

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE

Jordana Roider Rodrigues

MELHORIA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE
TECIDOS METÁLICOS NA FABRICAÇÃO DE PNEUS

Porto Alegre

2014

Jordana Roider Rodrigues

Melhoria do Processo de Produção de Tecidos Metálicos na Fabricação de Pneus

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientadora: Professora Maria Auxiliadora Cannarozzo Tinoco, Dra.

Porto Alegre

2014

Jordana Roider Rodrigues

Melhoria do Processo de Produção de Tecidos Metálicos na Fabricação de Pneus

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Maria Auxiliadora Cannarozzo Tinoco, Dra.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Carla Schwengber ten Caten, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Professor Cláudio José Müller, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Nilo Sergio Medeiros Cardozo, Dr. (PPGEQ/UFRGS)

Dedico este trabalho a minha amada sobrinha
Letícia, a garotinha que torna os meus dias mais
coloridos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pela compreensão nos momentos de ausência.

À Alessandra Rhoden pelo incentivo, apoio para iniciar o mestrado e exemplo de profissionalismo.

Agradeço também à professora Maria Auxiliadora Cannarozzo Tinoco pela orientação neste trabalho e a banca examinadora, professores Nilo Sergio Medeiros Cardozo, Cláudio José Müller e Carla Schwengber ten Caten, pelas valiosas contribuições à conclusão deste trabalho.

RESUMO

A melhoria de processos é um tema abordado em diversos setores. Este trabalho concentrou-se na melhoria do processo de produção de tecidos metálicos usados como material de reforço na fabricação de pneus radiais. O estudo foi realizado em uma indústria fabricante de pneus, em uma calandra de configuração Z e teve como objetivo aprofundar os conhecimentos a respeito deste processo identificando oportunidades de melhorias para reduzir perdas causadas por problemas qualitativos. Além disso, buscou melhorar a qualidade percebida pelo cliente interno sem afetar a qualidade do produto final, percebida pelo cliente externo. Para tanto, foi realizado um mapeamento do processo produtivo em questão, seguido de um estudo do efeito das temperaturas neste processo. O mapeamento mostrou que muitas etapas possuem influência direta na qualidade dos tecidos, as oportunidades de melhoria foram destacadas durante e após o mapeamento e estão relacionadas principalmente ao controle das temperaturas da calandra e dos moinhos, à automatização do processo, aos procedimentos operacionais e à instalação de dispositivos de controle e alerta. Uma vez que o controle das temperaturas de toda a linha da calandra resultou ser um fator crítico para o processo, realizou-se um estudo do efeito das temperaturas usadas durante a produção, a partir do uso da metodologia de Projeto de Experimentos com a aplicação de um Projeto Fatorial 2^{5-1} sem repetição. Quatro variáveis de resposta foram estudadas: quantidade de grumos pré-vulcanizados, aderência tecido-tecido, reversão de enxofre e adesão borracha-metal. Os fatores controláveis usados foram: temperatura dos moinhos alimentadores, temperatura dos cilindros 1 e 4, temperatura dos cilindros 2 e 3, temperatura dos tambores de resfriamento e temperatura do aquecimento das cordas metálicas. Pela otimização das variáveis de resposta, chegou-se aos valores ótimos para o processo, sendo todos eles no seu nível alto, com exceção da temperatura dos cilindros 2 e 3 que apresentou o melhor valor no nível baixo. Os resultados deste trabalho aprofundaram os conhecimentos num processo que, apesar de muito antigo, ainda possui poucos textos publicados a respeito. Adicionalmente, forneceu uma otimização experimental para as afirmações encontradas na literatura sobre a importância do controle de temperaturas no processo de fabricação de tecidos metálicos.

Palavras-chave: Mapeamento de processo. Tecido metálico. Melhoria de processo. Projeto de experimentos. Fabricação de pneus.

ABSTRACT

The process improvement is a topic widely used in several sectors. In this work this topic deals with improving the production process of metallic fabrics used as reinforcement material for radial tires. The study was carried out in a tire industry in a Z configuration calender and aims to deepen the knowledge about this process by identifying improvement opportunities to reduce losses caused by quality problems in metallic fabrics. It also seeks to improve the quality perceived by internal customer without affecting the quality of the final product, perceived by the external customer. Thus, a mapping of the production process in question was made, followed by a study of the effect of temperature in this manufacturing process. The mapping shown that many steps have direct influence on fabric quality, the opportunities for improvement were highlighted during and after the mapping and are related mainly to control the temperature of the calender and mills, to process automation, operational procedures and the installation of devices for control and alert. Since the temperature control of whole calender line proved to be a critical factor in the process, a study of the effect of the temperatures used during the production was performed from the use of the design of experiments methodology with the application of a factorial design 2^{5-1} , without replication. Four response variables were studied: number of pre vulcanized lumps, tack, sulfur reversion and steel-rubber adhesion. The controllable factors chosen were: feeder mills temperature, temperature of rolls 1 and 4 of the calender, temperature of rolls 2 and 3 of the calender, temperature of cooling drums and heating temperature of steel cords. By the optimization of the response variables, it was reached the optimum values for the process, all of which are in its high level except for the temperature of the rolls 2 and 3 which showed the best value in the low level. These results obtained deepened knowledge in a process which, though very old, still has a few articles published. Additionally, it provided quantitative data to the statements found in the literature about the importance of temperature control in the manufacturing process of metallic fabrics.

Keywords: *Process mapping. Metallic fabric. Process improvement. Design of experiments. Manufacture of tires.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resumo do método de trabalho.....	16
Figura 2: Representação de um calandra de configuração Z.....	25
Figura 3: Representação de uma árvore CTQ	26
Figura 4: Árvore CTQ para tecidos metálicos.....	30
Figura 5: Diagrama SIPOC do processo de emborrachamento de tecidos metálicos	32
Figura 6: Fluxograma do processo produtivo de tecidos metálicos	33
Figura 7: Etapas do método utilizado no estudo do efeito da temperatura no processo de calandragem de tecido metálico	52
Figura 8: Gráfico dos efeitos principais B e C sobre a variável de resposta aderência tecido-tecido	59
Figura 9: Gráfico de efeito da interação B e C sobre a variável de resposta aderência tecido-tecido	59
Figura 10: Gráfico dos efeitos principais significativos da VR adesão borracha-metal	61
Figura 11: Gráfico das interações para a VR adesão borracha-metal.....	62
Figura 12: Otimização do processo gerada pelo Software Minitab.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Similaridades entre mapas rodoviários e mapas de processos	22
Tabela 2: Características de qualidade do cliente interno	54
Tabela 3: Descrição dos parâmetros do processo	54
Tabela 4: Descrição dos fatores controláveis do processo	55
Tabela 5: Matriz experimental.....	56
Tabela 6: Descrição dos resultados ANOVA para VR aderência tecido-tecido	58
Tabela 7: Descrição dos resultados ANOVA para VR reversão	60
Tabela 8: Descrição dos resultados ANOVA para VR adesão borracha- metal	61

SUMÁRIO

1. INTRUDUÇÃO.....	11
1.1. Comentários iniciais	11
1.2. Tema e objetivos.....	12
1.3. Justificativa.....	13
1.4. Método.....	15
1.4.1. Caracterização do método de trabalho.....	15
1.4.2. Etapas do trabalho	16
1.5. Delimitações do trabalho	17
1.6. Estrutura do trabalho	18
2. ARTIGO 1 – MAPEAMENTO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM DE TECIDO METÁLICO PARA A FABRICAÇÃO DE PNEUS	19
2.1. Introdução	20
2.2. Referencial teórico.....	21
2.3. Procedimentos metodológicos	23
2.3.1. Definições Preliminares.....	25
2.3.2. Mapeamento de Alto Nível.....	26
2.3.3. Mapeamento Detalhado.....	27
2.3.4. Identificação das Oportunidades de Melhoria	28
2.4. Resultado e discussões.....	28
2.4.1. Definições Preliminares.....	28
2.4.2. Diagrama SIPOC	30
2.4.3. Fluxograma padrão ANSI.....	32
2.4.3.1. Regular temperatura nos moinhos	34
2.4.3.2. Plastificar composto de borracha nos moinhos abertos.....	34
2.4.3.3. Enviar borracha para a calandra	35
2.4.3.4. Regular parâmetros da calandra	35
2.4.3.5. Regular a lateral do tecido	36
2.4.3.6. Aplicar polietileno em um dos lados do tecido	36

2.4.3.7. Identificação das partes irregulares	37
2.4.4. Identificação das Oportunidades de Melhoria	37
2.5. Considerações finais	38
2.6. Referências	39
3. ARTIGO 2 – ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE CALANDRAGEM DE TECIDO METÁLICO	42
3.1. Introdução	43
3.2. Referencial Teórico	44
3.2.1. Tecidos Metálicos	44
3.2.2. Influência da temperatura na produção de tecidos metálicos	45
3.2.2.1. Eflorescência de enxofre	46
3.2.2.2. Aderência entre componentes	47
3.2.2.3. Adesão borracha-metal	47
3.2.2.4. Pré-vulcanização	48
3.2.3. Projeto de Experimentos	49
3.3. Procedimento Metodológico	50
3.4. Execução do Projeto de Experimentos	52
3.4.1. Identificação e estabelecimento do problema	52
3.4.2. Seleção das variáveis de resposta, fatores e seus níveis	53
3.4.3. Planejamento final e execução	55
3.5. Resultados e discussão	57
3.5.1. Análise dos dados	57
3.5.1.1. Grumos pré-vulcanizados	58
3.5.1.2. Aderência tecido-tecido	58
3.5.1.3. Reversão de enxofre	60
3.5.1.4. Adesão borracha-metal	60
3.5.2. Otimização	62
3.6. Conclusão	64
3.7. Referências	66

4. COMENTÁRIOS FINAIS.....	70
4.1. Conclusões.....	70
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	72
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização do trabalho, abordando os comentários iniciais sobre o cenário da área de estudo, o tema da dissertação e objetivos do trabalho, a justificativa do estudo e o método de pesquisa utilizado.

1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS

Impulsionadas pelo mercado atual, as indústrias buscam constantemente melhorias no processo de produção que resultem em melhor qualidade do produto e também em redução dos custos de produção. Segundo Paim *et al.* (2009), melhorar processos é uma ação básica para as organizações responderem às mudanças que ocorrem constantemente em seu ambiente de atuação e para manter o sistema produtivo competitivo. De acordo com dados da Confederação Nacional das Indústrias (2005), cerca de 70% das empresas de grande porte pesquisadas no Brasil investem em desenvolvimento de novos processos e produtos.

A indústria de pneus também se enquadra neste contexto. O uso de pneus importados aumentou em 2013 e representa 39% do consumo aparente de pneus no Brasil, sendo que os pneus chineses representam 50% deste índice (ANIP, 2013), devido aos preços de 20 a 40% menores que os produtos nacionais (GOLDENSTEIN *et al.*, 2007). A indústria de pneus pertence a um setor onde a taxa de defeitos e retrabalhos é alta, apresentando um custo considerável para o fabricante. Segundo dados do Relatório da Competitividade da Indústria Brasileira (CNI; SEBRAE, 2001), 4,5% da produção de artigos de borracha e plástico apresentam defeitos e destes somente 12,4% podem ser retrabalhados. Dessa forma, a indústria brasileira de pneus também busca por melhorias em seu processo produtivo, focando na redução dos custos pela diminuição das taxas de desperdício e na qualidade de seus produtos como ponto forte em relação aos pneus asiáticos.

A indústria de pneumáticos, pertencente à indústria da borracha, é responsável por cerca de 30 mil empregos diretos e 100 mil empregos indiretos no país segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (2013). Apesar da representatividade da indústria de pneus

no contexto brasileiro e de que as principais multinacionais fabricantes de pneus já possuam tecnologia para processos altamente automatizados, trazendo grandes inovações para a indústria de pneus (BRUSONI; SGALARI, 2007), o processo de fabricação ainda é, de uma forma geral, bastante manual, sendo necessário um elevado número de operadores (GOLDENSTEIN *et al.*, 2007). O processo de fabricação de pneus conta com seis processos básicos (RODGERS; WADDELL, 2005): (i) mistura dos elastômeros, negro de fumo e outros ingredientes para formar o composto de borracha; (ii) emborrachamento de cordas metálicas e tecidos na operação de calandragem; (iii) extrusão da banda de rodagem, flanco e outros componentes exclusivamente de borracha; (iv) montagem dos componentes do pneu em uma máquina confeccionadora; (v) vulcanização do pneu sob temperatura e pressão e (vi) acabamento, inspeção final e expedição. O grau de complexidade de cada etapa pode variar de acordo com a finalidade e o mercado de destino do pneu a ser fabricado. No entanto, independentemente do tipo de pneu ou do processo pelo qual foi construído, todo o pneu deve cumprir dez funções fundamentais (RODGERS; WADDELL, 2005): fornecer capacidade de carga, fornecer amortecimento, transmitir condução e torque de frenagem, fornecer força nas curvas, proporcionar estabilidade, possuir resistência à abrasão, gerar resposta de direção, possuir baixa resistência ao rolamento, fornecer o mínimo possível de ruído e vibração, ser durável ao longo do tempo de vida esperado.

Dessa forma, para atender e constantemente aprimorar estes requisitos essenciais, mantendo preços competitivos e procurando superar as expectativas dos clientes, as melhorias no processo de produção dentro da indústria de pneus deve ser uma busca contínua.

1.2. TEMA E OBJETIVOS

O tema dessa dissertação contempla a melhoria do processo produtivo, a partir do uso de metodologias de mapeamento de processos e de projeto de experimentos. A aplicação desses conceitos foi realizada no contexto da produção de tecidos metálicos usados como material de reforço na fabricação de pneus radiais.

Os processos podem ser melhorados pela melhoria do produto ou pela melhoria do método de fabricação. A segunda alternativa envolve fatores tais como velocidade de produção,

temperaturas de processo, escolha de ferramentas adequadas, entre outros (SHINGO, 1996). A presente pesquisa tem o intuito de responder a seguinte pergunta: Como melhorar a qualidade dos tecidos metálicos usados na confecção de pneus por meio da melhoria de seu processo de fabricação?

Neste sentido, o presente estudo possui como objetivo principal aprofundar os conhecimentos a respeito do processo de calandragem de tecidos metálicos, identificando oportunidades de melhorias para: (i) reduzir índices de desperdício e perdas de produção por problemas qualitativos em tecidos metálicos e (ii) melhorar a qualidade percebida pelo cliente interno sem afetar a qualidade do produto final, percebida pelo cliente externo, ambos gerados durante o processo de produção dos tecidos.

Para que seja possível alcançar o objetivo geral proposto, listam-se os seguintes objetivos específicos referentes aos cada um dos artigos que compõem esta dissertação:

- a) identificar oportunidades de melhoria no processo de fabricação de tecidos metálicos, através do mapeamento do processo de calandragem, relacionando as necessidades e os requisitos dos clientes com as etapas do processo;
- b) estudar o efeito das temperaturas no processo de fabricação de tecidos metálicos para a produção de pneus e o quanto elas influenciam nas características de qualidade do material.

1.3. JUSTIFICATIVA

A principal justificativa para o tema proposto está associada à relevância do mesmo para empresas de diversos setores e áreas de conhecimento. Segundo Van Aartsengel e Kurtoglu (2013), o princípio de que os recursos disponíveis, a qualidade e o tempo de execução associados a elementos discretos de um processo podem ser otimizados de forma metódica, é a base da filosofia da "Melhoria de Processos". Este princípio vem sendo usado em diversos setores e para diversas finalidades, como diminuição do impacto ambiental (CHEN; SHONNARD, 2004; CIOCCI; PECHT, 2006; PIGOSS *et al.*, 2013; MILLER *et al.*, 2013), melhoria na prestação de serviços (KRECKLER *et al.*, 2013; YILDIZ; DEMIRORS, 2013; CHOI *et al.*, 2013;

MAZUR *et al.*, 2012), melhoria no desenvolvimento de produtos (NIAZI *et al.*, 2005; IVERSEN *et al.*, 2004; TUNKELO *et al.*, 2013; GARZAS; PAULK, 2013; RASCHKE; SEM, 2013), melhorias no setor industrial (DREWS; KRAUME, 2005; : SHAHBAZ *et al.*, 2006; WAN; CHEN, 2008; CHAN; SPEDDING, 2003; TROVINGER; BOHN, 2005; CARLSON; SODERBERG, 2003), entre outros.

Neste trabalho a melhoria de processos busca a identificação de oportunidades de melhoria no processo de fabricação de tecidos metálicos, aprofundando o conhecimento sobre o assunto. A qualidade dos tecidos metálicos está associada ao seu processo de produção.. Apesar deste processo ser bastante antigo, não existem muitos trabalhos nesta área de atuação (BHOWMICK, 2008). Os pneus definem a capacidade de carga do veículo e o seu amortecimento, que é proporcional ao conforto sentido pelo motorista, transmitindo a dirigibilidade, a força de frenagem e fornecem a tração ao dirigir (CHANDRA, 2013). O desempenho de um veículo é fortemente dependente da capacidade dos seus pneus. Sem o desenvolvimento dos pneus, o desenvolvimento dos veículos de transporte a motor não seria possível (CHANDRA, 2013). O desempenho dos pneus por sua vez, depende da resistência e durabilidade das ligações entre as cordas metálicas e a borracha que integram os tecidos metálicos (DURAIRAJ, 2005; JEON, 1999). Neste sentido, o processo de produção desses tecidos metálicos constitui uma etapa importante na fabricação do produto final.

Estes tecidos são formados por cordas metálicas dispostas paralelamente e revestidas por um composto de borracha. As cordas são estruturas constituídas por dois ou mais filamentos de aço de alto teor de carbono, revestidos por uma fina camada de bronze. Tanto as cordas metálicas como o composto de borracha são produzidos com matéria-prima de elevada qualidade, o que é necessário pela exigência de desempenho a que os pneus são submetidos. Por ser um material formado por dois componentes, caso ocorra alguma irregularidade durante sua produção, os tecidos metálicos não podem ser reciclados ou reutilizados no processo. Isso representa um elevado custo para o fabricante, pois gera desperdício de mão de obra, de matéria-prima nobre e também de tempo de máquina..

Desta forma, considerando a importância do processo de produção de tecidos metálicos na fabricação de pneus radiais e da carência de estudos na literatura sobre o assunto, justifica-se o presente trabalho.

