



ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS E MELHORIA DA DISPONIBILIDADE DE MÁQUINAS

Bruna Andrade Machado – bruna.a.machado@unesp.br
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP/FEB)

Luiz Felipe Matos da Conceição – luizfelipeconceicao@engineer.com
Universidade de São Paulo (USP)

ÁREA: 1. ENGENHARIA DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PROD

SUBÁREA: 1.3 - Gestão da Manutenção

RESUMO: EM UM AMBIENTE DE FORTE CONCORRÊNCIA, ONDE O MERCADO DETERMINA O PREÇO DE VENDA, É NATURAL QUE SE BUSQUE MEIOS DE ATINGIR MELHOR COMPETITIVIDADE, REDUZINDO CUSTOS A PARTIR DO COMBATE AOS DESPERDÍCIOS, AUMENTANDO A EFETIVIDADE DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO. PROMOVER O USO MAIS ADEQUADO DOS EQUIPAMENTOS, PARA QUE SE POSSA PRODUZIR SEMPRE QUE NECESSÁRIO, É CHAVE PARA RESPONDER MAIS RAPIDAMENTE ÀS DEMANDAS DO MERCADO, EM ESPECIAL O MERCADO VIDREIRO. O OBJETIVO DESTES TRABALHOS É AUMENTAR A DISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE LAPIDAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE VIDRO TEMPERADO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS. O MÉTODO UTILIZADO PARA DESENVOLVER O TRABALHO É A PESQUISA-AÇÃO E SUAS ETAPAS DE REALIZAÇÃO DESDOBRADAS EM UM PROCESSO CÍCLICO DE PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO, VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS E PLANO DE AÇÕES FUTURAS. OS RESULTADOS PRELIMINARES OBTIDOS DEMONSTRAM A VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA SE OBTIVER O RESULTADO PRETENDIDO. FORAM IDENTIFICADAS AS PRINCIPAIS CAUSAS DE PARADAS DE MÁQUINA, CONSTRUÇÃO DAS ÁRVORES DE FALHAS E ELABORAÇÃO DE TABELA CONTENDO AÇÕES PROPOSTAS MEDIANTE A IDENTIFICAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE FALHAS.

PALAVRAS-CHAVES: LAPIDAÇÃO; ÁRVORE DE FALHAS; FTA; PDCA; TPM.

1. INTRODUÇÃO

Um dos diferenciais operacionais das empresas de manufatura é a forma como utilizam seus recursos, uma vez que os produtos são resultados do uso de matérias-primas, máquinas, métodos e mão-de-obra. Empresas comprometidas com esses diferenciais buscam meios de atingir melhor competitividade e eficiência, reduzindo custos a partir do combate aos desperdícios e perdas e aprimorando a qualidade do que se oferta.

Uma forma reconhecida para aumentar a eficiência do sistema de produção é a utilização efetiva dos equipamentos. Rüttimann (2016) exemplifica que a disponibilidade de equipamento contribui para a efetividade da produção. Em sua representação de um sistema de produção, Rüttimann (2016) aponta alguns conceitos que sustentam o uso efetivo de equipamentos, com destaque para a *Total Productive Maintenance* (TPM).

Através do uso de diversas ferramentas, as principais falhas são identificadas e suas causas descobertas, são desenvolvidas melhorias e os funcionários passam a ser treinados com foco na realização de manutenção de forma autônoma.

Quando uma empresa consegue conquistar esse patamar, ela consegue ter maior controle sobre seus processos, cumprir com o planejado e planejar melhor os tempos em que seus equipamentos deverão parar, sem que isso interfira significativamente na produtividade, e principalmente, no faturamento da empresa.

Em uma indústria de processamento de vidro temperado situada ao norte do Paraná, verificou-se uma quantidade relevante nas ocorrências de falhas nos equipamentos na seção de lapidação, o que incide em horas de máquina parada para reparos e consequente perda de produtividade.

Ocorre que tal setor, além de demonstrar altos índices de parada para manutenção representa um ponto crucial para a empresa, impactando a maior parte de sua produção. Só a seção de lapidação vertical, isoladamente, concentra 25% do total das ordens de manutenção corretiva, o que impacta significativamente não apenas a entrega de peças para o processo de têmpera como também a entrega de peças que não são temperadas, como exposto anteriormente.

Como a disponibilidade dos equipamentos de lapidação afeta diretamente a produtividade e a competitividade da organização frente ao mercado no setor em que atua, surge o problema a ser trabalhado nessa pesquisa: como melhorar a disponibilidade dos equipamentos desta seção?

1.1. Objetivo

É o foco deste trabalho elaborar a árvore de falhas para os principais defeitos apresentados no setor de lapidação vertical e, assim, aumentar a disponibilidade dos equipamentos e a produtividade empresarial.

Outros objetivos específicos são:

- Identificar as principais causas das paradas de máquina no setor de lapidação,
- Elaborar instrumento de manutenção autônoma com orientações para a ação;
- Capacitar os funcionários a realizarem a manutenção de forma autônoma
- Aumentar a produtividade do setor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O TPM é um sistema de gestão da manutenção desenvolvido em 1961 por Seiichi Nakajima em seus trabalhos na Nippondenso. Segundo Robinson e Ginder (1995) o TPM objetiva constituir uma estrutura que busca a efetividade global do sistema de produção. Agrega-se ainda princípios para se prevenir perdas e aumentar a confiabilidade por meio da aplicação de conceitos como “zero-defeito, zero-quebra ou falha e zero acidente.”

