

Pós-Graduação

Segurança de Processos



GESTÃO DA INTEGRIDADE DE ATIVOS EM PLANTAS DE PROCESSO MADURAS

Giulia de S. Matheus, Juberto R. Correia e Tatiana B. Moraes

RESUMO

Diversas plantas no Brasil possuem ativos maduros ou foram montadas com equipamentos realocados de instalações desativadas. Somado a tal constatação, tem-se o fato de a cultura de segurança de processo ser um tema pouco explorado no país, que apenas recentemente tem ganhado atenção das companhias. Uma vez que acidentes catastróficos não são muito comuns, qualquer acidente relacionado ao processo pode levar a prejuízos muitos expressivos em termos de danos a instalações e perda de capital humano e social. Em plantas de processo maduras, esses pontos são ainda mais delicados, e normalmente são instalações cuja organização pode não ter ainda desenvolvido um programa de gestão da integridade eficiente. Não obstante, verifica-se o fato de que os ativos dessas plantas muitas vezes já se encontram em condições próximas ao final do seu tempo de vida residual. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma lista de verificação (checklist) para avaliar a gestão da integridade e identificar possíveis falhas no gerenciamento da integridade de um ativo maduro, tomando como referência as boas práticas de engenharia, a norma regulamentadora 13 (NR 13), as normas API 579-1/ASME FFS-1, API RP 580, API RP 581, requisitos da HSE (Health and Safety Executive) e outras normas relevantes.

Palavras-chave: *Integridade mecânica, equipamentos, lista de verificação, segurança de processo.*

ABSTRACT

Several plants in Brazil have mature assets or were built with equipment relocated from decommissioned facilities. Added to this finding, there is the fact that the culture of process safety is a topic little explored in the country, which has only recently gained attention from companies. Since catastrophic accidents are not very common, any accident related to the process can lead to very significant losses in terms of damage to facilities and loss of human and social capital. In mature process plants, these points are even more delicate, and these are typically facilities whose organization may not yet have developed an effective integrity management program. Nevertheless, it is verified the fact that the assets of these plants are often already in conditions close to the end of their residual lifetime. Therefore, the present work aims to develop a checklist to assess integrity management and identify possible failures in the integrity management of a mature asset, taking as a reference good engineering practices, regulatory standard 13 (NR 13), API 579-1/ASME FFS-1, API RP 580, API RP 581, requirements by HSE (Health and Safety Executive) and other relevant standards.

Keywords: *Mechanical integrity, equipment, checklist, process safety.*

SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
APR	Análise preliminar de risco
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CSB	Chemical Safety and Hazard Investigation Board
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normalização)
DNV	Det Norske Veritas
EC&I	Elétrica, Controle e Instrumentação
HIC	Hydrogen Induced Cracking
HSE	Health and Safety Executive
MARS	Major Accident Reporting System
MI	Mechanical Integrity
MOC	Management of change (Gestão de Mudança)
NACE	National Association of Corrosion Engineers
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PMOC	Programa de manutenção, operação e controle
PSV	Pressure Safety Valve (Válvula de segurança)
RBI	Risk Based Inspection (Inspeção Baseada em Risco)
RBPS	Risk Based Process Safety (Segurança de Processo Baseada em Riscos)
RCM	Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada em Confiabilidade)
REGAGEP	Recognized and Generally Accepted Good Engineering Practices
RP	Recommended Practice (Prática recomendada)
SCC	Stress Corrosion Cracking
SEPRO	Segurança de processos

1. INTRODUÇÃO

A Gestão de Ativos é um modelo de gestão da integridade de instalações e bens de capital, que visa a extensão do seu tempo de vida útil e maior eficiência em sua utilização. Esse modelo de gestão adotado a partir da década de 70, trouxe resultados expressivos como a duplicação do valor de ações de grandes companhias, a chegada do homem à lua, a transformação de uma antiga refinaria em instalações de classe mundial, com ganhos de segurança e confiabilidade, dentre outros. Entretanto, para que este novo paradigma seja transformado em cultura organizacional, as lideranças em todos os níveis organizacionais precisam entender os conceitos, os princípios e os fundamentos que regem esta nova forma de pensar e agir (LAFRAIA, 2020).

O ativo é um item, algo ou entidade, que possua valor real ou potencial para uma organização. A forma como a organização gerencia seus ativos é determinante para a obtenção desse valor. Logo, a gestão de ativos diz respeito a todos os aspectos envolvendo a capacidade e a habilidade de uma organização atingir seus objetivos, desde o momento da concepção do ativo, passando pela sua vida operacional, até o descarte final (CCPS, 2014).

Entretanto, para o escopo de segurança de processos, é pertinente a avaliação e monitoramento da integridade mecânica dos equipamentos com objetivo de conferir à equipe de manutenção, processos e demais colaboradores a garantia da integridade daquele equipamento sob as suas condições de operação e evitar um possível acidente.

Alguns dos benefícios obtidos pela gestão eficiente de ativos, são listados abaixo conforme a PAS 55:2008.

- Extensão da vida útil do ativo com consequente redução dos investimentos sem sacrificar o desempenho organizacional de curto ou longo prazo;
- Risco gerenciado, redução da variabilidade financeira em resultados e perdas, segurança melhorada, *good will* e reputação, impacto ambiental e social minimizado;
- Conformidade demonstrada, de acordo com as exigências legais, estatutárias e regulatórias e aderência a padrões, políticas e processos da Gestão de Ativos que possam ser atingidos;
- Eliminação de potenciais perigos e ameaças mediante adoção de boas práticas de engenharia e conceitos de processos inerentemente seguros, gestão da integridade

mecânica (CCPS, 2006), inspeção baseada em risco (API 581) e manutenção centrada em confiabilidade.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo dos fatores capazes de contribuir e/ou agravar a perda de integridade de um ativo maduro, baseado em boas práticas de engenharia, em diretrizes e normas recomendadas pela indústria química, nuclear e de petróleo e gás e as demais indústrias. Isto a fim de demonstrar se os ativos avaliados operam dentro de condições seguras e identificar se há possibilidade da extensão de sua vida útil.

Como objetivos específicos, têm-se os seguintes:

- Desenvolver uma lista de verificação (*checklist*) para identificar possíveis falhas no gerenciamento da integridade de um ativo maduro, tomando como referência a norma regulamentadora 13 (NR13); API 579-1/ASME FFS-1, API RP 580, e API RP 581 e requisitos da HSE (Health and Safety Executive), dentre outros;
- Avaliar, através da lista de verificação desenvolvida, um ativo maduro envolvido em um evento de perda de contenção conhecido e investigado;
- Validar a ferramenta como instrumento capaz de auxiliar a priorização de adequações necessárias relacionadas à integridade de ativos.

Para o desenvolvimento do *checklist* serão consideradas as seguintes premissas:

- a indústria utilizadora da lista de verificação desenvolvida, é uma planta química com processo contínuo;
- o processo é estável;
- será abordada apenas a gestão da integridade mecânica de vasos de pressão e tanques;
- será considerado apenas o envelhecimento do equipamento em função de fenômenos graduais como corrosão uniforme, degradação, erosão e vibração;
- não será contemplada a transição de ativos.