1.4. MÉTODO

1.4.1. Caracterização do método de trabalho

A pesquisa descrita neste trabalho é voltada à geração de conhecimento sobre um processo de produção bastante específico dentro de uma empresa fabricante de pneus, dirigido a melhorias deste processo, sendo assim classificada como de natureza aplicada (SILVA; MENEZES, 2005). Em relação à abordagem a pesquisa pode ser classificada como qualitativa, por usar dados qualitativos, análises e observações não numéricas e também quantitativa, pois faz uso de ferramentas estatísticas na análise de dados numéricos (SILVA; MENEZES, 2005).

Segundo Gil (2002), a pesquisa descritiva tem como objetivo primordial a descrição das características de uma determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Ela se aproxima da pesquisa explicativa quando vai além da simples identificação da existência de relações entre as variáveis e pretende determinar a natureza dessas relações. Este é o caso do primeiro artigo deste trabalho, que descreve as etapas de um processo de produção visando tornar explícito os fatores críticos e construir hipóteses sobre eles. No segundo artigo foram usados experimentos com o objetivo de identificar fatores que contribuem para as características de qualidade do material, portanto sendo classificada como explicativa.

De acordo com Silva e Menezes (2005), na pesquisa-ação os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo. O primeiro artigo foi classificado dessa forma quanto aos seus procedimentos técnicos, pois foi desenvolvido com a interação dos pesquisadores e das pessoas envolvidas no processo em estudo. Já o segundo artigo, é classificado como pesquisa experimental, pois usa a metodologia de Projeto de Experimentos como forma de observação dos efeitos que as

variáveis produzem no material estudado (SILVA; MENEZES, 2005). A Figura 1 resume o método de trabalho usado na dissertação.



Figura 1: Resumo do método de trabalho

Fonte: elaborado pela autora (2014)

1.4.2. Etapas do trabalho

Com o intuito de atingir os objetivos propostos, esta dissertação seguiu quatro etapas. A primeira consistiu na identificação de necessidades dos clientes internos do processo de produção dos tecidos metálicos, com o objetivo de levantar as suas necessidades quanto a qualidade e produtividade relativas ao material recebido. Esse levantamento foi realizado a partir de entrevistas com os principais clientes do processo em estudo e as informações obtidas foram organizadas e analisadas usando a ferramenta árvore CTQ (*Critical to Quality*).

A segunda etapa envolveu o mapeamento do processo de fabricação dos tecidos metálicos, buscando detalhar as etapas de fabricação, mostrando o caminho dos materiais, as conexões existentes e destacando os pontos críticos das atividades. Nesta etapa foram usadas como ferramentas o diagrama SIPOC e o fluxograma padrão ANSI.

A etapa seguinte faz uma relação entre as duas etapas anteriores, o mapeamento e a árvore das necessidades e requisitos dos clientes, com foco na identificação dos pontos de descontinuidade, gargalos, redundâncias e outros pontos onde existam oportunidades de melhoria

do processo. Ainda nesta etapa é identificado o ponto mais crítico do processo (controle das temperaturas) e onde o trabalho pode ser aprofundado.

Partindo do mapeamento do processo realizado na etapa anterior e da identificação de parâmetros críticos do processo, na quarta e última etapa, realizou-se uma otimização dos parâmetros de temperaturas do processo a partir do planejamento e execução de um projeto de experimentos. O projeto de experimentos foi aplicado no processo de emborrachamento do tecido metálico com um Projeto Fatorial 2^{5-1} sem repetição, usando quatro variáveis de resposta relacionadas às características de qualidade definidas pelos clientes internos e pela equipe técnica, a partir de entrevistas.

1.5. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho aplica-se a um produto bastante específico usado exclusivamente na fabricação de pneus radiais. Os conceitos teóricos abordados provavelmente podem ser usados em outros processos, no entanto os resultados restringem-se à fabricação do produto específico estudado, não podendo ser genericamente empregado sem adaptações.

A melhoria de processos pode ser realizada por meio de alterações nas especificações do produto em questão e também por meio de adaptações ou modificações no processo de fabricação. Este trabalho limita-se a estudar o processo de fabricação, nenhuma alteração de especificação do produto foi realizada.

Dos pontos críticos do processo levantados no mapeamento do processo realizado no primeiro artigo, somente um (controle das temperaturas) foi melhor estudado a partir de um projeto de experimento no segundo artigo. No entanto, futuros trabalhos podem explorar outras etapas críticas do processo.

Por último, as análises apresentadas nas etapas exploratórias desta dissertação referem-se à percepção e o conhecimento da equipe técnica da empresa onde o trabalho foi realizado. O nome desta empresa não pôde ser divulgado devido a normas de confidencialidade.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é estruturado no formato de artigos científicos. Desta forma, a dissertação é composta de quatro capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao tema abordado na dissertação, destacando a importância da melhoria de processos nas indústrias em um mercado cada vez mais competitivo e apresentada brevemente a situação atual da indústria de pneumáticos. Neste capítulo também são introduzidos os objetivos gerais e específicos do trabalho, o método de trabalho, as delimitações do estudo e a estrutura do mesmo.

O primeiro artigo é apresentado no segundo capítulo, contendo um mapeamento sobre o processo de produção de tecidos metálicos usados como materiais de reforço na fabricação de pneus radiais. O principal resultado deste artigo é a constatação da importância do controle de temperatura em diversos pontos durante a fabricação dos tecidos.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo desta dissertação. Nele o principal ponto crítico resultante do mapeamento realizado no primeiro artigo é explorado. Possui o objetivo de otimizar os parâmetros de temperatura de acordo com a sua influência nas características de qualidade do material, o que é realizado por meio de um projeto de experimentos.

O último capítulo apresenta as conclusões decorrentes do trabalho desenvolvido, as melhorias propostas para o processo de produção de tecidos metálicos na indústria de pneus e discute as principais contribuições da dissertação. Também são explicitadas as limitações da pesquisa, indicando sugestões para trabalhos futuros.

2. ARTIGO 1 – MAPEAMENTO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM DE TECIDO METÁLICO PARA A FABRICAÇÃO DE PNEUS

Jordana Roider Rodrigues

Maria Auxiliadora Cannarozzo Tinoco

Uma versão resumida do artigo foi publicada nos Anais do VI Simpósio Internacional de Ingeniería Industrial:

Actualidad y Nuevas Tendencias, Bogotá, 24 al 26 de Julio de 2013.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi mapear o processo de calandragem de tecidos metálicos e identificar oportunidades de melhoria, relacionando as necessidades e requisitos dos clientes com as etapas do processo. Para isso, foram utilizadas as ferramentas árvore CTQ, para identificar as necessidades e requisitos dos clientes e o diagrama SIPOC e o fluxograma padrão ANSI, para mapear o processo. O mapeamento mostrou que muitas etapas possuem influência direta na qualidade dos tecidos, traduzida na voz dos clientes como aprovação dos materiais, ausência de defeitos e permitir o fluxo contínuo do processo posterior. As oportunidades de melhoria foram destacadas durante e após o mapeamento e estão relacionadas principalmente ao controle das temperaturas da calandra e dos moinhos, à automatização do processo, aos procedimentos operacionais e à instalação de dispositivos de controle e alerta.

Palavras-chave: Mapeamento de processo. Tecido metálico. Melhoria de processo.

Abstract: The purpose of this paper was to map the metallic fabric calendering process and identify improvement opportunities, relating the customer needs and requirements with the process steps. For that, we used the CTQ tree tool to identify the customer needs and requirements and the SIPOC diagram and the flowchart ANSI standard to map the calendering process. The mapping shown that many steps have direct influence on fabric quality, translated on the customer voice as material approval, lack of defects and to allow a continuous flow of subsequent manufacturing process. Opportunities for improvement were highlighted during and after the mapping and are related mainly to control the temperature of the calender and mills, to process automation, operational procedures and the installation of devices for control and alert.

Keywords: Process Quality, Flowchart, Rubber.

2.1. INTRODUÇÃO

Um pneu consiste na montagem de uma série de componentes com funções específicas para atender as necessidades de cada veículo em particular. A tecnologia ou engenharia de fabricação de pneus pode ser dividida em dois grandes segmentos: um que aborda a composição da borracha e outro referente aos materiais de reforço dos pneus. Os princípios da composição da borracha tratam basicamente das características dos polímeros, dos materiais de enchimento e das bases de vulcanização a serem usados para a fabricação de um determinado tipo de pneu (RODGERS; WADDELL, 2005). Os materiais de reforço são as cinturas e telas, que podem ser de fabricação têxtil ou metálica, e os talões dos pneus compostos por fios de aço. Neste artigo são abordados os assuntos referentes aos materiais de reforço que usam tecidos metálicos como matéria-prima.

Os tecidos metálicos possuem características de qualidade específicas, como boa aderência superficial e boa aderência borracha-metal, bem como espessura, peso e distribuição de cordas constantes. A falta de aderência, tanto superficial como borracha-metal, está principalmente relacionada com a migração de enxofre para a superfície do tecido, o que impossibilita a utilização da tela ou cintura durante a confecção do pneu cru e compromete as características fundamentais de segurança e durabilidade do pneu. Requisitos de peso e espessura, se não detectados durante a produção do tecido por meio de gráficos de controle, alteram o peso final do pneu e, dependendo da gravidade, provocam defeitos como escassez de material ou uniformidade irregular do pneu, entre outros. Se uma má distribuição de cordas ocorrer, esta só será detectada durante a inspeção final de raio-x dos pneus e, provavelmente, este será refugado. Qualquer um destes requisitos, quando não atendidos, resultam em qualidade insuficiente do produto, em refugo de material e conseqüentemente custo adicional para o fabricante, além de perda de receita

Diversos autores tratam das características de qualidade citadas, principalmente referentes à aderência, como ligadas à formulação do composto de borracha (POH *et al.*, 1995; KOK, 1987; BOSCOTT; LEHRL, 1990; JEON, 2010). No entanto, o processo de calandragem possui muitas

etapas e muitos fatores determinantes para a excelência do produto final, gerando a a dúvida: no processo de calandragem, quais são as etapas críticas para a qualidade do tecido metálico?

Este trabalho tem como objetivo mapear cada etapa do processo de calandragem de tecidos metálicos e identificar oportunidades de melhoria das características de qualidade do produto. O mapeamento de processo é uma ferramenta comumente utilizada pela metodologia Seis Sigma nas fases iniciais e é muitas vezes uma fonte de identificação de melhorias rápidas no processo (McCARTY *et al.*, 2004). O mapeamento foi realizado por meio de três ferramentas: a árvore CTQ (*Critical to Quality*), o diagrama SIPOC e um fluxograma padrão ANSI.

O trabalho está dividido da seguinte maneira: inicialmente são apresentados conceitos fundamentais para o entendimento do problema por meio de um referencial teórico. Em seguida, o procedimento metodológico usado é descrito e então detalhada a execução do mapeamento do processo de calandragem. Finalmente, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2.2. REFERENCIAL TEÓRICO

O mapeamento de processos é uma técnica bastante antiga. Foi inicialmente pensado por Frank Gilbreth no início do século XX (MADISON, 2005). Gilbreth era um ex-pedreiro que recomendou a substituição de movimentos supérfluos por outros mais eficazes ao observar atentamente os movimentos dos pedreiros, melhorando assim a produtividade (GOODWIN, 2005). O mapeamento do processo descreve os processos mostrando como as atividades dentro do processo se relacionam umas com as outras. Segundo Slack *et al.* (2006), duas características principais são comuns dentre as diversas técnicas de mapeamento de processos: (i) identificam os diferentes tipos de atividades que ocorrem durante o processo e (ii) mostram o fluxo de materiais, informação ou pessoas, através do processo.

Um processo pode ser definido como: (i) um grupo de atividades que leva a alguma saída ou resultado; (ii) os meios pelos quais o trabalho é feito ou (iii) um mecanismo para criar e entregar valor para o cliente (MADISON, 2005). De uma forma mais geral, um processo é definido como qualquer atividade ou conjunto de atividades que toma uma entrada, adiciona valor a ela e fornece uma saída a um cliente específico (GONÇALVES, 2000).

Segundo Lee e Snyder (2006), o mapa de processos é análogo a um mapa geográfico, pois informa onde se está, em qual lugar se quer chegar, como chegar e as dificuldades ao longo do caminho. Da mesma forma, Anjard (1996) compara o mapa de processos a mapas rodoviários, como mostra a Tabela 1. O mapa de processos destaca os passos da produção de um determinado produto (ou serviço), quem executa estes passos e onde os problemas podem ocorrer. O mapeamento do processo alerta para a área onde uma mudança no processo terá o maior impacto na melhoria da qualidade.

Tabela 1: Similaridades entre mapas rodoviários e mapas de processos

Mapa Rodoviário	Mapa de Processo
Pega direções e as converte em figuras	Pega procedimentos e os converte em figuras
Mostra vários percursos ou rotas para um destino	Mostra os percursos de viagem das entradas até se tornarem saídas
Mostra as comunidades pelas quais você passa para alcançar o destino	Mostra as funções/departamentos envolvidos e as transferências de responsabilidades
Mostra as conexões das rodovias	Mostra as conexões dos processos
Mostra as rotas mais rápidas e as mais lentas	Destaca as áreas para melhorias
Fornecer rotas alternativas	Desencadeia ideias para melhorias do processo

Fonte: adaptado de Anjard (1996).

O mapeamento do processo pode ser visto tanto como o iniciador da mudança como a ferramenta de mudança (FENTON, 2007). É utilizado também dentro do Seis Sigma e destaca-se como uma das ferramentas essenciais da metodologia. De acordo com Pande *et al.* (2001), o mapeamento fundamenta-se em uma série de tarefas conectadas por setas, que mostram o fluxo do trabalho, as decisões e/ou avaliações. Ainda segundo Pande *et al.* (2001) com o mapeamento concluído, é possível uma análise para identificação de áreas de problemas, como as descritas a seguir:

- *Descontinuidades*: Pontos onde não existe comunicação clara entre o fornecedor e cliente. A transferência de um grupo para o outro é mal realizada;
- *Gargalos*: Pontos onde ocorre o retardo ou atraso de todo o fluxo de trabalho. O volume a ser entregue é maior que a capacidade de produção;
- *Redundâncias*: Atividades repetidas ou duplicadas em dois pontos do processo que levam ao mesmo resultado;
- *Loops de trabalho*: Ponto onde ocorre um retrabalho, onde o produto volta para o processo para ser consertado, corrigido ou reparado;
- *Decisões/Inspeções*: Pontos onde são criados atrasos potenciais por decorrência de escolhas, avaliações ou verificações.

Um mapa de processo pode ser mostrado em vários níveis de detalhamento e comumente usa símbolos para representar diferentes atividades dentro do processo. Processos grandes e complexos podem ser inicialmente desenhados em um nível macro e posteriormente serem detalhados a níveis menores. O mapeamento deve começar no nível mais alto, onde são representados simplesmente como entrada-transformação-saída. Posteriormente o processo deve ser desmembrado em mini e/ou micro níveis. O nível de detalhamento e a quantidade de informações são variáveis e dependem do propósito do mapeamento (ANJARD, 1996; SLACK *et al.*, 2006).

2.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa descrita neste trabalho é voltada à geração de conhecimento sobre um processo de produção bastante específico dentro de uma empresa fabricante de pneus, dirigido às soluções de problemas qualitativos do produto, sendo assim classificada como de natureza

aplicada. Quanto à abordagem, esta pesquisa é qualitativa, pois usa dados qualitativos, análise, observações e comparações não numéricas. Por descrever as etapas de um processo de produção visando tornar explícito os fatores críticos e construir hipóteses sobre eles, esta pesquisa é classificada como exploratória do ponto de vista dos objetivos. Este estudo foi desenvolvido com a interação dos pesquisadores e das pessoas envolvidas no processo em estudo, assim sendo classificado como pesquisa-ação (SILVA, 2001).

Este trabalho foi realizado em uma empresa fabricante de pneus, dentro do setor que produz os materiais semiacabados usados posteriormente no processo de confecção. Por motivos de sigilo industrial, o nome da empresa não será citado. O processo produtivo estudado foi o de emborrachamento de tecidos metálicos usados na produção de cinturas, telas e bordos que são componentes essenciais para a confecção de pneus radiais. Estes tecidos são produzidos pelo processo de calandragem. Uma calandra pode ser grosseiramente definida como um moinho de precisão muito elevado, composta por rolos, de dois a quatro, com configurações variadas (CIESIELSKI, 1999).

O processo de calandragem inicia-se com a mistura do composto de borracha em misturadores fechados ou moinhos abertos. Em seguida, a borracha é aplicada por meio de grandes rolos rotativos em ambos os lados de uma série de cordas metálicas dispostas paralelamente ao sentido de emborrachamento, com distância entre cordas constante e pré-definida. Em seguida, o tecido emborrachado recebe um filme de polietileno para evitar que as camadas de tecido se colem após o embobinamento, então o tecido passa por rolos de resfriamento e é recolhido em bobinas. O processo em estudo é feito em uma calandra de configuração Z, como a representada de forma simplificada na Figura 2. Após o processo de calandragem, os tecidos são cortados em diferentes ângulos, formando assim as cinturas, telas e bordos metálicos.

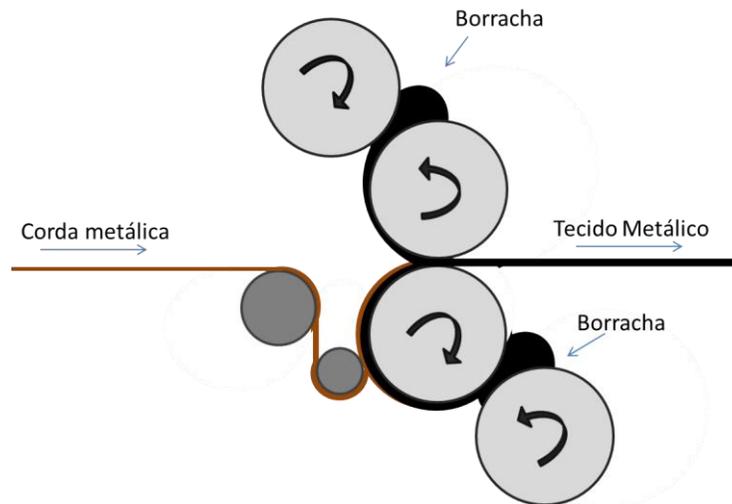


Figura 2: Representação de um calandra de configuração Z

Nos tópicos a seguir, são detalhadas as 4 etapas do procedimento metodológico utilizado: (i) definições preliminares; (ii) mapeamento de alto nível; (iii) mapeamento detalhado e (iv) identificação das oportunidades de melhorias.

