

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

**IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS DE SEGURANÇA E HABILIDADES DE
RESILIÊNCIA: Um estudo aplicado em um laboratório de engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul**

GIOVANA DA COSTA MASSIMINO

Orientador: TARCISIO ABREU SAURIN

PORTO ALEGRE
JANEIRO/2024

**IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS DE SEGURANÇA E HABILIDADES DE
RESILIÊNCIA ASSOCIADAS: Um estudo aplicado em um laboratório de engenharia
da universidade federal do rio grande do sul**

Giovana da Costa Massimino | UFRGS | giovanacosta1009@gmail.com

Tarcisio Abreu Saurin | UFRGS | saurin@ufrgs.br

Claudia Maria Dias Guerra Disconzi | UFRGS | claudiadguerra@hotmail.com

Resumo

Laboratórios acadêmicos são ambientes voltados à pesquisa e produção de conhecimento que apresentam características particulares. É comum que o quadro de colaboradores destes locais seja composto por uma parcela de estudantes sem nenhuma experiência profissional, que encontram nas atividades de pesquisa oportunidades de interagir com problemas do mundo real e construir pensamento científico, manipulando materiais e equipamentos. Estas características do ambiente de laboratório, e das atividades desenvolvidas, podem influenciar na ocorrência de acidentes (STEHLING *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2020). O objetivo principal deste trabalho é a identificação de riscos de segurança, utilizando a combinação das metodologias *hazard and operability study* (HAZOP) e *failure mode and effect analysis* (FMEA), e a identificação de habilidades de resiliência presentes nos ensaios de quinta-roda e pino rei, desenvolvidos no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS. O trabalho foi dividido em quatro etapas: (i) observação; (ii) identificação dos riscos; (iii) identificação de habilidades de resiliência (HR) e (iv) propostas de controle. Para os ensaios investigados, os riscos mecânicos foram os mais identificados (doze etapas), seguido dos riscos físicos (onze etapas), riscos ergonômicos (cinco etapas) e riscos químicos (três etapas). Com relação às habilidades de resiliência, identificou-se que, para o sistema sócio-técnico estudado, as habilidades são adquiridas ao longo do tempo e que é necessário experiência para sua consolidação.

Palavras-chave: Identificação de riscos, Laboratórios Acadêmicos, Habilidades de Resiliência, FMEA, HAZOP, Riscos de Segurança.

1. Introdução

Os laboratórios de Instituições Públicas de Ensino Superior (IPES), embora sejam instituições voltadas para pesquisa e produção de conhecimento, também respondem às necessidades da sociedade, interagindo com o setor público e privado (GROCHAU *et al.* 2010). Assim, é comum que os laboratórios de pesquisa sejam a primeira experiência profissional de muitos alunos no início da graduação, atuando como bolsistas no desenvolvimento de ensaios e atividades relacionadas a um projeto científico. É fundamental que os estudantes reconheçam e compreendam os perigos físicos e químicos relativos a essas atividades, a fim de estarem preparados para lidar com emergências (HILL, 2019).

De acordo com o estudo apresentado por Adane e Abeje (2012), a probabilidade de ocorrência de acidentes neste tipo de instituição aumenta significativamente devido à presença de funcionários ou estudantes sem experiência e que não estão cientes dos perigos e riscos enfrentados. Isto reforça a premissa de que o maior risco para as atividades de laboratório está no comportamento dos profissionais que atuam no ambiente, e não nas tecnologias disponíveis para minimizar e/ou eliminar tais riscos (PENNA *et al.*, 2010). Desta forma, as ações para o gerenciamento de riscos acabam sendo negligenciadas por parte das instituições, que pautam sua justificativa no tempo de exposição dos alunos às atividades laboratoriais ser relativamente baixo, o que, entretanto, não diminui o risco (SANTOS *et al.*, 2020).

Esta visão do fator humano como um risco ou perigo a ser resolvido está alinhada com a perspectiva de *Safety I*. Este mecanismo busca entender as causas da falha, presumindo que elas ocorram devido a componentes que podem ser decompostos em partes significativas do sistema, funcionando de forma bimodal (certo ou errado) (HOLLNAGEL *et al.*, 2014). Em contraponto a este olhar tem-se o *Safety II*, que busca compreender por que as coisas dão certo. Sob esta ótica, a variabilidade no desempenho cotidiano é uma forma de responder às condições variáveis, onde as pessoas exercem papel chave para a flexibilidade do sistema (HOLLNAGEL *et al.*, 2015).

Um número diverso de elementos interagindo dinamicamente, variabilidades imprevistas e resiliência caracterizam sistemas sócio-técnicos complexos (SSTC) (SAURIN e SOSA, 2013). Através das relações entre estes elementos, a resiliência representa a capacidade do sistema de compensar as variabilidades de entrada de uma atividade, de forma que a saída permaneça inalterada (HOLLNAGEL, 2012). Hollnagel (2011) afirma que para um sistema ser

considerado resiliente, quatro habilidades são essenciais: responder, monitorar, antecipar e aprender. Uma forma de compreender as condições em que a variabilidade no desempenho se torne difícil, ou impossível de monitorar e controlar é através do gerenciamento de riscos (HOLLNAGEL, 2015).

O gerenciamento de risco consiste na identificação, análise e gestão para determinar a melhor estratégia de redução da probabilidade de ocorrência, ou da gravidade do impacto do risco (GOVAN e DAMNJANOVIC, 2016). As técnicas de gerenciamento de riscos podem ser uma maneira de se alcançar o controle, identificando quais riscos aceitar, mitigar ou eliminar (SILVA, 2020) (a). Conforme explorado por Dunj^o *et al.* (2010), quando se trata da análise e identificação de riscos relacionados a condições de trabalho inseguras, a utilização combinada das metodologias *hazard and operability study* (HAZOP) e *failure mode and effect analysis* (FMEA), conhecido também como análise dos modos e efeitos de falha, aumenta a eficiência da análise, uma vez que o HAZOP se baseia no uso de diretrizes e parâmetros para identificar desvios na operação, enquanto o FMEA busca possíveis modos de falha.

Assim pontuado, o objetivo geral deste artigo consiste na identificação dos riscos relacionados a condições de trabalho inseguras, aplicado em um laboratório de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Como objetivos específicos têm-se: (i) aplicar as metodologias para identificar os riscos; (ii) identificar as habilidades de resiliência exigidas para enfrentar os riscos identificados, e (iii) propor formas de eliminar e/ou mitigar os riscos.

Este artigo estrutura-se em cinco seções principais: introdução, referencial teórico, procedimentos metodológicos, resultados e discussão e conclusões. Após esta seção de introdução, é apresentado o embasamento teórico-científico utilizado para a construção do estudo, com ênfase nos riscos encontrados em laboratórios e métodos de avaliação destes riscos. Na seção de procedimentos metodológicos são apresentadas as etapas de construção do estudo com relação ao atendimento do objetivo proposto.

2. Referencial Teórico

2.1. O Trabalho em Laboratórios de Pesquisa em Universidades

A produção de conhecimento científico e tecnológico apresentou avanços significativos na última década (SOUZA *et al.*, 2020). A perspectiva de desenvolvimento econômico pautado em inovação trouxe consigo um novo ambiente de articulação entre indústria, governos, sociedade e universidades, em um *framework* de Quádrupla Hélice (AUDY, 2017). Como

forma de responder aos estímulos, cada vez mais fortes, para o estreitamento dos laços com a sociedade e com a indústria, as universidades encontram nas atividades de laboratórios - calibrações, medições, análises, pesquisa e desenvolvimento (P&D) de métodos - uma forma de potencializar estes relacionamentos (RODIMA *et al.*, 2005).

Concomitante à contribuição nos avanços tecnológicos, as universidades desempenham o papel fundamental de aprimoramento do capital humano (HEATON *et al.*, 2019). Considerando que estudantes, em geral, apresentam pouca experiência para atuar no setor privado, as oportunidades de interagir com problemas do mundo real são disponibilizadas através da conexão dos estudantes com projetos de pesquisa (MUSCIO *et al.*, 2013; CEJAS, 2018). Através das atividades de pesquisa, os alunos têm a oportunidade de construir um pensamento científico, baseado em habilidades de observação, dedução e interpretação de trabalhos experimentais (REID e SHAH, 2006).

Os laboratórios universitários são ambientes de trabalho particulares em função de seus objetivos, que são voltados para o ensino, pesquisa e extensão (RANGEL *et al.*, 2014). Aspectos como falta de clareza sobre atribuições e responsabilidades, alta rotatividade de estudantes realizando testes e operando equipamentos e falta de flexibilidade nos processos (burocracia), por se tratar de uma unidade submetida às regras da universidade (GROCHAU *et al.*, 2010) são desafios no caminho da gestão de segurança (MARENDAZ *et al.*, 2013).

Estas características permitem que os laboratórios acadêmicos sejam caracterizados como sistemas sócio-técnicos complexos (SSCs), conforme Saurin e Sosa (2013). Isto porque apresentam uma diversidade de elementos - evidenciada pelos alunos de graduação e pós-graduação - interagindo de forma dinâmica entre si. Além disso, a presença de variabilidades não previstas e resiliência são fatores inerentes ao cenário de trabalho quando se trata de testes e experimentos (CEJAS, 2018).

No contexto de sistemas sócio-técnicos complexos, a engenharia de resiliência (ER) surge como um novo paradigma de gerenciamento de segurança (RIGHI *et al.*, 2015). A ER utiliza os *insights* provenientes das falhas em SSCs, considerando fatores organizacionais e aqueles que afetam o desempenho humano, no intuito de fornecer ferramentas que possibilitem um gerenciamento de riscos de forma proativa (WOODS, 2003). Sob essa perspectiva, a análise de perigos em SSCs deve ser focada na dinâmica e nas interações entre os fatores contribuintes (HOVDEN *et al.*, 2010).

As características do ambiente de laboratório de instituição de ensino e das atividades nele desenvolvidas podem influenciar na ocorrência de acidentes (STEHLING *et al.*, 2012;

SANTOS *et al.*, 2020). No ano de 2022, em *Isfahan Province*, Irã, um estudante foi vítima fatal e outro ficou ferido após um incêndio que ocorreu no laboratório de química da *Isfahan Industrial University (Laboratory tafeté institute)* (LABORATORY SAFETY INSTITUTE, 2023). No mesmo ano, no Brasil, uma explosão ocorrida em um laboratório do departamento de química da UFSCAR deixou 4 pessoas feridas (MARIN, 2022). Entretanto, é importante salientar que não existe um conceito legal para tratar deste tipo de acidente, visto que, os estudantes não são considerados trabalhadores, e que tampouco há obrigatoriedade de comunicação destes acidentes, ficando a cargo de cada instituição o discernimento sobre como lidar com o ocorrido (SANTOS, 2022).

De acordo com Allian *et al.* (2021), os processos que resultam em danos, sejam eles materiais ou imateriais, podem ter um efeito de ondulação sentido em várias cadeias externas. Desta forma, pode-se identificar nos últimos anos o crescimento de instituições acadêmicas que adotaram e implementaram uma cultura de segurança em seus ambientes de trabalho (WANG *et al.*, 2021) (a). Esses esforços não visam apenas evitar perda de ativos dos laboratórios, mas também adotar uma atitude mais consciente e responsável no ambiente de trabalho (NITSCHE *et al.*, 2019).

Novos estudos destacam a importância de conduzir uma identificação de perigos completa nos processos e operações envolvidos em escalas de laboratório (ESCOBAR-HERNANDEZ *et al.*, 2021). Para que isso ocorra, se faz necessário a aplicação de quatro pilares de segurança: (i) reconhecimento do risco; (ii) avaliação do risco; (iii) mitigação e (iv) preparo para agir em situações de emergência. Logo, muitos incidentes/acidentes ocorrem porque os riscos não foram entendidos e identificados (HILL, 2019). De acordo com o apresentado por Wu *et al.* (2020), os estudantes de graduação apresentam deficiências de conhecimento sobre as propriedades dos materiais utilizados e sobre como agir em emergências. Segundo os autores, os estudantes de pós-graduação também demonstram lacunas de conhecimento sobre segurança em laboratórios, mesmo com um grau de instrução mais elevado.

2.2. Riscos em Laboratórios

Vale ressaltar que risco e perigo não são sinônimos (SOUZA e LOURENÇO, 2015). Perigos são propriedades intrínsecas de substâncias ou condições, e podem ser eliminados removendo o agente, condição ou atividade que apresenta o perigo. Risco, por sua vez, é a probabilidade de um perigo resultar em uma consequência adversa. Um perigo não pode ser verdadeiramente reduzido, porém quando identificado, possibilita a implementação de

controles, enquanto o risco pode ser reduzido ou mitigado (ACS COMMITTEE ON CHEMICAL SAFETY, 2015). De acordo com Wahab *et al.* (2021), os riscos encontrados em laboratórios acadêmicos podem ser divididos em sete categorias: (i) químicos; (ii) elétricos; (iii) físicos; (iv) psicológicos; (v) ergonômicos; (vi) biológicos e (vii) mecânicos.

Os riscos químicos provenientes dos materiais são os mais importantes em laboratórios científicos (OMIDVARI e MANSOURI, 2014). A presença de solventes inflamáveis (MARENDAZ *et al.*, 2013) e reagentes líquidos (ATHQIYA *et al.*, 2019) é considerada como risco severo nestes ambientes. Além disso, os cilindros de gás, comumente utilizados em laboratórios, apresentam potencial de causar explosões físicas e químicas, induzindo também a explosão de outros equipamentos (ZHU *et al.*, 2020). A inflamabilidade, explosividade, toxicidade e corrosividade são as causas imediatas de acidentes em laboratórios (LIU *et al.*, 2023).

Produtos químicos podem chegar ao organismo através de quatro vias: inalação, ingestão, injeção e absorção pelo contato direto da pele (BHUSNURE *et al.*, 2018). A exposição a materiais químicos pode provocar efeitos na saúde que se manifestam de forma aguda - dores de cabeça, náusea e/ou vômito e feridas na pele - ou crônica - danos aos nervos, asma, dermatites e câncer (PAPADOPOLI *et al.*, 2020).

Escobar-Hernandez *et al.* (2021) apontam que os principais riscos nos ambientes de laboratório referem-se não somente aos riscos inerentes das substâncias, mas também às condições do processo e equipamentos utilizados. Os equipamentos utilizados em experimentos, que estão frequentemente operando em altas temperaturas e pressão, apresentam maior potencial de explosão (SCHNEIDER *et al.*, 2011). Em contrapartida, há uma gama de equipamentos que necessitam operar em baixas temperaturas para prevenir contaminações de amostras, crescimento bacteriano e o correto acondicionamento de reagentes (GOLBABAIEI *et al.*, 2022).