1.1 Segurança de processos baseada em risco (*Risk Based Process Safety*)

O *Center for Chemical Process Safety* (CCPS) desenvolveu um modelo para implantação de um sistema de gestão de segurança de processos denominado RBPS – *Risk Based Process Safety* (Segurança de Processo Baseada em Riscos), fundamentado em quatro pilares: comprometimento com segurança de processos, compreensão de perigos e riscos,

gerenciamento de riscos e aprendizados com a experiência - sob esses pilares se distribuem 20 elementos, conforme demonstrado na Figura 1. Um sistema de gestão de segurança de processos é “focado na prevenção, prontidão, mitigação, resposta ou restauração de liberações catastróficas de produtos químicos ou energia, resultados de um processo associado a uma instalação” (CCPS, 2014).

Figura 1: Pilares e elementos associados que constituem um robusto sistema de gestão RBPS.



Fonte: CCPS (2014).

Desta forma, considerando o modelo de gestão de segurança de processo proposto pelo CCPS, o presente trabalho estará relacionado diretamente a três de seus vinte elementos: Integridade e Confiabilidade de Ativos, Gestão de Mudança e Gestão de Revisões e Melhoria Contínua. Adicionalmente, será observada também, a prática recomendada API RP 581 - Metodologia de inspeção baseada em risco - a qual será abordada em mais detalhes no item 2.5.

1.1.1 Integridade e confiabilidade de ativos

A gestão da integridade e confiabilidade de ativos tem por objetivo garantir que equipamentos sejam projetados corretamente, fabricados, instalados e operados conforme especificado e apresentem condições para utilização até que sejam substituídos - durante toda vida útil.

Figura 2: Pilares da gestão da integridade de ativos maduros.



Fonte: Autoria própria (2022).

A manutenção das condições de operação deve ser assegurada através da realização de testes e inspeções que variam de acordo com o equipamento - material, tempo de uso, exposição a químicos, atmosferas corrosivas, intempéries, bom uso, etc. - de forma a garantir que o ativo esteja em boas condições para desempenhar adequadamente sua função durante toda sua vida útil. Gerir a integridade e a confiabilidade de ativos trata da sistematização dessas atividades, seguida de análise crítica de seus resultados, garantindo que um equipamento esteja em condições de atuar nas atividades para as quais foi designado (CCPS, 2014).

No Brasil vigora a Norma Regulamentadora número 13, que determina os requisitos mínimos para a garantia da integridade dos equipamentos com foco na instalação, inspeção, operação e manutenção, tendo em vista a segurança e a saúde dos trabalhadores. No entanto, esta norma tem o fator limitante de considerar a natureza química das espécies envolvidas e o produto Pressão *versus* Volume como fator de classificação de categoria (PASSOS, 2020).

Assim, de forma complementar à NR 13, tem sido cada vez mais utilizada a norma API 580, que trata da inspeção baseada em risco (*RBI*). Esta contempla não só a consequência em si, mas também a probabilidade de sua ocorrência, tendo em vista a integridade do equipamento e os mecanismos de deterioração do ativo. Desta forma, com a identificação e análise dos mecanismos de deterioração, é possível estabelecer intervalos de inspeção iguais ou menores do que aqueles estabelecidos pela NR 13, contribuindo para a gestão da integridade e evitando-se falhas do equipamento (PENA, 2016).

1.1.2 Gerenciamento de Mudanças

Gerenciar mudanças nos processos ao longo da vida de uma instalação, significa assegurar que mudanças realizadas não introduzam, de maneira inadvertida, novos perigos ou aumentem, de maneira não controlada, o risco de perigos existentes para instalações, pessoas e/ou meio ambiente. Uma mudança pode trazer consequências à vida útil de um equipamento, aumentando ou reduzindo a confiabilidade de sua operação. Logo, é essencial que as mudanças realizadas iniciem um processo de revisão dos programas de integridade (CCPS, 2014).

1.1.3 Gestão de Revisões e Melhoria Contínua

A gestão de revisões consiste em avaliar periodicamente como está o desempenho dos sistemas de gestão implementados, a fim de melhorar continuamente o processo produtivo e o local de trabalho. Esse processo fornece "*check ups*" regulares da operação e dos ativos, possibilitando a identificação e correção de desvios encontrados antes que eles sejam identificados por uma auditoria ou um acidente (CCPS, 2014).

1.2 Motivação para o trabalho

As inúmeras plantas de ácido sulfúrico, existentes no Brasil, foram a inspiração para o tema apresentado. Em geral, são plantas consideravelmente antigas, algumas com mais de 30 anos de operação, onde são observados inúmeros problemas relacionados à integridade de equipamentos e gestão da temática dentro das organizações. Não raro, a regra do “apagar incêndio” prevalece, tornando as unidades sujeitas a eventos SEPRO. Adicionalmente, no segmento industrial voltado para extração e beneficiamento de minérios, observam-se planta jovens, com menos de 10 anos de operação, apresentando sintomas críticos de deterioração e envelhecimento, sendo possível afirmar que essa condição está diretamente associada a ausente e/ou deficiente gestão da integridade de seus ativos (HSE, 2008).

Em ambas as situações supracitadas, o modelo de gestão baseada em risco (RBPS), ainda não é entendido em sua totalidade e aplicado. Essa condição associa-se à existência de uma cultura que opera atuando não eventualmente nas consequências de eventos SEPRO,

o que representa uma grande barreira humana, relacionada a hábitos operacionais, a ser vencida (HSE, 2008).

Assim, viu-se a necessidade de abordar o tema de integridade mecânica em plantas de processo maduras, a fim de auxiliar as organizações na gestão dos ativos maduros, fornecendo uma ferramenta para se antever a falha, evitando a perda de contenção e acidentes de maior magnitude (CCPS, 2006).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Gestão da Integridade Mecânica

A Integridade Mecânica (MI) pode ser definida como o gerenciamento de equipamentos estáticos de processo para garantir que ele seja projetado e instalado corretamente e operado e mantido adequadamente. A MI é um dos quatorze elementos contemplados no padrão de gerenciamento de segurança de processo da OSHA, que inclui ativos como vasos de pressão, tanques de armazenamento, sistemas de tubulação e hardware associado (válvulas, conexões, etc.), dispositivos de alívio e sistemas de desligamento/controle de emergência (API, 2019).

2.1.1 Vida útil

Em instalações que se aproximam do fim de sua vida útil econômica ou operacional a gestão de ativos tem como objetivo obter o máximo benefício econômico restante sem risco pessoal, ambiental, operacional ou financeiro.

A vida útil de uma instalação é composta pela vida útil funcional, vida útil de projeto, vida remanescente e vida útil real. A vida útil funcional corresponde à duração de vida da instalação determinada por um estudo econômico da demanda do mercado, que garanta a necessária rentabilidade do investimento. A vida útil de projeto é o tempo de vida da instalação, durante o qual deve-se assegurar níveis adequados de segurança operacional e de utilização. A vida remanescente (ou residual) associa-se à estimativa do tempo restante de vida de um equipamento ou acessório, estimada durante avaliações de sua integridade, em períodos pré-determinados. Por fim, a vida útil real é a vida real operacional diferente, menor ou maior, à vida útil estabelecida em projeto (API RP 580, 2016).

