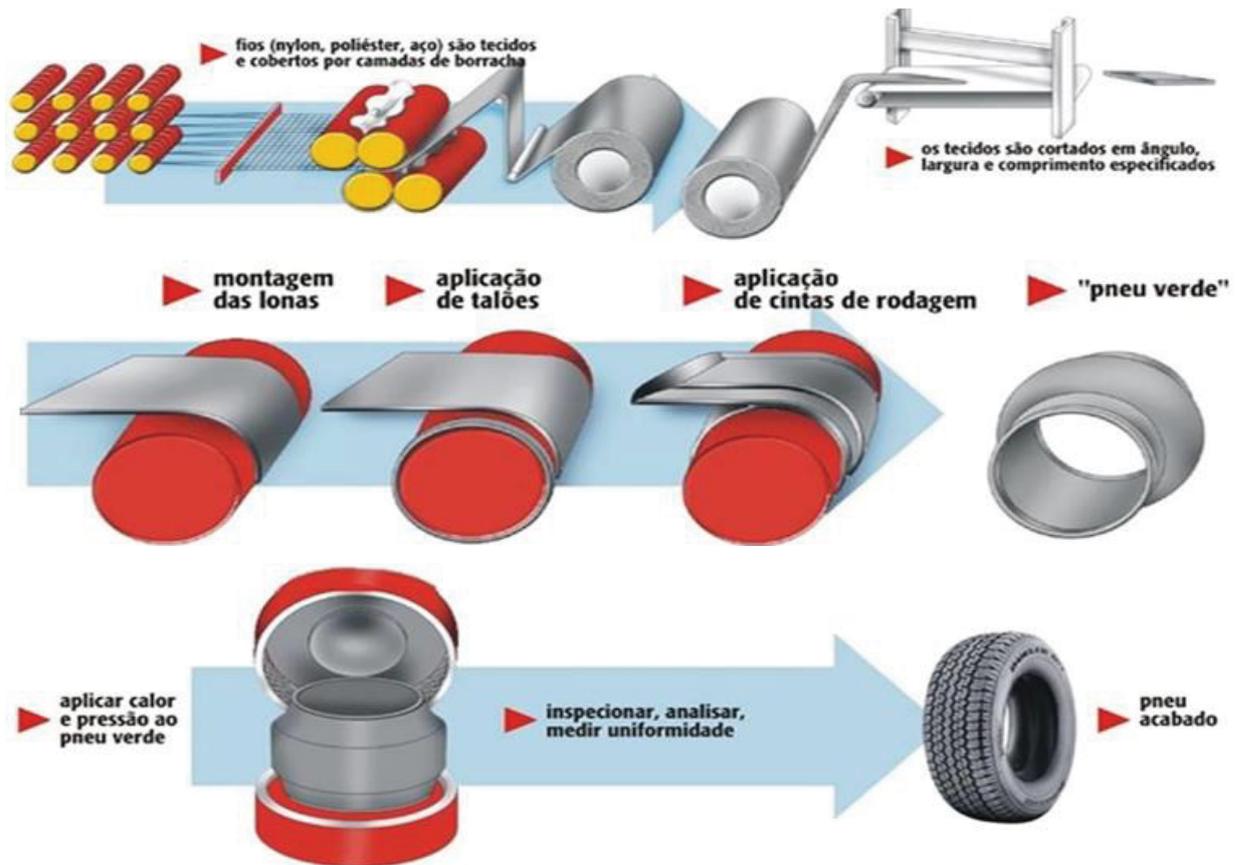
Há também a integração de sensores e eletrônicos nos pneus, conhecidos como "pneus inteligentes," permitem o monitoramento em tempo real da pressão, temperatura e condições de desgaste. Esses dados são transmitidos para sistemas de gerenciamento de veículos, melhorando a segurança e a eficiência. (CONTINENTAL, 2023)

2.2 PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS – BANDA DE RODAGEM

O processo de fabricação de pneus de banda de rodagem é complexo e envolve várias etapas, desde a seleção de matérias-primas até a finalização do produto, sendo comumente obtido pelas seguintes etapas: Misturação, Extrusão, Calandragem, Lonas, Talões, Construção, Vulcanização, e Inspeção da Qualidade. Abaixo, a Figura 6, ilustra o fluxograma deste processo:

Figura 6 - Fluxograma da Fabricação de Pneus





FONTE: <<http://www.noticiasautomotivas.com.br/images/img/f/bridgestone-santo-andre-6.jpg>>

2.2.1 Misturação

A misturação é o primeiro estágio da fabricação de pneus. Os materiais são misturados em um grande misturador para formar a compostagem da borracha. Esse processo envolve a combinação de borracha natural e sintética com aditivos, tais como negro de fumo, óleos, agentes vulcanizantes, para aprimorar características como resistência, durabilidade e aderência. O objetivo dessa etapa é obter uma mistura homogênea que ofereça as propriedades físicas desejadas para o pneu, como resistência ao desgaste e tração. Durante este processo são controladas algumas variáveis, tais como: temperatura e tempo de mistura. (RUBBER, 2015)

2.2.2 Extrusão

Após a misturação, o composto de borracha passa pela extrusão. É nessa etapa, que partes específicas do pneu são moldadas. O material misturado é empurrado através de moldes (ferramentas chamadas de "matrizes") para dar forma a

componentes como a banda de rodagem, as laterais e os talões. Os extrusoras são máquinas com parafusos que empurram o material através destes moldes, formando tiras de borracha que vão compor o pneu. (RUBBER, 2001)

2.2.3 Calandragem

As calandras, rolos de alta pressão, transformam a borracha em folhas finas e uniformes. Esse processo também é utilizado para unir as camadas de borracha ao tecido ou à malha de aço, que proporcionam resistência ao pneu. (RUBBER, 2001)

2.2.4 Construção do Pneu - (Verde)

Nessa etapa, todos os componentes do pneu (camadas de borracha, fios de aço, carcaça, banda de rodagem etc.) são montados para formar o "pneu verde" (não vulcanizado). A montagem é feita de dentro para fora, começando com o revestimento interno, seguido das camadas de reforço, talões e finalmente a banda de rodagem, vale inferir que esta superposição de várias camadas de material e a aplicação de cada componente segue uma sequência pré-definida. (RUBBER, 2001).

2.2.5 Cura ou Vulcanização

Esse passo é crucial para dar ao pneu suas propriedades finais, como elasticidade e resistência. A vulcanização é a etapa onde o "pneu verde" é submetido a calor e pressão para transformar a borracha em um material elástico e resistente. O processo de vulcanização envolve a formação de ligações cruzadas entre as moléculas de borracha, o que confere ao pneu sua durabilidade e capacidade de suportar cargas e estresses. Neste processo o pneu é colocado em uma prensa de moldagem que aplica calor (cerca de 150-180°C) e pressão por um período que pode variar de 12 à 20 minutos, dependendo do tipo de pneu. (RUBBER, 2009)

2.2.6 Inspeção da Qualidade

Após a vulcanização, o pneu passa por testes a fim de garantir que atenda aos padrões de segurança e qualidade. Dentre as inspeções pode-se citar:

- Inspeção visual: Verifica a aparência geral do pneu, procurando defeitos como bolhas, rachaduras ou deformações.
- Testes de raios X: Inspeccionam o interior do pneu para detectar possíveis falhas estruturais.
- Testes de durabilidade: Simulam condições de estrada para garantir que o pneu tenha a resistência necessária.
- Testes de uniformidade: Examinam a resistência e a capacidade de rodagem, medindo a uniformidade do pneu em termos de balanceamento e simetria (DEKKER, 2003), e tem como seu principal aspecto de observação a Força Radial, característica esta que protagoniza a discussão do presente trabalho.

2.2.7 Força Radial

Um aspecto técnico crucial na fabricação de pneus é a força radial, que é a força perpendicular ao eixo de rotação do pneu. A força radial é medida para avaliar a uniformidade e o balanceamento do pneu, impactando diretamente o conforto e a segurança do veículo. Durante a fabricação, o controle rigoroso da força radial garante que os pneus tenham uma distribuição uniforme de pressão, minimizando vibrações e melhorando a estabilidade do veículo. Segundo estudos, a variação excessiva da força radial pode reduzir a vida útil do pneu em até 20% e aumentar o consumo de combustível em aproximadamente 2%. Para os VEs, a importância da força radial é ainda mais pronunciada. Os VEs, como o Tesla Model S, que pesa cerca de 2.241 kg, são significativamente mais pesados que os veículos a combustão, como o Toyota Camry, que pesa aproximadamente 1.500 kg. Essa diferença de peso exige que os pneus sejam fabricados com precisão superior para suportar a carga adicional e manter o desempenho. Além disso, os VEs apresentam um torque quase instantâneo, o que provoca um desgaste mais acentuado e irregular dos pneus, demandando compostos e designs que possam suportar essas condições.

2.2.8 Descarte ou Reutilização

Pneus que não atendem aos padrões de qualidade são descartados ou reciclados. Os pneus conformes são preparados para distribuição.

2.3 DMAIC

A metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) surgiu como um dos pilares centrais do Six Sigma, uma estratégia de gestão de qualidade desenvolvida pela Motorola na década de 1980 para aprimorar a qualidade dos processos e reduzir a variabilidade nos sistemas de produção (HARRY; SCHROEDER, 2000). Bill Smith, engenheiro da Motorola, observou que a variabilidade nos processos produtivos era uma das principais causas de defeitos, o que resultava em um impacto negativo sobre a qualidade dos produtos entregues ao cliente (PANDE; NEUMAN; CAVANAGH, 2000). A partir dessas observações, ele propôs a criação de uma abordagem sistemática para a redução de defeitos, e assim surgiu o Six Sigma, que buscava alcançar um nível de qualidade com menos de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (HARRY; SCHROEDER, 2000).

O Six Sigma tornou-se amplamente reconhecido após ser adotado pela General Electric (GE) sob a liderança de Jack Welch na década de 1990. Welch utilizou a metodologia para transformar a GE em uma das empresas mais eficientes e lucrativas do mundo, aplicando o Six Sigma para melhorar processos, eliminar desperdícios e otimizar operações em diversas áreas da empresa (GEORGE ET AL., 2005). O sucesso do Six Sigma na GE consolidou a metodologia como uma estratégia global de negócios e qualidade, ganhando popularidade em empresas de todos os setores (HARRY; SCHROEDER, 2000).

Dentro do Six Sigma, o DMAIC surgiu como uma estrutura operacional central, organizando os esforços de melhoria contínua em cinco fases: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (PYZDEK; KELLER, 2009). Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), o DMAIC é projetado para ser uma abordagem sistemática, orientada por dados e resultados, que permite às organizações identificar problemas críticos, analisar suas causas e implementar soluções permanentes. A fase de Definir concentra-se na identificação do problema e na delimitação clara de objetivos e metas. Em seguida, a fase de Medir visa coletar dados para entender o estado atual do processo. A fase de Analisar explora os dados coletados para identificar as causas raízes dos problemas. A fase de Melhorar implementa soluções baseadas nas análises realizadas, e a fase de Controlar garante que as melhorias sejam sustentáveis ao longo do tempo (PYZDEK; KELLER, 2009).

A principal característica do DMAIC é seu foco no uso de dados para orientar decisões, eliminando suposições e garantindo que as ações de melhoria estejam fundamentadas em evidências concretas (MONTGOMERY, 2009). Cada fase da metodologia é estruturada para garantir a continuidade e a integridade das informações ao longo do projeto, proporcionando uma transição lógica entre a identificação do problema e a implementação das soluções (PANDE; NEUMAN; CAVANAGH, 2000).

Ao contrário de outras abordagens de melhoria de qualidade, o DMAIC não é apenas uma ferramenta de correção de problemas. Ele também é uma abordagem preventiva, projetada para evitar que problemas ocorram ao antecipar falhas potenciais e eliminá-las antes que possam impactar os resultados (GEORGE ET AL., 2005). Essa característica torna o DMAIC adequado para uma variedade de indústrias, desde a manufatura até o setor de serviços, onde os processos são complexos e as variáveis podem impactar diretamente na qualidade dos resultados (MONTGOMERY, 2009).

Além disso, o DMAIC é altamente flexível e pode ser aplicado em diferentes contextos e escalas, desde pequenas melhorias incrementais até grandes transformações de processos (HARRY; SCHROEDER, 2000). Isso se deve à sua natureza modular, que permite que as empresas adaptem cada fase às suas necessidades específicas, sem comprometer a eficácia da abordagem geral (PYZDEK; KELLER, 2009).

A filosofia subjacente ao DMAIC é a melhoria contínua, ou kaizen, que foi inicialmente popularizada no Japão, especialmente nas práticas de gestão da qualidade da Toyota (IMAI, 1990). O DMAIC adota essa mentalidade de melhoria constante ao incorporar revisões contínuas e monitoramento dos processos, garantindo que o progresso seja sustentado a longo prazo (GEORGE ET AL., 2005).