2.3.1. Definições Preliminares

Nesta etapa foi definida a equipe de trabalho. Os critérios de escolha dos membros da equipe envolveram o conhecimento profundo sobre o processo ou pelo menos de uma das atividades, a capacidade de compreender o cenário do trabalho e a disponibilidade de participar das reuniões e encontros. Dessa forma, para que as informações fossem bastante amplas, foram requisitados para o mapeamento integrantes de todas as áreas envolvidas no processo.

Ainda na etapa de definições preliminares, foi utilizada a árvore CTQ (*Critical to Quality*) como ferramenta para representar as necessidades e requisitos dos clientes do processo a ser investigado. Esta ferramenta é dividida em dois estágios. No primeiro estágio a equipe de trabalho cria a árvore CTQ, como mostrado na Figura 3, de acordo com os passos a seguir (ECKES, 2003a):

- Identificar os clientes do processo em estudo;

- Identificar as necessidades do cliente;
- Identificar as características das necessidades que determinam se o cliente está satisfeito (primeiro nível de requisitos);
- Avançar para níveis mais detalhados de requisitos se necessário.

No segundo estágio da construção da árvore CTQ é realizada a validação das necessidades e requisitos com os clientes reais do processo estudado (ECKES, 2003b). A validação foi feita por meio de entrevistas com os clientes do processo em estudo.

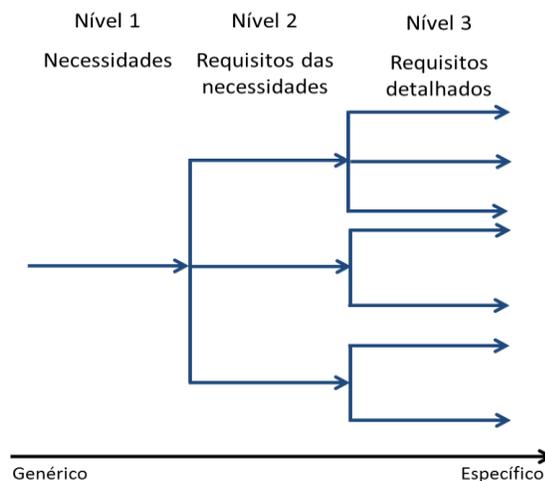


Figura 3: Representação de uma árvore CTQ

2.3.2. Mapeamento de Alto Nível

No mapeamento de alto nível, ou macro, as atividades principais que formam o processo central são identificadas. Neste mapa inicial não é incluído nenhum detalhe das transformações das matérias-primas no processo. O objetivo deste nível é definir o escopo do sistema e delimitar as fronteiras do mapeamento.

A ferramenta utilizada nesta etapa foi o diagrama SIPOC, uma das técnicas mais úteis e utilizadas de gestão e melhoria de processo (PANDE *et al.*, 2001). SIPOC, ou FEPSC, é a abreviação dos cinco elementos do diagrama:

- Fornecedor (*Supplier*): É quem fornece a informação, matéria-prima ou materiais para o processo;
- Entrada (*Input*): É o que é fornecido para o processo;
- Processo (*Process*): É a série de atividades ou passos que transforma as entradas no produto final da etapa considerada. É o que agrega valor à entrada;
- Saída (*Output*): É o resultado do processo, que são produtos ou serviços;
- Cliente (*Customer*): É quem recebe a saída. Pode ser o cliente final ou uma etapa posterior do processo.

Apesar de o sentido de leitura do SIPOC ser de esquerda para a direita, as etapas de construção do mapa são levemente diferentes, como mostrado nos passos a seguir, adaptado de Eckes (2003b):

1. Delimitar o processo, definir claramente onde começa (S) e onde termina (C);
2. Identificar as saídas do processo (O). Este deve ser descrito como um substantivo;
3. Identificar as entradas (I);
4. Destacar as principais atividades ou subprocessos, entre 5 e 7 atividades (P).

O sexto e último passo é também o mais importante do mapeamento de alto nível do processo. Para que o diagrama seja construído de forma adequada, nesta etapa não se deve antecipar a criação de um mapa ideal, ou seja, as atividades devem ser descritas exatamente como elas são e não como deveriam ser (ECKES, 2003a).

2.3.3. Mapeamento Detalhado

O mapeamento detalhado foi realizado por meio de fluxograma padrão ANSI (*American National Standards Institute*). Este fluxograma mostra o caminho de todos os materiais e informações que ocorrem durante o processo, as conexões entre as atividades e os movimentos

que circundam cada atividade, usando neste trabalho como ponto de partida o diagrama SIPOC. Um fluxograma pode ser definido como um método para descrever graficamente um processo, novo ou já existente, usando símbolos, linhas e palavras para apresentar graficamente as atividades e a sequência do processo (HARRINGTON, 1993).

Nesta etapa foi buscado o entendimento profundo do que acontece no processo, quem são os envolvidos e quais são as relações entre os processos e os requisitos dos clientes. Segundo Müller (2003), o fluxograma tem a função básica de documentar um processo para que se possam identificar as áreas que precisam ser melhoradas. Assim, o objetivo principal deste mapeamento é a identificação das atividades que funcionam bem e onde estão as desconexões e deficiências existentes, sempre com foco na qualidade do produto produzido e com o objetivo de identificar os pontos críticos da não qualidade.

2.3.4. Identificação das Oportunidades de Melhoria

Nesta etapa, foi realizada uma avaliação crítica do fluxograma para identificar pontos de descontinuidade, gargalos, redundâncias e outros pontos onde existam oportunidades de melhoria do processo. Estes pontos foram avaliados com foco nas necessidades e requisitos do cliente indicados na árvore CTQ. Parte dessa análise foi realizada juntamente à construção do mapeamento, uma vez que as atividades mais difíceis de explicar/entender são aquelas que não estão claras e conseqüentemente precisam ser melhoradas. Segundo Pande *et al.* (2001), informações esclarecedoras vêm à tona à medida que as pessoas falam e ouvem sobre o processo no qual trabalham durante a criação de mapas.

2.4. RESULTADO E DISCUSSÕES

2.4.1. Definições Preliminares

A equipe de trabalho foi composta da seguinte maneira: um engenheiro mecânico responsável pelas melhorias e manutenção da máquina, uma engenheira química responsável pela qualidade do produto semiacabado produzido, um engenheiro mecânico responsável por

melhorias de processo, um inspetor de qualidade responsável pelos índices de refugo do material estudado e um operador da calandra. Além disso, participaram deste trabalho quatro operadores da calandra metálica.

Como primeira tarefa, a equipe identificou os clientes do processo: (i) os operadores das cortadeiras (processo posterior) e (ii) os gestores responsáveis pelo processo posterior. Em seguida, foi identificado que a necessidade principal destes clientes era ter o tecido metálico em boas condições de uso, ou seja, material sem defeitos de produção e que não provoquem paradas nas cortadeiras por exemplo. Em seguida, a equipe identificou as características associadas a essa necessidade para então montar a árvore CTQ mostrada na Figura 4.

A validação da árvore foi realizada por meio de uma entrevista com nove operadores, que representam 50% da população de operadores de cortadeiras, os quais responderam à seguinte pergunta: Quais são os problemas encontrados nos tecidos metálicos que dificultam a sua operação? As respostas encontradas englobaram todas as necessidades e requisitos apontados anteriormente pela equipe e ainda foram adicionados quatro requisitos, sublinhados na Figura 4.

Da mesma forma, os quatro gestores da confecção responderam à seguinte pergunta: Quais os problemas encontrados, relacionados a tecidos metálicos, que o impedem de cumprir a meta diária de produção? Todos os pontos levantados já haviam sido abordados ou pela equipe ou pelos operadores, no entanto duas respostas foram relativas à falta de material para cumprir o programa, destacada em negrito na Figura 4. Esta é usualmente causada por falta de composto de borracha provocada por ineficiência do processo anterior ao estudado. A experiência dos operadores varia entre um ano e meio e seis anos no processo de corte, já os gestores possuem entre cinco semanas e seis anos no cargo. A linha de produtos que utiliza os semiacabados em estudo possui seis anos, dessa forma alguns operadores e gestores trabalham no cargo desde o início da operação.

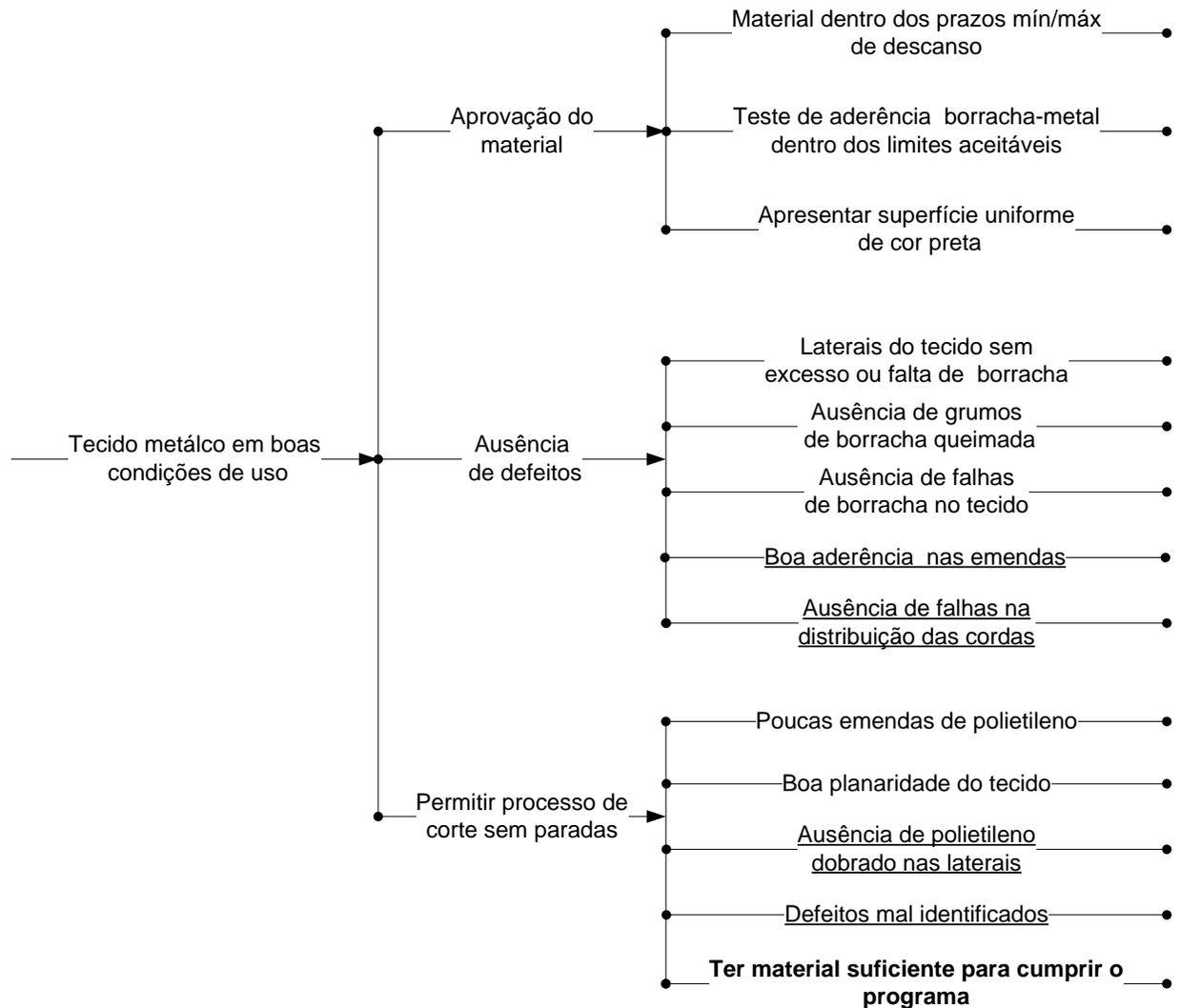


Figura 4: Árvore CTQ para tecidos metálicos

2.4.2. Diagrama SIPOC

O digrama SIPOC iniciou-se pela definição do nome do processo a ser estudado, que foi definido como “emborrachamento de tecidos metálicos”. Em seguida o processo foi delimitado com o início no recebimento das cordas metálicas e do composto de borracha e com fim no armazenamento do tecido emborrachado no estoque de semiacabados. Em seguida, foram

identificadas as saídas do processo como tecidos metálicos emborrachados e o cliente como o processo posterior de corte do tecido para a produção de cinturas, telas e bordos metálicos.

O passo seguinte foi a identificação dos fornecedores como sendo o armazém de matéria-prima, que fornece as cordas metálicas e o filme de polietileno e o processo de produção de compostos de borracha, que fornece os compostos de borracha. Como última etapa foram destacadas as sete atividades principais envolvidas no processo. O diagrama SIPOC completo é apresentado na Figura 5.

Alguns itens do diagrama SIPOC estão diretamente relacionados com a árvore CTQ: o requisito planaridade de tecido está relacionado à qualidade da entrada de cordas metálicas; o respeito aos limites no teste de aderência borracha-metal, a uniformidade da cor da borracha na superfície e a ausência de grumos no tecido relacionam-se ao fornecedor de composto de borracha, à qualidade do composto recebido e à plastificação desse material nos moinhos; laterais do tecido sem excesso ou falta de borracha e a ausência de falhas de borracha no tecido estão relacionados com a atividade de emborrachamento e os requisitos poucas emendas de polietileno e ausência de polietileno dobrado nas laterais estão relacionados à aplicação do filme de polietileno. Estes itens estão destacados na Figura 5.

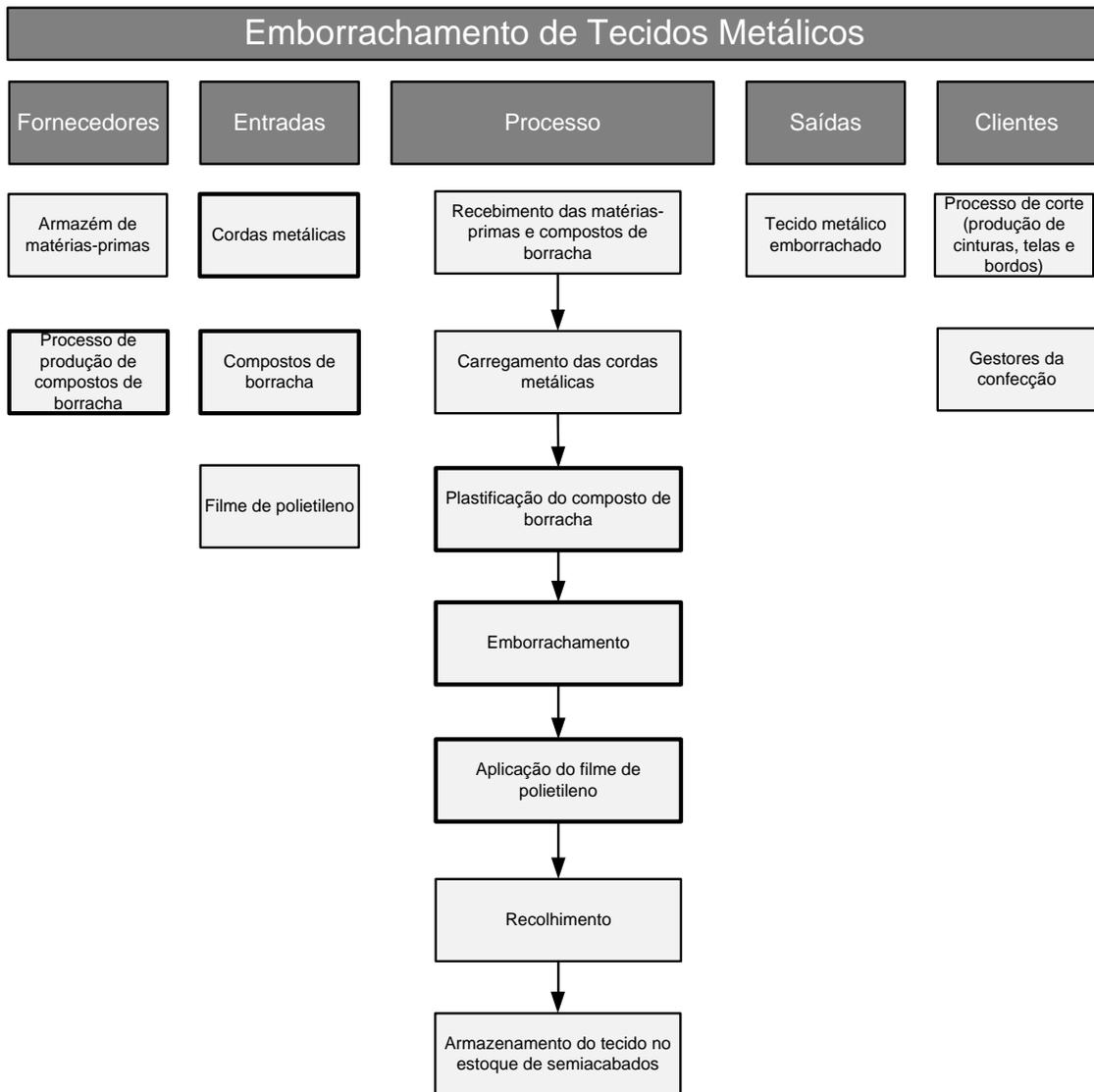


Figura 5: Diagrama SIPOC do processo de emborrachamento de tecidos metálicos

2.4.3. Fluxograma padrão ANSI

As sete atividades principais ou macro atividades mostradas no diagrama SIPOC foram desdobradas e melhor detalhadas em trinta micro atividades, passando por seis pontos de decisão, para a construção do fluxograma padrão ANSI apresentado na Figura 6. A equipe percebeu que todas as etapas estão relacionadas de alguma forma com os requisitos dos clientes. No entanto, as atividades destacadas no fluxograma foram identificadas como sendo as principais.