Riscos durante o manuseio de equipamentos podem incluir choque elétrico, ao ligar e desligar os aparelhos (ATHQIYA *et al.*, 2019), curto-circuito, devido à grande quantidade de equipamentos de alta potência ligados na mesma fiação, e descarga eletrostática (OZDEMIR *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2021). Além disso, devido às falhas de projeto, alguns instrumentos e equipamentos podem facilmente causar lesões mecânicas, pois não apresentam os devidos mecanismos de proteção (LI *et al.*, 2021). Os riscos mecânicos são observados com maior frequência em laboratórios de engenharia, onde há a presença de máquinas pesadas capazes de causar fratura, esmagamento, aprisionamento e cortes dos membros (WAHAB *et al.*, 2021).

Os riscos encontrados em laboratórios também podem ser da ordem ergonômica, como distúrbios musculoesqueléticos causados por horas de trabalho sentado (FAUZIAH *et al.*, 2020). As atividades estáticas e repetitivas, como análises em microscópios, pipetagem (processo de transferência de líquidos) e uso de instrumentos de medição são os fatores de maior contribuição para lesões. Estas lesões ocorrem, geralmente, quando há inflamação nos tendões, movimentação de músculos e articulações, ou compressão dos nervos e fluxo sanguíneo (MUKHTAD *et al.*, 2018).

Riscos de ordem biológica podem ser encontrados em laboratórios que utilizam amostras biológicas, como sangue e urina, bem como naqueles que utilizam amostras de material orgânico, como alimentos e plantas (ATHQIYA *et al.*, 2019). Os colaboradores que manipulam este tipo de material podem ser expostos a transmissão de doenças, infecções bacterianas e de pele (WAHAB *et al.*, 2021).

2.3. Aplicação de Métodos de Avaliação de Riscos

Existem inúmeras análises possíveis que objetivam identificar perigos, eventos e possíveis implicações na segurança dos colaboradores (ESCOBAR-HERNANDEZ *et al.*, 2021). As técnicas utilizadas para estas investigações, em laboratórios acadêmicos, incluem estudos de verificação hipotética apoiados por listas de verificações como *What-If/Checklist*, *hazard and operability study* (HAZOP) e análise dos modos e efeitos de falha (FMEA) (LEGGETT, 2012).

O HAZOP é um método de análise de riscos desenvolvido pela *British and International Chemical Company*, na década de 1960, com o propósito inicial de analisar processos da indústria química (SWANN e PRESTON, 1995). Desde então, o método apresentou grande difusão, sendo aplicado a diversos sistemas e operações complexas (GALANTE *et al.*, 2014). Pertencente ao grupo de análises qualitativas, o HAZOP é centrado na busca estruturada das causas de possíveis desvios de operação em diferentes pontos do sistema (SILVA *et al.*, 2020) (b). Sua aplicação requer habilidades de trabalho em equipe, visto que diversos especialistas devem articular perspectivas a fim de oferecer uma visão completa do processo (WILLEY *et al.*, 2020).

A aplicação do HAZOP se dá através da quebra do processo em diferentes nós, que serão analisados individualmente quanto a possíveis causas de anormalidades e suas consequências (ZHANG *et al.*, 2023). Os desvios são formulados usando palavras-guias (por exemplo: alta, baixa, não) e combinados com parâmetros da operação (por exemplo:

temperatura, fluxo) para fornecer um desvio “Alta temperatura” ou “Nenhum fluxo” (LEGGETT, 2012). Ao analisar um desvio, é aconselhável que se considere o pior cenário, portanto deve-se presumir que nenhuma proteção está instalada e que as consequências serão as mais severas possíveis (PUELLO *et al.*, 2020). A determinação do índice de risco associado ao desvio pode ser obtida através da multiplicação da frequência (F) pela severidade (S) de cada efeito identificado (CHERAGHI *et al.*, 2019).

O FMEA é um método eficiente utilizado na identificação, prevenção e controle de riscos potenciais (Wang *et al.*, 2021) (b). Inicialmente utilizado como uma documentação dos Procedimentos Militares das Forças Armadas dos EUA (BAIG e PRASANTHI, 2013), teve a sua aplicação difundida para os setores automotivos, industrial e, na década de 1990, foi aplicado pela primeira vez na área da saúde (CHIOZZA E PONZETTI, 2009). O FMEA avalia a influência das falhas através do número de prioridade de risco (RPN, do inglês *risk prority number*), calculado por meio da multiplicação de três indicadores - severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) - numa escala de 1 a 10 (CHANG *et al.*, 2013). Para os critérios de severidade e ocorrência a escala é interpretada de forma crescente, ou seja, quanto maior a significância, maior é a contribuição para a falha. Para o critério de detecção a lógica se inverte, de forma que, quanto maior for a detecção de uma falha, menor será sua pontuação (YAZDI *et al.*, 2017).

No entanto, identifica-se na literatura uma crítica ao modelo de cálculo do fator RPN, fundamentado em cinco pontos principais: (i) diferentes combinações de S, O e D podem resultar em um valor de RPN idêntico para riscos diferentes; (ii) S, O e D apresentam o mesmo grau de importância; (iii) o cálculo do RPN não considera as relações diretas e indiretas entre os modos de falha; (iv) o cálculo não segue a regra ponderada; (v) algumas instituições não possuem uma base de dados históricos, tornando difícil a determinação dos índices de ocorrência e detecção (SILVA *et al.*, 1997; CHANG *et al.*, 2013; KHASHA *et al.*, 2013; DAĞSUYU *et al.*, 2016).

Muitas combinações de métodos podem ser aplicadas para lidar com os pontos sensíveis do FMEA (BALARAJU *et al.*, 2019). Dağsuyu *et al.* (2016) utilizou a lógica *fuzzy*, que usa variáveis linguísticas para descrever os modos de falha, a fim de fornecer resultados mais realistas comparado aos valores absolutos. Peeters *et al.* (2018), por sua vez, aplicou uma combinação de FMEA com método *fault tree analysis* (FTA) - que usa uma árvore lógica para descrever causalidades - para entender as relações de causa e efeito unidirecionais. Para avaliar as relações diretas e indiretas entre os modos de falha é possível aliar à análise FMEA ao método

Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) (SEYED-HOSSEINI *et al.*, 2006). No trabalho de Hu *et al.* (2009), utilizou-se a combinação de FMEA e *fuzzy analytic hierarchy process* (FAHP) para determinação dos pesos relativos dos fatores.

A utilização combinada do FMEA com o HAZOP é uma forma eficiente de análise, visto que cada metodologia apresenta um enfoque central, com o FMEA buscando os potenciais modos de falhas, e o HAZOP os desvios na operação (DUNJÓ *et al.*, 2010). O estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2020), utilizou essa combinação de métodos para analisar os riscos físicos e ambientais no Laboratório de Eletroquímica e Corrosão (LSEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os autores utilizaram as análises provenientes do FMEA e HAZOP como *inputs* para a construção de uma ferramenta de *Checklist*, a ser utilizada no desenvolvimento dos experimentos. Ao todo foram analisados oito experimentos, ao que pode-se concluir que a ferramenta evitou efetivamente erros e restringiu riscos na execução dos ensaios (Silva *et al.*, 2020).

3. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos apresentados neste artigo buscam descrever o cenário de aplicação da identificação de riscos e classificar a pesquisa quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos. Ademais, se propõem a detalhar as etapas de realização do trabalho de modo a atender aos objetivos propostos.

3.1. Descrição do Cenário

O cenário deste estudo é o Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O LAMEF é um laboratório de ensino e pesquisa vinculado ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica (PPG3M), que também atua como uma unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII). Sua sede está localizada na cidade de Porto Alegre, contando também com outra unidade em uma cidade próxima. Considerando ambas as unidades, possui atualmente 143 colaboradores, dentre os quais 37 engenheiros contratados, 20 doutores, 27 mestres, 05 técnicos e 54 bolsistas de graduação.

A principal área de atuação do LAMEF é centrada em análises e desenvolvimento de materiais metálicos (eventualmente combinados com polímeros e/ou cerâmicos) para a indústria metalomecânica em geral ou segmentos específicos, como as indústrias automotiva,

ferroviária, aeroespacial e de óleo e gás, por exemplo. Outra frente de atuação do laboratório consiste na realização de ensaios acreditados na norma ABNT/NBR ISO/IEC 17025:2017, vigente desde 2010.

De forma mais específica, este trabalho se propõe a analisar os ensaios de fadiga em quinta-rodas e de resistência em pino rei. Estes ensaios são de natureza mecânica, onde a montagem é realizada, em sua maioria, de forma manual. As amostras manuseadas pelos operadores apresentam que cerca de 95 cm de comprimento, para a quinta-roda, e 20 cm de diâmetro para o pino rei. Além disso, o peso das amostras é significativo, 10kg (pino rei) e 160kg (quinta-roda), o que requer uso de empilhadeiras para movimentações.

Ambos os ensaios fazem parte do escopo acreditado, sendo o LAMEF um dos únicos laboratórios que realizam estes testes no Brasil. Tanto a quinta-roda, quanto o pino rei são componentes automotivos utilizados em caminhões, sendo a quinta-roda a peça responsável por fazer o elo entre o cavalo mecânico e a carreta, e o pino rei o item de acoplamento à quinta-roda permitindo o engate da carreta ao cavalo mecânico.

Em seu sistema de gestão, o laboratório especifica o procedimento para análise e prevenção de riscos, documentado sob identificação PG 024 Rev. 01 - Análise do gerenciamento de riscos em ensaios, registrado no formulário FG 023 Rev. 00 - Análise preliminar de perigo, sempre que um novo projeto/serviço inicia ou quando ocorrem mudanças significativas nas atividades de ensaio. Apesar da existência deste procedimento, foi evidenciado que o laboratório não adota sua aplicação conforme estipulado. A prática utilizada refere-se à elaboração e atualização de mapas de risco das áreas do laboratório, fixados na entrada dos respectivos locais.

O laboratório apresenta equipamentos de proteção coletiva (EPC), como: guarda-corpo, linhas de vida, kit de primeiros socorros, desfibrilador, maca, capelas químicas, chuveiro e lava-olhos, exaustores, lavadores de gases, detectores de fumaça e de gases, e sinalização diversa. Com relação aos equipamentos de proteção individual (EPI), o LAMEF possui um estoque que conta com equipamentos gerais, como: máscaras descartáveis, máscaras para gases da 3M, máscara para soldagem (elmo), luvas de proteção para diferentes aplicações, botinas com biqueira de aço, capacetes, protetores auriculares, óculos de proteção, aventais de raspa e *face shields*. Uniformes como jalecos, calças e macacões corta-fogo estão disponíveis para uso na entrada da área de ensaios mecânicos.

3.2. Classificação da Pesquisa

Com relação a sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, visto que apresenta o propósito prático de avaliar os riscos de segurança presentes nas atividades do laboratório (GIL, 2010). Para tanto, utiliza uma abordagem, majoritariamente, qualitativa, buscando compreender, descrever, interpretar e analisar aspectos relacionados à segurança na realização de atividades em laboratórios de pesquisa acadêmica. Quanto aos objetivos, o estudo é considerado como explicativo, dado que busca compreender os fatores de influência dos riscos e como eles afetam a segurança dos colaboradores. Em relação aos procedimentos, esta pesquisa classifica-se como um estudo de campo de caráter descritivo, uma vez que procura o aprofundamento de uma realidade específica, neste caso as atividades do laboratório, através da observação direta das atividades a fim de coletar explicações e interpretações (GIL, 2008).

3.3. Etapas da Pesquisa

O presente trabalho foi dividido em quatro macro etapas: (i) observação; (ii) identificação dos riscos; (iii) identificação de habilidades de resiliência (HR) e (iv) propostas de controle. Estas etapas foram desdobradas em micro etapas, apresentadas de forma mais detalhada nos parágrafos subsequentes.

A primeira etapa compreendeu a observação detalhada das condições do ambiente de laboratório, seus equipamentos, materiais e práticas utilizadas, a fim de identificar perigos presentes em cada um destes componentes. Esta investigação deu-se mediante três fontes de informação: (i) análise do layout e instalações físicas; (ii) análise documental dos equipamentos e procedimentos operacionais utilizados nos ensaios, e (iii) acompanhamento dos ensaios previstos no escopo em questão. Os dados obtidos a partir das três fontes supracitadas foram devidamente registrados em planilha eletrônica para análise posterior. No total foram realizadas em torno de 10 horas de observações não participantes.

A segunda etapa consistiu na aplicação dos métodos escolhidos para identificação dos riscos associados às atividades de ensaio, previamente delimitadas. Esta metodologia foi fundamentada no estudo de Silva *et al.* (2020), aplicado na identificação de riscos do Laboratório de Eletroquímica e Corrosão (LSEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Assim posto, a aplicação se constituiu a partir de três fases: (i) composição de time de especialistas; (ii) aplicação do HAZOP e (iii) aplicação do FMEA. A formação de um time de especialista se fez necessário para que, juntamente com a autora, fossem aplicadas as

metodologias HAZOP e FMEA. O FMEA foi utilizado para avaliar potenciais riscos físicos, enquanto o HAZOP os demais riscos encontrados.

A terceira etapa deste estudo utilizou a operacionalização proposta por Saurin *et al.* (2014) para a identificação de habilidades de resiliência. Para tal, foram utilizadas as análises geradas na primeira etapa (observação), bem como entrevistas semiestruturadas com colaboradores do time formado na segunda etapa. As habilidades identificadas foram agrupadas por similaridade e o grupo a que elas pertencem recebeu uma identificação representativa, por exemplo: elaborar estratégias para enfrentar situações de estresse e fadiga.

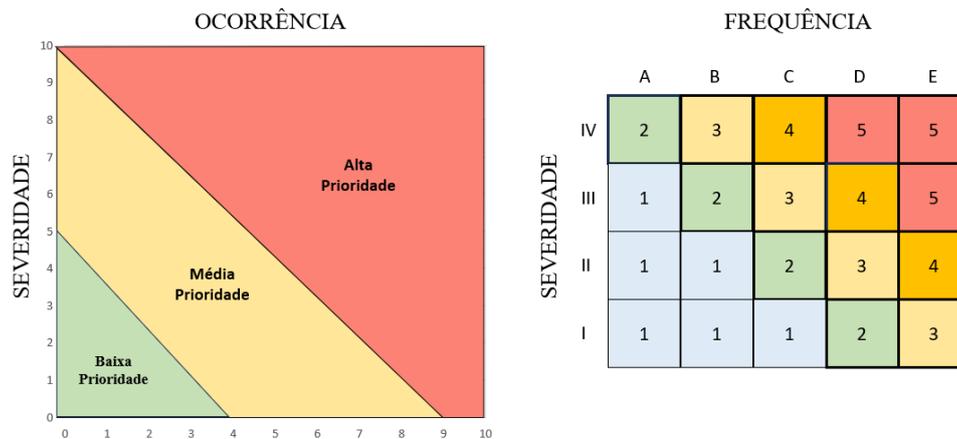
A quarta, e última, etapa correspondeu à elaboração de propostas de controle dos riscos classificados como risco não tolerável, conforme quantificação do risco. As propostas foram elaboradas de forma conjunta com o time de especialistas, que também se responsabilizou por designar pessoal capacitado para implementação, validação e monitoramento das medidas de controle. Estas informações foram utilizadas como *input* para a construção de um plano de ação utilizando a ferramenta 5W2H.