Jung et al. (2005) afirmam que, dentre os métodos e técnicas que objetivam contribuir para a confiabilidade e a segurança, a Análise da Árvore de Falhas (FTA) é a mais comumente utilizada. A FTA é uma abordagem estruturada e sistemática para identificar e analisar falhas potenciais em um sistema ou processo.

Embora a origem da análise sistêmica de falhas possa ser traçada desde o final dos anos 50, o conceito de FTA foi introduzido por H. Watson e A. Mearns no início dos anos 60 em seus trabalhos na Bell Laboratories (Bell), empresa de pesquisa associada à Companhia Americana de Telefone e Telégrafo (AT&T).

Na década de 70, a FTA também foi amplamente utilizada na Agência Nacional Aeronáutica e Administração Espacial (NASA). Dessa forma, a autoria do método de FTA, na forma como é hoje, não é creditada a um idealizador em específico, mas é fruto da contribuição de diversos pesquisadores, engenheiros e praticantes ao longo do tempo.

A FTA é um diagrama organizado em forma de “árvore” que representa as relações existentes entre diferentes eventos. Os eventos são classificados de cima para baixo, partindo-se do evento de topo, ou principal, até os eventos ramificados mais abaixo tidos como intermediários e básicos. O evento principal é denominado falha ou falha final e os eventos básicos são compreendidos como modos de falha individuais ou fatores contribuintes para a

ocorrência da falha final.

As relações são estabelecidas entre o evento principal (falha final) e os eventos básicos (modos de falhas individuais) através de portas lógicas. As portas lógicas definem como os eventos básicos se combinam para contribuir na ocorrência de eventos em níveis (ramificações) mais acima na árvore.

As principais portas lógicas empregadas na FTA são as portas “E” e “OU”, ademais, portas adicionais podem ser utilizadas em casos mais específicos em que a análise esteja sendo empregada. A FTA permite aplicações em diferentes segmentos das quais destacam-se as indústrias automotiva, aviação, aeroespacial, petróleo, bélica, entre outras.

3. METODOLOGIA

A metodologia que delinea o desenvolvimento do projeto é a Pesquisa-Ação, desdobrada no processo cíclico de melhoria *Plan* (planejar), *Do* (executar), *Check* (verificar) e *Act* (agir) (PDCA). Segundo Coutinho et al (2009), a Pesquisa-Ação é um conjunto de métodos de investigação que incluem simultaneamente ação (mudança) e investigação (compreensão). O desdobramento da Pesquisa-Ação em ciclos PDCA implica no aperfeiçoamento dos métodos, dos dados e da interpretação feita à luz da experiência (conhecimento) obtida a cada ciclo.

O método adotado possibilitou o autor intervir objetivamente no ambiente de estudo. As intervenções foram ponderadas em reuniões com as partes interessadas.

A FTA foi construída em uma abordagem dedutiva e sua aplicação considerada relevante para a organização como fator contribuinte para a melhoria na disponibilidade dos equipamentos de lapidação.

A primeira etapa da pesquisa consistiu no planejamento, com base na motivação do projeto. Verificou-se através dos dados de parada de máquina que a seção de lapidação vertical apresenta recorrência em paradas não planejadas.

A segunda etapa se referiu à coleta de dados referentes às manutenções corretivas aplicadas à seção de lapidação, disponíveis em diversos relatórios e documentos da empresa, tais como:

- **Relatório de parada de máquina:** relatório preenchido pelos líderes de produção onde foi possível identificar as principais falhas que resultaram em paradas de máquina e os respectivos tempos de parada.

- **Ordem de serviço:** relatório extraído do sistema de monitoramento da produção contendo as ordens de serviço de manutenção corretiva, a partir do qual foi obtido um descritivo geral das ações dispensadas aos equipamentos, bem como a identificação dos principais grupos de elementos de máquina e falhas associadas.
- **Manual do equipamento:** embora limitada, foi a principal fonte de informação sobre os aspectos técnicos como a regulação dos parâmetros de operação e cuidados adicionais para a conservação do equipamento.
- **Check-list de equipamentos:** registro das verificações realizadas pelos operadores de produção onde foi possível identificar as condições de funcionamento dos equipamentos ao longo dos meses.

Também foram realizadas reuniões com os manutentores da empresa para resgate do conhecimento organizacional quanto ao histórico dos equipamentos e para a condução de análise crítica sobre a disponibilidade e ações empregadas nas manutenções corretivas.

Na terceira etapa, com base nas informações obtidas, foi realizado um estudo sobre a condição atual dos equipamentos e análise dos registros de manutenção para identificar as principais causas das paradas de máquina no setor de lapidação. Foi construída uma tabela indicando as principais causas de parada, associando as causas e as falhas apresentadas pelos elementos de máquina. Além disso, foram levados em consideração os possíveis efeitos dessas falhas sobre a capacidade de entregar as encomendas em conformidade com os requisitos do cliente, sobretudo os requisitos dimensionais.