O DMAIC também se baseia em princípios fundamentais da estatística e controle de qualidade. Ferramentas como o Diagrama de Pareto, Histograma, Análise de Causa Raiz e Gráficos de Controle são comumente usadas em diferentes fases da metodologia para analisar dados e identificar variabilidades (MONTGOMERY, 2009). Estas ferramentas são essenciais para garantir que as decisões tomadas ao longo do projeto sejam baseadas em fatos e dados precisos, eliminando a subjetividade e permitindo um controle rigoroso do processo (PYZDEK; KELLER, 2009).

A metodologia DMAIC se consolidou como uma das abordagens mais eficazes para a melhoria contínua de processos em virtude de sua estrutura rigorosa, baseada em dados, e de sua flexibilidade para se adaptar a diferentes contextos

organizacionais. Ao longo das últimas décadas, o DMAIC foi amplamente adotado por organizações globais, tornando-se sinônimo de excelência operacional e gestão da qualidade (MONTGOMERY, 2009).

2.3.1 Fases do DMAIC

A metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) é uma abordagem sistemática, usada principalmente no Six Sigma, para conduzir projetos de melhoria contínua de processos. Cada uma das cinco fases do DMAIC é essencial para garantir que as melhorias sejam implementadas com base em dados sólidos, garantindo resultados mensuráveis e sustentáveis ao longo do tempo (HARRY; SCHROEDER, 2000).

2.3.1.1 Fase Definir (Define)

Segundo Harry e Schroeder (2000), a fase "Definir" é fundamental porque é nesse momento que o problema é identificado e o foco do projeto é determinado. Ela estabelece as bases para as fases seguintes, que serão orientadas por dados e análises meticulosas.

Montgomery (2009) reforça que, sem uma definição clara do problema e dos objetivos, os projetos podem se dispersar, levando a esforços mal direcionados e resultados insatisfatórios. Portanto, a fase "Definir" assegura que o projeto tenha uma direção clara desde o início.

2.3.1.1.1 Identificação do Problema e Escopo do Projeto

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), a etapa de identificação do problema e escopo do projeto é essencial porque fornece uma direção para o projeto, alinhando os objetivos do projeto com os problemas reais enfrentados pela organização. Sem uma definição precisa do problema, há o risco de a equipe de melhoria investir esforços em áreas menos prioritárias ou até mesmo em soluções que não resolvem o problema principal.

George et al. (2005) recomendam o uso de ferramentas como o Diagrama de Afinidades e Brainstorming para capturar as percepções iniciais e reunir as informações

necessárias para definir o problema de forma abrangente. Além disso, a utilização de Entrevistas com Stakeholders e a coleta de dados históricos são práticas essenciais para garantir que o problema está sendo corretamente enquadrado dentro do contexto organizacional.

Montgomery (2009) destaca que o uso da QFD ajuda a garantir que as melhorias projetadas estejam diretamente relacionadas às expectativas dos clientes, minimizando a possibilidade de desalinhamento entre as soluções implementadas e os resultados esperados.

2.3.1.1.1.1 QFD (Quality Function Deployment)

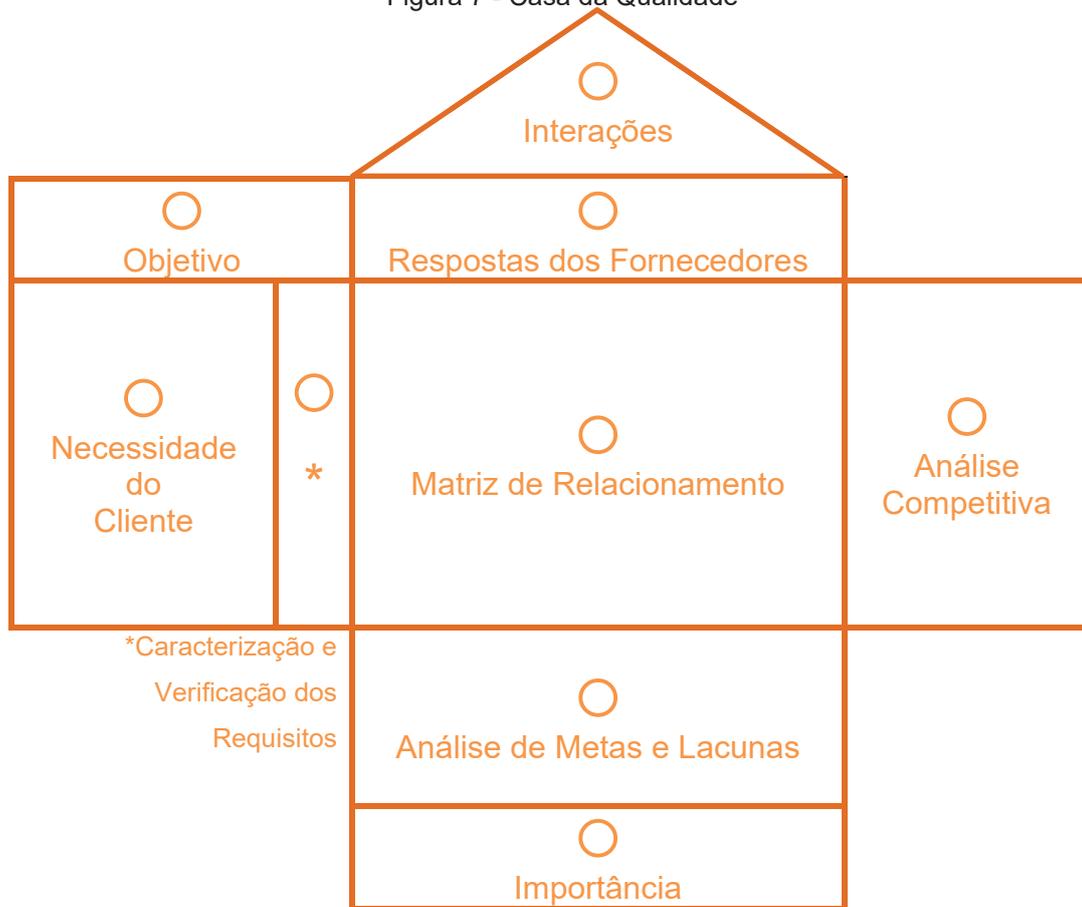
Segundo Montgomery (2009), o principal objetivo da QFD é assegurar que as melhorias implementadas em um processo ou produto estejam alinhadas com as expectativas do cliente, evitando o problema de "desconexão" entre o que o cliente deseja e o que é entregue pela organização.

Segundo Akao (1990), a Casa da Qualidade é uma estrutura essencial da QFD, que permite o desdobramento sistemático das demandas dos clientes em especificações técnicas claras, promovendo uma maior integração entre as áreas de marketing, engenharia e desenvolvimento.

De acordo com Hauser e Clausing (1988), a Casa da Qualidade organiza e prioriza as necessidades do cliente, correlacionando-as com os requisitos técnicos que devem ser atendidos, o que facilita o alinhamento entre as especificações do produto e as expectativas do mercado.

Além disso, Mazur (1993) destaca que a construção da Casa da Qualidade não apenas esclarece as relações entre necessidades e especificações, mas também identifica potenciais conflitos entre requisitos técnicos, permitindo uma análise mais profunda para otimizar o desenvolvimento do produto. A Figura 7 a seguir ilustra essa matriz, detalhando as etapas do desdobramento da qualidade em uma estrutura que promove a eficácia no desenvolvimento de produtos orientados para o cliente.

Figura 7 - Casa da Qualidade



FONTE: Adaptado de MAZUR (1993)

2.3.1.1.1.1 Objetivo

Segundo Montgomery (2009), o objetivo serve como a base para todo o trabalho subsequente, garantindo que a equipe esteja alinhada em relação às metas do projeto de desenvolvimento de produto ou serviço.

2.3.1.1.1.2 Necessidades do Cliente

Pyzdek e Keller (2009) destacam que a coleta e análise da Voz do Cliente (VoC) são fundamentais para que o produto ou serviço desenvolvido atenda diretamente às demandas do mercado.

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), esta é uma das fases mais críticas, pois garante que o desenvolvimento do produto ou serviço esteja completamente alinhado com as expectativas do cliente.

2.3.1.1.1.1.3 Caracterização e Verificação dos Requisitos

Segundo Montgomery (2009), o Modelo de Kano ajuda a classificar as necessidades do cliente em diferentes categorias: as que são esperadas (básicas), as que são desejadas (desempenho) e as que surpreendem positivamente (excitantes).

Pyzdek e Keller (2009) destacam que essa etapa é essencial para garantir que os objetivos técnicos sejam realistas e viáveis de serem atingidos.

2.3.1.1.1.1.4 Análise Competitiva

George et al. (2005) sugerem que essa análise competitiva ajuda a identificar os pontos fortes e fracos da empresa em relação à concorrência, permitindo que a organização se posicione estrategicamente no mercado.

2.3.1.1.1.1.5 Respostas dos Fornecedores

Segundo Montgomery (2009), os fornecedores devem ser envolvidos no processo de QFD desde o início, garantindo que eles compreendam as exigências do produto e sejam capazes de fornecer materiais ou componentes dentro das especificações necessárias.

2.3.1.1.1.1.6 Matriz de Relacionamento

Pyzdek e Keller (2009) sugerem que o uso da Matriz de Relacionamento é fundamental para determinar onde a equipe deve concentrar seus esforços. Se uma necessidade importante do cliente tem uma correlação forte com uma característica técnica específica, essa característica se torna uma prioridade no desenvolvimento do produto.

2.3.1.1.1.1.7 Interações

Segundo Montgomery (2009), é comum que melhorias em uma característica técnica possam ter impactos negativos em outra, o que exige que a equipe encontre soluções de compromisso ou explore alternativas.

2.3.1.1.1.1.8 Análise de Metas e Lacunas

Para Pande, Neuman e Cavanagh (2000), a análise de metas e lacunas é crucial para definir os objetivos do projeto e determinar quais melhorias terão o maior impacto na satisfação do cliente.

2.3.1.1.1.1.9 Importância

George et al. (2005) enfatizam que a análise de importância garante que os esforços de melhoria estejam concentrados nas áreas que mais influenciam a percepção do cliente em relação ao produto ou serviço.

2.3.1.1.1.2 Carta do Projeto (Project Charter)

A Carta do Projeto é uma ferramenta central nesta fase, como destacam George et al. (2005), pois permite que todos os membros da equipe e stakeholders envolvidos tenham clareza sobre os objetivos do projeto, as metas a serem alcançadas e os limites operacionais que precisam ser respeitados.

2.3.1.1.2 Garantia de Qualidade dos Dados

Montgomery (2009) destaca que a confiabilidade dos dados utilizados no DMAIC é essencial para garantir a precisão das análises que serão realizadas nas fases subsequentes.

Pande, Neuman e Cavanagh (2000) sugerem que, nesta fase, sistemas de medição devem ser validados e, se necessário, ajustados para garantir que as medições do processo sejam consistentes e confiáveis.

2.3.1.1.3 Comportamento dos dados

Segundo Harry e Schroeder (2000), o comportamento dos dados deve ser analisado para identificar variações, tendências e possíveis padrões sazonais ou repetitivos.

Pyzdek e Keller (2009) destacam que o uso de gráficos é uma maneira eficaz de tornar os dados mais acessíveis e compreensíveis para todos os membros da equipe, facilitando o alinhamento e a discussão sobre o problema.

Conforme sugerido por Pande, Neuman e Cavanagh (2000), a identificação das variações é uma etapa crucial, pois nem toda variação é indesejável. Montgomery (2009) ressalta que, sem um conhecimento profundo do comportamento dos dados, as metas estabelecidas podem ser irrealistas, o que pode comprometer o sucesso do projeto.

2.3.1.1.4 Identificação de Metas e Benefícios

Montgomery (2009) afirma que a definição de metas específicas permite que o projeto tenha um objetivo quantificável, o que facilita a medição de resultados ao longo das fases subsequentes.

Para estabelecer essas metas, George et al. (2005) sugerem o uso da análise de lacunas (gap analysis), que é uma técnica que avalia a diferença entre o estado atual do processo e o estado desejado. Pande, Neuman e Cavanagh (2000) ressaltam que, além de definir as metas, é importante também estimar os benefícios potenciais que podem ser alcançados com o projeto, tanto em termos financeiros quanto de satisfação do cliente.

2.3.1.1.4.1 Análise de Lacunas (Gap Analysis)

De acordo com Pyzdek e Keller (2009), a análise de lacunas fornece uma visão clara de onde o processo se encontra atualmente e onde ele precisa estar para atingir as metas e expectativas previamente definidas.

A Análise de Lacunas tem como base a identificação e a quantificação da diferença entre o estado atual (AS-IS) e o estado futuro desejado (TO-BE) de um processo ou sistema (MONTGOMERY, 2009).