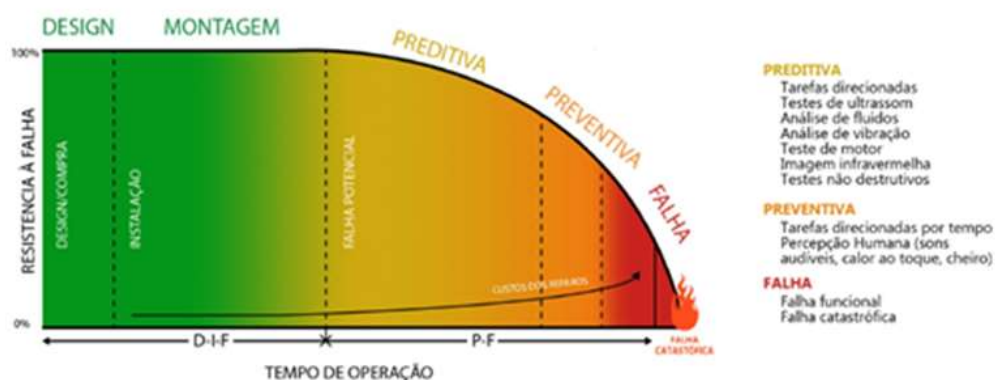
2.1.2 Ciclo de vida de um ativo

Uma ferramenta usual para acompanhar o envelhecimento de um ativo no tempo e auxiliar na gestão da sua integridade é a curva PF – Vide figura 3. Nela tem-se representada a performance do ativo (resistência à falha) em função do tempo de operação. Esta performance declina no decorrer da vida útil do ativo, levando a falha funcional. Com isso, o objetivo da curva PF é de estimar o intervalo entre a falha potencial e a funcional de forma que possam ser programadas as manutenções preventivas e preditivas. O ideal é que o momento de realização destas manutenções seja o mais próximo possível da falha potencial do ativo e o mais distante possível da falha funcional, a qual pode levar a acidentes catastróficos. (DYNAMOX, 2020).

Falhas de ativos não são eventos, mas sim processos de degradação. Por meio da curva PF, apresentada na Figura 3, busca-se representar a condição de um equipamento ou componente ao longo do tempo, o que possibilita identificar esses processos e agir prontamente para evitar a falha.

Com base na curva é possível definir dois tipos de falha: a falha potencial e a falha funcional. A primeira corresponde aos sinais dados pelo ativo de que uma falha funcional está próxima de ocorrer. Já a segunda é aquela na qual o ativo deixa de exercer a função para a qual foi projetado (DYNAMOX, 2020).

Figura. 3: Ciclo de vida de um ativo, representado pela curva PF.



Fonte: DYNAMOX (2020).

A curva PF é tipicamente usada na análise de confiabilidade dos ativos monitorados com base nos conceitos do RCM (*Reliability Centered Maintenance* - Manutenção Centrada na Confiabilidade). Desta forma, existe muito valor no entendimento desta curva e nas

atividades associadas a ela, pois o único jeito de prevenir a falha de um equipamento é priorizar ações para mitigar o P (falha potencial). Se uma falha potencial é detectada entre o ponto P e o ponto F (ponto da falha funcional), é possível tomar ações para prevenir as consequências ou ocorrências da falha funcional (DYNAMOX, 2020).

Vale ressaltar que a falha, quando ocorre, pode levar a consequências catastróficas. Um estudo realizado pela MARS (Major accident reporting system), mostra que 60% dos acidentes envolvendo perda de contenção tiveram como causa a falha da integridade de um dado equipamento. Destes acidentes, 50% estavam relacionados ao fim de vida útil do ativo (HSE, 2008).

2.1.3 Priorização de ativos

A gestão da integridade de ativos visa, principalmente, evitar a perda de contenção de um produto perigoso ou a liberação de uma grande quantidade de energia, e garantir a alta disponibilidade dos sistemas críticos ao processo – tanto do ponto de vista de segurança pessoal e ambiental, quanto do ponto de vista econômico (CCPS, 2014). Com uma boa gestão da integridade, a empresa consegue otimizar e melhor planejar os investimentos em manutenção e aquisição de sobressalentes e novos equipamentos (Milanese *et al.*, 2017).

A gestão da integridade dos ativos de uma planta só será efetiva com uma análise e classificação prévia dos ativos, de forma a priorizar aqueles que são mais críticos ao processo, ou seja, aqueles cuja falha oferece maior risco às pessoas, ao meio ambiente e/ou ao patrimônio da empresa. Tal priorização deve ser feita por meio de uma Análise de Risco, através da qual serão avaliados os perigos existentes na instalação capazes de originar cenários de risco e suas possíveis causas e consequências. Com isso, é possibilitada a identificação dos ativos associados aos cenários mais críticos, de forma a priorizá-los dentro de um plano de gestão da integridade estabelecido (CCPS, 2014). No entanto, vale ressaltar que independentemente da realização ou não da análise de risco, os equipamentos que se enquadram na NR 13 devem ser considerados críticos, devendo sempre ter prioridade no programa de inspeção e manutenção.

Como ferramenta complementar à análise de risco, tem-se a Inspeção Baseada em Risco (RBI), que combina sistematicamente a probabilidade (frequência) de falha e a consequência da falha para estabelecer uma lista de prioridades para os equipamentos baseando-se no risco e gerando planos de inspeção. Estes planos buscarão direcionar mais

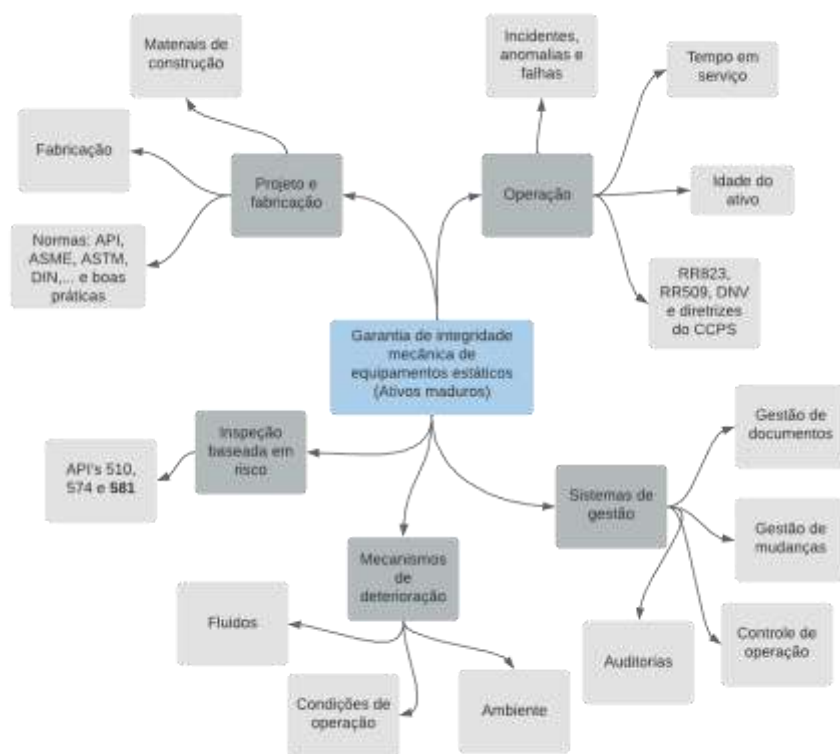
recursos para os itens que apresentarem maior risco. Assim, o RBI auxilia o processo de decisão para se saber o que, quando e como inspecionar (AFEFY, 2010).