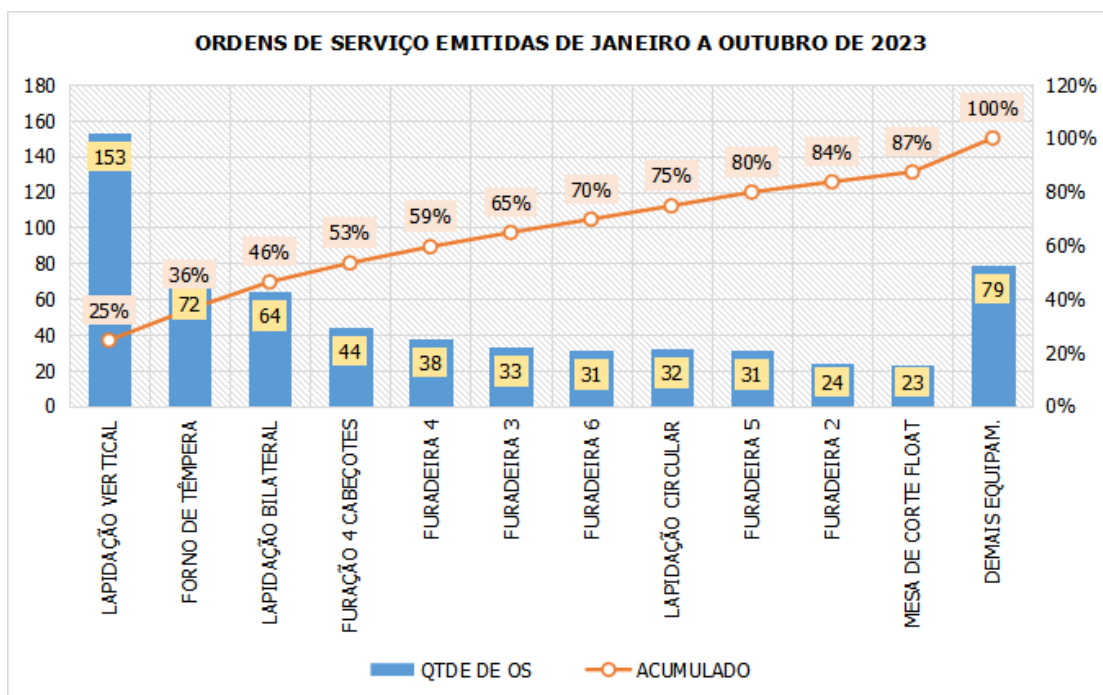
Estes elementos serviram de base para o desenvolvimento da FTA e elaboração do plano de ação. Segundo Coughlan e Coughlan (2002) a criticidade desta etapa consiste na abordagem colaborativa para que se aproveite a *expertise* dos envolvidos, em essencial, dos clientes do projeto. Inclusive, pôde-se utilizar o conhecimento técnico mecânico do autor na elaboração da árvore de falhas - FTA em conjunto com o departamento de manutenção, bem como dos materiais e manuais disponíveis para os equipamentos em estudo.

Seguiu-se então para a quarta etapa que consiste na implementação das ações definidas no plano. Esta etapa envolveu as intervenções no ambiente de estudo com o objetivo de promover a mudança necessária para se atingir o objetivo definido no projeto de pesquisa. É seguida pela avaliação da nova condição através da análise dos resultados obtidos, comparando-os com a condição inicialmente observada.

4. DESENVOLVIMENTO

Durante a análise da situação atual, foi contabilizada uma quantidade total de 624 ordens de serviço de manutenção corretiva para os equipamentos do parque fabril. O setor de lapidação recebeu quase 40% das intervenções corretivas e a seção de lapidação vertical 25% do total das ordens emitidas durante os meses de janeiro a outubro de 2023 (Gráfico 1).

GRÁFICO 1 – Quantidade de percentual de ordens de serviço emitidas de janeiro a outubro de 2023.



Fonte: Dados da pesquisa (2023)

Considerando-se o fluxo de produção, a seção de lapidação processa praticamente 99% da produção, sendo a seção de lapidação vertical responsável por processar em torno de 60% desse volume diariamente, incluindo as peças que não são temperadas. Verificou-se, portanto, que a grande quantidade de ordens de serviço destinadas à lapidação vertical impactou, em média, na perda de, aproximadamente, 1 dia por mês de produção nos meses de março, abril, maio e junho de 2023.

Vale ressaltar que a organização não possui registros de pequenas paradas de máquina que sejam resultantes da condição de pré-quebra, bem como paradas para pequenos ajustes devido a defeitos observados nas peças pela área de inspeção. Portanto, embora essas ocorrências não estejam comprovadas (registradas), com base na análise das ordens de serviço e check-list dos equipamentos, pode-se inferir que o impacto é maior que o contabilizado.

Cabe, portanto, salientar que, além das perdas de produtividade não registradas para pequenos ajustes, percebe-se a redução da produtividade agravada pela perda de matéria-prima, uma vez que, antes de realizarem esses pequenos ajustes, é comum que peças produzidas já tenham sido rejeitadas. Dentro do período estudado, identificou-se a perda e refugo de 6% do volume produzido e 22% do volume foi retrabalhado em decorrência de falhas na lapidação.

Além das perdas provenientes da necessidade de parada e manutenção das máquinas e as perdas por problemas de qualidade, é importante considerar o fato do mercado vidreiro ter um tempo médio de entrega entre 3 e 5 dias e que paradas não programadas tendem a impactar de forma bastante negativa, podendo gerar atrasos na entrega de pedidos, principalmente no que se refere às demandas customizadas, os quais representam mais de 80% da produção mensal.

Com as ordens de manutenção corretiva em mãos, foi possível ler e analisar as 153 ordens de serviço destinadas à seção de lapidação vertical. Muitas estavam incompletas, somente 38 ordens continham informações que permitiam identificar corretamente os elementos de máquina defeituosos e os problemas relacionados a cada um deles. A Figura 1, apresenta um recorte de como as informações foram trabalhadas no relatório extraído do sistema de monitoramento da produção contendo as ordens de serviço de manutenção corretiva.