George et al. (2005) sugerem que a análise de lacunas seja aplicada logo após a coleta de dados e a análise preliminar do processo para identificar as áreas que

apresentam o maior potencial de melhoria. Pyzdek e Keller (2009) descrevem as seguintes etapas principais para a execução de uma análise de lacunas eficaz:

- Identificação do Estado Atual (As-is): O primeiro passo na análise de lacunas é entender onde o processo ou sistema está atualmente. Isso requer a coleta de dados sobre o desempenho atual e a compreensão das métricas-chave que refletem o estado atual do processo (MONTGOMERY, 2009).
- Definição do Estado Futuro (To-be): Pande, Neuman e Cavanagh (2000) sugerem que a definição do estado futuro seja orientada pelas metas do projeto e pelas expectativas dos clientes.
- Comparação entre o Estado Atual e o Futuro: George et al. (2005) indicam que essa comparação deve ser feita de maneira objetiva, utilizando métricas mensuráveis para identificar onde as maiores diferenças residem e o quanto essas diferenças impactam o desempenho geral do processo.
- Identificação de Causas e Fatores Críticos: Pyzdek e Keller (2009) enfatizam a importância de utilizar técnicas como a Análise de Causa Raiz (Root Cause Analysis) para investigar as causas principais que estão impedindo o processo de alcançar o estado desejado.
- Desenvolvimento de um Plano de Ação: Montgomery (2009) sugere que o plano de ação deve incluir metas específicas, prazos e recursos necessários para implementar as mudanças.

2.3.1.1.5 Estruturação da Equipe do Projeto

Segundo Harry e Schroeder (2000), é fundamental garantir que a equipe tenha membros de diferentes departamentos e níveis hierárquicos, assegurando que todas as áreas impactadas pelo projeto sejam representadas. Pyzdek e Keller (2009) reforçam que a fase Definir também é o momento em que são definidos os papéis e responsabilidades de cada membro da equipe.

2.3.1.1.6 Desenho do processo principal

Segundo Montgomery (2009), o mapeamento do processo principal permite que a equipe visualize de forma clara como os insumos entram no sistema, como eles

são transformados durante o processo e como o produto ou serviço é entregue ao cliente.

2.3.1.1.6.1 SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer)

O SIPOC é outra ferramenta fundamental usada na fase Definir para mapear o processo de maneira macro, desde o fornecedor até o cliente final (PANDE; NEUMAN; CAVANAGH, 2000).

Conforme argumentam Harry e Schroeder (2000), o SIPOC oferece uma visão de alto nível do processo, detalhando as principais etapas e os atores envolvidos, o que é essencial para entender como as diferentes variáveis podem estar afetando o resultado final. Segundo George et al. (2005), o SIPOC também ajuda a identificar possíveis pontos de falha no processo e permite que a equipe faça um levantamento inicial de variáveis que podem estar contribuindo para o problema.

2.3.1.2 Fase "Medir" (Measure)

Como ressaltado por Montgomery (2009), a fase "Medir" é a espinha dorsal para fundamentar as decisões com dados precisos, eliminando a subjetividade do processo de melhoria.

2.3.1.2.1 Coleta e Estratificação de Dados

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), é fundamental que os dados sejam coletados de maneira rigorosa e a partir de fontes confiáveis, para garantir que o diagnóstico do problema seja baseado em fatos e não em suposições.

A estratificação de dados é uma técnica amplamente utilizada nesta fase para organizar as informações em categorias que permitam identificar padrões ou anomalias ocultas (GEORGE ET AL., 2005). A estratificação divide os dados em grupos menores com base em critérios específicos, como período de tempo, local, tipo de produto ou turno de produção, facilitando a identificação de variações dentro desses segmentos (MONTGOMERY, 2009). Segundo Pyzdek e Keller (2009), a estratificação oferece uma análise mais granular, permitindo que a equipe entenda melhor as causas da variabilidade no processo.

Além disso, o uso de ferramentas gráficas, como histogramas e boxplots, fornece uma visão clara sobre a dispersão dos dados e sua distribuição, o que é fundamental para a análise subsequente (PANDE, NEUMAN E CAVANAGH, 2000). O teste de normalidade, como o Teste de Anderson-Darling, é comumente utilizado para verificar se os dados seguem uma distribuição normal, o que influencia a escolha de métodos estatísticos para a análise (MONTGOMERY, 2009).

Pande, Neuman e Cavanagh (2000) afirmam que a linha de base permite que a equipe entenda o nível de variabilidade existente no processo, servindo como referência para avaliar o impacto das melhorias que serão implementadas nas fases subsequentes.

De acordo com Montgomery (2009), a análise da linha de base incluem o cálculo de estatísticas descritivas, como a média, o desvio padrão, a variância e os intervalos de confiança. Pyzdek e Keller (2009) recomendam o uso de intervalos de confiança para garantir que os resultados obtidos sejam representativos e possam ser aplicados em análises posteriores.

2.3.1.2.1.1 Teste de Anderson-Darling

Este teste é um aprimoramento dos testes de aderência tradicionais, como o Teste de Kolmogorov-Smirnov, e tem maior sensibilidade em identificar desvios da normalidade, especialmente nas extremidades das distribuições (MONTGOMERY, 2009).

Em muitos processos industriais, como aqueles abordados pelo Six Sigma, presume-se que os dados sejam normalmente distribuídos para que análises estatísticas, como controle de qualidade e análise de regressão, possam ser aplicadas de maneira confiável (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Pyzdek e Keller (2009), o Anderson-Darling é preferido em relação a outros testes de normalidade, pois leva em consideração tanto os valores centrais quanto as caudas da distribuição, tornando-o mais robusto em detectar desvios da normalidade em diferentes pontos da distribuição de dados.

O teste de Anderson-Darling funciona a partir da seguinte formulação de hipóteses:

- Hipótese nula (H_0): Os dados seguem uma distribuição normal.

- Hipótese alternativa (H_1): Os dados não seguem uma distribuição normal.

O resultado do teste é expresso por um valor-p. Um valor-p menor do que o nível de significância escolhido (geralmente 0,05) indica que a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Caso o valor-p seja maior que 0,05, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de que os dados sejam normalmente distribuídos (GEORGE ET AL., 2005).

O teste de Anderson-Darling baseia-se na comparação dos valores observados na amostra com os valores esperados em uma distribuição normal teórica. A fórmula que compõe o teste é a seguinte:

$$A^2 = n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((2i - 1) [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))]) \quad (1)$$

Onde:

- n é o tamanho da amostra.
- Y_i são os valores da amostra ordenados.
- $F(Y_i)$ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão.

O resultado do teste é apresentado como uma estatística A^2 e o valor-p correspondente. Quanto maior o valor da estatística A^2 , maior a evidência contra a normalidade dos dados. Em um cenário típico, se o valor-p resultante do teste for inferior ao nível de significância predefinido (geralmente $\alpha=0,05$), rejeitamos a hipótese de normalidade.

Montgomery (2009) reforça que a interpretação dos resultados depende do contexto de aplicação. Em muitos casos, a rejeição da normalidade não implica que o processo esteja fora de controle, mas pode sugerir que a equipe de melhoria precisa ajustar a abordagem de análise para considerar distribuições alternativas ou aplicar transformações nos dados.

A normalidade dos dados é um pressuposto comum em várias ferramentas estatísticas, como a análise de variância (ANOVA), o controle estatístico de processos (CEP) e o cálculo de intervalos de confiança (GEORGE ET AL., 2005).

Caso os dados não sigam uma distribuição normal, métodos alternativos podem ser utilizados, como transformações de dados (por exemplo, a transformação

logarítmica ou de Box-Cox), que tornam os dados mais adequados para análise (MONTGOMERY, 2009).

Pyzdek e Keller (2009) explicam que, se o Teste de Anderson-Darling indicar que os dados não são normais, a equipe também pode optar por utilizar métodos não paramétricos que não dependem da normalidade dos dados, como os testes de Kruskal-Wallis ou de Mann-Whitney.

2.3.1.2.2 Identificação de Variáveis Críticas

A fase Medir também tem como objetivo identificar as variáveis críticas que impactam diretamente o desempenho do processo, isso é feito por meio de técnicas estatísticas, como a análise de regressão e o Gráfico de Pareto, que permitem identificar quais variáveis estão contribuindo mais significativamente para a variabilidade no sistema (GEORGE ET AL., 2005).

O Gráfico de Pareto, baseado no Princípio de Pareto (também conhecido como a regra 80/20), é utilizado para classificar as causas em ordem de impacto, priorizando os fatores mais importantes que devem ser abordados (PYZDEK E KELLER, 2009). Segundo Montgomery (2009), o Gráfico de Pareto é uma ferramenta eficaz para ajudar a equipe a concentrar seus esforços nas variáveis que causam a maior parte dos problemas, o que otimiza os recursos disponíveis e acelera o processo de melhoria.

Conforme Montgomery (2009), a regressão linear múltipla permite quantificar a contribuição de cada variável para a variabilidade do processo e prever como alterações em determinadas variáveis podem afetar os resultados. A significância dos coeficientes é verificada por meio de testes estatísticos, como o valor-p e a estatística t , garantindo que as conclusões obtidas sejam robustas (HAIR ET AL., 2010).

2.3.1.2.2.1 Gráfico de Pareto

O Princípio de Pareto, também conhecido como a regra do 80/20, postula que aproximadamente 80% dos problemas são causados por 20% das causas (MONTGOMERY, 2009).

O Princípio de Pareto foi introduzido pelo economista italiano Vilfredo Pareto no final do século XIX. Ele observou que, na sociedade, a maior parte das riquezas era detida por uma pequena parte da população (20% da população detinha 80% da

riqueza). No contexto de qualidade e produtividade, Joseph M. Juran popularizou o conceito, aplicando-o a problemas industriais, sugerindo que a maior parte dos defeitos ou problemas de um processo é causada por um pequeno número de causas críticas (PYZDEK E KELLER, 2009).

O Gráfico de Pareto organiza visualmente os dados de uma maneira que permite à equipe de melhoria identificar e classificar as causas em ordem de impacto. As categorias ou causas são representadas em um gráfico de barras, ordenadas de maneira decrescente. O lado esquerdo do gráfico exibe as causas mais frequentes ou impactantes, enquanto as menos significativas estão à direita. Além das barras, uma linha cumulativa é desenhada para mostrar a proporção acumulada de impacto ou frequência de cada causa (GEORGE ET AL., 2005).

O gráfico de Pareto apresenta três componentes principais (MONTGOMERY, 2009):

- Barras: As barras representam a frequência ou magnitude de cada causa ou categoria. Elas são dispostas em ordem decrescente, com a barra mais alta à esquerda representando a causa mais frequente ou mais impactante.
- Linha cumulativa: Uma linha cumulativa é traçada no gráfico, representando o somatório percentual acumulado da contribuição de cada causa. Essa linha ajuda a visualizar rapidamente quais causas são responsáveis pela maior parte do problema.
- Eixo horizontal: Este eixo lista as categorias ou causas, como tipos de defeitos, falhas de processo, ou qualquer outro fator que esteja sendo analisado.
- Eixo vertical: Exibe a frequência ou a magnitude das ocorrências (por exemplo, número de defeitos, impacto financeiro, ou outro critério relevante).

O Gráfico de Pareto se destaca por sua simplicidade e eficiência em mostrar claramente quais causas devem ser priorizadas para alcançar os maiores resultados com o menor esforço (PYZDEK E KELLER, 2009).

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), a visualização proporcionada pelo gráfico ajuda a equipe a focar suas intervenções nas causas que têm maior impacto.

Montgomery (2009) destaca que esse foco nas causas principais evita o desperdício de recursos em problemas de baixa relevância, o que é fundamental em projetos de melhoria contínua.

A construção de um Gráfico de Pareto segue uma abordagem simples e sistemática. Segundo George et al. (2005), os passos são:

- Coleta de dados: Os dados relacionados às falhas, defeitos ou categorias de interesse são coletados. Os dados podem ser expressos em termos de frequência (número de ocorrências), impacto financeiro, ou outro critério relevante.
- Classificação das causas: As causas ou categorias são classificadas em ordem decrescente de frequência ou impacto.
- Cálculo da contribuição percentual: A frequência de cada causa é dividida pelo total de ocorrências, determinando a porcentagem que cada causa representa.
- Construção do gráfico: As barras são desenhadas para cada causa, e a linha cumulativa é traçada para mostrar o percentual acumulado.
- Interpretação: A equipe analisa o gráfico para identificar as causas principais e definir as ações corretivas necessárias.

2.3.1.1.6.2 Regressão Linear Múltipla

Segundo Draper e Smith (1998), a técnica de regressão linear múltipla permite a compreensão e a previsão do comportamento da variável dependente com base nas variáveis independentes.

Hair et al. (2010) afirmam que esta técnica é eficaz para modelar relações complexas entre variáveis e para realizar previsões. Montgomery, Peck e Vining (2012) descrevem que a regressão linear múltipla se baseia em vários pressupostos, incluindo linearidade, independência dos erros, homoscedasticidade e normalidade dos erros.