3.4 Quantificação do Risco

A quantificação do risco utilizou uma escala numérica para severidade, ocorrência e frequência, conforme Anexos I e II. A Figura 1, apresenta à direita, o gráfico de relação entre severidade e ocorrência e sua escala de cores, empregado na construção do FMEA. À esquerda, apresenta-se a matriz de riscos que relaciona frequência e severidade e sua escala de cores, utilizada na aplicação do HAZOP.

A mesma codificação de cores foi utilizada para a aplicação do FMEA e HAZOP, onde: vermelho representa riscos não toleráveis (índice 2); amarelo riscos moderados (índice 1); verdes riscos toleráveis (índice 0). Desta forma, o index dos riscos foi somado para obtenção do índice de risco final. Por exemplo, a ocorrência de um risco tolerável (0) e um risco moderado (1), resulta em um risco moderado ($0+1=1$). No caso de ocorrência de um risco moderado (1) e um risco não tolerável (2), o resultado será um risco não tolerável ($1+2=2$). Isto ocorre porque o nível não tolerável representa o nível máximo de risco, logo todas as somas maiores ou iguais a dois (2) serão alocadas nessa faixa, conforme exemplificado na Tabela 1.

Figura 1. Escala de riscos.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2020)

Tabela 1. Codificação de cores.

CLASSE	ÍNDICE	SOMA DO RISCO	RESULTADO
Risco não tolerável	2	0+2 ou 1+1 ou 1+2 ou 2+2	2
Risco moderado	1	0+1	1
Risco tolerável	0	0+0	0

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2020)

4. Resultados

Esta seção busca apresentar de forma detalhada os resultados obtidos em cada etapa da realização deste estudo, bem como discussões acerca deles. As subseções estão divididas conforme as etapas previamente definidas no item 3.3.

4.1 Observação

A etapa de observação foi composta por três subetapas: (i) análise do layout e instalações físicas; (ii) análise documental dos equipamentos e procedimentos operacionais utilizados nos ensaios, e (iii) acompanhamento dos ensaios previstos no escopo em questão.

4.1.1 Análise do Layout e Instalações Físicas

O ensaio de fadiga em quinta-roda e resistência em pino rei procuram simular estados reais de operação da peça em campo, reproduzindo as condições de arranque e frenagem

sofridas durante sua vida útil. Ambos os ensaios são normatizados conforme ABNT NBR NM ISO 8717:2003, para a qual o laboratório é acreditado através da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017. Por serem ensaios acreditados, são necessários diversos controles e documentos específicos para comprovação de competência técnica, validade dos resultados, treinamento e supervisão de pessoal.

Os experimentos são realizados em bancadas de testes dedicadas, operando com forças de até 250 kN, nos eixos x e y. As forças são transferidas para a amostra através de atuadores hidráulicos, continuamente abastecidos com óleo hidráulico e controlados a partir de bombas e servoválvulas Moog®. Estas, por sua vez, estão submetidas a controladores MTS® localizados em sala climatizada.

As bancadas para realização dos testes estão alocadas em um pavilhão de estrutura metálica, com pé direito de aproximadamente 9 m. Em virtude de suas dimensões, este ambiente não possui climatização e sua temperatura varia conforme a temperatura ambiente, o que dificulta o trabalho nos climas extremos, principalmente no verão. A NR 17 recomenda temperaturas entre 20 e 23° C para locais de execução de atividades que exijam intelecto e atenção constantes. Conforme Liu *et al.* (2024), a exposição ao calor pode gerar respostas fisiológicas como desconforto ocular, aumento da taxa metabólica, problemas respiratórios, fadiga, sonolência e dores de cabeça.

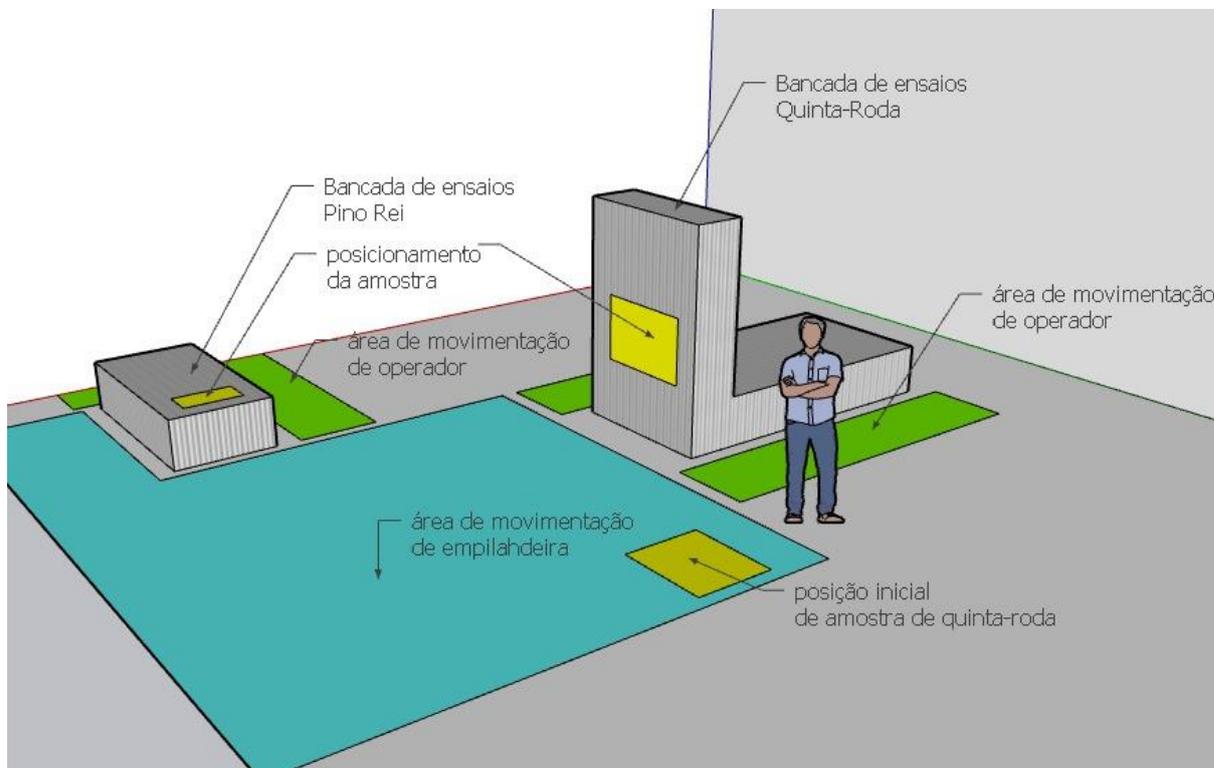
A iluminação do pavilhão é feita através de lâmpadas fixadas próximas ao teto e de iluminação natural provida das janelas de ventilação. A iluminação superior provoca sombras em pontos das bancadas, nos quais os operadores necessitam utilizar lanternas para clara visualização. Para estes pontos uma iluminação suplementar deveria ser projetada de forma a evitar ofuscamento, reflexos, sombras e contrastes excessivos, conforme indica a NR 17.

O piso do local é feito de concreto polido com pintura epóxi, facilitando a movimentação de empilhadeiras no local, visto que não apresenta desníveis referente a rejuntas ou lajotas. Apesar disso, o piso concentra poças de óleo que não são absorvidas pelo concreto e podem ser fontes de acidentes durante movimentação de operadores e de empilhadeiras.

As bancadas dos testes em estudo estão dispostas próximas uma da outra (cerca de 14 m linear), conforme ilustrado na Figura 2. Através da análise pode-se identificar que o local dispõe de pouco espaço para movimentação, principalmente para manobras que requerem uso de empilhadeira. Também se observa que o espaço destinado para movimentação dos operadores ao redor das bancadas é estreito, sendo necessário contornar as mangueiras hidráulicas que abastecem as bancadas. Apesar disso, devido ao layout ser do tipo posicional,

os operadores não necessitam percorrer grandes trajetos para realizar as etapas previstas na realização dos ensaios.

Figura 2. Layout das bancadas.



Fonte: Autora.

4.1.2 Análise Documental

Os documentos analisados nesta etapa foram procedimentos de ensaio, bem como lista de pessoal autorizado para a realização dos testes e a verificação da calibração dos equipamentos utilizados. A verificação da calibração e manutenção dos equipamentos foi realizada através de consulta ao sistema ERP SMARTLAB, onde as informações de cada equipamento são registradas e gerenciadas. Cada item analisado possui identificação unívoca, sendo sempre referenciado seguindo esta codificação, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Itens de análise para quinta-rodas e pino rei.

Item	Identificação	
	Quinta-Roda	Pino Rei
Procedimento de ensaio	PROENG-PE 145 Rev. 04	PROENG-PE 101 Rev. 09
Lista de pessoal autorizado	DC 027- Quinta-rodas	DC 027- Pino rei
Equipamentos utilizados	EQ 245, EQ 040, EQ 300, EQ 767	EQ 178, EQ 766, EQ 768

Fonte: Autora.

O procedimento de ensaio de fadiga em quinta-roda PROENG-PE 145 Rev. 04, apresenta todas as etapas de realização do teste de forma sequencial, porém não aprofunda o detalhamento das etapas, deixando margem para dúvidas do operador no momento do ensaio. Este procedimento não conta com fotos e/ou desenhos que possam auxiliar na consulta do operador, dificultando a busca por informação de forma rápida. Com relação ao procedimento de ensaio de resistência em pino rei PROENG-PE 101 Rev. 09, este também apresenta as etapas de realização do teste de forma sequencial e pouco detalhada, porém evidencia algumas etapas através de fotos, auxiliando o entendimento do leitor sobre a etapa referida.

Conforme Silva *et al.* (2020), o detalhamento das etapas, condições e parâmetros para a realização do teste deve ser detalhado no procedimento de ensaio, sempre que possível, acompanhado de fotos, figuras ou desenhos que facilitem o treinamento de novos colaboradores. Para ambos os ensaios, o treinamento de novos colaboradores é realizado mediante a leitura destes procedimentos e posterior acompanhamento e execução monitorada do ensaio. Dessa forma, entende-se que detalhar as etapas é fundamental para a compreensão dos colaboradores.

Atenta-se para o ponto que os dois procedimentos em questão apresentam em sua parte inicial orientações sobre a realização de inspeção visual dos equipamentos, na busca por vazamentos, problemas nos componentes elétricos e de fixação dos equipamentos, ou qualquer irregularidade antes do início da montagem do ensaio, mas o padrão de funcionamento não é apresentado. Caso o operador encontre alguma alteração, o responsável do ensaio deve ser acionado para realização de ação corretiva ou desativação do equipamento.

Todos os colaboradores treinados nos procedimentos são habilitados para a realização acompanhada dos ensaios e passam a integrar a lista DC 027 Rev 01, onde consta todo o pessoal autorizado para realizar os ensaios. Alguns colaboradores necessitam de treinamentos adicionais para executar partes específicas dos testes como, por exemplo, treinamento de empilhadeira (teórico e prático) e treinamento de MTS I. Estes treinamentos possuem sua própria lista de pessoal autorizado, conforme necessidade.

Através de verificação dos certificados de calibração no sistema SMARTLAB, identificou-se que os equipamentos utilizados nos testes estavam com sua calibração e manutenção em dia e foram avaliados em auditoria externa da norma NBR ABNT ISO/IEC 17025:2017, em julho de 2023. A periodicidade de calibração dos equipamentos é de um a dois anos (dependendo do equipamento), e alguns equipamentos somente necessitam calibração quando sua verificação

intermediária apontar desvios graves. A calibração dos equipamentos é realizada, obrigatoriamente, por laboratórios acreditados na norma supracitada.

4.1.3 Acompanhamento dos ensaios

Com relação a etapa de acompanhamento dos ensaios, foram acompanhados dois ensaios de fadiga em quinta-roda e dois ensaios de resistência em pino rei. Os primeiros ensaios foram observados no intuito de entender as etapas e parâmetros necessários para a realização dos testes, e os demais buscando comparar o trabalho prescrito com o trabalho real a partir dos procedimentos de ensaio previamente analisados.

Durante as observações foi possível identificar que para os dois testes analisados os riscos enfrentados são, na sua maioria, riscos mecânicos e físicos relacionados ao manuseio de equipamentos. Além disso, identificou-se a presença de riscos químicos, relacionados a substâncias tóxicas, e ergonômicos relacionados a posturas inadequadas e esforços intensos. Esses resultados condizem com o apontado na literatura para laboratórios acadêmicos, especialmente aqueles dedicados a atividades de engenharia onde a presença de equipamentos pesados incorre em riscos mecânicos e físicos aos colaboradores que realizam seu manuseio (e.g WAHAB *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021; ESCOBAR-HERNANDEZ *et al.* 2021). A Tabela 3 apresenta uma síntese das observações referentes aos ensaios de quinta-roda e de pino rei, apresentando os riscos identificados em cada etapa de realização destes. O relato completo das observações pode ser consultado no Apêndice I deste trabalho e a descrição das etapas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 3. Síntese da etapa de observação.

Etapa ensaio de quinta-roda	Etapa ensaio de pino rei	Perigo Identificado
(5), (6), (8), (9)	(5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12)	Mecânico: arranjo físico inadequado/ lesões devido ao manuseio de ferramentas/ queda de material pesado sobre membros/ aprisionamento de membros
(5), (8), (10), (11), (13), (14), (15)	(4), (5), (9), (11)	Físico: utilização de maquinário ruidoso
(9) e (11)	(6), (7), (13)	Ergonômico: exigência de postura inadequada / esforço físico intenso
(3), (7)	(3)	Químico: exposição a vapor inflamável/ ruptura na linha hidráulica

Fonte: Autora.

4.2 Identificação dos riscos

A etapa inicial para a identificação dos riscos necessitou da composição de uma equipe de especialistas na realização dos testes e de pessoal de áreas, para que pudessem contribuir com diferentes percepções. Por questão de privacidade e preservação de dados, os nomes dos integrantes da equipe serão omitidos e cada colaborador será identificado por um numeral. Desta forma, a Tabela 4 apresenta as características da equipe de especialistas formada para a identificação dos riscos.

Tabela 4. Perfil da equipe de especialistas.

Identificação	Sexo	Área de Formação	Atribuição
Especialista (1)	Masculino	Engenharia Mecânica	Engenheiro Júnior
Especialista (2)	Masculino	Engenharia de Materiais	Analista técnico
Especialista (3)	Masculino	Engenharia Metalúrgica	Bolsista de graduação

Fonte: Autora

Para a aplicação da metodologia HAZOP foram utilizadas as sequências identificadas nos procedimentos de ensaio como nós e as palavras-guias escolhidas foram: (i) nenhum; (ii) pouco e (iii) alto. O HAZOP foi utilizado nas etapas em que se observou a presença de riscos mecânicos, químicos e ergonômicos, avaliando como a operação poderia se desviar do padrão. O FMEA foi utilizado para avaliar as etapas em que se identificou riscos físicos, entendendo de que forma os equipamentos utilizados na etapa em questão poderiam falhar em realizar aquela operação. Para o caso em que se identificou a presença de riscos mecânicos/químicos/ergonômicos e físicos, a etapa do processo foi avaliada tanto pelo HAZOP, quanto pelo FMEA. A planilha completa das análises HAZOP e FMEA pode ser consultada nos Apêndices II, III, IV e V.