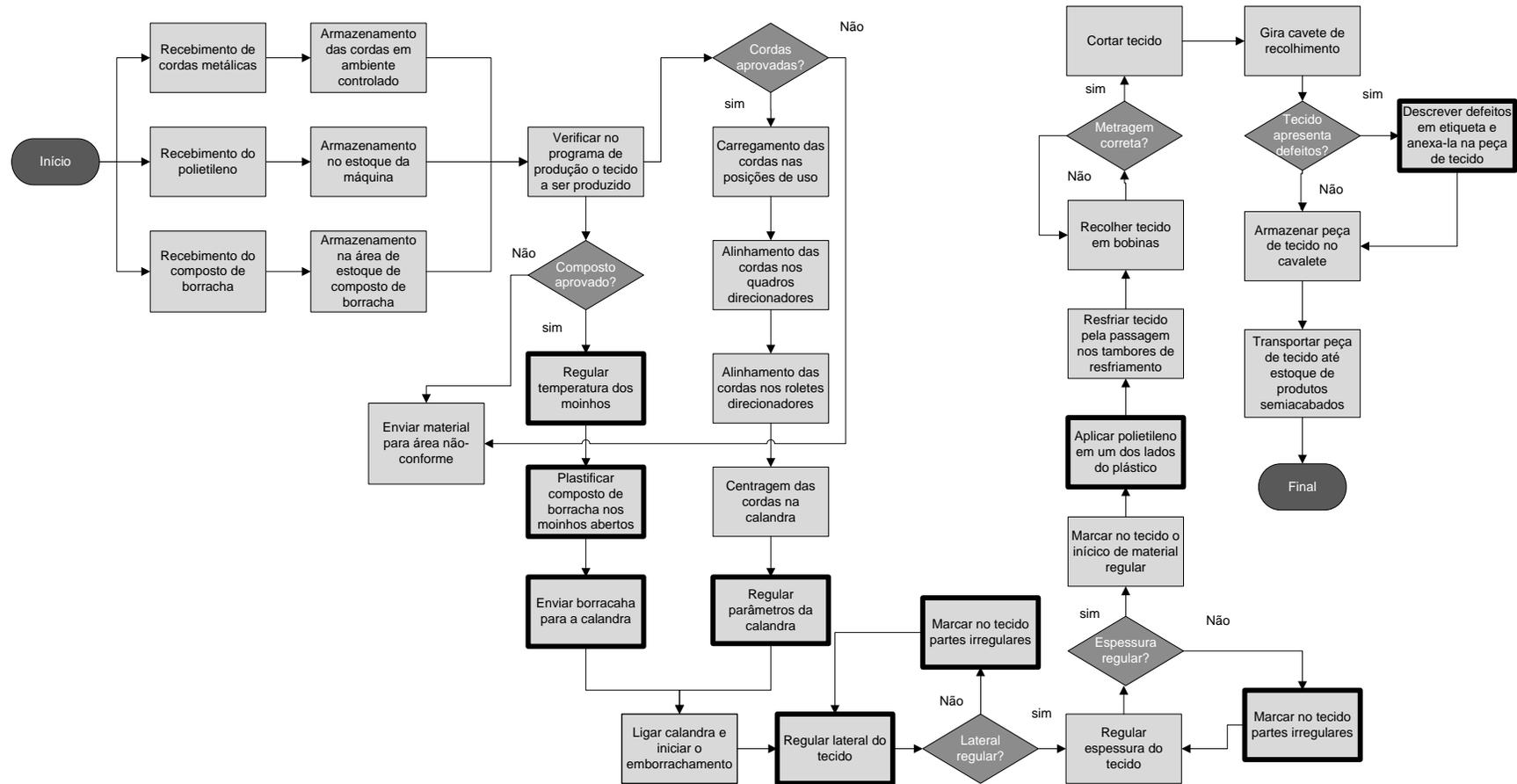


Figura 6: Fluxograma do processo produtivo de tecidos metálicos

A micro atividade de regulagem da temperatura nos moinhos, a plastificação do composto de borracha nos moinhos abertos e o envio de borracha para a calandra estão relacionada à atividade principal denominada no diagrama SIPOC como plastificação do composto de borracha. A etapa de regulagem dos parâmetros da calandra e da lateral do tecido, juntamente com mais três atividades, estão resumidas no diagrama como emborrachamento. A etapa de aplicação do polietileno foi nomeada da mesma maneira no diagrama e no fluxograma. Além disso, as etapas de identificação de pontos de irregularidades foram indicadas em três atividades e estão ligadas as atividades macro de emborrachamento e recolhimento. Essas micro atividades são descritas nos itens a seguir:

2.4.3.1. Regular temperatura nos moinhos

A temperatura da termo regulagem de cada um dos moinhos depende das características do composto de borracha. Dessa forma, compostos diferentes geralmente possuem temperaturas especificadas diferentes. O operador após identificar o tipo de composto a ser usado deve consultar a especificação de trabalho para certificar-se da temperatura certa e então regular o sistema de temperaturas.

Caso a temperatura ajustada seja inferior à correta, o composto não é homogeneizado suficientemente e não apresentará a aderência necessária para as emendas no processo posterior de corte. Já se a temperatura for superior à especificada, o enxofre presente no composto de borracha poderá migrar para a superfície do tecido e então apresentar manchas brancas, características de presença de cristais de enxofre. A presença destes cristais na superfície indica que a quantidade de enxofre no material não está dispersa uniformemente e poderá prejudicar o processo de vulcanização. Além disso, temperaturas elevadas causam a vulcanização precoce em alguns pontos do composto, causando a formação de grumos de borracha queimada.

2.4.3.2. Plastificar composto de borracha nos moinhos abertos

A plastificação da massa é a etapa onde o composto de borracha passa inicialmente por um moinho quebrador onde as cadeias do polímero são quebradas em cadeias menores, diminuindo a viscosidade do material e facilitando a etapa de emborrachamento. Posteriormente,

o composto é direcionado por meio de uma esteira a um moinho pré-alimentador e então a um moinho alimentador. Estes possuem a função de homogeneizar o composto e então enviar até os cilindros da calandra. A plastificação é dada em função da temperatura dos moinhos e também do tempo de permanência do composto em cada moinho. Quanto maior o tempo de permanência, maior é a geração de calor causada pela quebra das cadeias das moléculas e assim se este tempo for muito grande, o efeito é similar a uma temperatura elevada nas termo regulagens dos moinhos. Quando o tempo de permanência do composto nos moinhos for menor que o adequado, o composto terá o mesmo comportamento de um material produzido a baixas temperaturas.

2.4.3.3. Enviar borracha para a calandra

O operador dos moinhos deve manter constante a alimentação de borracha para a calandra, observando sempre se a fita não se rompeu. A largura da fita de alimentação é controlada no painel principal pelo operador da calandra e varia conforme a velocidade de emborrachamento. Qualquer diminuição de alimentação de borracha causa falha no emborrachamento, deixando o tecido com partes irregulares que serão refugadas no processo de corte. Excesso de alimentação acarreta em um banco de composto de borracha muito elevado, que aumenta a temperatura de trabalho e dificulta a operação.

2.4.3.4. Regular parâmetros da calandra

Antes de iniciar a etapa de emborrachamento, vários parâmetros da calandra precisam ser regulados pelo operador. Este verifica na especificação de trabalho do tecido a ser produzido todos os valores de pressão, tensão e temperatura e ajusta a máquina exatamente com os valores determinados.

Valores de pressão e tensão de cordas fora do especificado, resultam em uma má distribuição das cordas. Este problema foi destacado como requisito dos clientes, no entanto só é perceptível se a falha for muito grande. Falhas pequenas somente são detectadas na inspeção final dos pneus por raio-x. Além disso, valores de tensão de cordas não uniformes, ou seja, valores diferentes em regiões diferentes do tecido causam planaridade irregular. Quando este requisito não é atendido, durante o processo de corte, as pontas do tecido ficam elevadas e não é possível

fazer as emendas no processo automático. Em casos extremos, as pontas das emendas ficam sobrepostas e não é possível a utilização do material.

O último e mais importante parâmetro é temperatura da calandra e dos tambores de resfriamento, que são essenciais para a qualidade do tecido. Isto porque temperaturas fora do especificado causam praticamente todos os defeitos citados anteriormente: grumos de borracha queimada, migração de enxofre, falta de aderência e distribuição irregular de cordas. Este último defeito acontece quando a temperatura da calandra estiver muito elevada, podendo o tecido aderir a um dos cilindros da calandra causando tensão não uniforme no tecido.

2.4.3.5. Regular a lateral do tecido

O primeiro procedimento após iniciar o emborrachamento do tecido metálico é a regulagem da lateral de borracha. Este ajuste é feito por meio do ajuste de uma faca que corta as folhetas de borracha em excesso em cada extremidade lateral do tecido. A lateral deve ter a metade da quantidade de borracha presente entre as cordas do tecido. Isto porque após a emenda, as cordas do componente (tela, cintura ou bordo) devem ter o mesmo espaçamento.

2.4.3.6. Aplicar polietileno em um dos lados do tecido

A aplicação do polietileno é feita logo após o emborrachamento. Os operadores devem ter o cuidado de aplicar de forma centralizada sem deixar excesso em um dos lados e consequente falta no lado oposto. Excesso de polietileno facilita a dobra nas laterais. Isto é um problema no processo de corte, pois quando o recolhedor de polietileno puxa material com plástico dobrado, ocorre um estiramento do tecido e consequentemente uma má distribuição de cordas.

O polietileno tem a função de proteger o tecido, manter a aderência superficial e também evitar que as camadas de tecido fiquem aderidas umas nas outras durante o recolhimento em bobinas. Dessa forma, nenhuma parte do tecido pode ficar sem proteção e quando a bobina de polietileno termina, é necessário fazer uma emenda. Esta emenda é feita aplicando polietileno no lado oposto ao usual, até que a bobina vazia seja substituída por uma bobina cheia. Sempre que existir uma emenda na peça de tecido, é necessária uma parada no processo de corte para recolher o polietileno do lado oposto. Por isso, mais de uma emenda na mesma peça, ou elevado número

de peças com emendas, acaba interferindo significativamente na produtividade do processo de corte.

2.4.3.7. Identificação das partes irregulares

Geralmente os defeitos que ocorrerem durante a produção dos tecidos não podem ser retirados na calandra, pois isso exigiria uma parada de máquina, e cada parada provocaria mais defeitos. Dessa forma, toda vez que o tecido apresentar qualquer parte irregular, ele deve ser identificado da seguinte maneira: marcar com giz as parte irregulares, marcar com uma fita plástica o final da região com defeito (que indicará o início da região defeituosa no processo de corte) e anexar à etiqueta de identificação da bobina de tecido um cartão com a descrição do defeito presente no material. Se os defeitos não forem adequadamente identificados, os operadores das cortadeiras ao perceber o problema, boqueiam toda a peça de já produzida para garantir que materiais irregulares não sejam usados no processo de confecção. Além disso, todo o restante da peça é cortado em velocidade lenta, pois não é conhecido onde o defeito termina.

2.4.4. Identificação das Oportunidades de Melhoria

Durante o processo de mapeamento, foram identificadas algumas oportunidades de melhoria. Estas foram focadas e priorizadas de acordo com as necessidades dos clientes mostradas na matriz CTQ.

Como estiveram relacionadas a diversos procedimentos onde a falha acarretaria em defeitos graves, as temperaturas ao longo de toda a máquina podem ser consideradas como os parâmetros mais críticos do processo. Já existem na máquina sensores em alguns pontos críticos que emitem um alarme sonoro e visual quando a temperatura passa do valor especificado. No entanto, estes alarmes não permitem a identificação do motivo da variação e são ativados somente quando o problema já aconteceu. Como sugestão de melhoria, o alarme deveria ser regulado para acionar em um momento onde ainda fosse possível alguma ação para evitar que a temperatura prejudicasse a qualidade do material. Além disso, poderiam ser instalados dispositivos que detectassem queda da pressão de água, corte do fluxo da água de resfriamento, ou ainda algum problema na termo regulagem que causem a variação excessiva nas temperaturas.

A etapa onde o operador deve regular os valores de pressões, temperaturas e tensão antes de iniciar o emborrachamento é a que exige maior grau de atenção, pois é onde existe maior risco de falha operacional pelo elevado número de ajustes. Uma melhoria nesta etapa seria a automatização deste processo, de forma que cada tipo de tecido possua uma receita relacionada, que ajustasse automaticamente os parâmetros da máquina assim que a opção de um determinado tecido fosse escolhida. Uma melhoria alternativa seria a instalação de bloqueios na máquina caso algum valor não corresponda ao especificado.

Uma ação simples e de baixíssimo investimento seria adequar o tamanho das bobinas de polietileno para valores múltiplos do comprimento das bobinas de tecido metálico. Assim, eliminando as emendas de polietileno do processo. Outra ação importante de baixo investimento seria estender os sensores de quebra de fita de alimentação, que já existem no moinho alimentador, para os moinhos pré-alimentador e quebrador.

Outro requisito importante para o cliente que poderia ser atendido de forma mais precisa e segura é o teste de aderência borracha-metal. Para melhorar a confiabilidade referente a este teste, a espessura do material deveria ser constante. A sugestão de melhoria para isso seria a utilização de um equipamento que regule automaticamente a espessura do tecido. Este equipamento é bastante conhecido para controle de espessura em calandras, no entanto, a aquisição requer alto investimento. Porém, a aderência borracha-metal não é decorrência exclusivamente da espessura do material, estando mais relacionada aos ingredientes do composto de borracha e, portanto, depende bastante do processo anterior ao de emborrachamento.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível perceber neste trabalho que o processo de calandragem é essencial para a qualidade do produto e o mapeamento torna claro quais as etapas interferem em determinado requisito. Grande parte dos requisitos dos clientes foi relacionada diretamente às etapas do processo, identificando possíveis falhas e medidas para evita-las. É importante salientar que o processo não possui alto nível de automatização, ficando susceptível a erros operacionais em diversas etapas.

Alguns requisitos dos clientes foram vinculados aos fornecedores, às matérias-primas e a alguns processos anteriores. Estes são fatores não controláveis no processo de calandragem e que também podem interferir no atendimento aos requisitos. Na análise não foram considerados os requisitos referentes aos prazos mínimos e máximos de descanso do material e também ter material suficiente para cumprir o programa, uma vez que estes dependem muito mais da gestão da programação da produção, do que do processo de emborrachamento.

Ao longo do mapeamento, percebeu-se que o processo exige temperaturas específicas em diversos pontos e que estas são importantes para a qualidade do tecido produzido. Dessa forma, como sugestões para trabalhos futuros, pode ser destacado um estudo mais aprofundado sobre o perfil de temperaturas da calandra ou ainda um Projeto de Experimentos que identifique o grau de importância que esta tem para o atendimento aos requisitos dos clientes.

Por fim, pode-se afirmar que o método implementado mostrou-se útil para o alcance dos objetivos do trabalho, uma vez que identificou quais são as etapas críticas no processo de calandragem para a qualidade do tecido metálico. Além disso, as sugestões de melhoria ajudaram a direcionar a empresa no caminho de resolver os problemas que afetam a satisfação dos clientes deste processo.

2.6. REFERÊNCIAS

ANJARD, R. P.; *Process Mapping: One of Three, New, Special Quality Tools for Management, Quality and All Other Professionals*. Microelectronics Reliability. v. 36, n. 2, p. 223-225, 1996.

BOSCOTT, D. A; LEHRL, R. S.; *Rubber-to-Brass Adhesion Performance Improved by Epoxidation of the Rubber*. European Polymer Journal, v. 26, n. 2, p. 201-206, 1990.

CIESIELSKI, A. *An Introduction to Rubber Technology*. UK, Rapra Technology Limited, 1999. 173p.

ECKES, G; *Six Sigma for Everyone's*. USA, John Wiley & Sons Inc., 2003a. 130p.

ECKES, G; *Six Sigma Team Dynamics: The Elusive Key to Project Success*. USA, John Wiley & Sons Inc., 2003b. 262p.

- FENTON, E. M.; *Visualizing Strategic Change: The Role and Impact of Process Maps as Boundary Objects in Reorganization*. European Management Journal. v. 25, n. 2, p. 104–117, 2007.
- GOODWIN, C. J.; *História da Psicologia Moderna*. São Paulo. Cultrix, 2005. 584p.
- GONÇALVES, J. E. L.; *As Empresas são Grandes Coleções de Processos*. Revista de Administração de Empresas. v. 4, n.1, p 6-19, 2000.
- HARRINGTON, H. J; *Aperfeiçoando Processos Empresariais*. São Paulo. Makron Books, 1993. 368p.
- JEON. G. S.; *Enhancing the Adhesion Retention by Controlling the Structure of the Adhesion Interphase between Rubber Compound and Metal. Part II. Effect of Zinc Borate*. Journal of Adhesion Science and Technology, v.24, p. 709–729, 2010.
- KEZNER, H.; *Advanced Project Management: Best Practices on Implementation*. John Wiley & Sons Inc., 2004. 460p.
- KOK, M. C. *The Effects of Compounding Variables on the Reversion Process in the Sulphur Vulcanization of Natural Rubber*. European Polymer Journal, v. 23, n. 8, p. 611-615, 1987.
- LEE, Q.; SNYDER, B. *Value Stream & Process Mapping*, USA, Strategos Inc., 2006. 163p.
- MADISON, D. *Process Mapping, Process Improvement, and Process Management: A Practical Guide to Enhancing Work and Information Flow*. USA, Panton Press LLC. 2005. 320p.
- McCARTY, T.; DANIELS, L.; BREMER, M.; GUPTA, P.; *The Six Sigma Black belt Handbook*. Motorola University. McGraw-Hill, 2004. 588p.
- MULLER, C.; *Modelo de Gestão Integrando Planejamento Estratégico, Sistemas de Avaliação de Desempenho e Gerenciamento de Processos (MEIO - Modelo de estratégia, Indicadores e Operações)*. Porto Alegre, 2003.
- PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. *Estratégia Seis Sigma*. 1 ed. Rio de Janeiro. Ed. Qualitymark, 2001. 442p.
- POH, B. T.; KWOK, C. P.; LIM, G. H.; *Reversion Behavior of Epoxidized Natural Rubber*. European Polymer Journal, v. 31, n. 3, p. 223-226, 1995.

SILVA, E. L.; *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 3. ed. rev. atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001. 121p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.; BETTS, A.; *Gerenciamento de Operações e de Processos*. Bookman Companhia Editora, 2006. 552p.

WADDELL, W., RODGERS, B.; *Tire Engineering*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3rd Edition, USA. Elsevier Inc., 2005a. p. 619-661.

WADDELL, W.; RODGERS, B.; *The Science of Rubber Compounding*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3rd Edition, USA. Elsevier Inc., 2005b. p. 401-454.