A equação geral da regressão linear múltipla é expressa como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e \quad (2)$$

onde Y é a variável dependente, β_0 é a ordenada na origem, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os coeficientes de regressão, X_1, X_2, \dots, X_n são as variáveis independentes e e é o termo de erro.

A variável dependente, também conhecida como variável resposta ou variável explicada, é o foco principal de análise na Regressão Linear Múltipla. Ela representa o resultado ou efeito que os pesquisadores ou analistas desejam prever ou explicar com base em várias variáveis independentes (ou preditoras). Segundo Draper e Smith (1998), a variável dependente é a medida que se espera ser influenciada pelas mudanças nas variáveis independentes.

Segundo Draper e Smith (1998), a ordenada na origem (β_0) é o ponto onde a linha de regressão cruza o eixo Y quando todas as variáveis independentes têm valor zero. Em termos práticos, isso significa que β_0 representa o valor de Y na ausência de qualquer influência das variáveis X. Kleinbaum, Kupper e Muller (2008) destacam que a ordenada na origem garante que a equação de regressão esteja corretamente centralizada e ajustada aos dados observados.

Os coeficientes de regressão na equação de regressão linear múltipla representam a mudança esperada na variável dependente para uma mudança unitária em uma das variáveis independentes, mantendo as outras constantes. Kleinbaum, Kupper e Muller (2008) enfatizam a importância de interpretar corretamente esses coeficientes para entender as relações entre as variáveis e para tomar decisões informadas com base nos resultados da análise.

A interpretação das variáveis independentes no contexto de um modelo de regressão linear múltipla envolve a análise dos coeficientes de regressão associados. Kleinbaum, Kupper e Muller (2008) enfatizam que, para uma variável independente X_i , o coeficiente β_i representa a mudança esperada na variável dependente Y para uma mudança unitária em X_i , mantendo todas as outras variáveis independentes constantes. Essa interpretação permite aos analistas compreenderem como cada variável independente individualmente contribui para o comportamento da variável dependente.

O coeficiente de erro esperado em cada observação, denotado por “ e ”, influencia diretamente a qualidade do modelo estatístico. Quanto maior for o valor de “ e ”, menor será a robustez do modelo, indicando uma relação fraca entre as variáveis independentes e a variável dependente (HAIR ET AL., 2010).

A aplicação da Regressão Linear Múltipla em um conjunto de dados específico produz uma série de resultados estatísticos que fornecem uma visão detalhada sobre as relações entre as variáveis independentes e a variável dependente. A capacidade do modelo de explicar a variação nos dados é avaliada pelo Coeficiente de

Determinação (R^2). Este coeficiente reflete a proporção da variância total das observações que é explicada pelo modelo preditivo (DRAPER E SMITH, 1998). Ele é representado por um valor entre 0 e 1:

$$\mathcal{R}^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{total}} \quad (2.1)$$

O coeficiente de determinação (R^2) indica a proporção da variabilidade da variável dependente explicada pelo modelo. Montgomery, Peck e Vining (2012) afirmam que um valor de R^2 próximo de 1 indica um bom ajuste do modelo, enquanto um valor próximo de 0 sugere que o modelo não explica bem a variabilidade dos dados. R^2 é uma medida de quão bem as variáveis independentes explicam a variação na variável dependente.

Os valores-p associados aos coeficientes de regressão indicam a significância estatística de cada variável independente. Um valor-p menor que o nível de significância (geralmente 0.05) indica que o coeficiente é estatisticamente significativo. Hair et al. (2010) explicam que valores-p menores que 0.05 indicam que a variável independente tem um efeito significativo na variável dependente, rejeitando a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero.

Quadro 1 - Variável x Coeficiente x Valor-p

Variável	Coeficiente	Valor-p
X_1	β_1	p-value
X_2	β_2	p-value
X_n	β_n	p-value

FONTE: Adaptado de MONTGOMERY, PECK E VINING (2012)

As estatísticas t são calculadas para cada coeficiente de regressão para testar a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero. Calculada como a razão entre o coeficiente estimado e seu erro padrão.

$$t = \frac{\beta_i}{SE(\beta_i)} \quad (2.2)$$

Kleinbaum, Kupper e Muller (2008) destacam que valores absolutos maiores que o valor crítico (dependendo do nível de confiança e graus de liberdade) indicam que os coeficientes são significativamente diferentes de zero.

Quadro 2 - Variável x Coeficiente x Erro x t x Valor-p

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	t-Estatística	Valor-p
X_1	β_1	$SE(\beta_1)$	t-value	p-value
X_2	β_2	$SE(\beta_2)$	t-value	p-value
X_n	B_n	$SE(B_n)$	t-value	p-value

FONTE: Adaptado de MONTGOMERY, PECK E VINING (2012)

Montgomery, Peck e Vining (2012) afirmam que um valor de F elevado e um valor-p associado baixo indicam que o modelo de regressão como um todo é significativo. A estatística F avalia se pelo menos um dos coeficientes de regressão é diferente de zero.

A análise de resíduos é fundamental para verificar os pressupostos da regressão linear múltipla, como homoscedasticidade, normalidade e independência dos erros. Montgomery (2009) destaca que a análise de resíduos pode revelar problemas como heterocedasticidade (variância dos erros não constante) e autocorrelação (erros correlacionados), que podem invalidar as conclusões do modelo.

- Gráfico de Resíduos vs. Valores Ajustados: Deve mostrar uma dispersão aleatória dos resíduos ao redor de zero, indicando homocedasticidade.
- Histograma dos Resíduos: Deve aproximar-se de uma distribuição normal, indicando que os erros são normalmente distribuídos.
- Gráfico de Normalidade (QQ plot): Deve seguir aproximadamente uma linha reta, confirmando a normalidade dos resíduos.

Para melhorar o modelo, podem ser realizadas transformações nas variáveis ou seleção de variáveis:

- Transformação Logarítmica: Pode ser aplicada se a relação entre a variável dependente e uma ou mais variáveis independentes for não linear. Draper e Smith (1998) sugerem a utilização de transformações para melhorar o ajuste do modelo.

- Regressão Stepwise: Método automático para selecionar as variáveis mais significativas, melhorando a parsimônia do modelo. George et al. (2005) afirmam que técnicas de seleção de variáveis, como a regressão stepwise, são úteis para construir modelos mais robustos e interpretáveis.

2.3.1.1.6.3 Definição de Metas Baseadas em Dados

Segundo George et al. (2005), a definição de metas mensuráveis é crucial para garantir que as melhorias possam ser monitoradas ao longo do tempo e comparadas com a linha de base estabelecida anteriormente.

Pyzdek e Keller (2009) afirmam que, ao definir metas, é importante considerar a variabilidade natural do processo e buscar reduzi-la dentro de limites aceitáveis. Isso pode envolver a redução do desvio padrão ou a melhoria de outros indicadores de desempenho, como a capacidade do processo ou os índices de qualidade.

2.3.1.1.6.4 Comprovação de Benefícios e Potencial de Melhoria

Montgomery (2009) destaca que a vinculação das metas de melhoria a resultados financeiros tangíveis, como a redução de custos ou o aumento da eficiência operacional, é uma prática recomendada, pois garante que o projeto de melhoria esteja alinhado com os objetivos estratégicos da empresa.

Segundo George et al. (2005), a projeção de benefícios potenciais com base nos dados coletados e analisados aumenta a probabilidade de sucesso do projeto, uma vez que todos os envolvidos podem ver claramente os impactos positivos que as melhorias trarão para a organização.

2.3.1.1.7 Fase Analisar (Analyze)

Segundo Pyzdek e Keller (2009), essa fase é crucial para fundamentar as etapas subsequentes em dados concretos e garantir que as ações de melhoria abordem diretamente as causas principais do problema.

Montgomery (2009) argumenta que uma análise eficaz deve incluir uma combinação de ferramentas visuais e estatísticas que possibilitem uma investigação detalhada dos fatores críticos do processo. Ele sugere que essa fase permite

transformar dados em informações acionáveis, facilitando uma tomada de decisão informada e fundamentada.

De acordo com George et al. (2005), a fase Analisar é essencial para garantir que a equipe de melhoria compreenda completamente o processo e tenha clareza sobre os principais fatores que geram variações e defeitos.

2.3.1.1.7.1 Mapeamento do Processo e Ferramentas Visuais

Conforme Pande, Neuman e Cavanagh (2000), o mapeamento do processo ajuda a equipe a entender a sequência de atividades e a identificar onde podem ocorrer falhas ou gargalos. Montgomery (2009) afirma que essa prática é essencial para orientar a investigação dos fatores que influenciam o desempenho do processo e para garantir que todos os aspectos relevantes sejam considerados. Para ele, o mapa do processo permite identificar as interdependências entre etapas e variáveis, o que é crucial para uma análise completa e precisa.

2.3.1.1.7.2 Identificação de Causas Potenciais

Pyzdek e Keller (2009) sugerem que essa etapa deve envolver a participação de especialistas e operadores do processo, pois eles possuem conhecimento prático sobre as variáveis que podem estar influenciando a qualidade e o desempenho do processo. Uma ferramenta comum para organizar essas causas potenciais é o Diagrama de Ishikawa (ou Diagrama de Espinha de Peixe), que categoriza as causas em áreas como métodos, materiais, mão de obra, máquinas e meio ambiente (MONTGOMERY, 2009).

George et al. (2005) destacam que o Diagrama de Ishikawa permite uma visão estruturada e abrangente das causas potenciais, incentivando a equipe a explorar variáveis menos óbvias. Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), o uso desse diagrama ajuda a evitar que a equipe se concentre apenas em fatores evidentes, o que poderia resultar em intervenções ineficazes.

2.3.1.1.7.3 Validação das Causas com Ferramentas Estatísticas

Montgomery (2009) ressalta que a etapa de validação das causas com ferramentas estatísticas ajuda a equipe a distinguir entre suposições e causas comprovadas, garantindo que os esforços de melhoria sejam direcionados para os fatores que realmente afetam o desempenho do processo.

2.3.1.1.7.4 Análise de Regressão Múltipla

Segundo Montgomery (2009), a regressão múltipla permite examinar a relação entre uma variável dependente (resultado do processo) e várias variáveis independentes (causas potenciais), oferecendo uma visão quantitativa da influência de cada variável sobre o resultado final.

Pyzdek e Keller (2009) sugerem que a análise de regressão múltipla é especialmente útil quando existem múltiplas variáveis interagindo no processo. A técnica permite que a equipe identifique quais variáveis têm um impacto significativo no desempenho, auxiliando na priorização das causas que precisam ser abordadas nas fases de melhoria.

2.3.1.1.7.5 Histogramas para Visualização da Variabilidade

George et al. (2005) afirmam que os histogramas ajudam a entender a dispersão dos dados e a forma da distribuição, possibilitando a detecção de inconsistências ou padrões atípicos que podem indicar problemas no processo.

Segundo Montgomery (2009), o uso de histogramas na fase analisar permite que a equipe identifique se a variabilidade do processo está dentro dos limites aceitáveis ou se há sinais de variabilidade excessiva que precisam ser investigados.

2.3.1.1.7.6 Análise de Capacidade do Processo

Segundo Montgomery (2009), a análise de capacidade do processo compara a variabilidade do processo com os limites de especificação, revelando se o processo é robusto o suficiente para produzir resultados dentro dos padrões exigidos. Pyzdek e Keller (2009) recomendam a análise de capacidade como uma prática essencial na fase analisar, pois permite que a equipe identifique áreas onde o processo precisa de ajustes para melhorar a conformidade com os requisitos.

2.3.1.1.7.7 Coleta e Análise de Amostras

Segundo George et al. (2005), a análise de amostras oferece uma visão detalhada do comportamento do processo sob diferentes condições e fornece uma base quantitativa para testar hipóteses sobre as causas. Pande, Neuman e Cavanagh (2000) ressaltam que a coleta de amostras permite que a equipe verifique a consistência e a estabilidade do processo em diversas condições operacionais.

2.3.1.1.8 Fase Melhorar (Improve)

Segundo George et al. (2005), o objetivo da fase "Melhorar" é criar mudanças que resultem em melhorias tangíveis e mensuráveis no processo, utilizando uma abordagem baseada em dados e experimentação controlada.

2.3.1.1.8.1 Criação de um Plano de Ação

Pyzdek e Keller (2009) afirmam que um plano de ação claro e bem definido é essencial para evitar falhas de comunicação e garantir que cada membro da equipe saiba exatamente o que deve ser feito. Montgomery (2009) recomenda que o plano de ação seja estruturado de forma a incluir descrições detalhadas de cada atividade, prazos e responsáveis, para que todos os envolvidos estejam alinhados quanto às expectativas.

2.3.1.1.8.2 Brainstorming e Priorização de Soluções

Pande, Neuman e Cavanagh (2000) argumentam que o brainstorming é uma abordagem eficaz para explorar soluções inovadoras, aproveitando o conhecimento coletivo da equipe. George et al. (2005) recomendam o uso de matrizes de priorização para classificar as soluções e selecionar aquelas com maior potencial de sucesso.

