



UMA ANÁLISE DE APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA) À UTILIZAÇÃO GENÉRICA DE O´RINGS

APPLICATION OF FMEA METHODS FOR GENERIC UTILIZATIONS OF O´RINGS

Marcio Magini¹, Nathália Couto de Oliveira²,
João Carlos Sant'Anna da Silva³, Maira R. Rodrigues Magini⁴

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v43p368-381.2024

RESUMO: A previsão de deflexões em estruturas solicitadas por esforços axiais – como barras e treliças – é Neste trabalho, será proposta uma Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) em um sistema genérico composto por uma interface de vedação, um alojamento para anel, chamado groove, e um anel de vedação estilo o'ring. O o'ring é um anel elastomérico de seção transversal circular, cujas propriedades mecânicas são influenciadas por aditivos às matérias-primas, e a sua versatilidade e o seu baixo custo comercial são os principais motivos para o seu amplo uso. A partir do estudo das funcionalidades de cada componente para o bom funcionamento do sistema são levantados os possíveis modos de falha. Tais falhas são originadas em três principais etapas, a saber: projeto, fabricação e uso, e podem surgir vinculadas a qualquer um dos componentes supracitados. Esmiuçando os processos envolvidos nessas etapas, constrói-se uma árvore de falhas genérica. Finalmente, retomando as etapas do FMEA, são levantadas as possíveis soluções às causas listadas, que devem ser implementadas no sistema conforme confiabilidade requerida e disponibilidade de recursos.

PALAVRAS-CHAVE: vedação; O'ring; FMEA; árvore de falha.

ABSTRACT: The prediction of deflections in structures requested by axial forces - such as bars and trusses - is studied In this work, the FMEA methodology, analysis of failure modes and effects, is studied in a generic system composed by a sealing interface, called groove, and an o'ring. O'ring consists of an elastomeric ring with a circular cross-section, whose mechanical properties are influenced by additives to the raw materials, and its versatility and low commercial cost are the main reasons for the wide use. By studying the proper functionalities of each component for the system, possible failure modes are identified. Such failures originate in three main stages, namely: design, manufacture and use, and may arise linked to any of the aforementioned components. Examining the processes involved in these steps, a generic fault tree is constructed. Finally, returning to the FMEA stages, possible solutions to the listed causes are raised, which must be implemented in the system according to the required reliability and resource availability.

KEYWORDS: Sealing; O'Ring; FMEA; Fail Tree.

¹ Prof. Dr. Associado, Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), mmagini@macae.ufrj.br

² Engenharia Mecânica, Petrobrás, nathalia_coutoo@hotmail.com

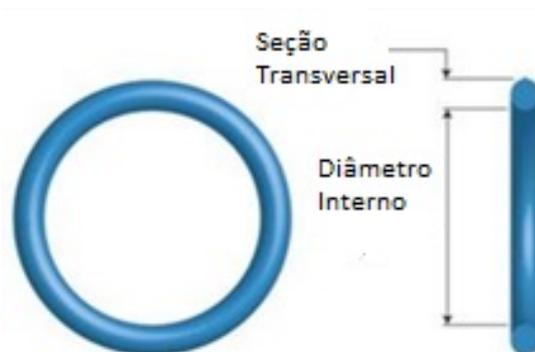
³ Prof. MSc. Assistente, Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), joaosantanna@macae.ufrj.br

⁴ Prof. Dr. Adjunto, Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), maira.magini@macae.ufrj.br

INTRODUÇÃO

O o'ring é um anel elastomérico de seção transversal circular que, quando comprimido entre duas interfaces, preenche as rugosidades e sela as superfícies, impedindo a comunicação entre as câmaras. Tal anel é usado na indústria como um importante material e método para vedação (Figura 1).

Figura 1 – Exemplo de o'ring e principais cotas



Fonte: elaborada pelos autores.

A eficácia da vedação depende de a compressão estar entre os valores necessários para a deformação do o'ring. As falhas ocorrem devido a três fatores: deformação durante a montagem, deformação fruto da pressurização do sistema e deformação por pressão acima da nominal suportada pelo o'ring (PARKER, 2018). A fim de evitar contaminações e por sua utilização dinâmica, os sistemas mais modernos priorizam selos não metálicos, dimensionados para trabalharem desde períodos curtos (MODY; GERRARD; GOODSON, 2013).