3. ARTIGO 2 – ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE CALANDRAGEM DE TECIDO METÁLICO

Jordana Roider Rodrigues
Maria Auxiliadora Cannarozzo Tinoco
Carla Schwengber ten Caten

Resumo: O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito das temperaturas no processo de fabricação de tecidos metálicos para a produção de pneus e o quanto elas influenciam nas características de qualidade do material. Para isso, foi utilizada a metodologia de Projeto de Experimentos com a aplicação de um Projeto Fatorial 2^{5-1} sem repetição. Quatro variáveis de resposta foram estudadas, todas relacionadas às características de qualidade definidas pelos clientes internos e pela equipe técnica: quantidade de grumos pré-vulcanizados, aderência tecido-tecido, reversão de enxofre (%) e adesão borracha-metal. Os fatores controláveis foram escolhidos através da priorização dos parâmetros do processo onde existem temperaturas controladas: temperatura dos moinhos alimentadores, temperatura dos cilindros 1 e 4, temperatura dos cilindros 2 e 3, temperatura dos tambores de resfriamento e temperatura do aquecimento das cordas metálicas. Pela otimização das variáveis de resposta, chegou-se aos valores ótimos para o processo, sendo todos eles no seu nível alto, com exceção da temperatura dos cilindros 2 e 3 que apresentou o melhor valor no nível baixo. Os resultados obtidos confirmaram as pesquisas encontradas na literatura sobre a importância das temperaturas usadas no processo de calandragem, pois todos os fatores estudados apresentaram algum tipo de efeito, seja como fator principal ou na interação com outros fatores. Além disso, trouxe uma otimização experimental a partir dos resultados do projeto de experimentos.

Palavras-chave: Tecido metálico. Projeto de experimentos. Temperatura. Fabricação de pneus.

Abstract: *The purpose of this paper was to study the effects of temperature in calendering process of the metallic fabric used in tires manufacturing and how they influence in the quality characteristics of the material. For this, the design of experiments methodology was used with the application of a factorial design 2^{5-1} , without replication. Four response variables were studied, all of them related to the qualities characteristics defined by the internal costumers and by the technical team: number of lumps pre vulcanized, tack, sulfur reversion (%) and steel-*

rubber adhesion. The controllable factors were chosen by the prioritization of the process parameters where there were controlled temperatures: feeder mills temperature, temperature of rolls 1 and 4 of the calender, temperature of rolls 2 and 3 of the calender, temperature of cooling drums and heating temperature of steel cords. By the optimization of the response variables, it was reached the optimum values for the process, all of which are in its high level except for the temperature of the rolls 2 and 3 which showed the best value in the low level. The results obtained confirmed the studies found in the literature about the importance of the temperatures used in the calendaring process, since all the factors studied had some type of effect, either as the main factor or in interaction with other factors. Furthermore, it brought a experimental optimization from the design of experiments data.

Keywords: *Metallic Fabric. Design of Experiments. Temperature. Manufacture of tires.*

3.1. INTRODUÇÃO

A perda de materiais por erros nos processos produtivos causados tanto por falhas operacionais como por processos pouco robustos é um grande problema para a indústria de qualquer setor. Na indústria da borracha, alguns materiais fora de especificação quando formados por um único componente, podem ser reaproveitados ou reciclados no próprio processo produtivo sem afetar significativamente as características do produto. Porém, materiais que combinam compostos de borracha com elementos metálicos, como os tecidos emborrachados, não podem ser reaproveitados e por serem refugados após utilizarem mão de obra e matéria-prima geram elevado custo de desperdício.

Esses tecidos metálicos são materiais de reforço usados para formar a estrutura de pneus radiais e a otimização do processo de calandragem desse material deve ser priorizada. Segundo um mapeamento do processo de calandragem de tecido metálico realizado em estudo anterior (RODRIGUES; TINOCO, 2013), o processo de produção envolve quatro etapas principais: (i) o carregamento e disposição das cordas metálicas nos roletes guias, (ii) a plastificação do composto de borracha, (iii) o emborrachamento do tecido na calandra e, (iv) o recolhimento em bobinas. De acordo com o mesmo estudo, o processo exige temperaturas específicas em diversos pontos que

envolvem diferentes controles de temperaturas. As cordas metálicas são armazenadas em ambiente climatizado, os moinhos usados para a plastificação e os roletes da calandra de emborrachamento são mantidos a temperaturas controladas, da mesma forma, antes do recolhimento, o tecido é resfriado em tambores específicos pra esta finalidade. Estudos da literatura demonstram que a temperatura é um fator crítico na fabricação de tecido metálico para a produção de pneus (FANCY *et al.*, 2013). A temperatura diminui a viscosidade do composto, melhorando o acabamento final do produto. No entanto, ela também aumenta as chances de degradação térmica, de formação de bolhas e aspecto irregular na superfície do tecido, de queima do composto de borracha e de excessiva ou deficiente aderência (FANCY *et al.*, 2013). Portanto, fica a dúvida: quanto a temperatura ao longo do processo de produção de tecidos metálicos influencia nas características de qualidade do produto? Este trabalho tem como objetivo estudar as temperaturas usadas no processo de fabricação de tecidos metálicos e o quanto elas influenciam nas características de qualidade do material, usando Projeto de Experimentos como metodologia.

3.2. REFERENCIAL TEÓRICO

3.2.1. Tecidos Metálicos

A tecnologia radial foi criada por BF Goodrich e primeiramente usada na indústria aeroespacial, pois seu inventor queria atingir clientes mais rentáveis. No entanto, os primeiros pneus radiais para automóveis foram fabricados pela Michelin em 1946 que adquiriu a licença da patente de Goodrich (SHETH, 2007; AJAMI *et al.*, 2006). Com o desenvolvimento da indústria de pneus, essa tecnologia substituiu os pneus convencionais por causa de seu excelente desempenho (YANJIN *et al.*, 2006).

Na fabricação dos pneus radiais, são utilizados tecidos metálicos, compostos por cordas de aço revestidas por um composto de borracha, produzidos por meio de um processo denominado calandragem. Calandras são equipamentos que processam compostos de borracha

após serem plastificados em misturadores internos ou moinhos. São diferenciadas pelo número e configuração de seus cilindros. Usualmente para fazer a cobertura simultânea nos dois lados do tecido são usadas calandras de quatro cilindros na configuração Z (ROCHA *et al.*, 2007). A primeira etapa do processo de fabricação dos tecidos metálicos é o carregamento das cordas metálicas que são dispostas paralelamente ao sentido de emborrachamento. Em seguida o composto de borracha é plastificado em moinhos abertos e levado por esteiras até a calandra onde a borracha é aplicada por meio de grandes rolos rotativos em ambos os lados das cordas metálicas. Neste momento a espessura do material é regulada e então o tecido metálico recebe um filme de polietileno para evitar o contato entre as suas camadas nas bobinas. Então o tecido passa por tambores de resfriamento e é recolhido em bobinas. Posteriormente o tecido é cortado em diferentes ângulos e larguras para a formação de cinturas e telas metálicas (RODRIGUES; TINOCO, 2013).

As cinturas são tecidos metálicos cortados em ângulos de 15° a 65° e, na construção dos pneus, ficam localizados abaixo da banda de rodagem. Tem a função de endurecer a carcaça, permitindo melhorar o desempenho quanto ao desgaste, à dirigibilidade e à resistência a danos. Além disso, as cinturas protegem a tela do pneu contra as irregularidades da estrada. A tela é um tecido metálico cortado a 90° que se estende de talão a talão no pneu. É o material de reforço primário, responsável pela sustentação da carga do pneu (RODGERS; WADDELL, 2005a).

3.2.2. Influência da temperatura na produção de tecidos metálicos

A temperatura tem forte influência na produção de materiais calandrados (RODRIGUES; TINOCO, 2013). Segundo Fancy *et al.* (2013), ela é o fator que mais afeta a qualidade do emborrachamento, sendo essencial para a quebra das moléculas de borracha, diminuindo a viscosidade do composto e facilitando o processo de calandragem (FANCY *et al.*, 2013; RODGERS, 2004). No entanto, a plastificação do composto também gera calor e, neste ponto, a temperatura precisa ser controlada e mantida constante para que a viscosidade do material seja uniforme e para que não ocorra a degradação do composto de borracha (FANCY *et al.*, 2013; WHITE, 2005). Entre os principais fatores afetados pela temperatura se destacam: (i) a

eflorescência de enxofre, (ii) a aderência entre componentes, (iii) a adesão borracha-metal e (iv) a pré-vulcanização.

3.2.2.1. Eflorescência de enxofre

O enxofre é o primeiro e mais importante agente de vulcanização para a indústria da borracha (CIESIELSKI, 1999). A forma rômica (solúvel) é a empregada na maioria dos casos, por ser mais barata e não necessitar nenhuma forma especial de manuseio ou armazenamento. Já a forma amorfa (insolúvel) é usada quando existe a necessidade de armazenar a mistura sem vulcanizar por certo período de tempo sem que a aderência seja prejudicada (ROCHA *et al.*, 2007) ou quando é necessário utilizar uma quantidade superior a 2 partes por 100 partes de borracha na formulação (RODGERS; WADDELL, 2005a). Os compostos usados no emborrachamento de tecidos metálicos possuem alto teor de enxofre, pois este é essencial para a ligação borracha-metal, que acontece usualmente através de um filme superficial de monossulfeto de cobre durante o processo de vulcanização (CIESIELSKI, 1999; RODGERS; WADDELL, 2005a).

À medida que a quantidade de enxofre no composto aumenta, parte desse enxofre pode lentamente migrar para a superfície, por um processo conhecido como eflorescência. O enxofre solúvel, como o próprio nome já diz, é muito mais solúvel em compostos de borracha e migra para a superfície facilmente, no entanto o enxofre insolúvel pode ser revertido a enxofre solúvel e também causar eflorescência. A reversão do enxofre insolúvel para solúvel é um processo que ocorre lentamente à temperatura ambiente, pois a forma rômica do enxofre é termodinamicamente mais estável. Esta transformação depende da temperatura. A temperaturas elevadas, o processo de reversão é acelerado (CHEN *et al.*, 1982 apud POH *et al.*, 1995; CATALDO, 1997).

A eflorescência causa muitos problemas na indústria de pneus e de outros produtos de borracha. Por exemplo, em compostos não vulcanizados, a eflorescência reduz a aderência necessária nas operações de confecção, causa vulcanização não homogênea dos compostos de borracha e também nas interfaces de componentes. Além disso, interfere negativamente na adesão borracha-metal (CIESIELSKI, 1999; CATALDO, 1997).

Portanto, a temperatura é um dos principais fatores responsáveis pela reversão do enxofre insolúvel para solúvel e a consequente eflorescência para a superfície do material. Dessa forma, é essencial que a temperatura do composto de borracha não atinja temperaturas elevadas, acima de 100°C, durante longos intervalos de tempo no processo de produção de tecidos metálicos (CIESIELSKI, 1999; RODGERS, 2004).

3.2.2.2. Aderência entre componentes

A aderência é um fenômeno superficial que ocorre pelo entrelaçamento das cadeias na superfície do composto da borracha. É necessária para garantir que os vários componentes do pneu cru permaneçam unidos até o processo de vulcanização (SOMMER, 2009). A aderência pode ser alterada pelo uso de resinas e pela mistura de diferentes elastômeros na formulação do composto (DATTA, 2005; CIESIELSKI, 1999). No entanto, durante o processo de produção dos componentes, a aderência também pode ser afetada.

Como citado anteriormente, a elevação da temperatura facilita o fenômeno de eflorescência, que diminui consideravelmente a aderência de tecidos metálicos. No entanto, temperaturas incorretas afetam a aderência também por outros motivos (FANCY *et al.*, 2013). Baixas temperaturas dificultam a plastificação e uniformização do composto, deixando o material com aparência opaca e sem aderência. Isto é um problema para os processos posteriores, pois afeta as emendas do tecido e também a estabilidade do pacote de cinturas na construção dos pneus. Por outro lado, temperaturas elevadas podem aumentar consideravelmente a aderência. Um tecido com excesso de aderência pode prender-se aos envoltórios e esteiras de confecção e prejudicar o processo tanto quanto a baixa aderência.

3.2.2.3. Adesão borracha-metal

As cordas metálicas são revestidas por uma fina camada de zinco e cobre e é esta camada juntamente com o enxofre contido no composto de borracha que são os responsáveis pela adesão borracha-metal, que acontece usualmente através de um filme superficial de monossulfeto de cobre (CIESIELSKI, 1999; CORAN, 2005; RODGERS; WADDELL, 2005b). A adesão é um fenômeno muito importante para o desempenho e a durabilidade dos pneus radiais, principalmente dos pneus que aceitam reformas e possuem mais de uma vida, normalmente pneus

para caminhões (DURAIRAJ, 2005; JEON *et al.*, 1999; CHANDRA *et al.*, 1996; JEON *et al.*, 1998). Por este motivo, a adesão borracha-metal é um parâmetro de aprovação para os tecidos metálicos.

A adesão borracha-metal depende de três aspectos: molecular, químico e físico. O aspecto físico, que é o estudado neste trabalho, é função da qualidade da cobertura da corda pelas camadas de composto de borracha, quanto melhor a cobertura, melhor é a adesão (RODGERS; WADDELL, 2005b). A temperatura é um forte fator que influencia a qualidade desta cobertura, pois afeta consideravelmente a uniformidade da viscosidade do composto de borracha. Temperaturas elevadas diminuem a viscosidade do composto de borracha, tornando-o mais fluído e melhorando a qualidade do emborrachamento (FANCY *et al.*, 2013).

3.2.2.4. Pré-vulcanização

A vulcanização é um processo químico de formação de redes pela inserção de reticulações entre as cadeias do polímero. Ela aumenta a elasticidade enquanto diminui a plasticidade e está presente nos produtos de borracha mais úteis, inclusive nos pneus. O processo é geralmente realizado por aquecimento da borracha, misturada com agentes de vulcanização, num molde sob pressão (CORAN, 2005). O tempo e a temperatura de vulcanização são dependentes da formulação do composto de borracha, como os agentes vulcanizantes e acelerantes (BABU *et al.*, 2013; CORAN, 2005).

A vulcanização é a última etapa no processo de fabricação de pneus. Dessa forma, os materiais semiacabados, como a banda de rodagem, os tecidos metálicos, entre outros, devem ser produzidos com temperatura tal a preservar o composto de borracha, para evitar a formação de grumos pré-vulcanizados, antes desta última etapa (CORAN, 2005). Nos tecidos metálicos, estes grumos ao passarem pela calandra afetam a densidade das cordas do material por abrirem um espaço entre elas. Isso resulta em refugo do material, pois a abertura de cordas pode fragilizar o pneu ou afetar sua uniformidade. Dessa forma, o aumento excessivo da temperatura de processo pode ser prejudicial ao material.

3.2.3. Projeto de Experimentos

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes onde alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada para então observar as mudanças resultantes nas respostas de saída. Já o Projeto de Experimentos (*Design of Experiments* - DOE) é uma atividade ampla e envolve o estudo sistêmico de diversos fatores que podem afetar uma ou mais características de qualidade. Ele envolve o planejamento do experimento, a execução do mesmo, a análise dos resultados e a otimização do produto ou processo em questão (MONTGOMERY, 2001). Na indústria de pneus, o projeto de experimentos é extensivamente usado ao longo do processo produtivo, especialmente na formulação dos componentes de borracha, no desenvolvimento e melhoria dos produtos e também na destinação de pneus inservíveis.

Anderson e Whitcomb (2002) mostraram um estudo de caso que ilustra como encontrar a receita ideal e otimizar o processo de formulações de borracha ou de plásticos por meio do projeto de experimentos. Eles defendem o uso de projeto de misturas e mostram como o uso de projetos fatoriais pode não ser útil para os casos de formulações. No mesmo ano, Cheng *et al.* (2002) investigaram o uso de projetos de experimentos juntamente com metodologias de simulação e modelagem para otimizar formulações de compostos de borracha. Ainda nesta área, Ryzko e Haberstroh (2000) apresentaram um método baseado em parâmetros de processo para escolher o método de caracterização do composto de borracha adequado e relevante para a previsão da processabilidade do composto e das mudanças nas características do produto.

Na indústria de pneus, Seong-era *et al.* (2012) utilizaram um projeto de experimentos com cinco fatores variados a cinco níveis para analisar os efeitos da variação do contorno de pneus no ruído de ressonância (cavitação). Também estudando o pneu acabado, Moshchuk *et al.* (2008) utilizaram esse método para quantificar os efeitos principais e as interações significativas entre as características dos pneus, entre outras variáveis de projeto de veículos, na oscilação dos veículos.

Rodionova e Pomerantsev (2004) usaram o DOE para analisar o tempo de vida de materiais poliméricos por meio de modelos de testes de envelhecimento, usando como exemplo a borracha de pneus. Zhang *et al.* (2010) usaram um projeto de experimentos com somente sete experimentos para a análise das propriedades mecânicas de um composto de polipropileno com

pó de borracha de pneus descartados, variando o conteúdo de compósitos de betume, entre outros ingredientes.

Além dos exemplos citados, o DOE é uma ferramenta extremamente importante para a melhoria do processo de produção, evitando a necessidade de alterações na formulação ou estrutura do produto. O DOE pode ser usado para identificar os fatores críticos do processo e determinar a direção de ajuste desses fatores. Também mostra qual fator deve ser mais cuidadosamente controlado durante a rotina de produção para evitar um alto nível de desperdício ou processos irregulares (MONTGOMERY, 2001).

3.3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A pesquisa realizada neste trabalho é voltada à geração de conhecimento sobre o processo de produção de tecidos metálicos e também de soluções aos problemas qualitativos desse material, sendo assim classificada como de natureza aplicada. A abordagem desta pesquisa é quantitativa, pois traduz em números as informações, podendo classifica-las e analisa-las usando ferramentas estatísticas. Uma vez que utiliza a abordagem de experimentos para identificar fatores que contribuem para as características de qualidade do material, esta pesquisa é classificada como explicativa. Além disso, do ponto de vista dos procedimentos técnicos este estudo é classificado como pesquisa experimental (SILVA, 2001).

A metodologia empregada neste trabalho foi a de projetos de experimentos usando cinco fases fundamentadas na proposta de Montgomery (2001) com algumas adaptações: (i) identificação e estabelecimento do problema; (ii) seleção da variável de resposta, fatores e seus níveis; (iii) planejamento final e execução; (iv) análise dos dados e (v) otimização. Este projeto de experimentos foi aplicado no processo de emborrachamento de tecido metálico em uma calandra de quatro cilindros de configuração Z de uma indústria fabricante de pneus. O projeto foi executado por uma equipe técnica, constituída por um especialista na área de calandragem da empresa, um especialista na área de compostos de borracha e dois inspetores de qualidade.