FIGURA 1 – Relatório das ordens de serviço.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Código	Mês	Tipo	Realizad	Patrimônio	Observação			EQUIPA
209	1	Corretivo	44713	LAPIDADORA VERTICAL 1	Arrumar a barra que faz a regulação da pinça (SAIU A CHAVETA); TRAVADO E			VERTICAL 1
224	1	Corretivo	44713	LAPIDADORA VERTICAL 1	Vazamento na caixa (URGENTE); CONTIDO VAZAMENTO, MAS PROVIDENCIADO			VERTICAL 1
225	1	Corretivo	44639	LAPIDADORA VERTICAL 1	Trocar a coifa do motor (9); EFETUADO A TROCA DE COIFA.			VERTICAL 1
241	1	Corretivo	44582	LAPIDADORA VERTICAL 1	esteira saída parando; FEITO A TROCA DA ENGRENAGEM CENTRAL E DA			VERTICAL 1
242	1	Corretivo	44591	LAPIDADORA VERTICAL 1	escapou correia saída; COLOCADO CORREIA NO LUGAR.			VERTICAL 1
243	1	Corretivo	44609	LAPIDADORA VERTICAL 1	esteira saída s escapou; ESTEIRA REGULADA.			VERTICAL 1
244	2	Corretivo	44618	LAPIDADORA VERTICAL 1	correia escapando; FEITO O APERTO E AJUSTE.			VERTICAL 1
245	2	Corretivo	44623	LAPIDADORA VERTICAL 1	Arrumar a esteira. CORREIA ESCAPOU, COLOCADA NO LUGAR.			VERTICAL 1
246	2	Corretivo	44630	LAPIDADORA VERTICAL 1	Arrumar a esteira (parou); TROCADO O ROLAMENTO E AJUSTADO A CORREIA.			VERTICAL 1
247	2	Corretivo	44631	LAPIDADORA VERTICAL 1	Arrumar a (esteira) de entrada. GUIA DA CORREIA GASTA, FEITO A TROCA.			VERTICAL 1
248	2	Corretivo	44632	LAPIDADORA VERTICAL 1	Arrumar a (esteira) de entrada da máquina; CORREIA GASTA, FALTA DE AJUSTE			VERTICAL 1
249	2	Corretivo	44658	LAPIDADORA VERTICAL 1	Esteira D/saída parada; ENGRENAGEM GASTA, COLOCADO PARA FUNCIONAR			VERTICAL 1
250	2	Corretivo	44665	LAPIDADORA VERTICAL 1	Esteira de saída parada; COLOCADO CORRENTE NO LUGAR.			VERTICAL 1
251	2	Corretivo	44673	LAPIDADORA VERTICAL 1	Esteira de saída parada; COLOCADO CORRENTE.			VERTICAL 1
252	2	Corretivo	44673	LAPIDADORA VERTICAL 1	Esteira de saída parada; COLOCADO CORRENTE, AGUARDANDO AUTORIZAÇÃO.			VERTICAL 1
253	2	Corretivo	44681	LAPIDADORA VERTICAL 1	Esteira de saída parada; TROCA DOS ROLAMENTOS DA TRANSMISSÃO DE			VERTICAL 1
255	2	Corretivo	44693	LAPIDADORA VERTICAL 1	Alinhar a esteira de saída. ALINHADA.			VERTICAL 1
272	2	Corretivo	44625	LAPIDADORA VERTICAL 1	A máquina desamou no painel; REELIGADO, MOTOR QUENTE.			VERTICAL 1
328	3	Corretivo	44630	LAPIDADORA VERTICAL 1	Dar uma olhada nos motores, estão saindo faíscas... (motivo/ Água); TROCADO			VERTICAL 1
329	3	Corretivo	44639	LAPIDADORA VERTICAL 1	Trocar o motor (7); MOTOR TROCADO.			VERTICAL 1
331	3	Corretivo	44681	LAPIDADORA VERTICAL 1	MOTOR POSIÇÃO 7 QUEIMOU. REALIZADO A TROCA DO MOTOR.			VERTICAL 1

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Após tratar as informações em conjunto com os manutentores da empresa, foi realizada a análise dos dados do relatório, sendo possível identificar as principais causas de parada e falhas observadas nos elementos de máquina.

A partir dessa análise, identificou-se que 82% das causas de paradas na seção de lapidação vertical estão relacionadas a quatro elementos de máquina, a saber: correias, polias, sapatas e motores elétricos. Alguns apontamentos mais detalhados contribuíram para a identificação dos problemas relacionados a esses elementos, tais como desgaste de engrenagens, regulagem de esticadores de correntes, vazamentos de água, curto circuito nos motores elétricos, entre outros.

Após a identificação dessas causas procedeu-se com a seleção das principais para a elaboração de FTA. Foram levados em consideração os possíveis efeitos dessas falhas sobre a capacidade de entregar as encomendas em conformidade com os requisitos estabelecidos pelo cliente, sobretudo os requisitos dimensionais.

Tendo em vista que a aplicação da FTA decorre da identificação e análise estruturada de falhas potenciais em um sistema. Procedeu-se com a abordagem dedutiva, isto é, foram identificados e definidos resultados reais indesejados, para que fossem estabelecidas contramedidas para os eventos causais daqueles resultados.