2.3.1.1.8.3 Prototipagem e Teste das Soluções

Harry e Schroeder (2000) destacam que a prototipagem minimiza os riscos, pois permite que a equipe observe o efeito das mudanças em condições reais sem comprometer o processo inteiro. Segundo Montgomery (2009), a prototipagem é especialmente útil para soluções que envolvem mudanças complexas, pois permite uma experimentação segura em um ambiente controlado.

2.3.1.1.8.4 Estabelecimento de Indicadores de Desempenho

Pyzdek e Keller (2009) ressaltam que os indicadores são fundamentais para verificar se as melhorias alcançaram os objetivos desejados e se o processo permanece sob controle. George et al. (2005) recomendam que os indicadores de desempenho sejam mensuráveis e fáceis de interpretar, permitindo que a equipe monitore os resultados em tempo real.

2.3.1.1.8.5 Monitoramento e Controle das Melhorias Implementadas

Segundo Montgomery (2009), o monitoramento contínuo é fundamental para detectar variações no processo que possam comprometer a eficácia das melhorias. Pyzdek e Keller (2009) sugerem que o uso de gráficos de controle possibilita uma resposta rápida a qualquer variação fora dos limites aceitáveis, assegurando que o processo permaneça estável e que as melhorias não sejam comprometidas.

2.3.1.1.8.6 Avaliação do Impacto e Retorno Financeiro

Pande, Neuman e Cavanagh (2000) destacam que a avaliação do impacto é essencial para assegurar que as melhorias geraram resultados mensuráveis e para calcular o retorno financeiro do projeto.

2.3.1.1.9 Fase Controlar (Control)

Segundo Pyzdek e Keller (2009), a fase controlar é fundamental para assegurar que as melhorias realizadas permaneçam efetivas ao longo do tempo, prevenindo o retorno dos problemas e consolidando as práticas implementadas.

2.3.1.1.9.1 Monitoramento Contínuo com Gráficos de Controle

Segundo Montgomery (2009), os gráficos de controle são essenciais para distinguir entre variações comuns (inerentes ao processo) e variações especiais (causadas por fatores externos ou anomalias), permitindo uma resposta imediata quando o processo sai dos limites aceitáveis.

Pyzdek e Keller (2009) relatam que os gráficos de controle devem ser configurados com limites de controle superior e inferior, que representam as faixas de variação aceitáveis do processo.

2.3.1.1.9.2 Procedimentos Operacionais Padrão (POPs)

George et al. (2005) afirmam que os POPs são críticos para garantir que todos os operadores e colaboradores envolvidos no processo sigam os mesmos padrões, evitando a variação causada por diferenças na execução das tarefas. Montgomery (2009) reforça a importância de revisar e atualizar os POPs periodicamente, assegurando que eles estejam sempre alinhados às necessidades do processo e às melhores práticas implementadas durante o projeto.

2.3.1.1.9.3 Treinamento e Capacitação das Equipes

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), o treinamento é essencial para assegurar que todos os colaboradores compreendam os novos procedimentos e a importância da consistência nas atividades. George et al. (2005) enfatizam que o treinamento regular ajuda a promover uma cultura de melhoria contínua, pois encoraja os colaboradores a identificar e relatar problemas, contribuindo para o monitoramento do processo.

2.3.1.1.9.4 Auditorias de Processo

Segundo George et al. (2005), as auditorias permitem que a equipe verifique a conformidade com os POPs e identifique áreas onde o processo pode estar se desviando dos padrões estabelecidos. Montgomery (2009) ressalta que as auditorias

de processos devem verificar tanto o cumprimento dos POPs quanto a efetividade dos controles implementados.

2.3.1.1.9.5 Indicadores de Desempenho e KPIs

Pyzdek e Keller (2009) afirmam que os KPIs devem ser definidos com base nos objetivos do projeto e precisam ser mensuráveis, relevantes e alinhados às metas da organização. George et al. (2005) recomendam que os KPIs sejam monitorados de forma regular para identificar tendências e detectar possíveis sinais de alerta antes que problemas maiores ocorram.

2.3.1.1.9.6 Ações Corretivas e Preventivas

Segundo Montgomery (2009), as ações corretivas são aplicadas quando um problema específico é detectado, enquanto as ações preventivas têm como objetivo evitar a ocorrência de problemas futuros. George et al. (2005) ressaltam que uma abordagem estruturada permite uma resposta rápida e eficaz aos problemas, evitando que variações ou falhas prejudiquem a eficácia das melhorias implementadas.

2.3.1.1.9.7 Documentação e Relatórios de Controle

Pyzdek e Keller (2009) destacam que a documentação completa e precisa facilita a continuidade do processo de melhoria e promove a transparência em toda a organização. Montgomery (2009) sugere que esses relatórios incluam análises de tendências e recomendações para ajustes, assegurando que a alta administração tenha uma visão clara do desempenho do processo e do sucesso das melhorias.

3. METODOLOGIA

A equipe optou pela metodologia DMAIC para estruturar o desenvolvimento do projeto. Essa ferramenta é composta pelas etapas de definir, medir, analisar, melhorar e controlar, que tem o objetivo de se aprofundar nas causas raízes do problema. Desta forma, é possível melhorar um processo, a qualidade do produto, viabilizar a redução de custo e desperdícios, gerando um retorno financeiro positivo para corporação.

3.1. FASE DEFINIR

A etapa inicial do projeto consiste na identificação de uma oportunidade ou problema recorrente. Diversas ferramentas podem auxiliar nessa fase, para o presente projeto optou-se por utilizar as seguintes ferramentas como brainstorm, SIPOC e QFD e Relatórios Históricos, emitidos por IoT de equipamentos e máquinas e GAP Analyses.

3.2. FASE MEDIR

Com base nos dados coletados utilizou, Teste de Normalidade de Anderson Dailing, Cálculo de Amostra Ideal, Regração de Multiplos fatores, R^2 , Gráfico de Pareto, e Gráfico de Dispersão.

3.3. FASE ANALISAR

Nesta etapa, o objetivo é analisar os dados e identificar as causas-raízes, a fim de validar as informações e evidências. Para o presente trabalho lançou-se mão das seguintes ferramentas brainstorming e Ishikawa, Mapa do Processo.

3.4. FASE MELHORAR

Nesta etapa, foram considerados os resultados obtidos na Fase Analyse, através do Brainstorming, Ishikwa, e Mapa do Processo, para a tomada de decisão entre quais dos “Ms”, a equipe irá atuar como frente de melhoria com o objetivo final de atingir a meta global e específicas determinadas.

3.5. FASE CONTROLAR

Nesta etapa, o projeto foca na garantia de que a melhoria proposta na etapa do Improve seja mantida ao longo do tempo, utilizando alterações permanentes no maquinário, padronização de processos e treinamentos dos colaboradores da operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO MAPA DE RACIOCÍNIO

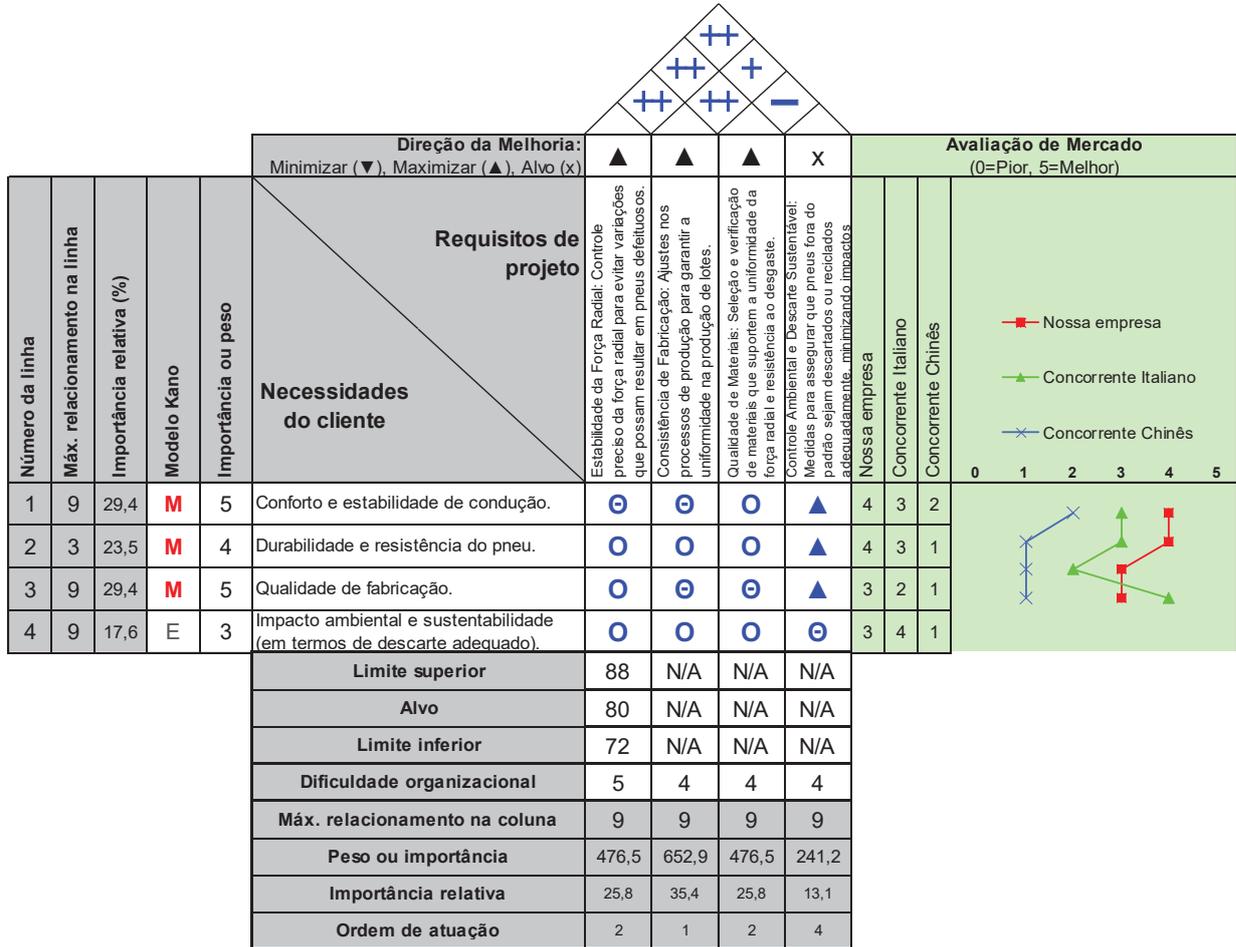
Os dados usados para o presente trabalho foram coletados de uma variedade de fontes, desde históricos que datam de 2018 a 2023, vale inferir que estes dados foram coletados via IoT dos equipamentos, sendo estes relacionados abaixo:

- Máquina de Avaliação de Uniformidade: responsável por medir a força radial do pneu (sem interferência humana), essa máquina é calibrada mensalmente de acordo com o RBC e verificada diariamente nos três turnos de produção (por setup time).
- Relatórios de custos de produto: esses dados são relativos ao custo da matéria-prima e dos processos de agregação de valor, esses dados são oriundos do setor financeiro.
- Relatórios de produção: esses dados são relativos ao custo de hora-homem da produção de pneus, esses dados são oriundos do setor de PCP.
- Relatórios de descarte: esses dados são relativos ao custo de descarte correto, ambientalmente, de cada pneu, esses dados são oriundos do setor de Gestão Ambiental.

E através do desdobramento do QDF, apresentado na Figura 2 – Quadro QFD foi possível identificar um problema comum entre os fabricantes de pneus, o requisito do projeto Inspeção de Uniformidade, possui uma relação muito forte com as demais atribuições, como o processo de mistura, a confecção das mantas têxtil e cintas de aço, o processo de cura, montagem do pneu verde e a confecção do talão. Essa análise foi realizada a partir do preenchimento do telhado da casa da qualidade e pontuando a necessidade do cliente com o requisito de projeto, então, resultando uma ordem de atuação ou ranking. O atributo que recebe o maior grau de importância é um diferencial entre os demais fornecedores ou um possível problema potencial que interfere nos

demais requisitos de projeto. A Figura 2, representada novamente, mostra o quadro preenchido com os requisitos de projeto classificados de maior importância.

Figura 8 - Quadro QFD – Telhado e Correlações



FONTE: AUTORES (2024).

O Quadro QFD evidencia que o conforto e a estabilidade de condução são os atributos mais relevantes para os clientes, com a maior pontuação na coluna de "Peso Relativo" (nota atribuída de acordo com a importância). Essa priorização reflete o desejo do consumidor por um produto que proporcione segurança, praticidade e uma experiência de uso diferenciada. A relevância desse atributo foi corroborada por comparações de mercado, indicando que a ausência de conforto comprometeria a competitividade frente a produtos de marcas concorrentes.