Na primeira fase do projeto, para o estabelecimento do problema, foram identificadas quais as necessidades do cliente interno do processo de emborrachamento do tecido metálico. Isso foi realizado por meio de uma entrevista com operadores e gestores de produção do processo

posterior à produção do tecido metálico. Eles responderam às seguintes perguntas, respectivamente: Quais são os problemas encontrados nos tecidos metálicos que dificultam a sua operação? E quais os problemas encontrados, relacionados aos tecidos metálicos, que o impedem de cumprir a meta diária de produção? Em seguida, a equipe técnica identificou as características de qualidade associadas às necessidades dos clientes e então atribuiu uma importância relativa a cada uma delas.

Na fase seguinte, a equipe definiu as variáveis de repostas associadas às características de qualidade importantes para o cliente e identificou outras variáveis de resposta associadas às especificações técnicas do produto. Também nessa fase, foram identificados os parâmetros do processo e seus intervalos de variação, identificados os fatores controláveis e definidos seus respectivos níveis. Segundo Montgomery (2001), quando são escolhidos os parâmetros que podem afetar o processo, eles podem ser classificados como fatores potenciais do projeto ou como fatores de perturbação. Os fatores potenciais do projeto são aqueles que a equipe técnica deseja variar, no caso deste estudo, as temperaturas controladas no processo de calandragem.

Na terceira fase, as definições finais do projeto de experimentos foram realizadas, identificadas as restrições e escolhido o modelo estatístico do experimento. Ainda segundo Montgomery (2001), esta definição deve levar em conta o tamanho das amostras, número de repetições, a ordem de execução e a aleatorização dos experimentos. Neste contexto, foi executado um projeto fatorial fracionado 2^{5-1} sem repetição, para adequar o projeto ao número de ajustes possíveis durante o processo de calandragem.

Na quarta fase, os dados foram tratados estatisticamente para a verificação dos fatores e interações significativas do experimento por meio da análise de variância (ANOVA) e por gráficos dos efeitos principais e das interações significativas gerados pelo *software* estatístico Minitab.

Na última fase, foi realizada a otimização do projeto de experimentos e, a partir desses resultados, foram discutidas as recomendações para a melhoria do processo produtivo em estudo. A otimização objetiva determinar a região dentro dos fatores significativos que leva a melhor resposta possível (MONTGOMERY, 2001). Dessa forma, as variáveis de resposta foram otimizadas com a definição dos melhores níveis para os fatores estudados, usando para isso a

função otimização de resposta do *software* Minitab. A Figura 7 mostra as etapas do método utilizado.

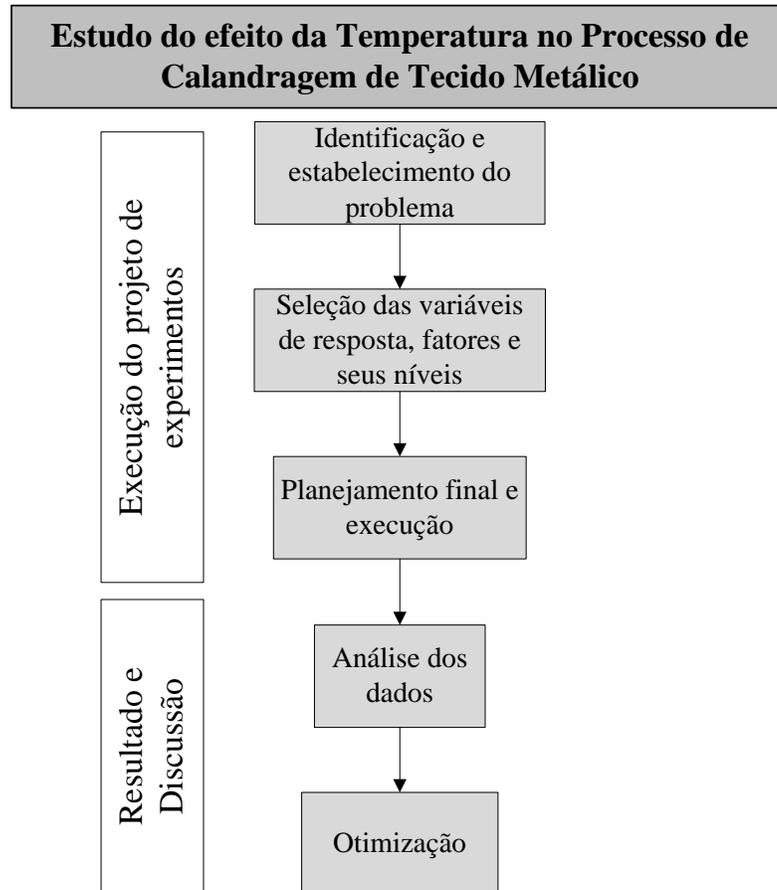


Figura 7: Etapas do método utilizado no estudo do efeito da temperatura no processo de calandragem de tecido metálico

3.4. EXECUÇÃO DO PROJETO DE EXPERIMENTOS

3.4.1. Identificação e estabelecimento do problema

Os clientes internos do produto em estudo são os funcionários responsáveis pela etapa posterior que é o processo de corte em ângulo dos tecidos metálicos, para a formação de cinturas

e telas metálicas. Aproximadamente 60% da população dos clientes do processo responderam às questões sobre os problemas relacionados ao material que afetam sua produtividade, existindo consenso em relação à exigência dos clientes para que o tecido não possua defeitos que provoquem paradas de produção ou refugo de material. Os clientes citaram como defeitos a presença de grumos pré-vulcanizados e a aderência irregular do tecido. Os grumos pré-vulcanizados são percebidos durante o processo de calandragem, no entanto as partes irregulares não são retiradas neste momento, pois cada parada de produção durante o emborrachamento gera uma quantidade maior ainda de refugo. Por esse motivo, os defeitos são marcados para serem retirados durante o processo de corte dos tecidos metálicos. Já aderência irregular é menos perceptível durante a calandragem e pode ser alterada dependendo do tempo de estocagem. Por isso só é detectada no momento do corte, no processo posterior a calandragem.

Outro defeito citado está relacionado às más condições das laterais do tecido, ou seja, com excesso ou falta de composto de borracha. Esse defeito é causado principalmente por falhas operacionais ou defeitos mecânicos na faca de corte de folhetas. Esses defeitos não podem ser controlados automaticamente e são falhas intermitentes de processo, sendo necessário atenção constante dos operadores e manutenção preventiva nas facas de corte das laterais do tecido, por esta razão e por não serem dependentes da temperatura, estes defeitos não serão estudados neste trabalho.

3.4.2. Seleção das variáveis de resposta, fatores e seus níveis

A Tabela 2 apresenta as características de qualidade (CQ) do tecido metálico definidas pelos clientes internos e consideradas neste trabalho, sua tipologia e importância relativa (IR), bem como as variáveis de resposta (VR) associadas, definidas pela equipe técnica. A última CQ, boa adesão borracha-metal, foi definida pela equipe técnica por se tratar de um parâmetro de aprovação do material.

Como o objetivo deste trabalho é estudar a importância das temperaturas do processo sobre as características de qualidade, os parâmetros de processo estudados são os de regulação de temperatura ao longo de todo o processo de emborrachamento. Ao todo, são oito pontos na

máquina onde a temperatura é controlada por meio de resistências elétricas ou pela passagem de água aquecida ou resfriada entre cilindros e tubulações. Além disso, um parâmetro importante para o processo é a perda de temperatura que sofre a fita de alimentação durante o transporte dos moinhos até a calandra. Esta perda de temperatura não é controlada e varia de acordo com a temperatura ambiente. A Tabela 3 apresenta os parâmetros do processo, bem como o ajuste atual, o intervalo de pesquisa e a facilidade de ajuste dos parâmetros. Na coluna de facilidade de ajuste quanto maior o valor, que varia de 1 a 3, mais facilmente o parâmetro é ajustável.

Tabela 2: Características de qualidade do cliente interno

CQ	VR	Tipo	IR	Alvo
Grumos pré-vulcanizados	Y1 - Quantidade de grumos pré-vulcanizados (grumos/m)	Menor é melhor	1	0
Boa aderência superficial	Y2 - Aderência tecido-tecido	Nominal é melhor	2	3
	Y3 - Reversão de enxofre (%)	Menor é melhor	3	0
Boa adesão borracha-metal	Y4 – Adesão borracha-metal (N)	Maior é melhor	2	200

Tabela 3: Descrição dos parâmetros do processo

Parâmetros do Processo	Ajuste atual	Intervalo de investigação da temperatura		Facilidade de Ajuste
		Mínimo	Máximo	
Temp. dos cilindros quebradores	30±3°C	25	35	2
Temp. dos cilindros alimentadores	20±3°C	18	24	2
Temp. dos cilindros 1 e 4 da calandra	85 ±5°C	82	88	2
Temp. dos cilindros 2 e 3 da calandra	95±5°C	72	78	2
Temp. dos tambores de resfriamento	22±2°C	20	25	2
Temp. pré-cantra	35±3°C	32	38	3
Temp. Cantra	27±3°C	24	30	3
Aquecimento das cordas	50±5°C	50	58	3
Perda de temperatura da fita de alimentação	12±3°C	9	15	1

Para definição dos fatores controláveis foi utilizada uma matriz de priorização, onde foi atribuído um valor que define a relação entre o parâmetro de processo e a variável de resposta, de acordo com o conhecimento da equipe técnica. Multiplicando este valor pela importância relativa de cada variável, obteve-se o índice de priorização para cada um dos parâmetros de processo. Os cinco parâmetros com maior índice foram escolhidos para serem estudados no experimento, ou seja, os fatores controláveis. No entanto, o parâmetro perda de temperatura na fita de alimentação apesar de apresentar um índice elevado não foi escolhido por ter um alto grau de dificuldade de ajuste, em seu lugar selecionou-se o aquecimento das cordas (Tabela 4). Os demais fatores foram mantidos constantes durante o experimento. Os níveis do intervalo de investigação escolhidos não excederam muito os valores de ajuste normal do processo pois a intenção era avaliar a influência de um pequeno acréscimo ou decréscimo de temperatura.

Tabela 4: Descrição dos fatores controláveis do processo

Fatores controláveis	Índice de priorização	Níveis do intervalo de investigação
A - Temp. dos cilindros alimentadores	25	18 – 24°C
B - Temp. dos cilindros 1 e 4 da calandra	27	82 – 88 °C
C - Temp. dos cilindros 2 e 3 da calandra	27	72 – 78 °C
D - Temp. dos tambores de resfriamento	20	20 – 25 °C
E - Aquecimento das cordas	10	50 – 58 °C

Segundo Montgomery (2001), se um fator varia naturalmente ou incontrolavelmente no processo, mas pode ser controlado durante o experimento, então ele pode ser chamado de fator de ruído. Neste trabalho, a temperatura ambiente e a variabilidade da matéria prima são os fatores de ruído mais importantes. Por isso os experimentos foram planejados para serem executados durante um intervalo de tempo com a menor variação de temperatura possível e usando o mesmo lote de matéria prima, composto de borracha e cordas metálicas.

3.4.3. Planejamento final e execução

Segundo Antony (2003), se é possível assumir razoavelmente que interações de alta ordem, terceira ou maior, não são importantes, então as informações dos efeitos principais e das interações de segunda ordem podem ser obtidas executando somente uma fração do experimento completo, ou seja, usando um projeto fatorial fracionado. Dessa forma, foi escolhido para o estudo um Projeto Fatorial Fracionado 2^{5-1} sem repetição, para que fosse possível a execução do experimento com os fatores controláveis definidos e mantendo os fatores de ruído constantes, realizando o experimento com menor número de ajustes, durante uma única corrida.

O experimento completo foi dividido em dois blocos utilizando a interação ABCDE, de ordem superior, como divisor e então somente um bloco escolhido aleatoriamente foi executado. Dessa forma, foram realizados 16 experimentos, sem repetição ($n=1$), usando como erro a variabilidade dos efeitos com valores muito pequenos, considerados não significativos. O contraste de definição ABCDE foi usado para verificar os efeitos vinculados, desta forma os efeitos vinculados são de terceira ordem ou superior e os mesmos são supostamente não significantes. A Tabela 5 mostra a matriz experimental com os fatores principais e os tratamentos. As respostas foram ocultadas por motivos de sigilo industrial.

Tabela 5: Matriz experimental

Tratamentos	Fatores Principais					Int. Ordem Superior
	A	B	C	D	E	ABCDE
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
ab	1	1	-1	-1	-1	-1
ac	1	-1	1	-1	-1	-1
bc	-1	1	1	-1	-1	-1
ad	1	-1	-1	1	-1	-1
bd	-1	1	-1	1	-1	-1
cd	-1	-1	1	1	-1	-1
abcd	1	1	1	1	-1	-1
ae	1	-1	-1	-1	1	-1
be	-1	1	-1	-1	1	-1
ce	-1	-1	1	-1	1	-1
abce	1	1	1	-1	1	-1
de	-1	-1	-1	1	1	-1
abde	1	1	-1	1	1	-1

acde	1	-1	1	1	1	-1
bcde	-1	1	1	1	1	-1

O experimento foi executado com velocidade reduzida de emborrachamento para que fosse possível realizar todos os experimentos durante a mesma corrida, mantendo constante o lote de matéria-prima, operadores e condições ambientais. Para cada ajuste de temperatura, foi usado um tempo de estabilização de vinte minutos.

A variável de resposta denominada quantidade de grumos pré-vulcanizados foi analisada visualmente pela contagem do número de grumos formados por metro linear de tecido. A aderência tecido-tecido foi avaliada pelo contato direto entre dois tecidos, medida por um único operador experiente que atribuiu notas numa escala de 1 a 5, sendo 3 o valor alvo.

Para a análise da reversão de enxofre foi retirada uma amostra do tecido de cada experimento e também do composto de borracha usado. A análise foi realizada por meio de extração por solvente do enxofre solúvel da amostra, método padrão do laboratório da empresa. O valor desta variável de resposta foi calculado pela diferença entre o percentual de enxofre solúvel do composto de borracha e da amostra do tecido do experimento.

Para a determinação da adesão borracha-metal foi realizado um teste de descamação, onde duas amostras de tecido são unidas, prensadas e vulcanizadas sob condições pré-determinadas. Um dinamômetro foi usado para medir a carga necessária para separação das camadas de tecido após a vulcanização. Finalmente, o valor de adesão é dado pela relação entre a carga e a unidade de superfície.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software estatístico Minitab. De acordo com Montgomery (2001), um método

estatístico não pode provar que um fator possui um efeito particular, mas pode fornecer diretrizes quanto a confiabilidade e validade dos resultados. Ainda de acordo com Montgomery (2001), técnicas estatísticas aliadas ao conhecimento do processo e bom senso, usualmente levam a conclusões consistentes. A seguir é apresentada a análise de cada variável de resposta do projeto de experimento.

3.5.1.1. Grumos pré-vulcanizados

A primeira variável de resposta analisada não apresentou ocorrência durante o experimento, ou seja, nenhum dos tratamentos apresentou qualquer grumo de composto pré-vulcanizado. Desta forma, pode-se concluir que dentro do intervalo de estudo, não há evidências de que a temperatura influencie na formação de grumos no processo de emborrachamento de tecidos metálicos.

3.5.1.2. Aderência tecido-tecido

O resultado da análise de variância (ANOVA) da variável de resposta aderência tecido-tecido é mostrado na Tabela 6. Como pode ser visto nesta tabela, os efeitos principais da temperatura dos cilindros 1 e 4 (B) (valor $p=0,015$) e da temperatura dos cilindros 2 e 3 (C) (valor $p=0,015$) e ainda a interação entre estes dois fatores destacaram-se como significativas, ao nível de 5%. Nas Figuras 8 e 9, apresentam-se os gráficos gerados pelo *software* Minitab dos efeitos principais e interações significativas, respectivamente.

Tabela 6: Descrição dos resultados ANOVA para VR aderência tecido-tecido

Fonte	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F	Valor p
A	1	0,0625	0,0625	1	0,343
B	1	0,5625	0,5625	9	0,015
C	1	0,5625	0,5625	9	0,015
D	1	0,0625	0,0625	1	0,343
E	1	0,0625	0,0625	1	0,343
B*C	1	0,5625	0,5625	9	0,015
Erro	9	0,5625	0,0625		
Total	15	2,4375	1,9375		

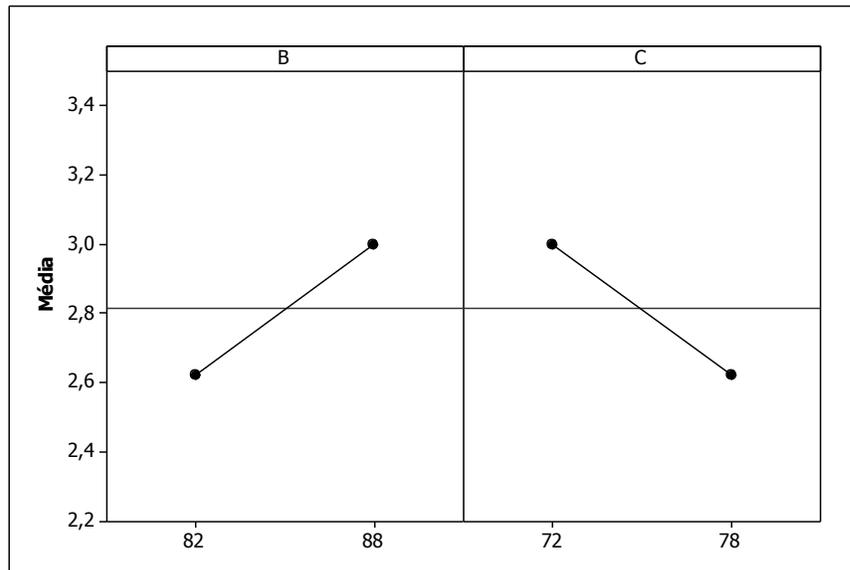


Figura 8: Gráfico dos efeitos principais B e C sobre a variável de resposta aderência tecido-tecido

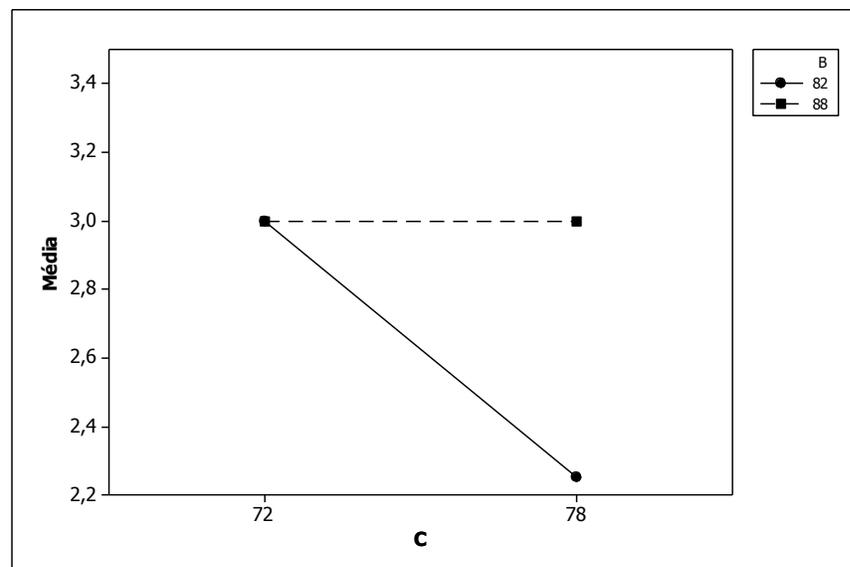


Figura 9: Gráfico de efeito da interação B e C sobre a variável de resposta aderência tecido-tecido

3.5.1.3. Reversão de enxofre

A variável de resposta reversão de enxofre não apresentou qualquer fator como significativo, ao nível de significância de 5%, como mostrado na tabela da análise de variância (Tabela 7). Portanto, não há evidências para concluir que, dentro do intervalo de estudo, a temperatura apresenta influência nesta variável.