Algumas árvores de falhas foram elaboradas a partir após o desenvolvimento das seguintes etapas:

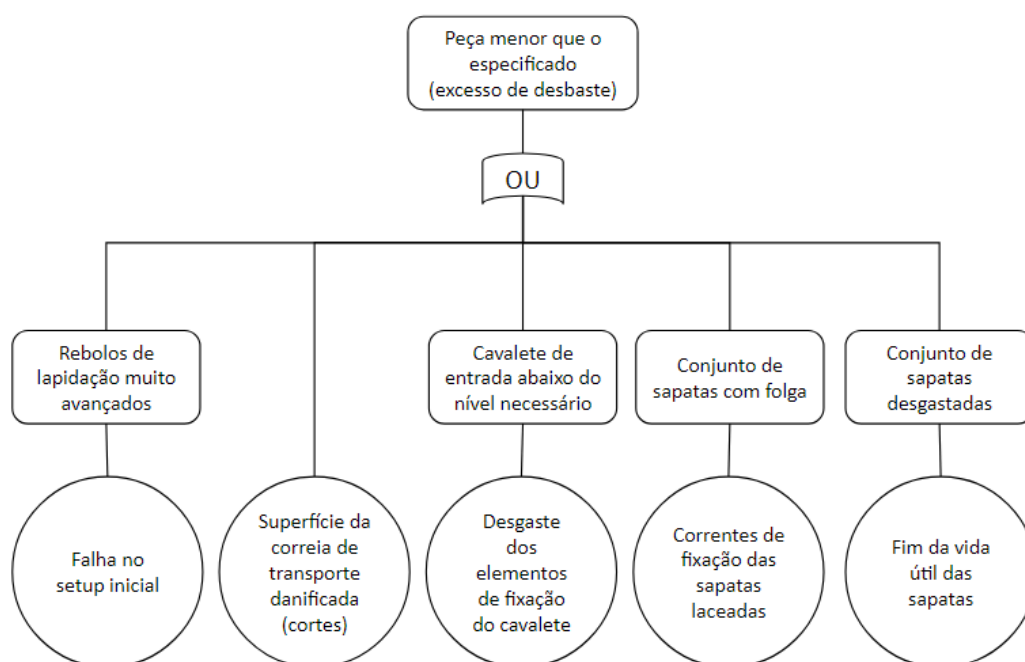
1. **Definição do evento de topo:** isto é, definir claramente a falha final ou resultado indesejado que se pretende analisar.
2. **Desdobramento do evento de topo em eventos intermediários e básicos:** um evento básico é o menor componente que contribui para um cenário específico de falha. Enquanto que um evento intermediário representa um nível contribuinte subsequente.
3. **Definição do escopo da análise:** trata-se da abrangência da análise e as limitações existentes.
4. **Construção do diagrama de árvore de falhas:** consistiu em elaborar uma representação visual dos cenários de falha através de uma estrutura semelhante à uma árvore. Posicionando-se o evento de topo no topo da árvore e conectando-o aos eventos intermediários; estes por sua vez foram conectados aos eventos básicos.
5. **Identificação e avaliação das causas:** para cada um dos eventos básicos foi identificado causas potenciais ou modos de falha. Considerando-se fatores relevantes

tais como, falhas operacionais, falhas nos elementos do sistema em análise, fatores externos e outros fatores delimitados no escopo da análise. E a avaliação das consequências de cada evento.

6. Determinação das relações lógicas: foram utilizadas portas lógicas para estabelecer as combinações entre os eventos. Uma porta lógica “E” significa que todos os eventos de entrada devem ocorrer para que o evento subsequente aconteça. Enquanto que uma porta lógica “OU” significa que ao menos um dos eventos de entrada deve ocorrer para que o evento subsequente aconteça.

As falhas definidas ao longo desse trabalho foram: (a) peça menor que o especificado (Figura 2), (b) peça maior que o especificado (Figuras 3 a 5), (c) peça fora do esquadro (Figura 6) não conformidade identificada como peça menor que o especificado é uma falha que resulta do excesso de desgaste durante o processo de lapidação. É um caso em que a máquina de lapidação do vidro opera em uma condição onde a quantidade de material desbastado está além do necessário. Isso faz com que a peça fique menor do que a dimensão especificada em projeto pelo cliente, ultrapassando a tolerância estabelecida pela norma NBR 14698.

FIGURA 2 – FTA para peça menor que o especificado.

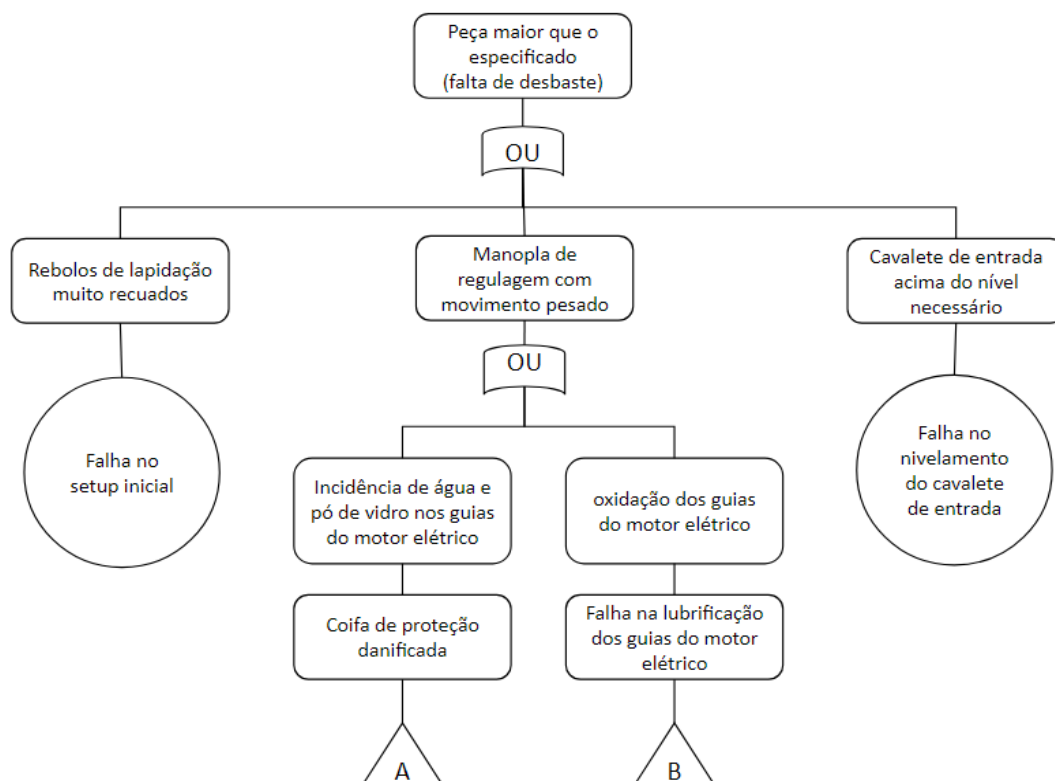


Fonte: Autoria própria (2024)