4.2.1 Identificação de riscos de ensaio de fadiga em quinta-roda

A identificação dos riscos relacionados ao ensaio de fadiga em quinta-roda analisou 11 etapas de execução do ensaio, das quais quatro foram analisadas exclusivamente pelo HAZOP, quatro exclusivamente pelo FMEA e três por ambas as metodologias, conforme Tabela 5. Cada uma das etapas será discutida individualmente nos parágrafos que seguem.

A etapa de verificação do sistema hidráulico na condição de alta pressão incorre em uma severidade crítica (III), gerando danos severos às linhas hidráulicas e lesões de gravidade moderada aos operadores em caso de ruptura na linha. Apesar disso, a frequência de ocorrência

desta falha é remota, visto que o sistema hidráulico está ligado à uma bomba que regula a passagem de óleo, e conseqüentemente, a pressão resultante.

Com relação à etapa de levantamento da contrachapa utilizando empilhadeira, uma alta velocidade de levantamento poderia incorrer na quebra da contrachapa com possibilidade de atingir o operador. Esta situação resulta em uma severidade crítica, porém com uma ocorrência extremamente remota. Através do FMEA identificou-se ainda, que caso a empilhadeira apresentasse danos estruturais na haste de elevação ou vazamentos no sistema hidráulico, poderia acarretar a queda da contrachapa durante a elevação, resultando em uma severidade grande com ocorrência de falhas ocasionais. Todas as empilhadeiras passam por manutenção preventiva periódica, sendo muito alta a chance de detecção de falhas nos seus sistemas e componentes internos.

Para a etapa de fixação do pino rei na bancada, as situações investigadas foram referentes a aplicação de forças menores do que o especificado ou maiores do que o especificado. A aplicação de forças menores resulta em concentração de tensão no(s) parafuso(s) menos torquados, podendo acarretar na quebra do pino rei durante a execução do ensaio. A aplicação de torque maior do que o especificado pode gerar a quebra do parafuso que recebeu mais força e, conseqüentemente, um aumento na rigidez da bancada de testes. As duas situações apresentam severidade crítica, visto que configuram danos severos à bancada e ao pino rei, porém a falha ocorreria durante o ensaio, onde não há contato direto com o operador. A ocorrência destas falhas foi considerada extremamente remota, visto que são utilizados torquímetros calibrados e segue-se um procedimento de torqueamento em “X” e em sequência, de forma a realizar a conferência de torque em cada parafuso.

Com relação à aplicação de graxa na superfície da quinta-roda, este é um parâmetro do tipo maior é melhor, então avaliou-se os desvios nenhum e pouco. A não existência de viscosidade é decorrente da não aplicação de graxa, resultando em danos a amostra, devido ao atrito intenso com a bancada de testes. Da mesma forma, pouca viscosidade decorrente da aplicação de pouca quantidade de graxa, bem como da aplicação de uma graxa com especificações diferentes, também resulta no atrito entre a amostra e a bancada, aumentando o ruído do teste. A verificação do coeficiente de atrito entre a quinta-roda e a bancada de testes é feita mediante teste com carga trativa, onde o coeficiente deve ser menor do que 0,15. As duas situações investigadas apresentaram frequência extremamente remota, sendo a falta de viscosidade com severidade catastrófica, enquanto pouca viscosidade severidade crítica.

O encaixe da quinta-roda na bancada de testes considera os parâmetros de pressão e velocidade. Com relação à pressão, o desvio se refere a falta de pressão no sistema, devido a válvula estar fechada ou a bomba desligada. A ocorrência dessas circunstâncias é remota e sua severidade é marginal, causando a interrupção do ensaio sem lesões aos operadores. Analisando a velocidade do encaixe, realizada através da utilização de empilhadeira, o caso de maior atenção seria a alta velocidade, pois acarretaria na colisão da empilhadeira com a bancada de testes. A severidade desta ação é crítica, visto que poderia gerar lesões aos colaboradores e aos equipamentos, entretanto a frequência desse desvio é remota. De forma conjunta, a utilização de empilhadeira ainda incorre na possibilidade de desabamento das lanças da empilhadeira durante a operação, devido a danos estruturais na haste da empilhadeira, vazamento no sistema hidráulico ou falha elétrica. Esta falha apresenta severidade séria, podendo gerar lesões aos operadores.

A fixação da quinta-roda na bancada é feita mediante utilização de torquímetro, da mesma forma que a fixação do pino rei na bancada. Os desvios de operação podem ser decorrentes da falta de calibração do torquímetro ou da falta de treinamentos dos operadores para utilizar este instrumento. A aplicação de força menor que o especificado apresenta severidade crítica, pois pode resultar na quebra da quinta-roda durante o ensaio. A aplicação de força maior do que o especificado também apresenta severidade crítica, visto que poderia resultar na quebra dos parafusos de fixação. Ambas as situações apresentam ocorrência extremamente remota devido a conferência de torque realizada.

A abertura da trava de segurança é necessária para acoplar a quinta-roda ao pino rei. Caso seja aplicada pouca força na abertura da trava, a mesma pode não abrir, o que resulta na interrupção do teste. Este fator apresenta severidade desprezível, pois não incorre em danos a propriedade ou aos colaboradores. Por outro lado, a aplicação de muita força na abertura da trava pode gerar a fadiga do operador, resultando em uma severidade marginal com frequência extremamente remota. Falhas no projeto da quinta-roda podem resultar na não abertura da trava de segurança, quebra estrutural da mesma e a desconexão durante o ensaio. O efeito destas falhas afeta o processo, mas ainda é seguro ao operador.

As etapas finais de avanços do atuador nos eixos horizontal, vertical e aplicação de carga máxima são etapas realizadas sem o contato direto do operador com o equipamento. As falhas analisadas nestas etapas decorrem dos modos de falha do atuador em realizar as operações solicitadas, conforme levantado na análise FMEA. Os modos de falha discutidos apresentam detecção muito alta, através do sistema de controle.

Tabela 5. Riscos do ensaio de fadiga em quinta-roda.

Ensaio: Fadiga em Quinta-Roda					
Operadores: Operador (1), Operador (2) e Operador (3)					
Etapa	Descrição da etapa	Perigo identificado	Análise HAZOP	Análise FMEA	Classificação do risco
1	Preenchimento do formulário de identificação do teste	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A
2	Configuração do teste em <i>software</i> dedicado	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A
3	Verificação do sistema hidráulico	Químico: Ruptura na linha hidráulica	Risco tolerável	-	Risco tolerável
4	Verificação das células de carga	Nenhum identificado	N.A	-	N.A
5	Levantamento da contrachapa rígida	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/ colisão)	Risco tolerável	Risco tolerável	Risco tolerável
6	Fixação do pino rei na bancada	Mecânico: lesões devido ao manuseio de ferramentas	Risco tolerável	-	Risco tolerável
7	Aplicação de graxa na superfície da quinta-roda	Químico: exposição a vapor inflamável	Risco tolerável	-	Risco tolerável
8	Encaixe da quinta-roda na bancada.	Mecânico: queda de material pesado sobre membros Físico: utilização de maquinário ruidoso	Risco tolerável	Risco moderado	Risco moderado
9	Fixação da quinta-roda e aplicação de torque nos parafusos	Mecânico: aprisionamento de membros Ergonômico: exigência de postura inadequada	Risco tolerável	-	Risco tolerável
10	Baixar a contrachapa rígida	Físico: utilização de maquinário ruidoso	Risco tolerável	Risco tolerável	Risco tolerável
11	Abertura da trava de segurança da quinta-roda	Físico: piso escorregadio Ergonômico: esforço físico intenso	-	Risco moderado	Risco moderado

12	Encaixe do pino rei na quinta-roda	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A
13	Avanço do atuador no eixo horizontal	Físico: utilização de maquinário ruidoso	-	Risco tolerável	Risco tolerável
14	Avanço do atuador no eixo vertical	Físico: utilização de maquinário ruidoso	-	Risco tolerável	Risco tolerável
15	Aplicação de carga máxima	Físico: utilização de maquinário ruidoso	-	Risco tolerável	Risco tolerável
16	Configuração final do teste	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A

Fonte: Autora

4.2.2 Identificação de riscos de ensaio de resistência em pino rei

A identificação dos riscos relacionados ao ensaio de resistência em pino rei analisou 11 etapas de execução do ensaio, das quais sete foram analisadas exclusivamente pelo HAZOP, uma exclusivamente pelo FMEA e três por ambas as metodologias, conforme Tabela 6. Cada uma das etapas é discutida individualmente nos parágrafos que seguem.

Com relação ao ensaio de resistência em pino rei, a etapa inicial de verificação do sistema hidráulico apresenta os mesmos resultados da etapa do ensaio de fadiga em quinta-roda, pois utiliza a mesma linha hidráulica, a mesma bomba e sistema de controle. Dessa forma, os desvios são os mesmos para ambos os ensaios, bem como sua severidade e frequência.

A remoção dos parafusos de fixação do atuador é uma etapa realizada utilizando parafusadeiras. Os modos de falha identificados para este equipamento são relacionados, principalmente, a desgastes de componentes internos da parafusadeira, problemas na bateria do equipamento, danos no mandril ou no botão de acionamento. A falha deste equipamento apresenta severidade mínima ou muito pequena, pois não afeta o usuário. A ocorrência destas falhas também foi mínima, com um raro número de falhas similares. Apesar disso, atualmente não há controles atuais que possam detectar estas falhas, logo sua detecção é quase impossível.

A etapa de levantamento do atuador é feita com auxílio de empilhadeira, onde o parâmetro de análise é referente a velocidade de elevação das lanças da empilhadeira portando o atuador hidráulico. Foram investigados os desvios nenhuma velocidade e alta velocidade, onde a alta velocidade apresentou uma severidade catastrófica incorrendo na ruptura da linha hidráulica e/ou queda do atuador, podendo atingir os operadores. Os dois desvios foram caracterizados como frequência extremamente remota de ocorrência. Para esta etapa, devido ao uso de empilhadeira, acrescenta-se os modos potenciais de falha do próprio equipamento, como a empilhadeira não conseguir levantar o atuador, levantar e perder altura, inclinar demais as lanças e desabamento das lanças enquanto movimentada. A ocorrências destas falhas é mínima e decorrem de problemas, sobretudo de falhas no sistema de elevação do equipamento.

A etapa de encaixe e fixação do pino rei na bancada de testes utiliza torquímetro para aplicação da força necessária. Assim, o parâmetro de análise utilizado foi força menor do que o especificado e força maior do que o especificado. As duas situações apresentaram severidade catastrófica, dado que a bancada é aberta e, em caso de quebra, os componentes poderiam atingir os operadores. Apesar disso, a frequência para estes desvios é extremamente remota.

Para a etapa de encaixe dos espaçadores o parâmetro analisado foi dimensão, considerando a dimensão do espaçador utilizado. O desvio analisado foi referente a uma

dimensão menor do que o necessário, visto que uma dimensão maior não encaixaria no pino rei. Como consequência da montagem de um espaçador menor, haveria folga entre os componentes, o que aumentaria o ruído provindo do teste e aumentaria a possibilidade de quebra de componentes.

O ajuste do deslocamento do atuador é realizado através da utilização de empilhadeira para posicionar o atuador no local correto. Para tal, é necessário que o operador de empilhadeira faça movimentos lentos e cuidadosos com as lanças do equipamento. Como forma de análise, utilizou-se o parâmetro velocidade alta como desvio da operação, resultando no não encaixe ou um encaixe torto do atuador no pino rei, com a possibilidade de atingir membros dos operadores durante a operação. A severidade desta falha é crítica, visto que oferece risco de lesões de gravidade moderada aos colaboradores. Ao utilizar empilhadeira incluí-se as falhas advindas do equipamento, conforme descrito na etapa de levantamento do atuador. Para esta etapa em específico destaca-se a falha referente a inclinação das lanças do atuador, visto que para a movimentação, as lanças precisam estar inclinadas para trás, de forma que o item não caia.

A montagem da raquete (componente do teste) é uma etapa feita para acoplar a haste do atuador à amostra. A aplicação de pouca força na montagem deste componente poderia gerar folga entre as partes, aumentando o ruído do teste. Por outro lado, a aplicação de uma força muito grande poderia “espanar” a rosca do parafuso, impossibilitando o seu torque. Estes desvios apresentaram frequência remota e severidade marginal, não incorrendo em danos aos colaboradores.

A fixação do atuador é realizada através de parafusadeira, da mesma forma que a remoção dos parafusos de fixação. Essa etapa, entretanto, apresenta maior risco, visto que os operadores necessitam fazer a fixação com todo o teste montado. Desta forma, além das possíveis falhas identificadas no FMEA, para esta etapa também foram analisados desvios em relação a força aplicada na fixação para mais (muita força) e para menos (pouca força). As duas situações apresentaram severidade marginal e frequência remota.

A montagem da goleira (componente do teste) é realizada para evitar a movimentação vertical do atuador durante a aplicação de carga. Assim, quanto mais força for aplicada na montagem, maior será a rigidez e menor será a liberdade de movimento do atuador, o que é desejado. A aplicação de pouca força na montagem da goleira acarretaria em forças compostas atuando sobre a amostra, alterando a validade dos resultados do teste.

O aperto final dos parafusos é realizado mediante aplicação de carga de compressão no atuador. Assim, foram analisados os parâmetros força, com relação à força do aperto, e carga

aplicada. Com relação ao parâmetro força foram verificados os desvios muita força e pouca força, onde ambos apresentaram severidade marginal e frequência remota. Para o parâmetro carga foram avaliados os desvios nenhuma carga e muita carga, com a aplicação de muita carga recebendo atenção especial, devido a sua severidade crítica de atingir o operador e causar danos à amostra.

Tabela 6. Riscos do ensaio de resistência em pino rei.