Vale destacar que o plano de gestão de ativos deve ser periodicamente revisitado, uma vez que a vida útil do ativo pode aumentar ou diminuir de acordo com variações nas condições operacionais e ambientais (AFEFY, 2010).

2.2 Garantia de integridade de ativos maduros

Visando manter a segurança operacional, é fundamental o acompanhamento e detecção da degradação e do envelhecimento dos ativos durante cada estágio do ciclo de vida da planta (GYENES; WOOD, 2016). Assim, há cinco pontos que devem ser priorizados a fim de se garantir a integridade mecânica de ativos maduros (equipamentos estáticos), os quais podem ser observados na Figura 4, a seguir.

Figura 4: Mapa mental para garantia de integridade de ativos maduros.



Fonte: Autoria própria (2022).

O primeiro ponto de atenção é referente ao projeto e fabricação do ativo. Deve-se verificar se o equipamento foi feito com os materiais adequados para sua aplicação e se a

fabricação foi realizada adequadamente, seguindo normas, diretrizes e boas práticas de engenharia.

O segundo ponto a ser verificado é relativo à operação do equipamento. Neste quesito deve-se atentar se o equipamento possui bom desempenho, confiabilidade e disponibilidade, atendendo bem às funções para as quais foi projetado. Também deve ser levado em conta o histórico de incidentes, anomalias e falhas, o tempo de serviço do ativo e sua idade (CROWL; LOUVAR, 2011).

O sistema de gestão da instituição é o terceiro ponto de atenção. O histórico de falhas, manutenções e mudanças devem estar documentados e ser de fácil acesso para consulta. Além disso, os procedimentos de operação e manutenção devem ser registrados e qualquer mudança deve ser reportada, a fim de evitar a perda de informação com o tempo e com a troca de equipe (CCPS, 2014).

A documentação, registro e histórico do ativo constituem uma espécie de prontuário, que se faz fundamental para a avaliação do quarto item, mecanismos de deterioração. Apenas com o registro das falhas e operação será possível identificar o que pode estar levando à deterioração do ativo. Assim, será possível atacar o problema de forma mais eficaz e efetiva, possibilitando uma melhor gestão do envelhecimento do equipamento e previsão de possíveis falhas, necessidade de intervenção e até mesmo de substituição (CROWL; LOUVAR, 2011).

Por fim, o último ponto de atenção é a inspeção do equipamento com base no risco. Inspeções periódicas devem ser realizadas de forma a priorizar os ativos mais críticos à segurança do processo.

2.3 Mecanismos de deterioração e envelhecimento de ativos

O envelhecimento/maturidade de um ativo não está relacionado apenas com seu tempo de fabricação, instalação e operação, mas também com o quanto e como ele foi modificado ao longo do tempo, em relação às características sob as quais foi projetado e construído (CCPS, 2006).

A deterioração sofrida pelos equipamentos durante sua operação é capaz de reduzir a sua integridade, acelerando o “envelhecimento”. Dentre os mecanismos conhecidos, capazes de deteriorar e envelhecer ativos, cabe destacar os seguintes, apresentados no relatório RR823 do HSE (2008):

- Corrosão generalizada ou uniforme: degradação física de um material devido a reações químicas que ocorrem em sua superfície. Pode acontecer por via úmida - presença de água no ambiente - vapor, atmosfera, etc., ou por via seca - ausência de água, presença de temperaturas elevadas ocasionando a oxidação química direta;
- Corrosão sob tensão: os principais mecanismos envolvem estresse sob cloreto (SCC - *Stress Corrosion Cracking*) e fissuração por hidrogênio (HIC - *Hydrogen Induced Cracking*);
- Erosão: desgaste mecânico causado por escoamento de fluidos, por partículas sólidas ou líquidas contidas em líquidos ou gases ou por jatos de líquidos ou de gases (também conhecido como impingimento);
- Fadiga mecânica: processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzem tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura após um certo número de ciclos (ASTM E1823, 2021).

Assim, subdividindo os ativos em quatro grandes grupos, é possível resumir os mecanismos genéricos de envelhecimento capazes de afetar alguns tipos de equipamentos, de acordo com a Tabela 1, mostrada abaixo, proposta pelo HSE (HSE, 2008):

Tabela 1 - Mecanismos de envelhecimento de ativos (deterioração).

Mecanismo de envelhecimento	Contenção primária (vasos, tubulações, tanques, bombas, etc.)	Estruturas (estruturas civis)	Proteções (salvaguardas)	Elétrica, Controle e instrumentação (EC&I)
Corrosão	x	x	x	x
Corrosão sob stress	x	x	x	
Erosão	x	x	x	x
Fadiga	x	x	x	
Fragilização	x	x	x	x
Danos físicos	x	x	x	x
Fragmentação		x	x	

Intempéries		x	x	
Expansão/contração devido a mudança de temperatura ou congelamento (processo ou meio ambiente)	x	x	x	x
Desvios de instrumentos				x
Juntas ressecadas				x
Envenenamento de detetor				x
Sedimentação		x	x	

Fonte: Adaptado de HSE, 2008.

Para esse estudo, serão excluídos os ativos relacionados a estruturas civis.

2.4 Testes e inspeções de ativos maduros

O plano de inspeção e testes de ativos deve ser baseado nas recomendações do fabricante, nas análises de risco realizadas, assegurando a observação e adoção de boas práticas de engenharia reconhecidas e aceitas - conceito RAGAGEP (*Recognized And Generally Accepted Good Engineering Practices*) – baseadas na legislação em vigor, NR-13, assim como, em instruções e normas elaboradas/emitidas por organizações que possuem membros qualificados e representativos, a exemplo da ASME, ANSI, NACE.

A inspeção de um ativo não reduz o risco inerente associado a ele, mas fornece conhecimento do estado de dano e reduz a incerteza. Como resultado, a probabilidade de que a perda de contenção ocorra está diretamente relacionada com a quantidade e qualidade das informações disponíveis da inspeção anterior e a capacidade do método de inspeção para quantificar o dano (API 581, 2008).

A redução da incerteza é função da eficácia do método de inspeção e abrangência na identificação e quantificação do tipo e extensão do dano. O risco calculado não é apenas uma função do tempo, mas também do conhecimento obtido sobre a condição ou estado de dano do componente determinado em um programa de inspeção eficaz (API 581, 2008).

Um ponto relevante a ser observado na elaboração de um plano de integridade de ativos maduros é a relação de compatibilidade entre o material de construção do ativo e do fluido

em contato com o mesmo. A matriz abaixo, indica a probabilidade de um ativo sofrer degradação em função do fluido que opera/armazena. Vale ressaltar que esta é uma informação geral, um guia inicial que não considera as demais variáveis - temperatura, pressão, concentração, velocidades de escoamento, dentre outras (HSE, 2008).

O dimensionamento da frequência de testes e inspeções em ativos é outro ponto a ser considerado. A realização de inspeções desnecessárias pode ser prejudicial se envolver a abertura de linhas e equipamentos, ou permitir a entrada de meios corrosivos - podendo aumentar o risco de falhas futuras, por exemplo, danificando revestimentos e juntas flangeadas. Adicionalmente, inspeções desnecessárias acarretam num aumento indesejado de custos diretos e indiretos.

Figura 5 – Guia da probabilidade de degradação de ativos maduros, associando fluido e material de construção.