No que se refere aos eventos causais, o item falha no setup inicial será trabalhado através da elaboração de um manual para a execução do setup seguido de treinamento *on the job* para os colaboradores da lapidação. Os itens correia danificada (cortes), desgaste dos elementos de fixação do cavalete, correntes de fixação das sapatas laceada e fim da vida útil das sapatas, serão desdobrados em uma folha de checagem de equipamento para verificação do colaborador. Estes mesmos itens quando indicados como não conformes deverão sofrer ação de manutenção.

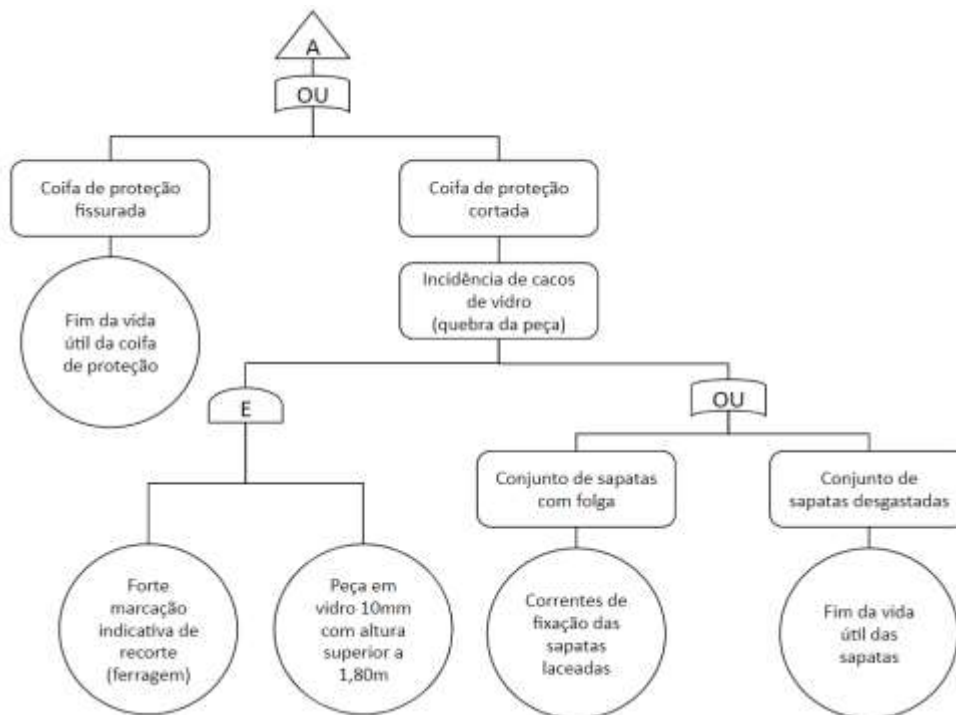
A não conformidade identificada como peça maior que o especificado resulta da falta de desgaste durante o processo de lapidação. É um caso em que a máquina de lapidação do vidro está em uma condição onde a quantidade de material desbastada não é suficiente, fazendo com que a peça fique maior do que a dimensão especificada em projeto pelo cliente, com desvio superior à tolerância estabelecida pela norma NBR 14698 (Figuras 3 a 5).

FIGURA 3 – FTA para peça maior que o especificado.



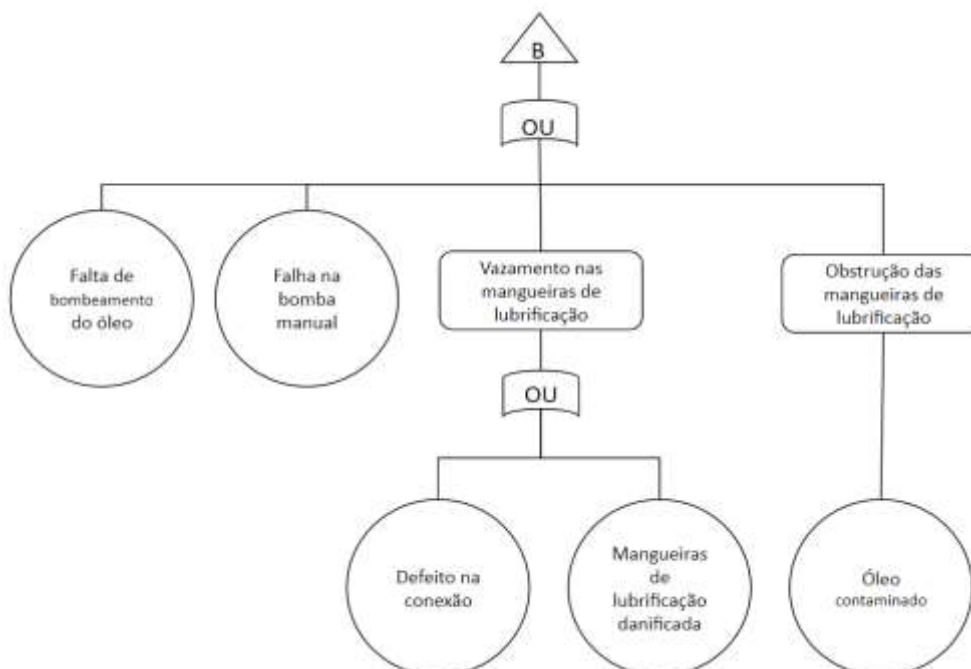
Fonte: Autoria própria (2024)

FIGURA 4 – continuação da FTA por conector A para peça maior que o especificado.