Ensaio: Resistência em Pino Rei					
Operadores: Operador (1), Operador (2) e Operador (4)					
Etapa	Etapa (descrição)	Perigo identificado	Análise HAZOP	Análise FMEA	Classificação do risco
1	Preenchimento do formulário de identificação do teste	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A
2	configuração do teste em <i>software</i> dedicado	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A
3	Verificação do sistema hidráulico	Químico: Ruptura na linha hidráulica	Risco tolerável	-	Risco tolerável
4	Remoção dos parafusos de fixação da bancada de teste	Físico: utilização de maquinário ruidoso	-	Risco moderado	Risco moderado
5	Levantamento do atuador	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/ colisão) / risco de queda sobre membros	Risco tolerável	Risco tolerável	Risco tolerável
6	Encaixe e fixação do pino rei na bancada de testes	Mecânico: queda sobre membros inferiores Ergonômico: esforço físico intenso	Risco tolerável	-	Risco tolerável
7	Aplicação de torque dos parafusos de fixação do pino rei	Mecânico: aprisionamento de membros; Ergonômico: exigência de postura inadequada	Risco tolerável	-	Risco tolerável
8	Montagem dos espaçadores	Mecânico: esmagamento de membros	Risco tolerável	-	Risco tolerável
9	Ajuste do deslocamento do atuador	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/ colisão) / risco de queda sobre membros	Risco tolerável	Risco tolerável	Risco tolerável
10	Montagem da raquete	Mecânico: esmagamento de membros	Risco tolerável	-	Risco tolerável
11	Fixação do atuador	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/ colisão) / risco de queda sobre membros	Risco tolerável	Risco moderado	Risco moderado
12	Montagem da goleira	Mecânico: queda sobre membros inferiores	Risco tolerável	-	Risco tolerável

13	Aplicação de carga de compressão para aperto dos parafusos da raquete	Ergonômico: esforço físico intenso	Risco tolerável	-	Risco tolerável
14	Configuração final do teste	Nenhum identificado	N.A	N.A	N.A

Fonte: Autora

4.3 Identificação das habilidades de resiliência

A etapa de identificação das habilidades de resiliência utilizou um questionário semiestruturado, composto de três blocos de perguntas norteadoras, conforme Apêndice A. O primeiro bloco buscou entender, de forma geral, a rotina do entrevistado e uma situação real, onde suas habilidades foram testadas. O segundo bloco consistiu em perguntas de aprofundamento sobre a situação relatada pelo entrevistado, no intuito de compreender todas as nuances do ocorrido. O terceiro e último bloco também procurou aprofundamento do relato, porém utilizou questões hipotéticas para instigar a percepção do entrevistado sobre possíveis desfechos diferentes da situação apresentada.

Foram entrevistados dois colaboradores, um com 10 anos de experiência no laboratório e outro com um mês de experiência. A intenção dessa amostra é entender como colaboradores, em diferentes momentos da carreira, lidam com as situações adversas da rotina, buscando pontos de resiliência. As entrevistas foram gravadas (áudio) e sua transcrição foi lida e relida múltiplas vezes, tanto pela autora, quanto pela coorientadora, para que fosse possível identificar as HR. Através da leitura da transcrição das entrevistas, foi possível identificar grupos comuns de habilidades desenvolvidas, agrupadas por similaridade, conforme Tabela 7.

A partir das entrevistas realizadas e das observações, foi possível identificar quatro grupos de habilidades de resiliência no desenvolvimento dos ensaios investigados: (i) gerenciar equipes durante a ocorrência de falhas; (ii) elaborar estratégias para a identificação da falha; (iii) elaborar estratégias para a solução da falha e (iv) tomar decisões sobre soluções.

O gerenciamento da equipe durante uma falha é o ponto inicial para sua resolução, visto que é necessário a readequação das atividades, de forma que os colaboradores possam dedicar tempo para investigar a ocorrência e buscar soluções. Este é um ponto relevante quando tratamos da segurança dos operadores, pois cabe a alta gestão evidenciar que as atividades podem ser reorganizadas e que a prioridade dos colaboradores é a busca pela solução.

A busca por estratégias para identificar a falha mostrou habilidades, que são desenvolvidas pelos operadores ao longo do tempo, atuando na montagem dos ensaios. A capacidade de diferenciar sons em uma operação normal de sons em uma operação problemática, bem como a diferença entre uma poça de óleo devido a lubrificação natural dos componentes e de uma poça de óleo devido a vazamentos, são exemplos dessas habilidades construídas. Essas habilidades permitem que os operadores identifiquem falhas ocultas e condições não seguras de operação, antes mesmo da ocorrência de uma falha catastrófica, o que pode ser crucial para a segurança do operador e integridade da operação.

De forma similar, o desenvolvimento de soluções para a falha ou condição não segura são habilidades adquiridas com a vivência destas situações. Algumas situações requerem parada total para ações corretivas, como a substituição de equipamento, enquanto outras podem ser resolvidas com ajustes e customização de uma ferramenta ou material. Nesse sentido quanto mais conhecimento se tem da operação, maior é a clareza sobre qual destas opções é a mais segura e viável, pois nem sempre a opção viável é a mais segura.

A tomada de decisão acerca de uma solução é um ponto crítico no sistema sócio-técnico, visto que cada decisão pode alterar de forma significativa o resultado da operação, incluindo a segurança dos operadores. A utilização de experiência passadas e a discussão com colegas sobre pontos de não atendimento, são ações que buscam reduzir o risco da tomada de decisão.

Tabela 7. Habilidades de resiliência identificadas.

HR 1: Gerenciar equipes durante a ocorrência de falhas
Reorganizar, em caráter de urgência, as atividades da equipe
Manter a confiança de que a equipe é capaz de solucionar o problema
Estimular a equipe a pensar em saídas para a dificuldade encontrada
Realizar reuniões para levantar hipóteses de causa do problema
HR 2: Elaborar estratégias para identificação da falha
Identificar falhas a partir de sons diferentes no ensaio
Identificar falhas a partir da visualização de movimento do atuador
Identificar falhas a partir da visualização de vazamento de óleo
Identificar falhas através de <i>interlocks</i> no sistema
HR 3: Elaborar estratégias para solução da falha
Corrigir os erros encontrados de forma rápida
Buscar ajuda com outras equipes para encontrar uma solução
Customizar soluções através do uso de materiais e ferramentas disponíveis
Ponderar entre a melhor solução e a solução viável
HR 4: Tomar decisões sobre soluções adotadas
Correr riscos ao tomar decisões de grande impacto
Aprender, com a experiência, a tomar decisões mais assertivas de forma rápida
Discutir e identificar fatores de não atendimento nos testes.

Fonte: Autora.

4.4 Propostas de Controle

Para os ensaios investigados não foram identificados riscos da classe não tolerável. Ainda assim, a partir das observações e análises realizadas foram elaboradas propostas de controle e intervenções no ambiente, de forma a reduzir os riscos encontrados, conforme Tabela 8. As medidas relacionadas ao espaço físico se referem a instalação de termo-higrômetros para controle da temperatura e humidade do local, bem como a instalação de ventiladores para proporcionar maior conforto térmico aos operadores durante a execução dos ensaios. Além disso, a instalação de iluminação nos pontos de sombra das bancadas é uma proposta que busca proporcionar aos operadores maior autonomia nas etapas de fixação, visto que poderão trabalhar utilizando as duas mãos, não sendo necessário segurar lanternas.

Com relação à utilização de torquímetro, atualmente não há um treinamento formal sobre os modelos e funcionamento da ferramenta que, apesar de simples, apresenta pontos de atenção (e possível erro de operação) como sentido de aperto e troca de unidade. Esses pontos precisam ser verificados antes do início do ensaio para evitar desvios na operação. Assim, propõem-se a elaboração de um checklist de verificação para estes itens.

Da mesma forma, a utilização de parafusadeiras não apresenta um checklist de verificação, a ser feito antes do início da operação, para identificar possíveis falhas. Entende-se que este equipamento também necessita de treinamento, visto que o torque dos parafusos será dado pela própria parafusadeira. Em conjunto com estas propostas, sugere-se que os cachimbos de tamanhos diferentes, daqueles utilizados pela equipe, sejam retirados do carrinho de ferramentas e devolvidos ao estoque geral de forma o erro. Para aqueles que realmente são utilizados, indica-se a identificação colorida com marcador permanente, facilitando a identificação visual destes itens.

Com relação aos procedimentos de ensaio propõem-se que sejam revisados, para que as etapas sejam melhor detalhadas e aprofundadas, utilizando recursos visuais, como fotos e desenhos, para auxiliar na compreensão dos colaboradores. Todas as práticas anteriormente citadas, caso aprovadas pela equipe, deverão constar na nova revisão dos procedimentos de ensaio.

Tabela 8. Plano de controle 5W2H.

O que? <i>(What)</i>	Por que? <i>(Why)</i>	Quem? <i>(Who)</i>	Quando? <i>(When)</i>	Como? <i>(How)</i>	Quanto custará? <i>(How much)</i>
Compra de termo-higrômetro	Realizar o controle de umidade e temperatura no local dos ensaios	Analista da qualidade	jan/24	Compra direta	R\$ 80,00
Instalação de termo-higrômetro	Realizar o controle de umidade e temperatura no local dos ensaios	Operador 3	jan/24	Fixação na coluna lateral	-
Compra de lâmpadas	Iluminação superior faz sombra em pontos de fixação da bancada	Operador 2	fev/24	Compra direta	R\$ 300,00
Instalação de lâmpadas na bancada	Iluminação superior faz sombra em pontos de fixação da bancada	Equipe de manutenção	fev/24	Fixação nos pontos de sombra	-
Compra de ventilador industrial	Calor intenso no local de execução dos ensaios	Operador 3	jan/24	Compra direta	R\$ 2.000,00
Instalação de ventilador industrial	Calor intenso no local de execução dos ensaios	Equipe de manutenção	fev/24	Fixação na parede acima das bancadas	-
Elaborar checklist de verificação de torquímetros	Não há controle	Operador 2	mar/24	Fazer o levantamento dos modelos de torquímetro disponíveis; Listar etapas de verificação	-

Elaborar treinamento teórico e prático sobre utilização e modelos de torquímetro	Não há treinamento	Operador 2	abr/24	Levantar dúvidas frequentes de utilização dos torquímetros; Levantar erros já cometidos na utilização da ferramenta; Verificar manual de uso	-
Elaborar treinamento teórico e prático sobre a trava de segurança da quinta-roda	Não há treinamento	Operador 2	mai/24	Levantar dúvidas frequentes sobre a trava; Levantar erros já cometidos na abertura; Verificar instruções do fabricante	-
Elaborar checklist de verificação para as parafusadeiras	Não há controle	Operador 3	mar/24	Fazer o levantamento dos modelos de parafusadeira disponíveis; Listas etapas para verificar a bateria, os botões e o mandril	-
Elaborar treinamento teórico e prático sobre utilização de parafusadeiras	Não há treinamento	Operador 3	mai/24	Levantar dúvidas frequentes de utilização da ferramenta; Levantar erros já cometidos na utilização da ferramenta; Verificar manual de uso.	-

Retirar cachimbos de tamanhos diferentes do carrinho de ferramentas	Evitar seleção de cachimbo que não encaixa	Operador 4	jan/24	Medir todos os cachimbos disponíveis e devolver ao estoque aqueles que não encaixam nos parafusos utilizados	-
Marcar cachimbos utilizados com marcador permanente	Evitar seleção de cachimbo que não encaixa	Operador 4	jan/24	Fazer uma marcação colorida com marcador industrial nos cachimbos utilizados no ensaio	-
Fazer revisão no procedimento de ensaio de quinta-roda e pino rei	Procedimentos não detalham as etapas	Operador 1	Mai/24	Detalhar as etapas dos ensaios de forma completa; Adicionar fotos e imagens para complementar as etapas.	

Fonte: Autora.

5. Conclusões

O presente estudo atingiu seu objetivo geral de identificar os riscos e habilidades de resiliência presentes na realização dos ensaios de fadiga em quinta-roda e resistência em pino rei. A busca e seleção de uma metodologia de análise de riscos para um ambiente de laboratório utilizou como premissa as necessidades específicas destes ambientes, optando-se pela metodologia de Silva *et al.* (2020), anteriormente aplicada no laboratório de corrosão da Universidade Federal do Paraná.

Com relação a metodologia utilizada para identificação e quantificação dos riscos, identificaram-se restrições para a análise dos ensaios investigados. O HAZOP é uma metodologia eficiente que proporciona *insights* sobre a operação, oferecendo melhores resultados quando analisa sistemas contínuos. Assim, foi necessário adaptar a metodologia utilizando as etapas como nós, para que a análise pudesse ser realizada. Apesar disso, o entendimento da equipe foi maior com essa ferramenta, devido ao uso de palavras-guias na construção dos desvios. O FMEA, apesar de ser uma metodologia mais aplicável para o trabalho desenvolvido, apresentou limitações de caráter técnico, visto que os colaboradores possuíam o conhecimento sobre a operação dos equipamentos, mas não sobre seus componentes, o que inviabilizou uma análise mais profunda das falhas possíveis neste cenário.

A aplicação combinada das duas metodologias retornou uma análise interessante, visto que foi possível investigar a operação e o equipamento de formas separadas, e posteriormente, unir os modos potenciais de falha advindos das duas fontes, em uma visão geral sobre cada etapa do processo. Desta forma é possível rastrear as falhas, caso ocorram, identificando em que etapa do processo elas ocorreram e consultar, nas análises já realizadas, as causas potenciais.

Através das etapas propostas de observação e identificação dos riscos foi possível validar os principais riscos apontados na literatura para laboratórios acadêmicos, principalmente os que se destinam as atividades de engenharia (e.g., WAHAB *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021; ESCOBAR-HERNANDEZ *et al.* 2021). Os riscos mecânicos foram os mais identificados na etapa de observação, estando presentes em doze etapas, seguido dos riscos físicos que foram observados em onze etapas. Para os ensaios investigados, os riscos ergonômicos foram identificados em cinco etapas e os riscos químicos em apenas três.

Por meio das entrevistas realizadas para identificação das habilidades de resiliência pode-se entender que, para o sistema sócio-técnico estudado, as habilidades são adquiridas ao longo do tempo e que é necessário experiência para consolidar certas habilidades, como por

exemplo, “identificar falhas a partir de um som”. Os dois entrevistados, apesar de apresentarem níveis de conhecimento e experiências diferentes, convergiram para o mesmo grupo de habilidades desenvolvidas pela equipe na execução dos ensaios em questão.

Para trabalhos futuros, sugere-se a replicação da metodologia para outros ensaios desenvolvidos pelo laboratório, a fim de identificar se as limitações encontradas no presente trabalho se verificam para ensaios de outras naturezas predominantes como, por exemplo, os ensaios com maior manipulação de produtos químicos. Além disso, uma análise de riscos comparativa entre - ensaios com acreditação e ensaios sem acreditação - seria interessante para identificar a contribuição do atendimento aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 nos riscos identificados.

Referências Bibliográficas

ACS COMMITTEE ON CHEMICAL SAFETY. (2015). **Identifying and Evaluating Hazards in Research Laboratories.**

ADANE, L., & ABEJE, A. (2012). **Assessment of familiarity and understanding of chemical hazard warning signs among university students majoring chemistry and biology: a case study at Jimma University, Southwestern Ethiopia.** *World Applied Sciences Journal*, 16(2), 290-299.

ALLIAN, A. D., FLANAGAN, R. C., MENTZER, R., SPERRY, J. B., XIA, H., & ZHAO, R. (2021). **Precompetitive Collaborations in the Pharmaceutical Industry: Process Safety Groups Work Together to Reduce Hazards, from R&D Laboratories to Manufacturing Facilities.** *ACS Chemical Health & Safety*, 28(5), 297-302.

ATHQIYA, A. A., HAQI, D. N., ALAYYANNUR, P. A., PASKARINI, I., & SUGIHARTO, F. M. (2019). **Hazard identification, risk assessment, and determining controls in laboratories.** *Indian Journal of Public Health Research & Development*, 10(7), 877-883.