Fluido de Processo	Material de Construção											
	Aço carbono	Aço inoxidável 13 Cr	Aço Inoxidável Tipo 304	Aço Inoxidável Tipo 316	Aço inoxidável duplex (22% Cr)	Super Duplex Aço Inoxidável (25% Cr)	Hastelloy 625	Monel	Alumínio	GRE/GRP	Cobre	Titânio
Água de refrigeração												
Água de processo												
Água desaerada												
Água do mar												
Ácido forte												
Ácido fraco												
Base Forte												
Base Fraca												
Hidrocarbonetos aromáticos												
Hidrocarbonetos Alifáticos												
Gás Ácido												
Ar seco												
Ar úmido												
Hidrogênio												
Álcoois Secos												
Aminas orgânicas												
Gás Cloro												
Vapor												
	Alta probabilidade de degradação											
	Probabilidade média de degradação											
	Baixa probabilidade de degradação											

Fonte: Adaptado de HSE, 2008.

2.5 Inspeção baseada em risco

A inspeção baseada em risco é uma prática recomendada, tratada detalhadamente nas normas API RP 580 e 581. Ela consiste numa metodologia que usa o risco como base

para priorizar e gerenciar programas de inspeção de equipamentos, analisando a probabilidade e as consequências de falhas de equipamentos (INSPECTIONEERING, 2022).

De forma geral, conforme a degradação do equipamento evolui, o risco associado a ele e a probabilidade da ocorrência de uma falha aumentam. A inspeção, em si, não solucionará o problema nem reduzirá o risco (API 581, 2008). No entanto, ela possibilitará um melhor entendimento e quantificação do dano, auxiliando assim na programação e alocação de recursos para manutenção ou até mesmo substituição do ativo.

Vale ressaltar que a inspeção deve ser realizada periodicamente, uma vez que ela reflete o estado atual do ativo, operando sob as condições vigentes no momento da inspeção. Qualquer mudança nas condições operacionais poderá alterar os resultados obtidos na avaliação anterior, modificando assim a taxa de degradação (API 581, 2016).

Desta forma, a inspeção baseada em risco é fundamental na gestão de ativos maduros. Com ela, é possível priorizar os ativos mais críticos ao processo e à segurança das pessoas e meio ambiente e atuar de forma mais efetiva na gestão e solução dos problemas.

Uma boa inspeção deverá levar em conta cinco pontos principais: o tipo do ativo que será inspecionado; o mecanismo de degradação em desenvolvimento; a suscetibilidade ou taxa de degradação; o método de inspeção a ser empregado; e o acesso à área do ativo a ser avaliado (API 581, 2008).

3. METODOLOGIA

3.1 Premissas para a elaboração da lista de verificação

As inspeções realizadas são importantes em cada parte do processo. Em geral, cada avaliação fornece um equilíbrio entre o conservadorismo, a quantidade de informações necessárias para a avaliação, a habilidade do pessoal que realiza a avaliação e a complexidade da análise que está sendo realizada (API 579-1/ASME FFS-1, 2021).

O objetivo de uma lista de verificação é fornecer um retrato atual da instalação. Se a lista de verificação não fornecer um resultado aceitável, poderá gerar ações para mitigar o risco mantendo o ativo em operação ou colocando-o fora de operação, de acordo com as condições verificadas. A lista de verificação destina-se a fornecer dados criteriosos e conservadores que podem ser utilizados com uma quantidade mínima de informações de

inspeção ou componente. Esta verificação poderá ser realizada por uma equipe própria ou terceira.

Assim, o questionário em questão foi realizado em forma de perguntas, tendo como base os requisitos da NR-13 e API 579 e 581. Além disso, vale ressaltar que o *checklist* desenvolvido não considera instalações externas ao processo, compreendendo apenas vasos de pressão e tanques associados ao processo.

Por fim, vale ressaltar que devido as particularidades de alguns equipamentos estáticos, em especial sistemas de troca térmica com e sem combustão, pode não ser pertinente desenvolver um *checklist* geral. Em virtude, do grande número de perguntas que seria necessário para torná-lo suficientemente robusto. Portanto, neste trabalho é proposta uma lista de verificação (*checklist*) para vasos de pressão e tanques, e recomenda-se em trabalhos posteriores a elaboração de mais duas listas, uma para trocadores de calor sem combustão e outra para trocadores de calor com combustão.

3.2 Abordagem para o desenvolvimento da lista de verificação

Com base na revisão bibliográfica de livros, artigos e normas, foram elencados os cinco pilares destacados no mapa mental (item 2.2) como base do *checklist*. Assim, a lista de verificação foi dividida em cinco sessões:

- Projeto e fabricação (1);
- Operação (2);
- Sistemas de gestão (3);
- Mecanismo de deterioração (4);
- Inspeção baseada em risco (5).

Abaixo tem-se uma breve explicação do que cada tópico buscou contemplar e focar.

1. Projeto e fabricação:

Neste tópico buscou-se coletar informações construtivas do equipamento. Assim, para a elaboração das perguntas tomou-se como base os principais pontos relacionados ao projeto e fabricação que podem impactar a integridade mecânica do ativo.

2. Operação:

Esta sessão foi desenvolvida com o intuito de verificar o desempenho do equipamento diante das condições de operação vigentes. Assim, foram elaboradas perguntas relacionadas ao tipo de fluido e aos parâmetros operacionais (temperatura, pressão e vazão), associando essas informações com os dados de projeto do equipamento, a fim de verificar se houve alguma mudança significativa em relação às condições de operação para as quais o ativo foi concebido.

Nesta sessão também são questionadas as condições ambientais, como amplitude térmica, umidade do ar, salinidade e pluviosidade. Tais fatores são extremamente relevantes, impactando a integridade mecânica e, conseqüentemente, na vida útil do ativo.

3. Sistema de Gestão:

Este terceiro tópico foi desenvolvido com o intuito de verificar os sistemas de gestão vigentes associados ao ativo em verificação. Assim, buscou-se questionar programas de manutenção, documentação, procedimentos, treinamentos, histórico de falhas, análises de risco e modificações realizadas no equipamento.

4. Mecanismos de deterioração:

Nesta seção, buscou-se fazer perguntas que levassem à identificação da possível existência de mecanismos de deterioração capazes de acelerar a degradação de um ativo, aumentando a probabilidade de ocorrência de uma perda de contenção (conhecendo o mecanismo de deterioração em decurso é mais fácil de tratar e prevenir o problema).

5. Inspeção baseada em risco:

Neste item buscou-se desenvolver perguntas associadas às saídas esperadas do plano de inspeção baseada em risco (RBI), tomando como base as normas API RP 580 e 581. Assim, foi questionado se o ativo é contemplado no programa de inspeção e também em relação a periodicidade e tipos de inspeções realizadas.

Caso algum item seja verificado como não conforme, a lista apresenta um espaço para colocar as observações encontradas em campo (observações) e as ações a serem tomadas, com prazos e responsáveis. Além das perguntas, a lista apresenta também campos para o

nome da planta, a identificação do ativo (TAG), o tempo de vida útil e o tempo de vida útil residual (conforme a última inspeção, caso haja), o nome dos participantes da verificação e seus respectivos cargos, a assinatura de cada um e a data. Tais campos devem ser preenchidos a fim de se manter um registro completo da verificação realizada e a ciência de todos frente aos resultados obtidos no *checklist*. No Anexo 1 é apresentada a lista de verificação.