Fonte: Autoria própria (2024)

FIGURA 5 – continuação da FTA por conector B para peça maior que o especificado.



Fonte: Autoria própria (2024)

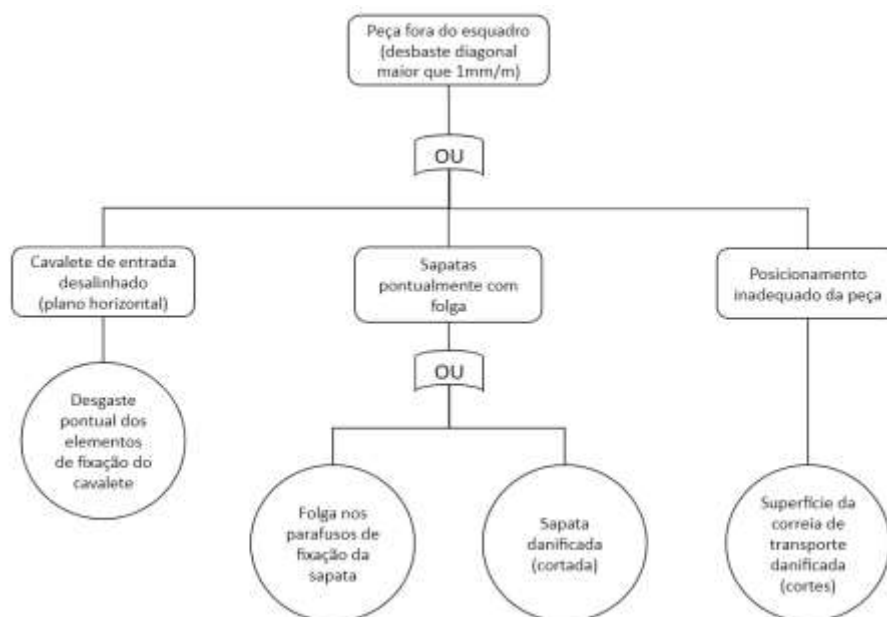
No que se refere aos eventos causais desta árvore de falhas, aos itens falha no *setup* inicial e falta de bombeamento do óleo será aplicada a mesma abordagem utilizada no caso de peça menor que o especificado. Os itens fim da vida útil da coifa de proteção, corrente de fixação das sapatas laceada, fim da vida útil das sapatas, falha na bomba manual e óleo contaminado, serão desdobrados em uma folha de checagem de equipamento para verificação do colaborador. Estes mesmos itens quando indicados como não conformes deverão sofrer ação de manutenção.

No que se refere aos itens forte marcação indicativa de recorte (ferragem) e peça em vidro 10mm com altura superior a 1,80m, ambos uma combinação de elementos provenientes do processo anterior à lapidação, será estabelecido um procedimento para que as peças com essas características sigam uma rota de produção alternativa em outro equipamento.

Quanto aos itens defeito na conexão e mangueiras de lubrificação danificadas, não estão facilmente acessíveis ao colaborador, portanto serão incluídas como itens a serem verificados no plano de manutenção preventiva.

A peça fora do esquadro é uma não conformidade em que a máquina de lapidação do vidro opera em uma condição onde a peça é processada fora dos limites de perpendicularidade. Isso faz com que o material seja removido em uma linha diagonal, o que resulta em uma peça na forma de um trapezoide, isto é, ao menos um dos lados não está em paralelo (Figura 6).

FIGURA 6 – FTA para peça fora do esquadro.



Fonte: Autoria própria (2024)

É uma falha que ocorre em função de 4 eventos básicos que decorrem exclusivamente de aspectos mecânicos: desgaste pontual dos elementos de fixação do cavalete, folga nos parafusos de fixação da sapata, sapata danificada (cortada) e superfície da correia de transporte danificada (cortes). Estes itens serão incluídos na folha de checagem de equipamento para verificação do colaborador e quando apontados como não conformes deverão sofrer ação de intervenção da manutenção.

Além das ações diretamente relacionadas aos eventos causais, foi estabelecido um procedimento para verificação amostral das peças por parte do colaborador, como forma de assegurar que a máquina está em condição de operação para entregar peças conforme.

A partir da elaboração das FTAs foi possível delinear ações de verificação e intervenção que os operadores poderão fazer no âmbito da manutenção autônoma e através das ações estabelecidas melhorar a disponibilidade das máquinas de lapidação vertical, objetivo principal da pesquisa. Assim, procedeu-se com a elaboração de uma lista (Figura 7) contendo as contramedidas estabelecidas para os eventos causais dos resultados indesejados, bem como estratégias de mitigação.

FIGURA 7 – Contramedidas estabelecidas para os eventos causais.