Tabela 7: Descrição dos resultados ANOVA para VR reversão

Fonte	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F	Valor p
A	1	1,684	1,684	0,711	0,438
B	1	12,573	12,573	5,311	0,069
C	1	2,933	2,933	1,239	0,316
D	1	0,647	0,647	0,273	0,624
A*B	1	13,721	13,721	5,796	0,061
A*C	1	0,187	0,187	0,079	0,790
A*D	1	8,118	8,118	3,429	0,123
B*C	1	0,057	0,057	0,024	0,883
B*D	1	0,396	0,396	0,167	0,700
C*D	1	0,549	0,549	0,232	0,651
Erro	5	11,837	2,367		
Total	15	52,701	43,231		

3.5.1.4. Adesão borracha-metal

Para a variável de resposta adesão borracha-metal, os fatores considerados significativos foram a temperatura dos cilindros 1 e 4 (B) (valor $p=0,046$), a temperatura dos cilindros 2 e 3 (C) (valor $p=0,043$), a temperatura dos tambores de resfriamento (D) (valor $p=0,002$) e o aquecimento das cordas (E) (valor $p=0,007$) e também as interações A*D (valor $p=0,022$), B*C (valor $p=0,027$) e C*D (valor $p=0,018$) (Tabela 8). Os gráficos das Figuras 10 e 11 mostram os fatores e interações significativas.

Tabela 8: Descrição dos resultados ANOVA para VR adesão borracha- metal

Fonte	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F	Valor p
A	1	80,102	80,102	3,367	0,140
B	1	194,603	194,603	8,181	0,046
C	1	203,063	203,063	8,536	0,043
D	1	1135,690	1135,690	47,742	0,002
E	1	625,000	625,000	26,274	0,007
A*B	1	107,123	107,123	4,503	0,101
A*C	1	97,022	97,022	4,079	0,114
A*D	1	316,840	316,840	13,319	0,022
A*E	1	50,410	50,410	2,119	0,219
B*C	1	273,902	273,902	11,514	0,027
C*D	1	357,210	357,210	15,016	0,018
Erro	4	95,152	23,788		
Total	15	3536,118	3464,753		

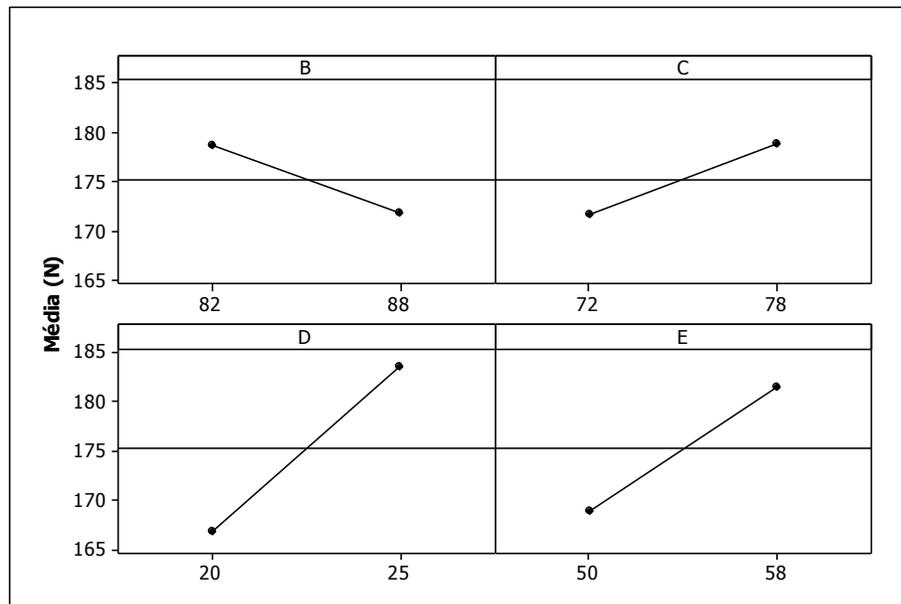


Figura 10: Gráfico dos efeitos principais significativos da VR adesão borracha-metal

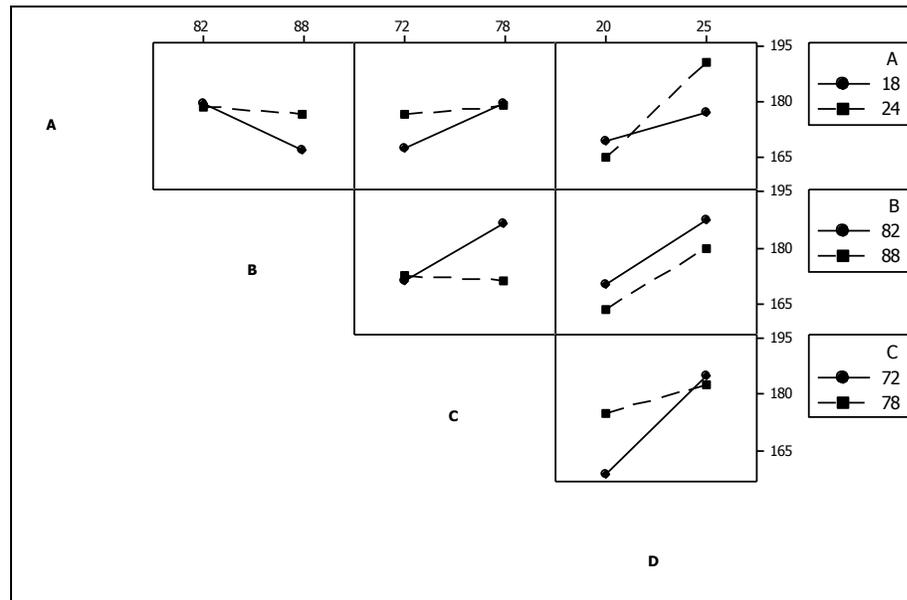


Figura 11: Gráfico das interações para a VR adesão borracha-metal

3.5.2. Otimização

Usando todas as variáveis de resposta de acordo com o seus respectivos índices de importância relativa descritos na Tabela 2, a otimização completa do processo foi gerada e apresentada na Figura 12, obtida por meio da função *response optimizer* do *software* Minitab. Nota-se que, com exceção do fator C, todos os fatores atingem seus níveis ótimos no patamar superior de temperatura. O melhor resultado significa aderência tecido-tecido adequada e maior adesão borracha-metal, sem que o percentual de reversão de enxofre atinja o seu nível superior de especificação e também sem a formação de indesejáveis grumos de composto pré-vulcanizado.

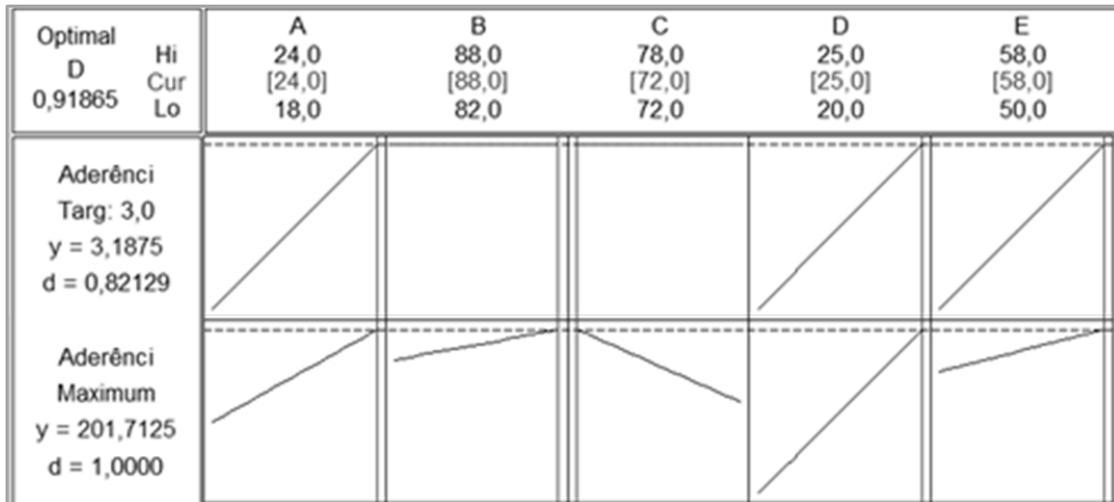


Figura 12: Otimização do processo gerada pelo Software Minitab

De acordo com essa otimização, o ajuste ótimo do fator temperatura dos moinhos alimentadores (fator A) é em seu nível superior, o que é coerente com o fato de que temperaturas mais elevadas facilitam a plastificação, deixando o composto mais homogêneo e facilitando também o processo de emborrachamento. O ajuste ótimo para a temperatura dos cilindros 1 e 4 (fator B) se dá em seu nível superior e dos cilindros 2 e 3 (fator C), no seu nível inferior. Isso pode ser explicado uma vez que a temperatura mais elevada nos cilindros 1 e 4 torna a parte inferior da folha superior e a parte superior da folha inferior mais aquecida, justamente as faces em contato com as cordas metálicas, melhorando a qualidade da cobertura do composto de borracha sobre as cordas metálicas, e assim a adesão borracha-metal. Pelo mesmo motivo, a temperatura do aquecimento das cordas (fator E) também tem seu ajuste ótimo no nível mais alto.

Além disso, entende-se que a diferença de temperatura entre os pares de cilindros 1 e 2 e 3 e 4 aumenta o atrito do composto de borracha ao passar pela fenda entre os cilindros, melhorando a plastificação do composto e conseqüentemente a aderência tecido-tecido. Nota-se também que o nível baixo para os cilindros 2 e 3 é favorável à adesão borracha-metal, podendo ser explicado

pelo fato de que uma temperatura menor faz com que a folheta do composto de borracha se desprenda facilmente destes cilindros, sem concorrência com o emborrachamento das cordas. Já os tambores de resfriamento tiveram o melhor ajuste na temperatura superior (fator D), provavelmente isto está relacionado a uma diminuição do choque térmico pela diferença entre o tecido e os tambores. Desta forma, recomenda-se que, para a otimização do processo, todos os parâmetros sejam ajustados no nível alto estudado, com exceção da temperatura dos cilindros 2 e 3 onde recomenda-se o ajuste no nível baixo.

Os resultados obtidos reforçam as afirmações encontradas na literatura, com o diferencial do uso de uma otimização experimental. As temperaturas mais elevadas melhoraram significativamente as variáveis de resposta estudadas, justamente nos pontos ressaltados por estudos anteriores: diminuição da viscosidade e melhoria na qualidade de cobertura das cordas metálicas (FANCY *et al.*, 2013; RODGERS, 2004; RODGERS; WADDELL, 2005b).

As alterações das temperaturas realizadas no experimento não afetaram a formação de grumos pré-vulcanizados ou o percentual de reversão de enxofre insolúvel para solúvel, uma vez que estas temperaturas não ultrapassaram 100°C, assim como previsto nos dados da literatura (CIESIELSKI, 1999; RODGERS, 2004; CORAN, 2005). Da mesma forma, as temperaturas usadas não foram suficientemente baixas para causarem irregularidades no aspecto visual do tecido ou falta de aderência tecido-tecido (FANCY *et al.*, 2013).

3.6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo da influência da variação da temperatura em pontos considerados críticos para o processo de produção de tecidos metálicos na fabricação de pneus, a partir da realização de um projeto de experimento fatorial fracionado 2^{5-1} . As quatro variáveis de resposta escolhidas foram aquelas associadas diretamente com as características de qualidade apontadas pelos clientes internos e também pela equipe técnica responsável pelo processo e pelo produto.

As variáveis de resposta grumos pré-vulcanizados e percentual de reversão de enxofre não apresentaram fatores controláveis significativos dentro dos limites estudados. Como estas

variáveis são bastante importantes para a qualidade dos tecidos metálicos, esse resultado contribui de forma positiva para a segurança quanto ao intervalo de temperaturas usado no processo, principalmente quando se trata do aumento de temperatura que foi favorável para as outras variáveis de resposta estudadas.

A variável de resposta aderência tecido-tecido, que é essencial para o processo de construção da carcaça do pneu, apresentou significativa melhora quando a diferença de temperatura entre os cilindros 1 e 4 e os cilindros 2 e 3 foi de 10 °C, melhorando a plastificação do composto pelo atrito causado por essa diferença de temperatura. Além disso, o aumento das temperaturas apontado na otimização do processo usando todas as variáveis de respostas não foi suficientemente grande para favorecer a eflorescência de enxofre, o que seria prejudicial para a aderência tecido-tecido, entre outras inconveniências.

A última variável de resposta estudada, a adesão borracha-metal, foi a que apresentou maior número de fatores influenciáveis, com quatro efeitos principais e três interações significativas. Por ser uma variável de aprovação do material e por ser essencial à vida útil do pneu, é muito importante ter o valor dessa variável maximizado. Por fim, o ajuste ótimo deste estudo apresentou todos os fatores em seu nível superior, com exceção do fator C, temperatura entre os cilindros 2 e 3.

Constatou-se que a aplicação da metodologia de projeto de experimentos favoreceu o planejamento e a condução da investigação da influência dos cinco fatores controláveis priorizados pela equipe técnica e da interação entre eles. Além disso, o uso de um projeto fatorial fracionado possibilitou chegar a resultados satisfatórios com um número reduzido de experimentos, o que foi essencial para a realização deste trabalho, uma vez que números elevados de experimentos requerem uma quantidade grande de amostras a serem analisadas e tempo excessivo para a sua execução, entre outros transtornos.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui com estudos da literatura, uma vez que forneceu modelos metodológicos que permitira uma otimização experimental para as afirmações encontradas nas pesquisas sobre a importância do controle de temperaturas no processo de fabricação de tecidos metálicos na indústria de pneus. Além disso, a pesquisa

desenvolvida neste estudo permite preencher as lacunas existentes na literatura pela carência de estudos quantitativos focados na melhoria do processo de produção de tecidos metálicos na indústria de pneus.

Do ponto de vista prático, os resultados deste trabalho podem ser utilizados para obter o melhor ajuste dos parâmetros para otimização dos resultados do processo de calandragem de tecido metálico na fabricação de pneus, na empresa em estudo e em outras indústrias do setor. Eles contribuem para a não geração de refugo e também para evitar perdas de produção, que são importantes fatores no cálculo de custo de produção de pneus.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros, verificar a melhoria no desempenho do processo produtivo da empresa, após implementar os ajustes na temperatura sugeridos no estudo, através do acompanhamento de indicadores de eficiência, qualidade do produto final e custos, entre outros. Outras pesquisas poderiam objetivar o estudo da influência da temperatura e do tempo de estocagem dos tecidos metálicos para as suas características de qualidade.

3.7. REFERÊNCIAS

- AJAMI, R. A.; COOL, K.; GODDARD, G. J.; KHAMBATA, D. *International Business Theory and Practice*. 5ª ed. USA. M. E. Sharpe Inc. 2006. 548p.
- ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. *Mixture DOE uncovers formulations quicker*. Rubber & Plastics News. *October 21, 2002*. p. 16-18. Disponível em: <<http://www.rubbernews.com/article/20021021/ISSUE/310219958/mixture-doe-uncovers-formulations-quicker>>. Acesso em: 12 jun. 2013.
- ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 1st ed. USA. Elsevier Inc., 2003. 190p.
- BABU, R. R.; SHIBULAL, G. S.; CHANDRA, A. K.; NASKAR, K. *Compounding and Vulcanization*. In.: ADVANCES IN ELASTOMERS I: BLENDS AND INTERPENETRATING NETWORKS. ebook. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. p. 83 – 136.
- CORAN, A. Y. *Vulcanization*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3ª ed. USA. Elsevier Inc., 2005. p. 321-366.

CATALDO, F. *A study on the structure and properties of polymeric sulfur*. Die Angewandte Makromolekulare Chemie. v. 249, n. 4348, p. 137 – 149, 1997.

CHANDRA, A. K.; MUKHOPADHYAY, R.; KONAR, J.; GHOSH, T. B.; BHOWMICK A. K.; *X-ray photoelectron spectroscopy and Auger electron spectroscopy of the influence of cations and anions of organometallic adhesion promoters on the interface between steel cord and rubber skim compounds*. Journal of Materials Science. v.31, p. 2667-2676, 1996

CHENG, B.; ZHU, N.; FAN, R.; ZHOU, C.; ZHANG, G.; LI, W.; JI, K. *Computer aided optimum design of rubber recipe using uniform design*. Polymer Testing. v.21, p. 83-88, 2002.

CIESIELSKI, A. *An Introduction to Rubber Technology*. UK. Rapra Technology Limited, 1999. 173p.

DATTA, S. *Elastomer Blends*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3^a ed. USA. Elsevier Inc., 2005. p. 529-554.

DURAIRAJ, R. B. *Resorcinol: Chemistry, Technology and Applications*. Berlin: Springer, 2005. 748p.

FANCY, M. A., JOSEPH, R.; VARGHESE, S.; *Elastomer Processing*. In.: ADVANCES IN ELASTOMERS I: BLENDS AND INTERPENETRATING NETWORKS. ebook. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. p. 137 – 166.