AUDY, J. (2017). **A inovação, o desenvolvimento e o papel da Universidade.** *Estudos avançados*, 31, 75-87.

BAIG, M. M. H. A., & PRASANTHI, S. G. (2013). **Failure Modes and Effect Analysis of a Mechanical Assembly by Using Mil-Std 1629a Method.** *the moon*, 13(13).

BALARAJU, J., RAJ, M. G., & MURTHY, C. S. (2019). **Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine—A case study.** *Journal of Sustainable Mining*, 18(4), 257-268.

BHUSNURE, O. G., DONGARE, R. B., GHOLVE, S. B., & GIRAM, P. S. (2018). **Chemical hazards and safety management in pharmaceutical industry.** *Journal of Pharmacy Research*, 12(3), 357-369.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Secretaria do Trabalho. Secretaria de Inspeção do Trabalho. Departamento de Segurança e Saúde do Trabalhador. Comissão Tripartite Paritária Permanente. Normas Regulamentadoras. NR. Brasília, 22 out. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora>. Acesso em: 15 jan. 2024.

CEJAS, A.J.D. (2018). **Aperfeiçoamentos em um framework para análise de folgas em sistemas sócio-técnicos complexos: aplicação em um laboratório químico.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade federal do Rio Grande do Sul.

- CHANG, K. H., CHANG, Y. C., & TSAI, I. T. (2013). **Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision-making trial and evaluation laboratory approach.** *Engineering Failure Analysis*, 31, 211-224.
- CHERAGHI, M., BALADEH, A. E., & KHAKZAD, N. (2019). **A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities.** *Safety science*, 114, 12-22.
- CHIOZZA, M. L., & PONZETTI, C. (2009). **FMEA: a model for reducing medical errors.** *Clinica chimica acta*, 404(1), 75-78.
- DAĞSUYU, C., GÖÇMEN, E., NARLI, M., & KOKANGÜL, A. (2016). **Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit.** *Computers & Industrial Engineering*, 101, 286-294.
- DUNJÓ, J., FTHENAKIS, V., VÍLCHEZ, J. A., & ARNALDOS, J. (2010). **Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review.** *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), 19-32.
- EBRAHEMZADIH, M., HALVANI, G. H., SHAHMORADI, B., & GIAHI, O. (2014). **Assessment and risk management of potential hazards by failure modes and effect analysis (FMEA) method in Yazd Steel Complex.** *Open Journal of safety science and Technology*, 4(03), 127.
- ESCOBAR-HERNANDEZ, H. U., SHEN, R., PAPADAKI, M. I., POWELL, J. A., ZHOU, H. C., & WANG, Q. (2021). **Hazard Evaluation of Metal–Organic Framework Synthesis and Scale-up: A Laboratory Safety Perspective.** *ACS Chemical Health & Safety*, 28(5), 358-368.
- FAUZIAH, R., ALAYYANNUR, P. A., HAQI, D. N., & HIDAYAT, S. I. (2020). **Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control (HIRADC) Method in a University Laboratory in Surabaya, Indonesia.** *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 14(1).
- GALANTE, E., BORDALO, D., & NOBREGA, M. (2014). **Risk assessment methodology: quantitative HazOp.** *Journal of Safety Engineering*, 3(2), 31-36.
- GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, ed 5,2010.
- Gil, A. C. (2008). **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. Editora Atlas SA.
- GOLBABAEL, F., AZRAH, K., GOODARZI, Z., AHMADI, O., & KARAMI, E. (2022). **Risk assessment of cold stress in petroleum transfer station in the northwestern regions of Iran: Subjective and field measurements.** *Journal of Thermal Biology*, 110, 103335.

GOVAN, P.; DAMNJANOVIC, I.(2016). **The Resource-Based View on Project Risk Management.** *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 142, n. 9, p. 04016034, 2016.

GROCHAU, I. H., FERREIRA, C. A., FERREIRA, J. Z., & TEN CATEN, C. S. (2010). **Implementation of a quality management system in university test laboratories: a brief review and new proposals.** *Accreditation and Quality Assurance*, 15, 681-689.

HEATON, S., SIEGEL, D. S., & TEECE, D. J. (2019). **Universities and innovation ecosystems: A dynamic capabilities perspective.** *Industrial and Corporate Change*, 28(4), 921-939.

HILL Jr, R. H. (2019). **Recognizing and understanding hazards—The key first step to safety.** *Journal of Chemical Health and Safety*, 26(3), 5-10.

HOLLNAGEL, E., (2011). **RAG-The Resilience Analysis Grid. Resilience Engineering in Practice: A Guidebook.** Ashgate Publishing Limited, Farnham, Surrey, pp. 275–296, 2011.

HOLLNAGEL, E., (2012). **FRAM: the Functional Resonance Analysis Method e Modelling Complex Socio-technical Systems.** Ashgate, BurlingtonHOLLNAGEL, E. (2014). **Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management.** Ashgate, England.

HOLLNAGEL, E., WEARS, R. L., & BRAITHWAITE, J. (2015). **From Safety-I to Safety-II: a white paper.** *The resilient health care net: published simultaneously by the University of Southern Denmark, University of Florida, USA, and Macquarie University, Australia.*

HOVDEN, J., ALBRECHTSEN, E., & HERRERA, I. A. (2010). **Is there a need for new theories, models and approaches to occupational accident prevention?.** *Safety science*, 48(8), 950-956.

HU, A. H., HSU, C. W., KUO, T. C., & WU, W. C. (2009). **Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP.** *Expert Systems with Applications*, 36(3), 7142-7147.

KHASHA, R.; SEPEHRI, M. M.; KHATIBI, T. (2013). **A fuzzy FMEA approach to prioritizing surgical cancellation factors.** *International Journal of Hospital Research*, v. 2, n. 1, p. 17-24.

Laboratory Safety Institute. Laboratory fatalities. Disponível em: <https://www.labsafety.org/memorial-wall>. Acesso em 02 ago. 2023

LEGGETT, D. J. (2012). **Lab-HIRA: Hazard identification and risk analysis for the chemical research laboratory. Part 2. Risk analysis of laboratory operations.** *Journal of Chemical Health & Safety*, 19(5), 25-36.

- LI, X., ZHANG, L., ZHANG, R., YANG, M., & LI, H. (2021). **A semi-quantitative methodology for risk assessment of university chemical laboratory.** *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104553.
- LIU, S., JU, S., MENG, Y., LIU, Q., & ZHAO, D. (2023). **Inherent Hazards Assessment and Classification Method for University Chemical Laboratories in China.** *ACS Chemical Health & Safety*.
- LIU, G., CHEN, H., YUAN, Y., & SONG, C. (2024). **Indoor thermal environment and human health: A systematic review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114164.
- MARENDAZ, J. L., SUARD, J. C., & MEYER, T. (2013). **A systematic tool for assessment and classification of hazards in laboratories (ACHiL).** *Safety science*, 53, 168-176.
- MARIN, A. Explosão em laboratório da UFSCar deixa 4 pessoas feridas em São Carlos, diz Corpo de Bombeiros. G1, 06 mai. (2022). Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos/regiao/noticia/2022/05/06/explosao-em-laboratorio-de-quimica-da-ufscar-deixa-4-estudantes-feridos-em-sao-carlos.ghtml>. Acesso em: 02 ago. 2023
- MUKHTAD, A. A., AMINESE, H. A., MANSOR, M. A., MANSOUR, H. S., & ELMESMARY, H. A. (2018). **Ergonomic risk assessment among healthcare laboratory technicians in Benghazi medical centre.** *International Journal for Advance Research and Development*, 3(3), 318-327.
- MUSCIO, A., QUAGLIONE, D., & VALLANTI, G. (2013). **Does government funding complement or substitute private research funding to universities?.** *Research Policy*, 42(1), 63-75.
- NITSCHKE, C. I. (2019). **Promoting safety culture: An overview of collaborative chemical safety information initiatives.** *Journal of Chemical Health & Safety*, 26(3), 27-30.
- OMIDVARI, M., & MANSOURI, N. (2014). **Fire and spillage risk assessment pattern in scientific laboratories.** *International Journal of Occupational Hygiene*, 6(2), 68-74.
- OZDEMIR, Y., GUL, M., & CELIK, E. (2017). **Assessment of occupational hazards and associated risks in fuzzy environment: a case study of a university chemical laboratory.** *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(4), 895-924.
- PAPADOPOLI, R., NOBILE, C. G. A., TROVATO, A., PILEGGI, C., & PAVIA, M. (2020). **Chemical risk and safety awareness, perception, and practices among research laboratories workers in Italy.** *Journal of occupational medicine and toxicology*, 15(1), 1-11.

PEETERS, J. F. W., BASTEN, R. J., & TINGA, T. (2018). **Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner.** *Reliability engineering & system safety*, 172, 36-44.

PENNA, P. M. M., AQUINO, C. F., CASTANHEIRA, D. D., BRANDI, I. V., CANGUSSU, A. S. R., MACEDO SOBRINHO, E., ... & MIGUEL, Â. (2010). **Biossegurança: uma revisão.** *Arquivos do Instituto Biológico*, 77, 555-565.

PUELLO, J., GÓMEZ, S., RUIZ, I., LOMBANA, S., & FIGUEROA, S. (2020). **Application of HAZOP, LOPA and SIL to an Alkylation Unit in a Refinery: A Case Study.** *Chemical Engineering Transactions*, 82, 343-348.

RANGEL, S. V. D., SILVA, M. B. C., RANGEL, L. A. D., & SOARES, R. A. R. (2014). **Segurança em práticas de ensino em Laboratórios de Engenharia.** *Revista Práxis*, 6(12).

REID, N., & SHAH, I. (2006). **The role of laboratory work in university chemistry.** *Chemistry Education Research and Practice*, 8(2), 172-185.

RIGHI, A. W., SAURIN, T. A., & WACHS, P. (2015). **A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal.** *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 142-152.

RODIMA, A., VILBASTE, M., SAKS, O., JAKOBSON, E., KOORT, E., PIHL, V., ... & LEITO, I. (2005). **ISO 17025 quality system in a university environment.** *Accreditation and quality assurance*, 10, 369-372.

SANTOS, A. T. P., ANSILAGO, M., BONFÁ, M. R. L., SIMIONATTO, S., & CARVALHO, E. M. (2020). **Análise da Elaboração de um Protocolo para Registros de Acidentes em Laboratórios de Pesquisa e Ensino.** *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 28209-28223.

SANTOS, G.F (2022). **Acidentes em atividades acadêmicas no âmbito de uma instituição pública de ensino superior.** Programa de Pós-Graduação em Educação e Docência/ Mestrado Profissional. Universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

SAURIN, T. A., SOSA, S. (2013). **Assessing the compatibility of the management of standardized procedures with the complexity of a sociotechnical system: Case study of a control room in an oil refinery.** *Applied ergonomics*, 44(5), 811-823.

SAURIN, T. A., WACHS, P., RIGHI, A. W., & HENRIQSON, E. (2014). **The design of scenario-based training from the resilience engineering perspective: A study with grid electricians.** *Accident Analysis & Prevention*, 68, 30-41.

SCHNEIDER, R.P.; GAMBA, R.C.; ALBERTINI, L.B. **Manuseio de Produtos Químicos.** Capítulo 5: Perigos Associados a Equipamentos e Acessórios do Laboratório. São Paulo: ICBII

USP, 2011. 28 p. Protocolo da Rede PROSAB Microbiologia. Área: Métodos Básicos. Disponível em: . Acesso em: 25/06/2023

SEYED-HOSSEINI, S. M., SAFAEI, N., & ASGHARPOUR, M. J. (2006). **Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision-making trial and evaluation laboratory technique**. *Reliability engineering & system safety*, 91(8), 872-881.

SHERIQUE, J. (2011). **Aprenda como fazer**. 7ª edição. São Paulo: LTr.

SILVA, F. R. (2020) (a). **Gestão de riscos em laboratórios de instituições públicas de ensino superior para atendimento à norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/RS.

SILVA, C. E. S. D., TIN, J. V., & OLIVEIRA, V. C. D. (1997). **Uma Análise da Aplicação da FMEA nas Normas de: Sistema de Gestão pela Qualidade (ISO9000 e QS9000), Sistema de Gestão Ambiental (ISO14000) e Sistema de Gestão da Segurança e Saúde do trabalho (BS8800-futura ISO18000)**. *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 17.

SILVA, L. H. S., DE ABREU RODRIGUES, L. C., DIOGENES, A. N., ABRANTES, A. C. T. G., BAPTISTA, A., & PONTE, H. (2020) (b). **A risk reduction approach for academic research labs: A case study on naphthenic corrosion**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 64, 104061.

SOUZA, D. L. D., ZAMBALDE, A. L., MESQUITA, D. L., SOUZA, T. A. D., & SILVA, N. L. C. D. (2020). **A perspectiva dos pesquisadores sobre os desafios da pesquisa no Brasil**. *Educação e Pesquisa*, 46.

SOUZA, K. R. G., & LOURENÇO, L. (2015). **A evolução do conceito de risco à luz das ciências naturais e sociais**. *Territorium*, (22), 31-44.

STEHLING, M. M. C. T., REZENDE, L. D. C., CUNHA, L. M., PINHEIRO, T. M. M., HADDAD, J. P. D. A., & OLIVEIRA, P. R. D. (2012). **Fatores de risco para a ocorrência de acidentes em laboratórios de ensino e pesquisa em uma universidade brasileira (2012)**. *Revista Mineira de Enfermagem*, 19(1), 101-112.

SWANN, C. D., & PRESTON, M. L. (1995). **Twenty-five years of HAZOPs**. *Journal of loss prevention in the Process Industries*, 8(6), 349-353.

WAHAB, N. A. A., AQILA, N. A., ISA, N., HUSIN, N. I., ZIN, A. M., MOKHTAR, M., & MUKHTAR, N. M. A. (2021). **A Systematic Review on Hazard Identification, Risk**

Assessment and Risk Control in Academic Laboratory. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 24(1), 47-62.

WANG, D., PAN, C., & WANG, L. (2021)(a). **Design and Practice of an Organic Analysis Laboratory to Enhance Laboratory Safety.** *ACS Chemical Health & Safety*, 28(4), 238-243.

WANG, Q., JIA, G., JIA, Y., & SONG, W. (2021)(b). **A new approach for risk assessment of failure modes considering risk interaction and propagation effects.** *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 108044.

WILLEY, R. J., CARTER, T., PRICE, J., & ZHANG, B. (2020). **Instruction of hazard analysis of methods for chemical process safety at the university level.** *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 103961.

WOODS, D. D. (2003). **Creating foresight: How resilience engineering can transform NASA's approach to risky decision making.** *Work*, 4(2), 137-144.

WU, K., JIN, X., & WANG, X. (2020). **Determining university students' familiarity and understanding of laboratory safety knowledge—a case study.** *Journal of Chemical Education*, 98(2), 434-438.

YAZDI, M., DANESHVAR, S., & SETAREH, H. (2017). **An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system.** *Safety science*, 98, 113-123.