Tendo em vista a complexidade e importância da Norma Regulamentadora 13, optou-se por desenvolver uma lista de verificação à parte, contemplando cada item da norma, a fim de que fosse possível verificar o grau de aderência do ativo em análise à norma.

Por fim, abaixo estão algumas observações referentes ao *checklist* que devem ser levadas em conta no momento de sua aplicação:

- O tópico referente a NR13 só deve ser respondido caso o equipamento se enquadre na NR13, caso contrário, deve-se ir direto para o tópico 1;
- Se algum item do tópico referente a NR13 não for atendido, o ideal é que a lista seja interrompida, o item não conforme seja adequado e só então a verificação seja retomada;
- Sempre que é dito “equipamento”, se faz referência a vasos de pressão ou tanques;
- Os “acessórios” se referem a vents, válvulas, PSV,... associadas ao equipamento estático.

Para as respostas do *checklist* foram estabelecidas categorias. Nos tópicos de 1, 2, 3 e 5 definiu-se seis possíveis respostas, apresentadas na Tabela 2 a seguir.

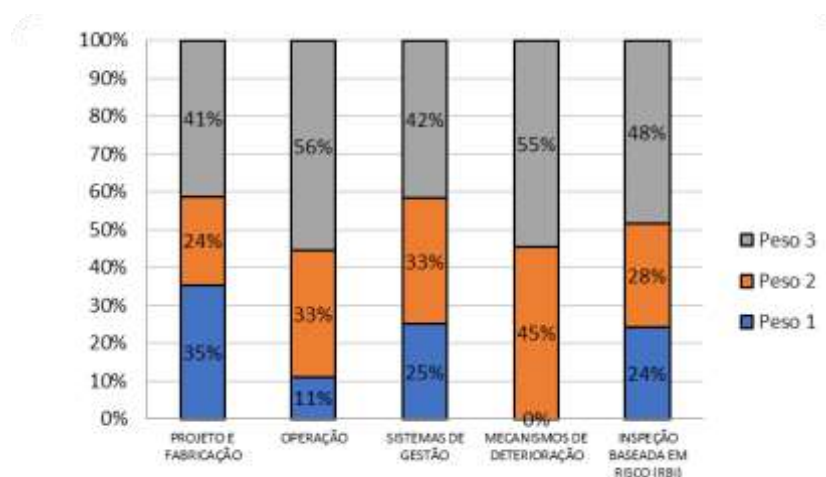
Tabela 2 - Classificação das respostas do *checklist* (itens 1, 2, 3 e 5).

Item	Status	Prazo para cumprir a ação	Nota
Atende totalmente (AT)	Sem ações a serem feitas.	-	10
Atende em grande parte (AG)	Conforme, mas melhorias podem ser feitas.	3 meses	7,5
Suficiente (S)	Sem risco a curto prazo. Porém, pode trazer consequências a longo prazo.	2 semanas	5
Insuficiente (I)	Agendar MOC / Realizar adequação o mais rápido possível.	1 semana	2,5
Não Atende (NT)	Risco iminente. Parar operação e adequar.	Imediato	0
Não Aplicável (NA)	Pergunta não se aplica ao ativo em verificação	-	-

Para o item 4, foram adotadas apenas 3 categorias de resposta: sim (S), não (N) e não aplicável. Optou-se por essa divisão por serem perguntas relacionadas às condições físicas do ativo, as quais entende-se não haver um estado parcial. Já para o *checklist* referente a NR 13, adotou-se também apenas três categorias de resposta: conforme (C), não conforme (NC) e não aplicável (NA). Essa divisão foi estabelecida por se tratar de uma norma, a qual os itens devem ser atendidos, não sendo aceitável uma conformidade parcial.

Para cada pergunta dos itens 1 a 5 foi estabelecido um peso, variando de 1 a 3. O peso 1 corresponde a uma pergunta importante, o 2 a uma pergunta muito importante e o peso 3 associa-se a uma pergunta crítica. Estes pesos foram estabelecidos de forma comparativa, ou seja, comparando perguntas de uma mesma categoria e determinando qual seria mais ou menos crítica, tendo em vista a integridade do ativo. Na figura abaixo é possível verificar a distribuição da criticidade por categoria do *checklist*. Vale ressaltar que a ideia é que esses pesos sejam fixos, não devendo ser modificados na aplicação do *checklist* - seja para um mesmo ativo, seja para ativos diferentes.

Figura 6 - Distribuição da criticidade de cada pergunta por categoria.



3.3 Método de avaliação das respostas

A fim de avaliar o resultado obtido após a aplicação do *checklist*, foi atribuída uma nota final para cada categoria, com base nas respostas. Esta nota consiste na média ponderada de cada resposta, conforme apresentado na Equação 1 abaixo, sendo M_i a média da categoria i (1, 2, 3, 4 ou 5), P o peso atribuído à pergunta, N a nota atribuída à pergunta e o índice desses dois parâmetros variando de 1 a n (número de perguntas da categoria).

$$M_i = \frac{P_1 \times N_1 + P_2 \times N_2 + \dots + P_n \times N_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad (\text{Eq. 1})$$

Desta forma, a cada categoria do *checklist* é atribuída uma nota final, que varia de 0 a 10. O compilado das notas de todas as categorias pode ser observado por um gráfico aranha, a partir do qual é notável o(s) ponto(s) de maior fragilidade. Além disso, também são compiladas as respostas por categoria e por peso, a fim de se verificar a quantas perguntas críticas, por exemplo, foi atribuída nota 0, 2,5, 5, 7,5 ou 10 (o mesmo é feito para as perguntas importantes e muito importantes). Ambos os gráficos serão apresentados na próxima seção (4.2), com a aplicação do *checklist* a um estudo de caso.

3.4 Preenchimento do *checklist*

O preenchimento do *checklist* inicia-se na aba “Inf. gerais”, na qual são colocadas as informações da unidade, do equipamento em análise, a data e o nome, cargo e assinatura

de todos os envolvidos na verificação. Em seguida, caso o ativo seja contemplado na NR 13, deve-se preencher a aba “NR 13”, caso contrário, parte-se direto para a aba “Proj-Fabric”, “Operação”, “Gestão”, “Deterioração” e “RBI”.

Caso para alguma pergunta seja pertinente um comentário, deve-se fazê-lo na coluna destinada a observações. Caso haja alguma ação a ser feita, esta deverá ser indicada na parte inferior do *checklist*, sendo já determinado um responsável pela execução e um prazo para o cumprimento da ação.

Após o preenchimento de todas as abas, os resultados gráficos poderão ser verificados na aba “Análise”, cabendo à equipe de verificação a interpretação e avaliação dos resultados. Por fim, na aba "Referência", poder-se-á verificar as referências utilizadas para a confecção do *checklist*, tabelas que devem ser utilizadas para responder algumas perguntas e a listagem de normas que podem ser úteis para consulta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo de caso

Com o objetivo de validar o *checklist* desenvolvido, o mesmo foi aplicado a um acidente real, considerando as informações contidas no relatório final de investigação elaborado e emitido pelo Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) em outubro de 2002 (CSB, 2002), referência 2001-05-I-DE; trata-se do acidente ocorrido na refinaria Motiva, em 17 de julho de 2001, localizada na cidade de Delaware, nos Estados Unidos. A ideia de realizar tal aplicação foi de verificar se a aplicação do *checklist* seguida da avaliação de suas saídas contribuiria significativamente para prevenção da ocorrência. A seguir, será apresentado de forma objetiva o ocorrido e informações levantadas sobre o equipamento envolvido.