DEFEITO	FALHA	AÇÃO	RESPONSÁVEL
Peça menor que o especificado (excesso de desgaste)	Falha no setup inicial	Repetir procedimentos de ajuste dos rebolos	Operador
Peça menor que o especificado (excesso de desgaste)	Superfície da correia de transporte danificada (cortes)	Substituir a correia de transporte	Manutenção
Peça menor que o especificado (excesso de desgaste)	Desgaste dos elementos de fixação do cavalete	Substituir elementos de fixação	Operação / Manutenção
Peça menor que o especificado (excesso de desgaste)	Correntes de fixação das sapatas laceradas	Ajuste das correntes de fixação das sapatas (remoção de elos)	Manutenção
Peça menor que o especificado (excesso de desgaste)	Fim de vida útil das sapatas	Substituição das sapatas	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Falha no setup inicial	Repetir procedimentos de ajuste dos rebolos	Operador
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Fim da vida útil da coifa de proteção	Substituir a coifa de proteção	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Forte marcação indicativa de recorte (ferragem) e peça em vidro 10mm com altura superior a 1,80m	Ajustar a pressão de marcação (máquina de corte) e direcionar a peça para linha de lapidação horizontal	Operador (Corte)
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Correntes de fixação das sapatas laceradas	Ajuste das correntes de fixação das sapatas (remoção de elos)	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Fim da vida útil das sapatas	Substituição das sapatas	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Falta de bombeamento do óleo	Bombear 3 vezes a alavanca da bomba manual	Operador
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Falha na bomba manual	Instalação de bomba manual reserva	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Defeito na conexão da mangueira de lubrificação	Substituir a conexão da mangueira de lubrificação	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Mangueiras de lubrificação danificadas	Substituir a mangueira de lubrificação danificada	Manutenção
Peça maior que o especificado (falta de desgaste)	Óleo contaminado	Limpar o contêiner de óleo, aplicar jato de ar nas mangueiras	Manutenção
Peça fora de esquadro (desgaste diagonal maior que 1mm/m)	Desgaste pontual dos elementos de fixação do cavalete	Identificar visualmente os elementos desgastados e substituí-los	Operação / Manutenção
Peça fora de esquadro (desgaste diagonal maior que 1mm/m)	Folga nos parafusos de fixação da sapata	Aperto dos parafusos de fixação da sapata	Operação / Manutenção
Peça fora de esquadro (desgaste diagonal maior que 1mm/m)	Sapata danificada (cortada)	Substituição da sapata danificada (cortada)	Operação / Manutenção
Peça fora de esquadro (desgaste diagonal maior que 1mm/m)	Superfície da correia de transporte danificada (cortada)	Substituir a correia de transporte	Manutenção

Fonte: Autoria própria (2024)

Até o presente momento, muitas descobertas e melhorias foram conquistadas pelos envolvidos, mas ainda há a necessidade de mensurar os indicadores para comparar o cenário atual, pós implementação das árvores de falha, com o cenário anterior, aqui descrito.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os resultados da elaboração e aplicação as FTAs não tenham sido devidamente mensurados, é de entendimento dos envolvidos que a sua construção proporcionou oportunidades ímpares de aprofundamento do conhecimento a respeito da operação e do funcionamento dos equipamentos, como também das relações existentes entre partes específicas do equipamento e a qualidade das peças. Além disso, possibilitou delinear até que ponto os operadores da seção de lapidação vertical podem interferir no equipamento para garantir qualidade. Em decorrência da falta de maturidade da equipe de trabalho e da própria organização com a ferramenta, optou-se, inicialmente, por não avançar com as seguintes etapas de FTA:

- **Atribuir probabilidades:** Ou seja, avaliação da probabilidade de ocorrência de cada evento básico. Nesta etapa é importante a análise dos dados que compõem o histórico, conteúdo técnico, opinião de especialistas e outras fontes que possam contribuir para estimar a probabilidade de cada evento básico acontecer.
- **Calcular a probabilidade:** Consideração das probabilidades de ocorrência dos eventos básicos e as suas relações lógicas para determinar a probabilidade global de ocorrência do evento de topo.
- **Avaliação do risco:** Esta etapa objetiva ajudar a concentrar na abordagem dos problemas mais críticos. Avalie o risco global ao levar em consideração a combinação das probabilidades atribuídas e as respectivas consequências. Priorize os cenários de falhas baseados em seus níveis de risco.

Entende-se que procedimentos devem ser melhor descritos e treinamentos devem ser fornecidos à equipe para que a manutenção autônoma possa se tornar uma realidade na empresa.

Embora essa etapa ainda não tenha sido totalmente alcançada, já é possível notar um maior engajamento da equipe e uma melhora na disponibilidade dos equipamentos, bem como a redução de peças reprovadas o que impactará diretamente nos custos de operação.

Tais ações estão sendo executadas para que a empresa possa alcançar uma gestão mais eficaz.

REFERÊNCIAS

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 220-240. 2002.

COUTINHO, C. P. et al. Investigação-ação: metodologia preferencial nas práticas educativas. **Revista Psicologia, Educação e Cultura**, 13:2, p. 355-379. 2009.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM** - Total Productive Maintenance. Productivity Press, Inc. 1988.

OHNO, T. **Toyota Production System** - Beyond Large-Scale Production. Boca Raton: CRC Press. 1988.

ROBINSON, C. J.; GINDER, A. P. **Implementing TPM**: North American experience. Portland, USA: Productivity Press. 1995.

RÜTTIMANN, B. G. Going beyond triviality: The Toyota Production System - Lean Manufacturing beyond Muda and Kaizen. **Journal of Service and Management**, 9, p.140-149. 2016.

STONE, K. B. Four decades of lean: a systematic literature review. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 3, 2, p.112-132. 2012.

SUGIMORI, Y. et al. Toyota Production System and Kanban System Materialization of Just-in-Time and Respect-for-Human System. **The International Journal of Production Research**, v. 15, 6, p. 553-564, 1977.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **Lean Thinking**: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, The Free Press, New York, NY. 1996.