ZHANG, H., ZHANG, B., & GAO, D. (2023). **A new approach of integrating industry prior knowledge for HAZOP interaction.** *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 82, 105005.

ZHU, C., TANG, S., Li, Z., & FANG, X. (2020). **Dynamic study of critical factors of explosion accident in laboratory based on FTA.** *Safety Science*, 130, 104877.

APÊNDICE I

Ensaio: Fadiga em Quinta-Roda Operadores: Operador (1), Operador (2) e Operador (3)

Etapa	Etapa (descrição)	Observação	Perigo identificado
1	Preenchimento do formulário de identificação do teste	O operador preenche de forma manual o formulário	Nenhum identificado
2	Configuração do teste em <i>software</i> dedicado	O operador (1) realiza as configurações na sala de controle	Nenhum identificado
3	Verificação do sistema hidráulico	Operador (1) realizou o acionamento do sistema hidráulico na sala de controle. Operador (2) verificou se as linhas receberam pressão no manômetro.	Químico: Ruptura na linha hidráulica
4	Verificação das células de carga	Operador (1) realizou a verificação das células de carga através de procedimento com resistor padrão, na sala de controle	Nenhum identificado
5	Levantamento da contra-chapa rígida	O operador (2) fez o levantamento da contra-chapa utilizando as lanças da empilhadeira. Depois de içada a contra-chapa foi fixada manualmente pelo operador (3) com cintas catracadas. Após a fixação das cintas as lanças da empilhadeira foram retiradas e a empilhadeira foi retirada do espaço.	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/colisão)
6	Fixação do pino rei na bancada	Esta etapa só é realizada quando há mudança no dimensional da quinta-roda, sendo necessário mudar o pino rei. Nas duas observações não foi necessário fazer a alteração do pino rei.	Mecânico: lesões devido ao manuseio de ferramentas

7	aplicação de graxa na superfície da quinta- roda	Operador (2) utilizou um pincel para passar graxa na superfície da quinta-rodinha. *Operador utilizando luvas nitrílicas. Nesta etapa o operador (2) também aplicou WD-40 (spray lubrificante) nos parafusos. *Operador sem respirador	Químico: exposição a vapor inflamável
8	Encaixe da quinta-rodinha na bancada.	O encaixe da quinta-rodinha foi realizado com auxílio de empilhadeira, onde o operador (2) ficou responsável pelas manobras e operador (3) por verificar o alinhamento na bancada. Assim que o alinhamento estava correto a empilhadeira avançou sobre a bancada a fim de encaixar a quinta-rodinha no vão de encaixe. *Ambos operadores utilizando botina com biqueira de aço e capacete	Mecânico: queda de material pesado sobre membros Físico: utilização de maquinário ruidoso
9	Fixação da quinta-rodinha e aplicação de torque nos parafusos	Operadores (2) e (3) fizeram o encaixe dos parafusos de fixação da quinta-rodinha na bancada, colocando os braços para dentro do vão de encaixe. Para realização do torque ambos utilizaram torquímetro e para encontrar o local do parafuso colocaram a cabeça	Mecânico: aprisionamento de membros Ergonômico: exigência de postura inadequada
10	Baixar a contra-chapa rígida	O operador (2) fez o levantamento da contra-chapa utilizando as lanças da empilhadeira para que o operador (3) pudesse remover as cintas catracadas.	Físico: utilização de maquinário ruidoso
11	Abertura da trava de segurança da quinta-rodinha	Operador (2) utilizou uma corda para puxar a trava de segurança.	Físico: piso escorregadio Ergonômico: esforço físico intenso
12	Encaixe do pino rei na quinta-rodinha	Operador (2) e (3) verificam o encaixe do pino rei na quinta-rodinha após abertura da trava de segurança.	Nenhum identificado

13	Avanço do atuador no eixo horizontal	Operador (1) realizou o avanço do atuador através de software. Os demais operadores permaneceram ao lado da bancada observando e orientando o operador (1) na realização do movimento.	Físico: utilização de maquinário ruidoso
14	Avanço do atuador no eixo vertical	Operador (1) realizou o avanço do atuador através de software. Os demais operadores permaneceram ao lado da bancada observando e orientando o operador (1) na realização do movimento.	Físico: utilização de maquinário ruidoso
15	Aplicação de carga máxima	O operador (1) realiza a aplicação da carga de ensaio nos atuadores. Os operadores (2) e (3) observaram afastados para verificar se os atuadores estão movimentando conforme operação normal	Físico: utilização de maquinário ruidoso
16	Configuração final do teste	O operador (1) realiza as configurações na sala de controle	Nenhum identificado

Ensaio: Resistência em Pino Rei
Operadores: Operador (1), Operador (2) e Operador (4)

Etapa	Etapa (descrição)	Observação	Perigo identificado
1	Preenchimento do formulário de identificação do teste	O operador preenche de forma manual o formulário	Nenhum identificado
2	configuração do teste em <i>software</i> dedicado	O operador (1) realiza as configurações na sala de controle	Nenhum identificado
3	Verificação do sistema hidráulico	Operador (1) realizou o acionamento do sistema hidráulico na sala de controle. Operador (2) verificou se as linhas receberam pressão no manômetro.	Químico: Ruptura na linha hidráulica
4	Remoção dos parafusos de fixação da bancada de teste	Operador utiliza parafusadeira para remoção dos parafusos	Físico: utilização de maquinário ruidoso
5	Levantamento do atuador	Operador (2) responsável por posicionar a empilhadeira no local desejado. Operador (1) prendeu cintas com ganchos no atuador e nas lanças da empilhadeira. Operador (2) realizou o içamento do atuador. *Ambos operadores utilizando botina com biqueira de aço e capacete	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/colisão) / risco de queda sobre membros
6	Encaixe e fixação do pino rei na bancada de testes	Operador (1) posicionou o pino rei na bancada e ambos operadores realizaram a fixação através de parafusos.	Mecânico: queda sobre membros inferiores Ergonômico: esforço físico intenso
7	Aplicação de torque dos parafusos de fixação do pino rei	Operadores utilizaram torquímetro e necessitaram colocar os braços no vão de encaixe para dar o torque nos parafusos	Mecânico: aprisionamento de membros; Ergonômico: exigência de postura inadequada
8	Montagem dos espaçadores	Operador (3) fez o encaixe dos espaçadores ao redor do pino rei.	Mecânico: esmagamento de membros

9	Ajuste do deslocamento do atuador	Operador (2) utilizou a empilhadeira para movimentar o atuador até a posição desejada. Operador (3) auxiliou no controle do movimento com as mãos , realizando um ajuste fino de posição.	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/colisão) / risco de queda sobre membros
10	Montagem da raquete	O operador (2) verificou o alinhamento da raquete com o pino e solicitou ao operador (1) pequenos avanços no atuador para que o posicionamento ficasse mais assertado	Mecânico: esmagamento de membros
11	Fixação do atuador	Operadores (2) e (3) utilizaram parafusadeiras para fazer a fixação do atuador na bancada. *Operadores utilizando protetor auricular do tipo plug	Físico: utilização de maquinário ruidoso Mecânico: arranjo físico inadequado (risco de batida/colisão) / risco de queda sobre membros
12	Montagem da goleira	Operadores (2) e (3) seguram a goleira na posição de trabalho para que ela seja fixada, através de parafusos, na bancada.	Mecânico: queda sobre membros inferiores
13	Aplicação de carga de compressão para aperto dos parafusos da raquete	O Operador (1) aplicou força de compressão no atuador enquanto os operadores (2) e (3) realizaram o aperto dos parafusos	Ergonômico: esforço físico intenso
14	Configuração final do teste	O operador (1) realiza as configurações na sala de controle	Nenhum identificado

APÊNDICE II

SISTEMA: ENSAIO DE QUINTA-RODA											
NÓ	PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	DETECÇÃO/ PROTEÇÕES	FREQ	SEVER	RISCO	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO	
Nó 3 (Verificação do sistema hidráulico)	1-Pressão	a) Nenhum	Nenhuma Pressão	1-Válvula fechada 2- Bomba desligada	Teste não inicia	Aviso de pressão na bomba/ Aviso de erro nos controladores MTS	B	II		Risco tolerável	Risco tolerável
		b) Pouco	Pouca Pressão	1-Vazamento na linha 2-Manômetro lendo incorretamente a pressão 3-Existência de outro atuador fazendo muita força na linha hidráulica 4- Bomba ligada no modo "low"	Atuadores não conseguem realizar a força necessária /Teste não inicia	Aviso de erro nos controladores MTS	A	I		Risco tolerável	
		c) Alto	Muita Pressão	1- Falha na válvula de regulação de pressão da bomba 2-Manômetro lendo incorretamente	Ruptura na linha hidráulica	Aviso de erro nos controladores MTS	A	III		Risco tolerável	
Nó 5 (Levantamento da contra-chapa rígida)	1-Pressão	a) Nenhum	Nenhuma Pressão	1-Válvula fechada 2- Bomba desligada	Obstrução no curso do atuador vertical/ teste interrompido	Aviso de erro nos controladores MTS	B	I		Risco tolerável	Risco tolerável
	2-Velocidade	a) Nenhum	Nenhuma velocidade	1-Deritos no sistema de combustível 2- Falha na bomba hidráulica da empilhadeira 3- Falha na bateria da empilhadeira	Necessidade de utilizar talha para fazer a elevação. Atividade com maior contato do operador com o sistema	Sem detecção/ sem proteção	A	I		Risco tolerável	
		c) Alto	Velocidade alta	1- Falha de comunicação entre o controle de elevação e a alavanca de elevação da empilhadeira	Quebra da contra-chapa com possibilidade de atingir o operador	Sem detecção/ sem proteção	A	III		Risco tolerável	
Nó 6 (Fixação do pino rei na bancada)	1- Força	b) Pouco	Pouca força	1- Torquímetro setado de forma errada para menos 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torqu岸ar um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Concentração de tensão no parafuso menos torqu岸ado/Quebra do pino rei durante execução do ensaio	Procedimento para torqu岸amento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	III		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Torquímetro setado de forma errada para mais 2- Torquímetro descalibrado 3- Operador não treinado para usar torquímetro	Quebra do parafuso mais torqu岸ado/ Aumento da rigidez da bancada	Procedimento para torqu岸amento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	III		Risco tolerável	
Nó 7 (aplicação de graxa na superfície da quinta-roda)	1-Viscosidade	a) Nenhum	Sem viscosidade	1- Não foi aplicada a graxa	Atrito entre a quinta-roda e a chapa gerando danos à amostra e aos equipamentos/ Aumento no ruído do teste	Teste com carga trativa para determinação do coeficiente de atrito	A	IV		Risco tolerável	Risco tolerável
		b) Pouco	Pouca viscosidade	1- Foi aplicada pouca graxa 2- Foi aplicada uma graxa diferente do especificado	Atrito entre a quinta-roda e a chapa gerando danos à amostra e aos equipamentos/ Aumento no ruído do teste	Teste com carga trativa para determinação do coeficiente de atrito	A	III		Risco tolerável	

SISTEMA: ENSAIO DE QUINTA-RODA											
NÓ	PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	DETECÇÃO/ PROTEÇÕES	FREQ	SEVER	RISCO	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO	
Nó 8 (Encaixe da quinta- roda na bancada)	1-Pressão	a) Nenhum	Nenhuma Pressão	1-Válvula fechada 2- Bomba desligada	Quinta-roda não encaixa na bancada pois não deu batente no atuador horizontal/ Teste interrompido	Aviso na bomba sobre pressão/ Aviso de erro nas MTS	B	II		Risco tolerável	Risco tolerável
	2-Velocidade	a) Nenhum	Nenhuma velocidade	1- Empilhadeira desligada 2- Empilhadeira sem combustível 3- Desgaste nas engrenagens da empilhadeira	Teste interrompido	Sem deteção/ sem proteção	A	I		Risco tolerável	Risco tolerável
		b) Pouco	Velocidade baixa	1- Operador acelerou pouco 2-Falha no acelerador	Quinta-roda não encaixa na bancada/ Teste interrompido	Sem deteção/ sem proteção	B	II		Risco tolerável	
		c) Alto	Velocidade alta	1- Operador acelerou muito 2- Falha no acelerador	Colisão com a bancada	Sem deteção/ sem proteção	B	III		Risco tolerável	
Nó 9 (Fixação da quinta- roda e aplicação de torque nos parafusos)	1-Força	c) Alto	Pouca força	1- Torquímetro setado de forma errada para menos 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquar um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Concentração de tensão no parafuso menos torqueado/ Quebra da quinta-roda durante execução do ensaio	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	III		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Torquímetro setado de forma errada para mais 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquar um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Quera do parafuso mais torqueado/ Aumento da rigidez da bancada	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	III		Risco tolerável	
Nó 11 (Abertura da trava de segurança da quinta-roda)	1-Força	b) Pouco	Pouca força	1-Operador não instruído sobre como abrir corretamente a trava de segurança 2- Defeito de projeto da quinta-roda	Trava da quinta-roda não abre/ Teste interrompido	deteção visual da abertura da trava	A	I		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Quinta-roda está travada na bancada	Fadiga do operador/ Possibilidade de queda da quinta-roda da bancada	deteção visual da abertura da trava	A	II		Risco tolerável	

APÊNDICE III

SISTEMA: ENSAIO DE PINO REI											
NÓ	PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	DETECÇÃO/ PROTEÇÕES	FREQ	SEVER	RISCO	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO	
Nó 3 (Verificação do sistema hidráulico)	1-Pressão	a) Nenhum	Nenhuma Pressão	1-Válvula fechada 2- Bomba desligada	Teste não inicia	Aviso de pressão na bomba/ Aviso de erro nos controladores MTS	B	II		Risco tolerável	Risco tolerável
		b) Pouco	Pouca Pressão	1-Vazamento na linha 2-Manômetro lendo incorretamente a pressão 3-Existência de outro atuador fazendo muita força na linha hidráulica 4- Bomba ligada no modo "low"	Atuadores não conseguem realizar a força necessária /Teste não inicia	Aviso de erro nos controladores MTS	A	I		Risco tolerável	
		c) Alto	Pressão alta	1- Falha na válvula de regulação de pressão da bomba 2-Manmetro lendo incorretamente	Ruptura na linha hidráulica	Aviso de erro nos controladores MTS	A	III		Risco tolerável	
Nó 5 (Levantamento do atuador)	1-Velocidade	a) Nenhum	Nenhuma velocidade	1- Atuador está fixado na bancada 2-Detritos no sistema de combustível 3- Falha na bomba hidráulica da empilhadeira 4- Falha na bateria da empilhadeira	Teste interrompido	Sem detecção/ sem proteção	A	I		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Velocidade alta	1- Lanças da empilhadeira subindo rápido 1- Falha de comunicação entre o controle de elevação e a alavanca de elevação	Ruptura na linha hidráulica/ queda do atuador gerando danos ao equipamento	Sem detecção/ sem proteção	A	IV		Risco tolerável	