No dia 17 de julho de 2001, estava sendo feito um reparo na plataforma de acesso aos tanques de estocagem de ácido sulfúrico da refinaria Motiva. Durante o reparo, foi liberada uma fagulha proveniente do trabalho a quente em andamento - esta fagulha serviu como fonte de ignição ao entrar em contato com vapores inflamáveis provenientes do tanque 393, que continha ácido sulfúrico “reutilizado” (próximo ao qual estava sendo realizado o trabalho). Com a ignição houve uma explosão, que levou a separação do tanque de seu fundo, liberando todo o seu conteúdo e atingindo outro tanque próximo - que também teve seu conteúdo liberado. O incêndio durou cerca de 1 hora e meia, e teve como consequências uma fatalidade, 8 pessoas feridas e um significativo impacto

ambiental em função do ácido sulfúrico vazado ter atingido o Rio Delaware (de CSB, 2002).

O tanque 393 - envolvido no acidente – foi fabricado em aço carbono, no ano de 1979, com a finalidade de armazenar ácido sulfúrico “fresco”. Com o passar dos anos, o tanque sofreu corrosão localizada em diversos pontos, sendo identificados diversos vazamentos no casco entre os anos de 1998 e 2001. Os vazamentos reportados foram sanados, com exceção de um ocorrido em maio de 2001, no entanto, havia diversos furos no teto e casco do tanque sem registro oficial. Assim, em cada inspeção realizada, era recomendado que fosse feita uma verificação interna do tanque, porém esta foi continuamente postergada pela Motiva.

No ano 2000, o tanque foi modificado para armazenar ácido sulfúrico “reutilizado”, o qual continha uma fração de hidrocarbonetos leves, capazes de vaporizar levando a formação de atmosfera inflamável entre a superfície do líquido e o teto do tanque. Não há evidências de que foi feito um estudo adequado para implantação desta mudança.

Na Tabela 3 são destacados os registros e recomendações das inspeções realizadas no tanque 393.

Tabela 3 – Registros das inspeções realizadas no tanque 393 entre os anos de 1992 e 2001.

Data	Registro	Comentário
1992	Medida de espessura	Aproximadamente metade da tolerância à corrosão disponível foi consumida.
1994	Inspeção interna: sulco de corrosão se estendendo ao redor do costado, próximo ao piso do tanque. Realizado reparo com solda.	Com a taxa de corrosão observada, o tanque terá toda sua tolerância à corrosão consumida em aproximadamente 4 anos. Realizar nova inspeção com ultrassom em 2 anos para monitorar a taxa de corrosão.
jun/98	Vazamento no costado: reparado com chapa de aço.	Inspeção externa com ultrassom atrasada (recomendada em 1995).
jul/98		Remover isolamento em 2 anos para realização de nova inspeção por ultrassom do costado.
abr/99	Vazamento no costado: reparado com "remendo".	
set/99	Vazamento no costado: furo acima dos pontos de vazamento anteriores. Reparado com "remendo".	Tendo em vista as recentes falhas observadas, é recomendado que o tanque seja retirado de operação assim que possível, para uma inspeção interna e análise por ultrassom.
abr/00	Vazamento no costado: vazamento horizontal devido a um sulco no casco, na mesma área dos vazamentos anteriores.	Tendo em vista as recentes falhas observadas, é recomendado que o tanque seja retirado de operação assim que possível.
jul/00	Vazamento no costado: vazamentos do mês de abril foram corrigidos com uma cobertura de epóxi, voltando a vazar em julho. Desta vez, foi feito reparo com aço carbono.	Este tanque deve ser retirado de operação assim que possível, devido a corrosão no costado.
mai/01	Vazamento no costado: vazamento imediatamente acima dos pontos anteriores. Reparo não efetuado.	Este tanque tem um histórico de vazamentos e corrosão externa. Ele deveria ser retirado de operação assim que possível para uma inspeção interna e reparo permanente.

(Fonte: Adaptado de CSB, 2002)

4.2 Resultados e Discussões

4.2.1 Utilização da ferramenta

O *checklist* elaborado foi respondido por três profissionais com o objetivo de assegurar um olhar multidisciplinar durante a análise, cujas formações são em engenharia química, engenharia de segurança do trabalho e engenharia elétrica. Durante essa etapa, as seguintes necessidades de adequação foram observadas:

- Necessidade de sinalizar que o time que realizará a avaliação do ativo deve apresentar um grau de conhecimento técnico relacionado à manutenção, inspeção e integridade de equipamentos;
- Revisar e adequar as perguntas do *checklist* para facilitar o entendimento do usuário - linguagem clara;
- Incluir informações de suporte para preenchimento do *checklist* na aba “Referências”, como a tabela de compatibilidade de materiais, índice de normas para consulta, informações sobre categorias de peso das questões e tabela de prazos NR-13;
- Inclusão da aba “Análise” para permitir ao usuário do *checklist* a consolidação do resultado de conformidade de cada categoria avaliada.

4.2.2 Aplicação *checklist*

O *checklist* desenvolvido foi aplicado ao tanque TQ-393, utilizado para armazenar ácido sulfúrico conforme descrito do acidente ocorrido na refinaria Motiva, em 17 de julho de 2001.

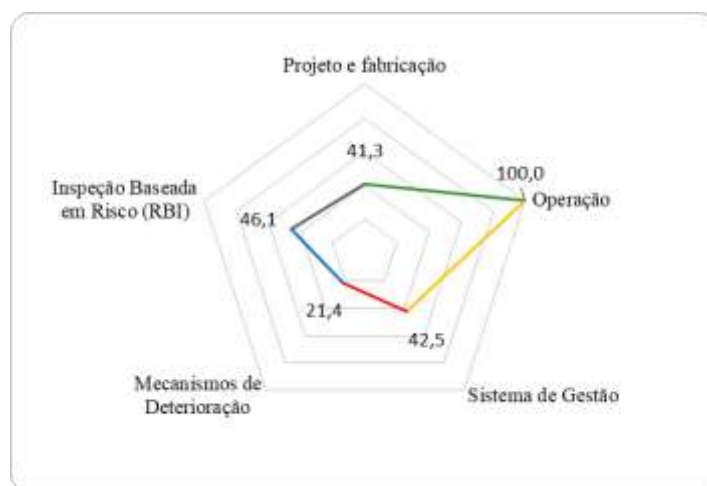
Ao analisar todos os dados referentes aos itens verificados através do *checklist*, foi possível estabelecer um percentual de conformidade referente às categorias de Projeto e fabricação, operação, gestão, deterioração e envelhecimento e inspeção baseada em risco (RBI). A verificação relativa aos requisitos da NR-13 não foi realizada, pois o equipamento não é enquadrado na NR 13. A Tabela 4 apresenta os resultados da aplicação do *checklist*, sendo desconsiderados os itens não aplicáveis.

Tabela 4 - Resultados da aplicação do *checklist* ao estudo de caso.

Categoria	Conformidade (%)
Projeto & Fabricação	50%
Operação	100%
Sistema de Gestão	42,5%
Mecanismos de Deterioração e envelhecimento	21,4%
Inspeção baseada em risco	46,1%

Os resultados apresentados são em função das informações contidas no relatório de acidente avaliado.