A abordagem adotada pelo QFD permite que as necessidades do cliente sejam traduzidas em métricas tangíveis, como a rigidez e geometria do pneu. Assim, o método serve como base para alinhar os esforços técnicos do projeto às expectativas do consumidor, priorizando os atributos mais valorizados.

Os resultados obtidos na matriz QFD indicam forte correlação entre o conforto e estabilidade de condução e os seguintes requisitos técnicos:

- Rigidez do pneu: Requisito técnico com alta correlação positiva (indicado pelo símbolo "+"), essencial para a estabilidade em curvas e terrenos irregulares.
- Geometria da banda de rodagem: Relacionada à capacidade do pneu de manter aderência e minimizar vibrações, impactando diretamente a percepção de conforto.
- Qualidade da fabricação: Influência sobre a consistência do desempenho e a durabilidade, assegurando maior estabilidade ao longo do ciclo de vida do produto.

O teto da matriz QFD reforça a interdependência entre esses requisitos técnicos. Por exemplo, a rigidez do pneu está correlacionada de forma negativa com a suavidade da condução, demandando um equilíbrio criterioso para evitar que o aprimoramento de um atributo prejudique outro.

A análise de mercado demonstrada no QFD posiciona a empresa em uma situação intermediária quanto ao conforto e estabilidade. A visualização gráfica mostra que concorrentes italianos apresentam ligeira vantagem, enquanto concorrentes chineses possuem um desempenho inferior. Essa comparação reforça a necessidade de aprimorar atributos técnicos que elevem a experiência percebida pelo cliente, especialmente nas categorias com alta correlação com o conforto.

O uso do Modelo Kano no QFD possibilitou a categorização dos atributos relacionados ao conforto e estabilidade como "mandatórios". Esse resultado evidencia que esses fatores não apenas aumentam a satisfação quando bem atendidos, mas também geram insatisfação quando negligenciados.

Essa categorização demonstra que, embora atributos técnicos como o peso total do pneu e a rigidez possam ser otimizados como "atrativos", o conforto e a estabilidade de condução devem receber atenção primária, pois são não negociáveis para a aceitação do produto pelo mercado.

A tabela de priorização no rodapé do QFD aponta para a necessidade de ações rápidas e direcionadas. O conforto e a estabilidade obtiveram o maior índice de prioridade, justificando intervenções nos requisitos técnicos que apresentem maior potencial de impacto. Os principais atributos priorizados incluem:

- Rigidez do pneu: Foco no ajuste fino para minimizar conflitos entre estabilidade e suavidade.
- Geometria da banda de rodagem: Melhorias no design para otimizar o equilíbrio entre aderência e conforto.
- Qualidade da fabricação: Investimento em controle de processos e tecnologia para assegurar consistência.

Essas prioridades foram determinadas com base no impacto direto sobre as necessidades do cliente, conforme indicado pela matriz de correlação.

A partir da Análise do Quadro QFD, pode-se então seguir com a ferramenta SIPOC, para determinação do “Principal Processo” a fim de em mapear de forma visual quais são às entradas e saídas do processo de fabricação de pneus. A Figura 9 – SIPOC, detalha o processo estudado no presente trabalho:

Figura 9 - SIPOC - Fabricação de Pneus

S	I	P	O	C
Fornecedor de Borracha	Borracha	Recebimento de matéria-prima	Estoque em análise	Controle de Qualidade
Fornecedor de Poliester	Poliester			
Fornecedor de Arame de Aço	Arame de Aço			
Fornecedor de Carbono	Carbono			
Fornecedor de Enxofre	Enxofre			
Estoque de matéria-prima	Estoque em análise	Controle de Qualidade de Recebimento	Estoque aprovado	Mistura da matéria-prima
Controle de Qualidade	Estoque aprovado	Mistura da matéria-prima	Estoque intermediário	Produção
Mistura da matéria-prima	Estoque intermediário	Fabricação de sub materiais	Borracha cortada	Produção
			Manta têxtil	
			Cintas de aço	
			Talão	
Produção	Borracha cortada	Montagem dos pneus verdes	Pneu verde	Setor de vulcanização
	Manta têxtil			
	Cintas de aço			
	Talão			
Produção	Pneu verde	Processo de cura	Pneu curado	Máquina de uniformidade
Setor de vulcanização	Pneu curado	Inspeção de uniformidade	Pneu aprovado por uniformidade	Operador da inspeção visual
Máquina de uniformidade	Pneu aprovado por uniformidade	Inspeção visual	Pneu aprovado por inspeção visual	Estoque
Operador da inspeção visual	Pneu aprovado por inspeção visual	Expedição	Pneu expedido	Distribuidor

FONTE: AUTORES (2024).

Com base no SIPOC acima apresentado, e após discussões, determinou-se que o processo a ser investigado com maior detalhamento seria o Fabricação de sub materiais e que tomar-se-ia como embasamento a relação de medidas resultantes do processo de avaliação final do pneu, a Inspeção de Uniformidade. A Inspeção de uniformidade é a etapa mais importante na fabricação de pneus, pois esse processo de Controle de Qualidade do Produto, quem dirá se o pneu apresentou ou não, alguma não-conformidade, e se será um pneu APROVADO, ou REPROVADO.

A Figura 10 apresenta a relação histórica de rejeição de pneus, por não-conformidade de requisito Uniformidade, do último quadriênio, apresentada pela Figura 10.

Figura 10 - Histórico de Rejeitos de Pneus - Quadriênio



FONTE: AUTORES (2024).

Realizado a estratificação da quantidade de pneus descartados no ano de 2023, obtém-se a representação gráfica de descarte mensal, ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Estratificação de Rejeição de Pneus em 2023

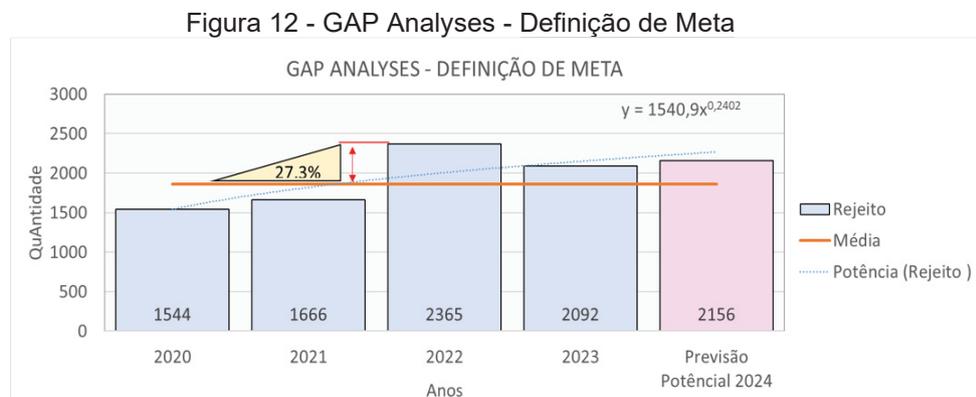


FONTE: AUTORES (2024).

Denota-se que o gráfico de barras acima apresentado, mostra amplitude variável entre os meses. Considerando o valor total de custo de uma unidade de pneu, em R\$ 184,34 tem-se que no ano de 2023, entre as competências Janeiro a setembro, houve um prejuízo financeiro de R\$ 350.061,66.

Portanto o saldo financeiro negativo, relacionado a esta etapa do processo de fabricação dos pneus, demonstra-se como um processo aderente a tratativas com a metodologia requisito do projeto (DMAIC), devido a seu potencial saving e complexidade.

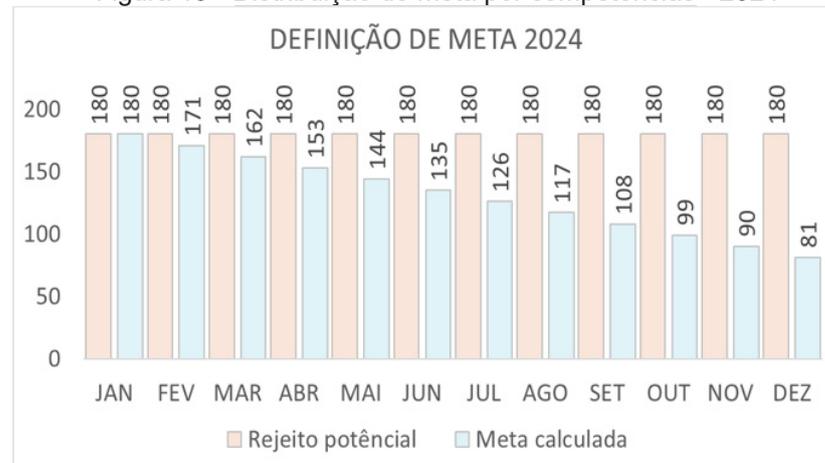
Para a definição da meta utilizou-se a ferramenta GAP Analyses, trabalhando os dados de Rejeitos já relacionados na Figuras X – Histórico de Rejeitos Quadriênio. Após a aplicação da ferramenta, obteve-se que a previsão de Rejeição de Pneus pela característica Uniformidade, em 2024, caso nenhuma intervenção nos processos seja realizada, poderia ser da ordem de 2.156 unidades, conforme ilustrado pela Figura 12. abaixo:



FONTE: AUTORES (2024)

Determinou-se, portanto que uma meta SMART, seria na ordem de 27,3% de redução da rejeição por medidas de uniformidade, por Força Radial. Na sequência, realizou-se a distribuição desta previsão de 2.156 pneus entre todas as competências (meses) do ano de 2024, comparando-a com o volume de rejeição esperado já com a implementação de um modelo otimizado para a avaliação de uniformidade. Demonstrada na FIGURA 13:

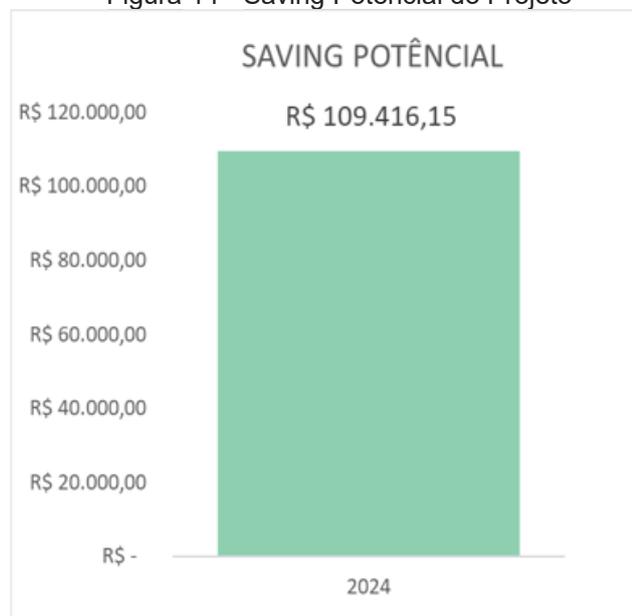
Figura 13 - Distribuição de meta por competências - 2024



FONTE: AUTORES (2024)

Com base na meta estabelecida, e considerando o valor R\$184,34 por unidade de pneus, pode-se obter o saving de R\$109.416,15, dentro da competência 2024, reduzindo a rejeição por uniformidade de até 594 pneus, segundo FIGURA 14:

Figura 14 - Saving Potencial do Projeto

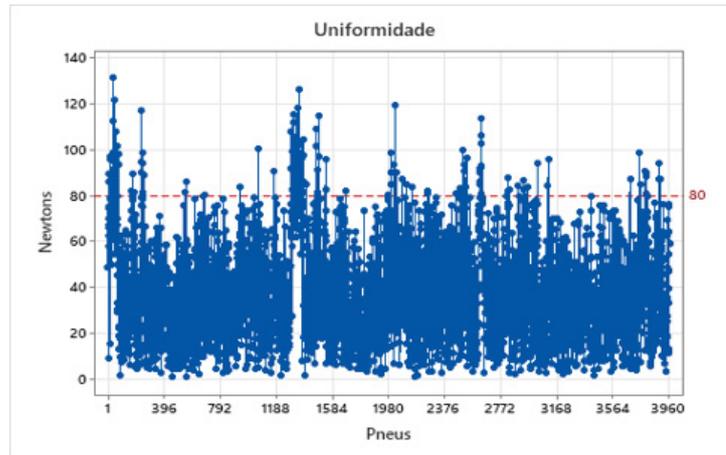


FONTE: AUTORES (2024)

Para o desenvolvimento do Measure, do presente trabalho, os dados foram coletados através de sensores existentes e instalados nas máquinas de avaliação de uniformidade. Esses sensores são responsáveis por medir a força radial do pneu sem interferência humana e, portanto, seus dados são totalmente confiáveis decorrente da

calibração mensalmente de acordo com o RBC e a verificação diariamente em três turnos de produção a cada setup. Com as medições extraída diariamente das quantidades de pneus e as variações da força aplicado em newtons no pneu é possível projetar um gráfico de dispersão, onde este, mostra alguns pontos acima da média de 80, (considerada ideal) o que resulta na reprovação do pneu, ilustrado na Figura 15:

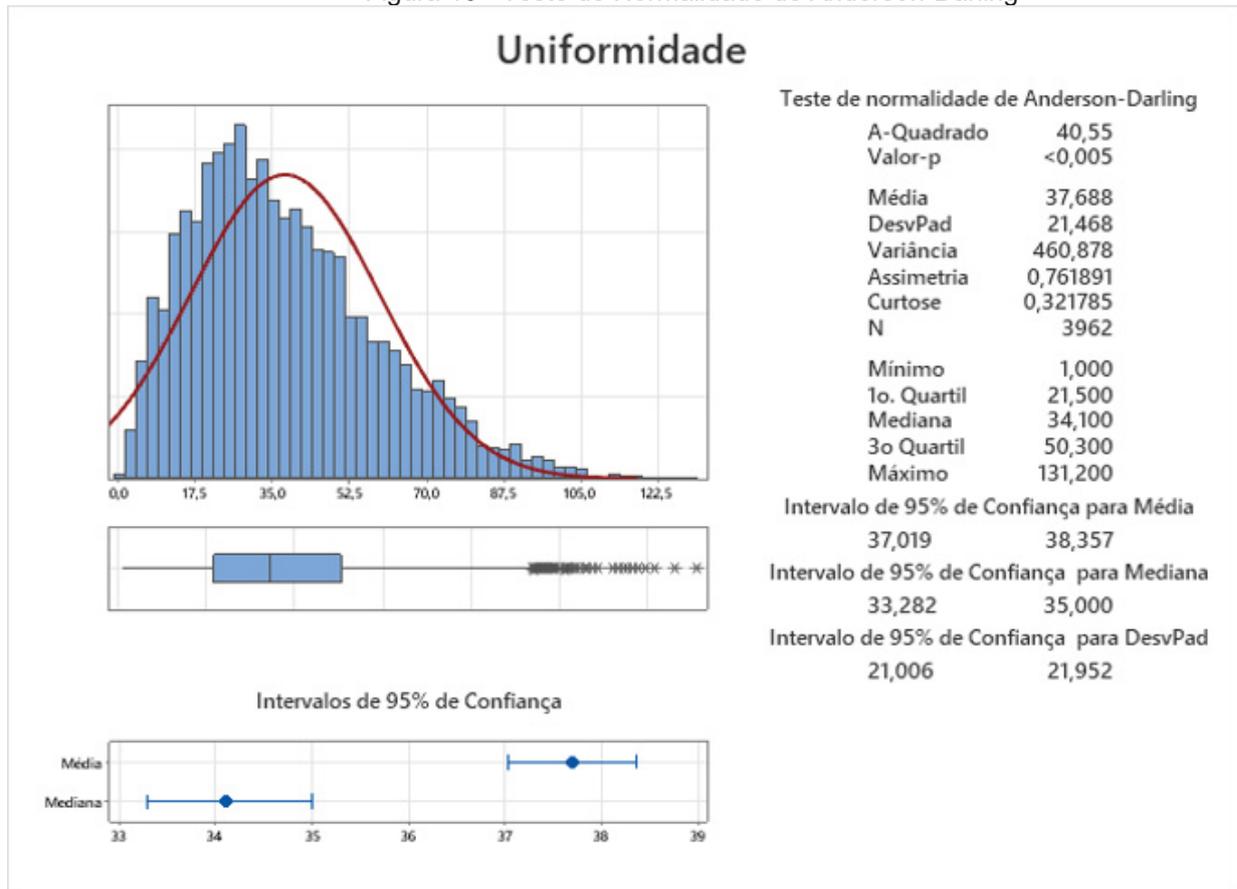
Figura 15 - Gráfico de Dispersão



FONTE: AUTORES (2024)

E a fim de entender o comportamento dos dados, aplicou-se um teste de normalidade estatístico, utilizando-se o software Minitab versão 19. Optou pelo método de Anderson-Darling, pois este é considerado mais sensível a desvios da normalidade, especialmente em distribuições com caudas longas. Esse teste avalia a adequação da distribuição dos dados em relação a uma distribuição normal, proporcionando uma análise mais robusta. Nota-se também que abaixo, do gráfico de dispersão, apresenta um histograma e o boxplot para visualizar possíveis outliers. Enquanto o histograma fornece uma visão geral da forma da distribuição, o boxplot destaca os quartis e os valores atípicos, conforme ilustrado pela Figura 16:

Figura 16 - Teste de Normalidade de Anderson-Darling



FONTE: AUTORES (2024).

No presente estudo, o teste de normalidade de Anderson-Darling foi aplicado para verificar se os dados relacionados à uniformidade dos pneus seguem uma distribuição normal. A hipótese nula (H_0) desse teste é que os dados seguem uma distribuição normal, enquanto a hipótese alternativa (H_1) sugere que os dados não seguem essa distribuição. A pergunta-chave que fundamenta a análise é: "Os dados relacionados à uniformidade dos pneus seguem uma distribuição normal, permitindo o uso de técnicas estatísticas paramétricas, ou seria necessário adotar abordagens não paramétricas ou de redução dimensional?"

Os principais resultados do teste estão apresentados na figura. Observa-se que:

- O valor do teste A^2 foi 40,55, indicando uma grande discrepância em relação à normalidade.
- O valor-p obtido foi menor que 0,005 ($p \leq 0,05$), o que leva à rejeição da hipótese nula (H_0).

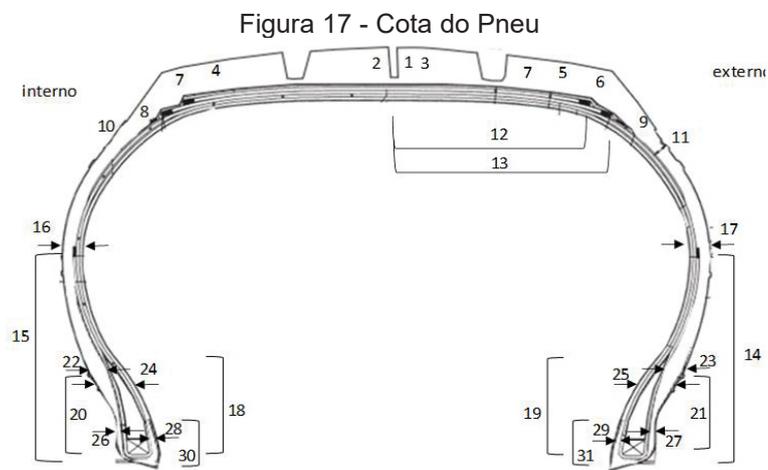
- A análise dos histogramas e boxplots revela uma distribuição assimétrica positiva, com concentração dos dados em valores menores e caudas longas em direção aos valores superiores.

Os indicadores descritivos reforçam essa conclusão:

- A assimetria é de 0,7618, indicando que a distribuição é enviesada positivamente.
- A curtose de 0,3218 sugere que a distribuição possui caudas menos pronunciadas que a distribuição normal padrão.
- O intervalo de confiança de 95% para a média (37,019 a 38,357) e para a mediana (33,282 a 35,000) revela diferenças pequenas entre esses dois estimadores centrais, mas ainda destacam a assimetria nos dados.

Com a rejeição da hipótese nula (H_0), conclui-se que os dados não seguem uma distribuição normal. Isso impede o uso direto de técnicas que assumem normalidade, como análises paramétricas tradicionais, e indica a necessidade de métodos alternativos para compreender os dados.

Após estratificar os dados e descartar a hipótese nula (valor-p $\leq 0,05$), assumindo que os dados não seguem uma distribuição normal. Optou em fazer uma regressão linear de múltiplos fatores para investigar as relações entre as variáveis e então, reduzir o número dimensões de menor importância. As variáveis utilizadas foram às cotas ou as também conhecidas como dimensões de fabricação do pneu, conforme ilustrado pela Figura 17.



FONTE: Adaptado pelos AUTORES (2024).

Realizou-se o cálculo de determinação do tamanho de uma amostra de pneus necessárias, para realização dos testes de uniformidade, com o objetivo de identificar quais entre as 32 cotas influenciam mais na amplitude dos resultados de uniformidade por força radial.

A quantidade de amostra foi definida a partir do método de cálculo de amostra estatístico <10000 amostras, e chegou-se ao número de amostra ideal de 52 pneus.

Separou-se então 52 amostras de pneus do processo produtivo normal de maneira aleatória. Os pneus foram enviados para realização de análise dimensional onde obteve-se 52 relatórios com 32 medições cada, ou seja, cada pneu teria 32 diferentes cotas que poderiam variar causando o defeito, então utilizou-se a análise de regressão de múltiplos fatores para entender quais das cotas teriam maior influência nos defeitos de Uniformidade por força radial.

Ao final de quatro regressões, utilizando Minitab 19, obteve-se os resultados apresentados abaixo:

Figura 18 - Coeficientes

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
19	13,08	3,42	3,83	0,000	3,30
22	46,0	11,4	4,03	0,000	2,93
25	-15,18	7,23	-2,10	0,042	3,68
29	30,4	10,4	2,91	0,006	1,85
30	4,15	1,94	2,14	0,039	2,62
31	5,08	1,68	3,02	0,004	2,34

FONTE: AUTORES (2024)

Também após realizar a quarta regressão, obteve-se o seguinte Sumário do Modelo:

Figura 19 - Sumário do Modelo

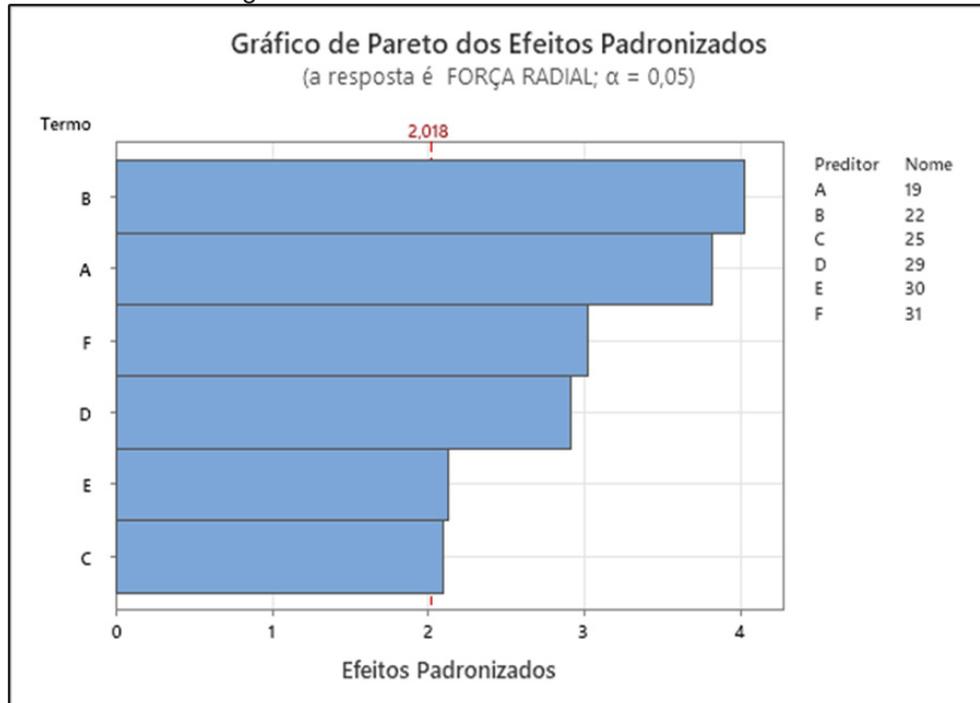
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
20,9503	89,14%	87,59%	84,97%

FONTE: AUTORES (2024)

Sendo o R2 obtido de (89,14%) considerando ideal por Montgomery e Runger (2014). Através das Regressões de Múltiplos fatores, também foi gerado um gráfico de Pareto como mostra Figura 20, onde identificou-se que os termos A e B ou as cotas 19 e 22 tem maior influência na uniformidade do pneu:

Figura 20 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados



FONTE: AUTORES (2024).

Observa-se também que as cotas que mais influenciaram na amplitude das medidas de Uniformidade por Força Radial, se encontram no conjunto inferior do molde do Pneu, com 6 principais cotas identificadas, e todas localizadas na região denominada Talão.

Figura 21 - Cotas Influentes Identificadas



Fonte: AUTORES (2024)

Portanto, a partir dos resultados obtidos acima relatados, pode-se definir as metas prioritárias, que contribuirão para a meta global determinada mediante o GAP Analyses, apresentado no Quadro 3 – Metas Prioritárias.

Quadro 3 - Metas Prioritárias

O quê?	Onde?	Em Quanto?
Redução no desvio padrão	Cota 19	10%
Redução no desvio padrão	Cota 22	10%
Redução no desvio padrão	Cota 31	10%
Redução no desvio padrão	Cota 30	10%

Fonte: AUTORES (2024)

Ao reduzir o equivalente de 10% no desvio padrão da média de cota do pneu em cada uma das seções identificadas de maior impacto objetiva-se atingir a meta global estipulada em 27,3%, equivalente em R\$ 109.416,15 em 12 meses.