JEON, G. S.; HAN, M. H.; SEO, G.; *Improving adhesion properties between rubber compound and brass-plated steel cord by the addition of epoxidized natural rubber to rubber compound*. Korean Journal of Chemical. Engineering. v. 15, n.3, p. 317-323, 1998.

JEON, G. S.; HAN, M. H.; SEO, G. *The Adhesion Properties of Stearic Acid-Loaded Rubber Compounds to Brass-Plated Steel Cords*. Korean Journal of Chemical. Engineering., v. 16, n. 4, p. 434-440, 1999.

MOSHCHUK, N.; MOUSSEAU, C.; NORMAN, K.; MOTORS, G. *Simulation Study of Oscillatory Vehicle Roll Behavior during Fishhook Maneuvers*. American Control Conference. FrA09.3. 2008.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 5^a ed. USA. John Wiley & Sons Inc., 2001. 684p.

POH, B. T.; KWOK, C. P.; LIM, G. H. *Reversion behaviour of epoxidized natural rubber*. European Polymer Journal, v. 31, n. 3, p. 223-226, 1995.

ROCHA, E. C.; LOVISON, V. M. H.; PIEROZAN, N. J. *Tecnologia de transformação dos elastômeros*. 2ª ed. São Leopoldo. Centro Tecnológico de Polímeros - SENAI, 2007. 352 p.

RODIONOVA, Y. O.; POMERANTSEV, A. L. *Prediction of Rubber Stability by Accelerated Aging Test Modeling*. Published online 19 January 2005 in Wiley InterScience. DOI 10.1002/app.21347

RODGERS, B.; *Rubber Compounding: Chemistry and Applications*. 1st ed. Marcel Dekker, Inc., 2004. 575p.

RODGERS, B.; WADDELL, W. *The Science of Rubber Compounding*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3ª ed. USA. Elsevier Inc., 2005a. p. 401-454.

RODGERS, B.; WADDELL, W. *Tire Engineering*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3ª ed. USA. Elsevier Inc., 2005b. p. 619-661.

RODRIGUES, J. R.; TINOCO, M. A. C. *Mapeamento do processo de calandragem de tecido metálico para fabricação de pneus*. Publicado in.: VI Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias, Bogotá, 24 al 26 de Julio de 2013.

RYZKO, P.; HABERSTROH, E. *Quality assurance in the rubber mixing room – Prediction of the rubber compound properties that are relevant for the elastomer product properties*. *Macromolecular Materials and Engineering*. v. 284/285, p. 64–69, 2000.

SEONG-RAE, K.; KI-DEUG1, S.; DONG-WOO, L.; SUN-CHUL, H. *Cavity noise sensitivity analysis of tire contour design factors and application of contour optimization methodology*. Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. v. 19, p. 2386–2393, 2012.

SHETH, J. N. *Os maus hábitos das boas empresas e como fugir deles*. Bookman Companhia Editora, 2007. 260p.

SILVA, E. L.; *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 3ª ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001. 121p.

SOMMER, J. G.; *Engineered Rubber Products - Introduction to Design, Manufacture and Testing*. Germany. Hanser Publishers, 2009. 173p.

WHITE, J. W. *Rheological behavior and processing of unvulcanized rubber*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3ª ed. USA. Elsevier Inc., 2005. p. 237-319.

YANJIN, G.; GUOQUN1, Z.; GANG, C. *Influence of Belt Cord Angle on Radial Tire under Different Rolling States*. Journal of Reinforced Plastics and Composites. v. 25, n. 10, p. 1059-1077, 2006.

ZHANG, S. L.; ZHANG, Z. X.; XIN, Z. X.; PAL, K.; KIM, J. K. *Prediction of mechanical properties of polypropylene/waste ground rubber tire powder treated by bitumen composites via uniform design and artificial neural networks*. Materials and Design. v. 31, p. 1900-1905, 2010.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Este tópico objetiva apresentar os comentários finais sobre o trabalho desenvolvido, abordando suas conclusões principais e sugestões para trabalhos futuros sobre assuntos relacionados e não tratados neste trabalho.

4.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação trouxe como tema a melhoria do processo de produção de tecidos metálicos usados como material de reforço em pneus radiais. Seu objetivo principal foi aprofundar os conhecimentos a respeito do processo de produção de tecidos metálicos, identificando oportunidades de melhorias no seu processo produtivo. A identificação de etapas críticas do processo e proposta de melhorias considerou a qualidade percebida pelo cliente interno, sem afetar a qualidade do produto final, percebida pelo cliente externo. Para atingir o objetivo principal, foram estabelecidos dois objetivos específicos, executados através de artigos.

O primeiro artigo teve por objetivo mapear o processo de produção do tecido metálico, de forma a identificar etapas críticas e atender requisitos de qualidade dos clientes internos do processo. Do mapeamento, constatou-se que grande parte dos requisitos dos clientes está relacionada diretamente às etapas do processo e, desta forma, foi possível identificar possíveis falhas e medidas para evitá-las. Dentre as possíveis melhorias propostas a partir desse primeiro estudo podem ser destacadas:

- a) Ajustar os alarmes de temperatura para acionamento anterior a temperatura máxima permitida no processo de emborrachamento, e assim tornar possível ações corretivas a tempo de evitar que a qualidade do produto seja afetada;
- b) Instalar dispositivos para detectar queda da pressão de água, corte do fluxo da água de resfriamento, ou ainda algum problema na regulagem automática de temperatura que cause a sua variação excessiva;
- c) Instalar receitas para cada tipo de tecido metálico, onde a regulagem dos valores de pressões, temperaturas e tensão sejam feitas de forma automática,

sem a necessidade da intervenção dos operadores, diminuindo assim a possibilidade de erros operacionais;

- d) Instalar bloqueios na máquina para valores de pressão, temperatura ou tensão irregulares.
- e) Adequar o tamanho das bobinas de polietileno para valores múltiplos do comprimento das bobinas de tecido metálico, a fim de eliminar as emendas de polietileno do processo;
- f) Instalar sensores de quebra de fita de alimentação, que já existem no moinho alimentador, para os moinhos pré-alimentador e quebrador;
- g) Aquisição de um equipamento de regulação automática da espessura do tecido, para melhorar a confiabilidade na espessura do tecido metálico.

Os resultados obtidos confirmaram algumas afirmações encontradas na literatura, como por exemplo, a falta de automatização do processo (GOLDENSTEIN *et al.*, 2007), o que pode torná-lo susceptível a erros operacionais em diversas etapas. Além disso, ao longo do mapeamento, identificou-se que o processo exige temperaturas específicas em diversos pontos e que estas são essenciais para a qualidade do tecido produzido.

Partindo dessa última constatação, realizou-se, no segundo artigo, um estudo do efeito das temperaturas no processo de calandragem de tecidos metálicos, por meio de um projeto de experimentos. Não há evidências suficientes para afirmar os fatores estudados possuem influência significativa em duas das quatro variáveis de resposta estudadas, formação de grumos pré-vulcanizados e percentual de reversão de enxofre. Isso confirma os dados da literatura que afirmam que estes fenômenos ocorrem usualmente acima de 100°C, temperatura esta não usada nos experimentos (CIESIELSKI, 1999; RODGERS, 2004; CORAN, 2005). A variável de resposta aderência tecido-tecido, apresentou significativa melhora quando a diferença de temperatura entre os cilindros 1 e 4 e os cilindros 2 e 3 foi de 10 °C, melhorando a plastificação do composto pelo atrito causado por essa diferença de temperatura. A quarta e última variável de resposta estudada, a adesão borracha-metal, foi a que apresentou maior número de fatores influenciáveis, com quatro efeitos principais e três interações significativas. O seu ajuste ótimo

apresentou a maioria de seus fatores no nível superior, isso é justificado pela melhoria da uniformidade da cobertura das cordas metálicas causada pela diminuição da viscosidade devido ao aumento da temperatura. Esses resultados indicam que a empresa pode ajustar as temperaturas usadas na sua linha de calandragem de tecidos metálicos conforme otimização gerada pelo projeto de experimentos executado:

- a) 24°C nos moinhos alimentadores;
- b) 88°C nos cilindros 1 e 4 da calandra;
- c) 72°C nos cilindros 2 e 3 da calandra;
- d) 58°C no aquecimento das cordas; e
- e) 25°C nos tambores de resfriamento.

Do ponto de vista de sua contribuição prática, esta dissertação possibilitou a visualização do processo de calandragem e seus principais pontos de atenção para a qualidade do material. Da mesma forma, os seus resultados podem ser utilizados pela empresa em estudo para obter o melhor ajuste dos parâmetros de temperatura na otimização dos resultados do processo de calandragem de tecido metálico, contribuindo para a não geração de refugo e também para evitar perdas de produção, que são importantes fatores no cálculo de custo de produção de pneus. Os resultados obtidos também podem servir de referência para outras empresas do setor.

Academicamente, o trabalho aprofundou os conhecimentos sobre o processo de calandragem de tecido metálico na fabricação de pneus que, apesar de muito antigo, são poucos os estudos publicados a respeito (BHOWMICK, 2008), dessa forma, contribuindo com essa área do conhecimento. Adicionalmente, este trabalho forneceu uma otimização experimental para as afirmações encontradas na literatura sobre a importância do controle de temperaturas no processo de fabricação de tecidos metálicos (FANCY *et al.* 2013; CIESIELSKI, 1999; RODGERS, 2004).

4.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação somente um dos pontos críticos resultantes do mapeamento realizado no primeiro artigo foi aprofundado. Outros pontos como a influência dos operadores, a variação da

espessura do tecido e o uso de um maquinário mais automatizado não foram investigados. Esses fatores poderiam ser aprofundados com o uso de projeto de experimentos ou com o uso de outra metodologia quantitativa.

Da mesma forma, somente os pontos de influência de temperatura durante o processo de produção do material foram analisados, a influência da temperatura de estocagem tanto do composto de borracha quanto do tecido metálico não foram consideradas. Tampouco o tempo de estocagem foi levado em consideração na análise da influência sobre as características de qualidade percebidas pelo cliente interno. Uma função de tempo e temperatura poderia ser criada relacionando a aderência borracha-borracha e borracha-metal, por exemplo.

Neste trabalho foi citada a importância do processo de produção sobre os índices qualitativos e de produtividade no setor da empresa em questão. No entanto, não foram avaliados ou estimados os ganhos com a implantação das melhorias propostas neste trabalho, bem como os custos de investimentos necessários.

Tecidos têxteis são igualmente produzidos pelo processo de calandragem e usados na fabricação de pneus, mas não foram abordados neste estudo. Estes materiais e os tecidos metálicos são produzidos em máquinas completamente separadas ou em máquinas adaptadas de uso comum. Um estudo sobre as diferenças e similaridades destes processos e do uso de máquinas distintas ou compartilhadas poderia ser considerado.

Tais delimitações desta dissertação representam oportunidades para o aperfeiçoamento da pesquisa sobre melhorias de processos e sobre a fabricação de pneus de uma forma geral. De uma forma específica, essas sugestões de trabalhos futuros podem contribuir para a ampliação do conhecimento do processo de calandragem.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). Empregos e salários. Jul. 2013. Disponível em: <http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo&area=35&titulo_pagina=Emprego%20e%20Sal%Elrios>. Acesso em: 24 jan. 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). Produção da Indústria Brasileira de Pneus em 2012. [2013]. Disponível em: <http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o>. Acesso em: 24 jan. 2014.
- BHOWMICK, A. K. (Ed.). *Current topics in elastomers research*. New York: CRC Press, 2008.
- BRUSONI, S. SGALARI, G. *New combinations in old industries: The introduction of radical innovations in tire manufacturing*. In: INNOVATION, INDUSTRIAL DYNAMICS AND STRUCTURAL TRANSFORMATION, 2007. p. 189-207.
- CARLSON, J. S.; SODERBERG, R. *Assembly root cause analysis: a way to reduce dimensional variation in assembled products*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, v. 15, n. 2, p. 113-150, Apr. 2003.
- CHAN, K. K; SPEDDING, T. A. *An integrated multidimensional process improvement methodology for manufacturing systems*. Computers & Industrial Engineering, v. 44, n. 4, p. 673-693, Apr. 2003.
- CHANDRA, A. K.; BHANDARI, V. *Nanocomposites for tyre applications*. In: ADVANCES IN ELASTOMERS II, ADVANCED STRUCTURED MATERIALS. Berlin: Springer, 2013.
- CHEN, H.; SHONNARD, D. R. *Systematic framework for environmentally conscious chemical process design: early and detailed design stages*. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 43, n. 2, p. 535-552, Jan. 2004.
- CHOI, D.; HOFFMAN, K. A.; KIM, M. O.; MCCARTY, D. *A High-Resolution Analysis of Process Improvement: Use of Quantile Regression for Wait Tim*. Health Services Research. v. 48, n. 1, p. 333-347, feb, 2013.
- CIESIELSKI, A. *An Introduction to Rubber Technology*. UK, Rapra Technology Limited, 1999. 173p.

CIOCCI, R; PECHT, M. *Impact of environmental regulations on green electronics manufacture*. *Microelectronics International*, v. 23, n. 2, p. 45-50, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Indicadores de competitividade na indústria brasileira*. 2. ed. rev. e atual. Brasília: CNI, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Relatório da competitividade da indústria brasileira*. Brasília: CNI; Rio de Janeiro: SEBRAE, 2001.

CORAN, A. Y. *Vulcanization*. In.: *THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER*. 3ª ed. USA. Elsevier Inc., 2005. p. 321-366.

DREWS, A; KRAUME, M. *Process improvement by application of membrane bioreactors*. *Chemical Engineering Research & Design*, v. 83, n. A3, p. 276-284, Mar. 2005.

DURAIRAJ, R. B. *Resorcinol: Chemistry, Technology and Applications*. Berlin: Springer, 2005. 748p.

FANCY, M. A.; REETHAMMA, J.; VARGHESE, S. *Elastomer Processing*. In: *ADVANCES IN ELASTOMERS I: BLENDS AND INTERPENETRATING NETWORKS*. Berlin: Springer, 2013.

GARZAS, J.; PAULK, M. C. *A case study of software process improvement with CMMI-DEV and Scrum in Spanish companies*. *Journal of Software: evolution and process*, v. 25, n. 12, p. 1325-1333, Dec. 2013.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002. 200p.

GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. F., BARRIOS, M. T. *Panorama da indústria de pneus no Brasil: ciclo de investimentos, novos competidores e a questão do descarte de pneus inservíveis*. In.: *BNDS SETORIAL*. Rio de Janeiro, n. 25, p. 107-130, Mar. 2007.

IVERSEN, I.; MATHIASSEN, L.; NIELSEN, P. A. *Managing risk in software process improvement: an action research approach*. *Mis Quarterly*, v. 28, n. 3 (special issue), p. 395-433, Sept. 2004.

JEON, G. S.; HAN, M. H.; SEO, G. *The Adhesion Properties of Stearic Acid-Loaded Rubber Compounds to Brass-Plated Steel Cords*. *Korean d. Chem. Eng.*, v. 16, n. 4, p. 434-440, 1999.

KRECKLER, S; MORGAN, R.D.; CATCHPOLE, K.; NEW, S.; HANDA, A.; COLLINS, G.; MCCULLOCH, P. *Effective prevention of thromboembolic complications in emergency surgery*

- patients using a quality improvement approach. *BMJ Quality & Safety*, v. 22, n. 11, p. 916-922. Nov. 2013.
- MARCONI, N.; BARBI, F. *Taxa de câmbio e composição setorial da produção: sintomas de desindustrialização da economia brasileira*. São Paulo: FGV-EESP, 2010.
- MAZUR, L. M.; MCCREERY, J. K.; CHEN, S. J. *Quality Improvement in Hospitals: Identifying and Understanding Behaviors*. *Journal of Healthcare Engineering*, v. 3, n. 4, p. 621-647, Dec. 2012.
- MILLER, S. A.; BILLINGTON, S. L.; LEPECH, M. D. *Improvement in environmental performance of poly(beta-hydroxybutyrate)-co-(beta-hydroxyvalerate) composites through process modifications*. *Journal of Cleaner Production*, v. 40, p. 190-198, Feb. 2013.
- NIAZI, M.; WILSON, D.; ZOWGHI, D. *A maturity model for the implementation of software process improvement: an empirical study*. *The Journal of Systems and Software*, Sydney, v. 74, n. 2, p. 155-172, Jan. 2005.
- PAIM, R.; CARDOSO, V.; CAULLIRAUX, H. M. *Gestão de processos: pensar, agir e aprender*. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- PIGOSSO, D. C. A.; ROZENFELD, H.; MCALOONE, T.C. *Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies*. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 160-173, Nov. 2013.
- RASCHKE, R. L.; SEN, S. *A value-based approach to the ex-ante evaluation of IT enabled business process improvement projects*. *Information & Management*, v. 50, n. 7, p. 446-456, Nov. 2013.
- SHAHBAZ, M.; SRINIVAS; HARDING, J.A.; TURNER, M. *Product design and manufacturing process improvement using association rules*. *Journal of Engineering Manufacture*, v. 220, n. 2, p. 243-254, Feb. 2006.
- SHINGO, S. *O sistema toyota de produção do ponto de vista da engenharia de produção*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 1996.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2005.

TROVINGER, S. C; BOHN, R. E. *Setup time reduction for electronics assembly: combining simple (SMED) and IT-based methods*. Production and Operations Management, v. 14, n. 2, p. 205-217, Summer 2005.

TUNKELO, T.; HAMERI, A. P.; PIGNEUR, Y. *Improving globally distributed software development and support processes: a workflow view*. Journal of Software: evolution and process, v. 25, n. 12, p. 1305-1324, Dec. 2013.

VAN AARTSENGEL, A.; KURTOGLU, S. *Handbook on continuous improvement transformation: the lean six sigma framework and systematic methodology for implementation*. Berlin: Springer, 2013.

RODGERS, B.; *Rubber Compounding: Chemistry and Applications*. 1st ed. Marcel Dekker, Inc., 2004. 575p.

RODGERS, B.; WADDELL, W. *Tire Engineering*. In.: THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF RUBBER. 3^a ed. USA. Elsevier Inc., 2005. p. 619-661.

WAN, H.D.; CHEN, F. *A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives*. International Journal of Production Research, v. 46, n. 23, p. 6567-6584, 2008.

YILDIZ, O; DEMIRORS, O. *Measuring healthcare process quality: Applications in public hospitals in Turkey*. Informatics for Health & Social Care. v. 38, n. 2, p. 132-149, Mar, 2013.