Figura 7 - Porcentagem de conformidade por categoria.



A categoria “Mecanismo de Deterioração” apresentou o menor índice de conformidade, 21,4 %, seguida das categorias “Sistema de Gestão” e “Inspeção Baseada” em Risco que obtiveram os percentuais de 42,5 % e 46,1 % respectivamente.

Foi observado 0 % (zero) de conformidade para itens críticos relacionados à categoria “Sistema de Gestão”:

1. Alterações sem estudo de MOC;
2. Recomendações oriundas de inspeção de integridade não atendidas;
3. Plano de inspeção não considerou as recomendações da análise de risco.

Os itens 1 e 2 aparecem como causa raiz do relatório final de investigação emitido pelo CSB em Outubro de 2022. Assim, o uso do *checklist* como ferramenta para prevenção de

perdas de contenção através da observação da integridade do equipamento, no caso avaliado, poderia ter: alertado quanto ao NÃO cumprimento de recomendações oriundas das inspeções realizadas; evidenciado a necessidade de se estudar a alteração realizada no tanque 393 (MOC); e sinalizado a necessidade da realização de uma análise de risco mais aprofundada da área de tancagem - local onde estava o tanque de ácido sulfúrico modificado e que não possuía uma análise de risco (APR, *What if*, *Bow tie*...).

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O presente trabalho permitiu a identificação de fatores capazes de contribuir e/ou agravar a perda de integridade de um ativo maduro, através do levantamento bibliográfico realizado, o qual considerou a observação de boas práticas de engenharia, da Norma Regulamentadora 13 (NR13), dos códigos API 579-1/ASME FFS-1, API RP 580 e 581; e publicações da HSE (*Health and Safety Executive*), permitindo a elaboração de uma lista de verificação voltada para avaliar o nível de conformidade relacionado à integridade mecânica de ativos maduros.

A lista de verificação desenvolvida possibilitou uma análise apurada de um tanque locado em uma planta industrial madura. A aplicação do *checklist* a uma ocorrência real, utilizando-se das informações contidas no relatório técnico do acidente ocorrido na refinaria Motiva, permitiu concluir que a aplicação do *checklist* num ativo maduro é capaz de ajudar na identificação de problemas presentes, auxiliar na busca da causa raiz de um evento e alertar para possíveis desvios de projeto, auxiliando na priorização de adequações e contribuindo para a redução da probabilidade de ocorrência de um evento SEPRO.

O questionário aplicado ao estudo de caso, conseguiu identificar os pontos frágeis relacionados à integridade do ativo através de resultados baixos de conformidade dentre as categorias estabelecidas: mecanismos de deterioração e envelhecimento, sistemas de gestão e inspeção baseada em risco. Assim, foi demonstrada uma condição desfavorável de operação, sinalizando a necessidade de adequação e permitindo corroborar com a ideia de que uma análise bem feita, associada ao conhecimento técnico e multidisciplinar do time de avaliação, torna possível identificar e priorizar pontos vulneráveis capazes de levar a perdas de contenção.

Dada a importância da aplicação do *checklist*, torna-se necessário à organização definir a periodicidade da avaliação, ações a serem tomadas, prazos e a definição dos responsáveis,

de forma a garantir o gerenciamento do risco. Nesse sentido, o *checklist* contribui de forma eficiente, permitindo à organização ter uma visão geral relacionada à integridade de seus vasos de pressão e tanques.

Como sugestão, para trabalhos futuros, fica o aprimoramento do *checklist*, a fim de torná-lo mais específico para cada tipo de equipamento e para a realidade da empresa que irá aplicá-lo. Além disso, nota-se uma oportunidade de avaliar a possibilidade de extensão da vida útil do ativo com a aplicação periódica da lista de verificação e da implantação e acompanhamento das ações levantadas. Assim, esta, também, seria uma sugestão de estudo para novos trabalhos, revendo o *checklist* de forma a incluir a avaliação e o impacto na vida útil do ativo.

REFERÊNCIAS

AFEFY, Islam H.. Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: a case study. **Engineering**, [S.L.], v. 02, n. 11, p. 863-873, 2010. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2010.211109>.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-For-Service. 2021.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RECOMMENDED PRACTICE 580: Risk-based Inspection**. 3 ed., 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RECOMMENDED PRACTICE 581: Risk-Based Inspection Technology**. 3 ed., 2016.

API, American Petroleum Institute. **Mechanical Integrity Standards**. 2019. Disponível em: <https://www.api.org/oil-and-natural-gas/health-and-safety/refinery-and-plant-safety/process-safety/process-safety-standards/mechanical-integrity-standards>. Acesso em: 19 mar. 2022.

ASTM E1823. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. ASTM International. Pennsylvania-USA. 2021.

CCPS, **Diretrizes para Segurança de Processo Baseada em Risco**. CCPS, 2007.

CCPS. **Guidelines for mechanical integrity systems**. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2006.

CCPS; **Risk Based Process Safety Overview**; Center for Chemical Process Safety, 2014.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F.. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. 3. ed.. Prentice Hall, 2011.

CSB (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board). **Investigation report: refinery incident**. Delaware City. Report N° 2001-05-I-DE. 2002. 93 p.

DET NORSKE VERITAS. **RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-G101: Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipments**. 2002.

DYNAMOX. **Curva P-F: Como o seu entendimento pode contribuir para a manutenção**. 2020. Disponível em: <https://dynamox.net/blog/curva-p-f-como-o-seu-entendimento-pode-contribuir-para-a-manuten%C3%A7%C3%A3o/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

GYENES, Zsuzsanna; WOOD, Maureen H.. Lessons learned from major accidents relating to ageing of chemical plants. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 48, p. 733-738, jun. 2016. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1648123>.

HSE. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **RR823: Managing Ageing Plant: A Summary Guide**. 2008.

INSPECTIONEERING. **Overview of API RP 581 - Risk Based Inspection Technology**. Disponível em: <https://inspectioneering.com/tag/api+rp+581>. Acesso em: 21 abr. 2022.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de Gestão de Ativos: Volume 1: fundamentos**. Amazon Digital Services Llc, 2020. 1 v.

MILANESE, Stefano; SALVADOR, Emanuele; DECADRI, Stefano; RATTI, Riccardo. Asset integrity management system (aims) for the reduction of industrial risks. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 57, p. 283-288, maio 2017. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1757048>.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 13**: Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Brasil, 2019.

PASSOS, Bruno. **NR-13, um breve resumo....** LinkedIn, 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/nr-13-um-breve-resumo-bruno-passos/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 17 ago. 2022.

PENA, Camila Pontes. **RBI - Foco na inspeção não intrusiva e NR-13**. Isq Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2016/07/RBI-Foco-na-Inspe%C3%A7%C3%A3o-N%C3%A3o-Intrusiva-Camila-Pontes.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022

The Institute of Asset Management. PAS 55:2008. Gestão de ativos.

VISHNU, C.R.; REGIKUMAR, V.. Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: a case study. **Procedia Technology**, [S.L.], v. 25, p. 1080-1087, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211>.

ANEXO I – CHECKLIST



ANEXO I.pdf

ANEXO II – PLANILHA CHECKLIST



Checklist Integridade
de Ativos.xlsm

ANEXO III – PLANILHA ESTUDO DE CASO



Checklist Integridade
de Ativos_Estudo de C