Para a fase “Analisar” foi necessário, retomar a análise do SIPOC do processo de fabricação dos Pneus. Para aprofundar a compreensão das causas das variações no processo, foi conduzido um brainstorming com operadores e responsáveis pela área, proporcionando insights relevantes. Os dados levantados foram organizados em um diagrama de Ishikawa, que destacou as principais causas potenciais da variabilidade no processo. Conforme ilustrado pela Figura 22 – Ishikawa:

Figura 22 - Ishikawa



FONTE: AUTORES (2024)

Considerando o resultado da regressão linear de múltiplas variáveis onde todas as cotas identificadas como maiores impactantes na uniformidade, estão localizadas na região do Talão, e após Brainstorming, e análise do Ishikawa, representado na Figura 20, indicou-se a ausência de uma velocidade padrão resultava em variações de velocidade¹, sendo esse portanto, considerado o processo crítico, despadronização da velocidade de extrusão.

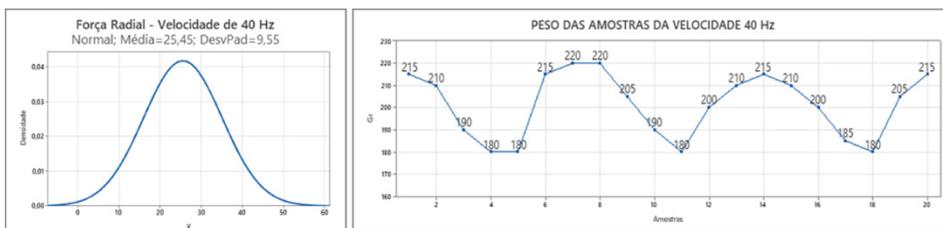
Foram realizadas validações experimentais controladas para confirmar as hipóteses levantadas. Esses experimentos incluíram ajustes na frequência dos motores das extrusoras, na velocidade de operação das máquinas, na posição do acumulador, no volume de borracha aplicado ao talão e no peso do material. Cujo resultados podem ser observados nas Figuras 23, 24 e 25 abaixo:

Figura 23 - Frequência de Extrusão 35 Hz x Pesos das Amostras



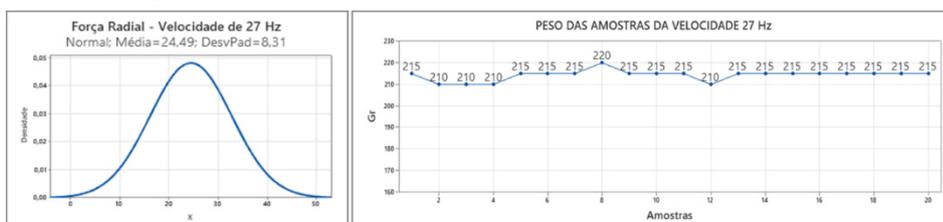
FONTE: AUTORES (2024)

Figura 24 - Frequência de Extrusão 40 Hz x Pesos das Amostras



FONTE: AUTORES (2024)

Figura 25 - Frequência de Extrusão 27 Hz x Pesos das Amostras



FONTE: AUTORES (2024)

¹ A velocidade da extrusora é expressa em RPM (rotações por minuto) e pode ser ajustada por meio do ajuste da frequência. Para conversão, considera-se que 1 Hz corresponde a 60 RPM.

Como a área do talão, está atrelada ao volume e este é intimamente dependente da massa, cortou-se 52 amostras de seção de talão, com 150mm cada e pesou-as, gerando os gráficos a direita, das figuras 21, 22, e 23. E abaixo, ilustrou-se as seções de talão utilizadas.

Figura 26 - Corte e Medidas de Peso do Talão



FONTE: AUTORES (2024)

Após estes testes, identificou-se que esta variação pode chegar em até 13Hz de amplitude entre diferentes operadores, o que compromete a consistência do processo, ou seja, repetibilidade nos resultados de peso (g) gerando uma variação no desvio padrão de 14,89% e na média da uniformidade 3,92%.

Os testes, foram essenciais para validar a consistência dos resultados obtidos nas análises de regressão, bem como validar que as causas comprovadas relacionadas abaixo, estariam contribuindo para a reprovação de pneus por uniformidade, e, portanto, seriam estas a serem otimizadas.

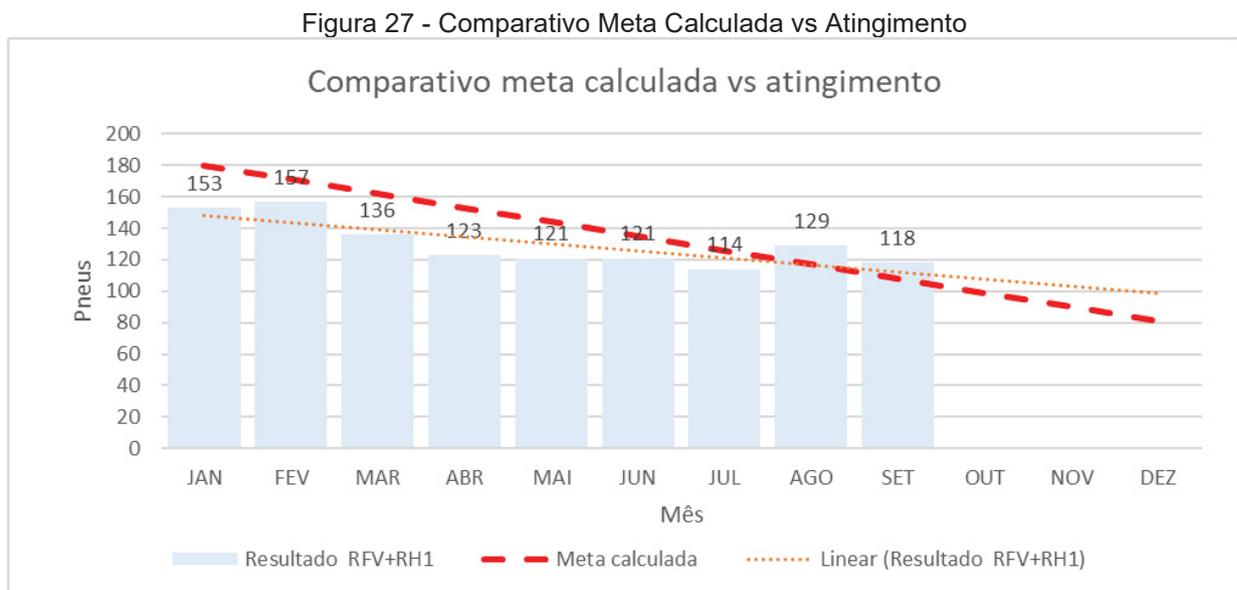
- 1° - Falta de padronização da velocidade de extrusão
- 2° - Ausência de controle para a velocidade
- 3° - Falta de treinamento dos operadores

Para a fase "Melhorar" foi dedicada à implementação de soluções para estabilizar o processo e reduzir a rejeição de pneus. Foram realizados novos testes para validar as ações de melhoria propostas. Essas ações incluíram a padronização da velocidade de operação das máquinas, do volume de borracha aplicado e da posição do acumulador.

Retomando a análise das Figuras 21, 22 e 23, demonstram os resultados obtidos com as frequências 35, 40, e 27 Hz, e pode-se observar que também há oscilação de peso (g), devido a alteração de frequência em Hz, tanto os valores de uniformidade, média e desvio padrão. Observou-se também pelos gráficos, que a

frequência de 27Hz de aplicação da borracha, produzia pneus com medidas de uniformidade com repetibilidade e reprodutibilidade. Com base nestas observações, determinou-se que seria utilizado como padrão a frequência 27 Hz. Essa mudança eliminou a variabilidade causada por ajustes inadvertidos ou incorretos durante a operação, garantindo que a velocidade fosse mantida constante em 27 Hz em toda a linha de produção. Além de promover a melhora da reprodutibilidade das medidas de peso do talão, que conseqüentemente influência nas 6 cotas principais, apontadas na Figura 23.

Para a Fase Controlar, portanto, o impacto dessas melhorias foi monitorado ao longo de vários ciclos de produção, também foi criado um plano de treinamento para os operadores, de modo que todos estivessem cientes das novas diretrizes e soubessem operar as máquinas corretamente dentro dos novos parâmetros estabelecidos. E abaixo na sequência, na Figura 25, pode ser evidenciado, através dos dados de Scrap Anual:



FONTE: AUTORES (2024)

5. CONCLUSÕES

Este projeto conclui que a adoção da metodologia Lean Six Sigma demonstrou ser fundamental para a otimização dos processos, resultando em uma significativa redução dos refugos na ordem de 492 unidades de pneus até o presente momento de coleta de dados, com 10/12 meses de implantação da melhoria, e na mitigação dos impactos ambientais. A aplicação da abordagem DMAIC combinada com diagrama de Ishikawa possibilitou uma condução objetiva na identificação e resolução do problema, levando a melhorias quantitativas expressivas em um intervalo de tempo reduzido após a fase de implementação do Improve. Com a estabilização das variações e a consecução de níveis de qualidade superior, a equipe manifesta otimismo em relação aos resultados obtidos até o presente momento, considerando a meta global definida, de R\$ 109.416,15, o projeto já alcançou 93,95% deste valor, R\$ 102.804,25, e levando-se em consideração que não se transcorreu os 12 meses da etapa Control, tem-se que estes valores estão alinhados às metas globais e específicas estabelecidas para este projeto. Essa trajetória de melhoria contínua evidencia a eficácia da metodologia aplicada e seu potencial para promover benefícios sustentáveis no contexto operacional de fabricação de pneus. Os resultados confirmaram uma redução significativa nas rejeições de pneus, além de melhorias expressivas na avaliação da uniformidade, evidenciando a eficácia das ações corretivas aplicadas. Notoriamente, comprovando as causas identificadas, e o atingimento da meta global estabelecida.

5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para que os KPI's da companhia continuem declinando, recomenda-se a investigação dos impactos significativos apontados pelas demais cotas do pneu, evidenciados durante as regressões lineares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAO, Yoji. **Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design**. Cambridge, MA: Productivity Press, 1990.

BRIDGESTONE CORPORATION. **Technical Handbook**. Bridgestone, 2018.

CONTINENTAL. **Inovações em tecnologia de pneus para veículos modernos**. Disponível em: <https://www.continental.com>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DEKKER, Richard. **Applications of quality inspection in the automotive industry**. Berlin: Springer, 2003.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

GEORGE, Michael L.; ROWLANDS, Dave; PRICE, Mark; MAXEY, John. **The Lean Six Sigma Pocket Toolkit: A Quick Reference Guide to 70 Tools for Improving Quality and Speed**. New York: McGraw-Hill, 2005.

GRAND VIEW RESEARCH. "Automotive Tire Market Size, Share & Trends Analysis Report". Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automotive-tire-market>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HAIR, Joseph F. et al. **Multivariate Data Analysis**. 7th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

HAUSER, John R.; CLAUSING, Don. "The House of Quality". Harvard Business Review, v. 66, n. 3, p. 63-73, 1988.

HARRY, Mikel; SCHROEDER, Richard. **Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations**. New York: Doubleday, 2000.

IMAI, Masaaki. **Kaizen: A Estratégia para o Sucesso Competitivo**. São Paulo: IMAM, 1990.

KLEINBAUM, David G.; KUPPER, Lawrence L.; MULLER, Keith E. **Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods**. 4th ed. Belmont, CA: Duxbury Press, 2008.

MAZUR, Glenn H. **Voice of the Customer (VOC) Translation Matrix: An Overview**. Cambridge, MA: Quality Function Deployment Institute, 1993.

McKINSEY & COMPANY. "The road ahead for e-mobility: Building an infrastructure for electric vehicles". Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-road-ahead-for-e-mobility>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MICHELIN GROUP. **Tire Performance Handbook**. Michelin, 2019.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. **Introduction to Linear Regression Analysis**. John Wiley & Sons, 2012.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2014.

PANDE, Peter S.; NEUMAN, Robert P.; CAVANAGH, Roland R. **The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance**. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

PYZDEK, Thomas; KELLER, Paul A. **Seis Sigma Guia do Profissional: Um Guia Completo para Green Belts, Black Belts e Gestores em Todos os Níveis**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2010.

RUBBER, J. D. **Modern Advances in Tire Manufacturing**. New York: Tire Industry Press, 2001.

RUBBER, J. D. **Rubber Composition and Extrusion Processes in Modern Tires**. London: Rubber Science Publishing, 2015.

RUBBER, J. D. **The Evolution of Tires and Their Applications**. New York: Tire Technologies Publishing, 1985.

TESLA, Inc. **"Tesla Model S Specifications"**. Disponível em: <https://www.tesla.com/models>. Acesso em: 20 nov. 2024.