SISTEMA: ENSAIO DE PINO REI										
NÓ	PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	DETECÇÃO/ PROTEÇÕES	FREQ	SEVER	RISCO	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Nó 6 (Encaixe e fixação do pino rei na bancada de testes. Aplicação de torque nos parafusos)	1- Força	b) Pouco	Pouca força	1- Torquímetro setado de forma errada para menos 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquar um parafuso 4- Operador não treinado para usar	Concentração de tensão no parafuso menos torquado/Romper o pino rei durante execução do ensaio	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	IV		Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Torquímetro setado de forma errada para mais 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquar um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Quebra do parafuso mais torquado/ Aumento da rigidez da bancada	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	A	IV		Risco tolerável
Nó 8 (Montagem dos espaçadores)	1-Dimensão	b) Pouco	Pouca dimensão	2- Espaçador errado 3- Falta de instrução do operador	Folga entre os componentes do teste/ Não atinge o carregamento necessário/ Possibilidade de atingir o operador	Detecção visual do encaixe	A	III		Risco tolerável
Nó 9 (Ajuste do deslocamento do atuador)	1-velocidade	c) Alto	Velocidade alta	1- Falha de comunicação entre o controle de elevação e a alavanca de elevação	Atuador não encaixa corretamente no pino rei/ Encaixe torto/esmagament de membros	Sem detecção/ sem proteção	B	III		Risco tolerável
Nó 10 (Montagem da raquete)	1-Força	b) Pouco	Pouca força	1- Operador fadigado 2- Operador não treinado	Folga entre os componentes do teste/ Teste não atinge o carregamento necessário/ Aumento do ruído do teste	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	B	II		Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	2- Operador não treinado	Espanar a rosca do parafuso/ Impossibilidade de dar torque	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	B	II		Risco tolerável

SISTEMA: ENSAIO DE PINO REI											
NÓ	PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIO	POSSÍVEIS CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	DETECÇÃO/ PROTEÇÕES	FREQ	SEVER	RISCO	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO	
Nó 11 (Fixação do atuador)	1-Força	b) Pouco	Pouca força	1- Operador fadigado 2- Operador não treinado sobre utilização e parafusadeira 3-Falha na parafusadeira	Folga entre o atuador e a bancada/ Movimentação do atuador durante o teste/ Aumento no ruído do teste	Sem detecção/ sem proteção	B	II		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Operador não treinado sobre utilização e parafusadeira 3-Falha na parafusadeira	Espanar a rosca do parafuso	Sem detecção/ sem proteção	B	II		Risco tolerável	
Nó 12 (Montagem da goleira)	1-Força	b) Pouco	Pouca força	1- Operador fadigado 2- Torquímetro setado de forma errada para menos	Maior liberdade de movimento do atuador durante o teste	Sem detecção/ sem proteção	B	I		Risco tolerável	Risco desprezível
Nó 13 (Aplicação de carga de compressão para aperto dos parafusos da raquete)	1-Força	b) Pouco	Pouca força	1- Torquímetro setado de forma errada para menos 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquear um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Parafuso mal apertado permite folga entre a raquete e o pino rei/ Fadiga do parafuso	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	B	II		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita força	1- Torquímetro setado de forma errada para mais 2- Torquímetro descalibrado 3- esqueceu de torquear um parafuso 4- Operador não treinado para usar torquímetro	Parafuso no limite de trabalho/ Possibilidade de quebra do parafuso	Procedimento para torqueamento em x e depois em sequencia para garantir o torque	B	II		Risco tolerável	
	2- Carga	a) Nenhum	Nenhuma carga	1- sistema hidráulico desligado	Impossibilidade de dar o aperto nos parafusos / folga entre os componentes/ aumento do ruído do teste	sistema de controle sinaliza	A	I		Risco tolerável	Risco tolerável
		c) Alto	Muita carga	1-Aplicação errada no controlador para mais	Possibilidade de danificar a amostra/ Possibilidade de atingir o operador	sistema de controle sinaliza	B	III		Risco tolerável	Risco tolerável

APÊNDICE IV

sistema: Ensaio de quinta-roda										
subsistema: Empilhadeira										
FUNÇÃO	FUNÇÃO (no ensaio)	MODO POTENCIAL DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEV	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLES/MEDIDAS ATUAIS	DET	RPN	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Carregar, movimentar e empilhar materiais	Levantamento da contra-chapa rígida/ Baixar a contra-chapa rígida	1- Empilhadeira não consegue levantar a contra-chapa	1- Interrupção do ensaio	6	1- Empilhadeira sem combustível 2- Falha no motor 3- vazamento no sistema hidráulico 4- Sobrecarga de trabalho 5- Danos estruturais na haste 6- Falha elétrica	2	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	24	Risco tolerável
		2- Empilhadeira levanta a contra-chapa, mas vai cedendo	1- Queda da contra-chapa	7	1- Danos estruturais na haste 2- vazamento no sistema hidráulico	5	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	70	Risco moderado
	Encaixe da quinta-rodinha na bancada /	1- Desabamento das lanças da empilhadeira enquanto movimentada a quinta-rodinha	1- Esmagamento de membros inferiores dos operadores 2- Danos a amostra 3- Interrupção do ensaio	9	1- Danos estruturais na haste 2- vazamento no sistema hidráulico 3- falha elétrica	2	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	36	Risco tolerável

sistema: Ensaio de quinta-roda										
subsistema: Trava de segurança										
FUNÇÃO	FUNÇÃO (no ensaio)	MODO POTENCIAL DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEV	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLES/MEDIDAS ATUAIS	DET	RPN	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Travar o pino rei na quinta-rodinha	Travar o pino rei na quinta-rodinha	1- Trava de segurança não abre	1- Interrupção do ensaio	8	1- Erro de projeto 2- Pouca força do operador na abertura 3- Ângulo de abertura errado	2	controle visual da abertura da trava	6	96	Risco moderado
		1- Quebra estrutural	1- Interrupção do ensaio	8	1- Erro de projeto	4	Aviso de interlock nos controladores MTS	2	64	Risco moderado
		2- Trava de segurança abre, mas não fecha	1- Desconexão acidental do pino rei durante a operação do ensaio. 2- Interrupção do ensaio	8	1- Erro de projeto 2- Falha na instalação dos componentes	1	Aviso de interlock nos controladores MTS	2	16	Risco tolerável

sistema: Ensaio de quinta-roda/ pino rei										
subsistema: Atuador hidráulico										
FUNÇÃO	FUNÇÃO (no ensaio)	MODO POTENCIAL DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEV	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLES/ MEDIDAS ATUAIS	DET	RPN	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Converter energia de trabalho em energia mecânica	Avanço do atuador no eixo horizontal / Avanço do atuador no eixo vertical/ Aplicação de carga máxima	1-Haste do atuador não movimentada	1-Interrupção do ensaio	6	1-Sistema está desligado 2- Não há pressão no sistema. 3- Existência de agente obstruindo o curso da haste	2	Aviso nos controladores MTS	2	24	Risco tolerável
		2-Quebra do atuador	1-Interrupção do ensaio 2- Necessidade de trocar do equipamento (caso tenha em estoque)	8	1- Aplicação de forças compostas maiores que o dimensionado 2- Desgaste nos componentes internos	2	Aviso de interlock nos controladores MTS	2	32	Risco tolerável
		2- Atuador movimentando junto com a haste	1-Interrupção do ensaio	8	1- Desgaste nos componentes internos 2- Parafusos de fixação quebrados	2	Aviso de interlock nos controladores MTS	2	32	Risco tolerável

APÊNDICE V

sistema: Ensaio de pino rei										
subsistema: Parafusadeira elétrica										
FUNÇÃO	FUNÇÃO (no ensaio)	MODO POTENCIAL DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEV	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLES/MEDIDAS ATUAIS	DET	RPN	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Apertar e retirar parafusos	Remoção dos parafusos de fixação do atuador na bancada de teste/ Fixação do atuador na bancada de testes	1-Parafusadeira não liga	1-Impossibilidade de remoção/fixação dos parafusos 2- Interrupção do ensaio para troca do equipamento 3- Operadores necessitam remover os parafusos de forma manual (fadiga do operador)	2	1- Problemas na betaria do equipamento 2- Desgaste dos componentes internos	2	sem controle/ sem medidas	10	40	Risco tolerável
		2- Cachimbo não encaixa	1- Desgaste dos parafusos 2- Interrupção do ensaio para troca do equipamento 3- Folga na fixação do atuador na bancada	3	1-Cachimbo errado para os parafusos 2- operador não treinado sobre tipos de cachimbo	2	sem controle/ sem medidas	10	60	Risco moderado
		2- Parafusadeira não rotaciona	1-Impossibilidade de remoção/fixação dos parafusos 2- Interrupção do ensaio para troca do equipamento 3- Operadores necessitam remover os parafusos de forma manual (fadiga do operador)	3	1- Danos no mandril da parafusadeira 2- Problema no botão de acionamento da parafusadeira	2	sem controle/ sem medidas	10	60	Risco moderado

sistema: Ensaio de pino rei										
subsistema: Empilhadeira										
FUNÇÃO	FUNÇÃO (no ensaio)	MODO POTENCIAL DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEV	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLES/MEDIDAS ATUAIS	DET	RPN	CLASSIFICAÇÃO DO RISCO
Carregar, movimentar e empilhar materiais	Levantamento do atuador/ Ajuste do deslocamento do atuador	1-Empilhadeira não consegue levantar o atuador	1- Necessidade de utilizar paleteira para fazer o levantamento	6	1- Falha no sistema de elevação da empilhadeira 2- Empilhadeira sem combustível	2	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	24	Risco tolerável
		2-Empilhadeira levanta o atuador, mas vai cedendo e perdendo altura	1- Danos ao atuador 2- Queda do atuador sobre membros inferiores dos operadores 3-Interrupção do ensaio	8	1- Falha no sistema de elevação da empilhadeira 2- Empilhadeira sem combustível	1	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	16	Risco tolerável
		3- Lanças da empilhadeira muito inclinadas para frente	1- Queda do atuador 2- Danos ao atuador e aos operadores	8	1- Falta de treinamento do operador sobre os controles da empilhadeira	1	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	16	Risco tolerável
		4- Lanças da empilhadeira desabam durante o levantamento do atuador	1- Interrupção do ensaio 2- Queda do atuador sobre membros inferiores dos operadores	10	1- falha de pressão no sistema de levantamento	1	manutenção preventiva das empilhadeiras	2	20	Risco tolerável

APÊNDICE VI

Bloco 1: Relato

- Q1 Quanto tempo você atua aqui no laboratório?
- Q2 E antes do laboratório, você teve alguma experiência?
- Q3 Você pode falar um pouquinho como é o seu dia a dia, suas atividades?
- Q4 Como é a sua equipe aqui do laboratório?

Você consegue me contar alguma situação adversa, uma situação peculiar, algum momento em

Q5 que as suas habilidades foram desafiadas ou uma situação que você não esperava e teve que tomar uma decisão, um evento, um problema, uma urgência?

Bloco 2: Aprofundamento

- Q1 O que tinha na situação que fez vocês perceberem que algo iria acontecer?
- Q2 O que tinha na situação que fez vocês saberem o que fazer?
- Q3 O que os levou a tomarem esta decisão?
- Q4 Que informações vocês usaram para tomar esta decisão?
- Q5 Que conhecimento foi necessário ou útil nesta situação ou neste momento?
- Q6 Quais eram os objetivos específicos neste momento?
- Q7 Quais eram as principais preocupações de vocês neste momento?
- Q8 Como vocês podem resumir a situação neste momento?

Bloco3: Situações Hipotéticas

- Q1 Você considerou outras alternativas?
- Q2 Outra pessoa poderia ter agido diferente?
- Q3 Você teria tomado a mesma atitude, mais cedo na carreira?
- Q4 Esse incidente teria terminado diferente se você ou alguém com a mesma habilidade/experiência não estivesse lá?

ANEXO A

SEVERIDADE		
RANK	EFEITO	CRITÉRIO
1	Nenhum	Nenhum efeito
2	Mínimo	Usuário não afetado
3	Muito pequeno	Usuário pouco afetado
4	Pequeno	Pequeno incômodo ao usuário
5	Moderado	Usuário sente algum desconforto. Resulta em falha de componente não-vital
6	Significativo	Usuário sente desconforto
7	Grande	Usuário insatisfeito
8	Extremo	Usuário muito insatisfeito. Produto/processo afetado, mas ainda operacional e seguro
9	Sério	Potencial efeito perigoso
10	Catastrófico	Efeito perigoso. Não atende a critérios mínimos de segurança

Fonte: Adaptado de Ebrahemzadih *et al.* 2014.

OCORRÊNCIA		
RANK	EFEITO	CRITÉRIO
1	Quase nunca	Falha improvável. Histórico não mostra falhas
2	Mínima	Raro número de falhas similares
3	Falhas raramente ocorrem	Poucas falhas similares
4	Baixa	Algumas falhas similares
5	Falhas ocasionais	Número ocasional de falhas prováveis
6	Moderada	Número médio de falhas prováveis
7	Falhas ocorrem com frequência	Número moderadamente alto de falhas prováveis
8	Alta	É provável que haja um grande número de falhas
9	Muito alta	Provavelmente um número muito alto de falhas
10	Quase certa	Falha quase certa

Fonte: Adaptado de Ebrahemzadih *et al.* (2014).

DETECÇÃO		
RANK	EFEITO	CRITÉRIO
1	Quase certa	Métodos de detecção comprovados disponíveis
2	Muito alta	Análise computacional comprovada disponível
3	Alta	Simulação e/ou modelagem do sistema
4	Moderadamente alta	Testes nos componentes do sistema instalados
5	Média	Testes em componentes do sistema
6	Baixa	Testes em componentes de sistema semelhantes
7	Muito baixa	Testes em protótipos do sistema
8	Mínima	Comprovação de testes de durabilidade de componentes do sistema
9	Rara	Apenas técnicas não comprovadas ou não confiáveis de detecção
10	Quase impossível	Não existem controlos atuais para detectar a falha

Fonte: Adaptado de Ebrahemzadih *et al.* (2014).

ANEXO B

CATEGORIA	DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO	PERIODICIDADE
A	Extremamente remota	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação	Uma vez a cada 1 ano
B	Remota	Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo/instalação	Uma vez a cada 08 meses
C	Improvável	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação	Uma vez a cada semestre
D	Provável	Esperado ocorrer durante a vida útil do processo/instalação	Uma vez a cada 03 meses
E	Frequente	Esperado ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo/instalação	Uma vez por mês

Fonte: Adaptado de Sherique (2011).

CATEGORIA	DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO/ CARACTERÍSTICAS
I	Desprezível	Sem danos, ou danos insignificantes à propriedade e/ou sem lesões aos funcionários ou terceiros
II	Marginal	Danos leves à propriedade (de baixo custo de reparo) e/ou sem lesões aos funcionários ou terceiros
III	Crítica	Danos severos à propriedade, lesões de gravidade moderada em empregados, prestadores de serviço ou membros da comunidade
IV	Catastrófica	Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e/ou provoca mortes ou lesões graves em várias pessoas (empregados, prestadores de serviço ou membros da comunidade)

Fonte: Adaptado de Sherique (2011).