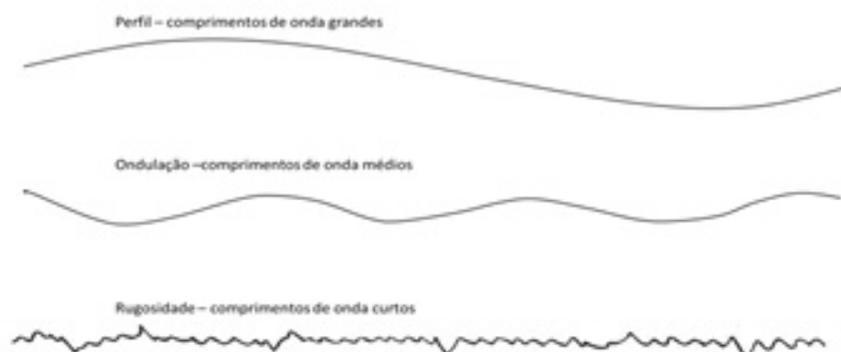
Plásticos e elastômeros são as matérias-primas mais populares para gaxetas, o'rings e outros selos em razão de sua resiliência (CLAVELARIO, 2012). Com o tempo e a demanda por melhores desempenhos surgiram os primeiros compósitos, que misturam diferentes materiais, melhorando, assim, as funções mecânicas (VENTURA, 2009; GORNI, 2003). Os hiperelásticos possuem não linearidade geométrica, sendo aceitável a relação constitutiva que pressupõe que a tensão em um ponto pode ser obtida tão somente a partir das deformações no ponto. Só é possível relacionar a tensão com a deformação de forma linear, de acordo com o proposto pela Lei de Hooke, em pequenas deformações, de até aproximadamente 100%, e, conforme aceitando deformações, de até 1000%, ainda no regime elástico (KRÜTZMANN, 2015; CAETANO, 2010).



Em materiais hiperelásticos, o coeficiente de Poisson, razão entre a contração lateral relativa e a expansão longitudinal, é igual a 0,5. Tal dado define elastômeros como materiais sólidos totalmente incompressíveis, ou seja, que mantêm seu volume constante durante o processo de deformação, sua capacidade de deformabilidade e suas características de rigidez, tal como outros fatores: modo de cisalhamento, força de compressão entre outros aspectos que são de importância para se estudar a eficácia do o'ring (KRÜTZMANN, 2015).

As interfaces em contato direto com o o'ring são conhecidas como *grooves*, nas quais o posicionamento dos o'rings determina sua capacidade de melhor vedação (KARASZKIEWICZ, 1990; GREEN; ENGLISH, 1992; RICHTER, 2016). A rugosidade é uma característica inerente a superfícies de engenharia referente às características dimensionais em nível microscópico (Figura 2). Essas características dependem de como o material é produzido (PÁDOA, 2018).

Figura 2 – Diferença entre irregularidades superficiais



Fonte: Pádoa (2018).

O atrito é um fenômeno muito estudado experimentalmente, principalmente no que tange a aplicações com o'rings. As seguintes hipóteses são plausíveis: a) a força total de atrito total não depende da área de contato; b) a força total de atrito é proporcional à força normal total aplicada na superfície; e c) a força total de atrito independe da velocidade em casos de baixa velocidade relativa (RAMOS, 2019; CAETANO, 2010).

Coeficientes de atrito envolvendo elastômeros são determinados por normas regulamentadoras, a saber: ISO 21182, DIN 2782 e ASTM D1894. Em 1978, com a criação do comitê e em razão de influência política e comercial, a ISO 3601-1 foi produzida, no modelo métrico, contendo aproximadamente 230 tamanhos de o'ring entre 1.80 e 7.00 mm de seção transversal (FLINTNEY, 2003). Várias revisões



das normas, baseadas nos sistemas de medição, foram feitas para a padronização das especificações técnicas. Outras normas também podem ser encontradas, como NF T 47-501, norma internacional emitida pelo Instituto Francês de Padrões, a AS568, emitida pela SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos) para fins aeroespaciais e a JIS B 2401, norma referente ao padrão industrial japonês (CAETANO, 2010; FLINTLEY, 2003; RICHTER, 2016).

DESENVOLVIMENTO

A Análise de Modos de Falha e seus Efeitos – FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) – é uma análise sistemática e proativa de possíveis modos de falha, com foco na prevenção, e tem como propósito identificar ações necessárias para prevenir que falhas afetem o consumidor final, garantindo o máximo de qualidade, confiabilidade e durabilidade (McDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008; MZOUGUI; FELSOUF, 2019). Segundo McDermott, Mikulak e Beauregard (2008), tais pontos são definidos pela falta de funcionamento segundo o estabelecido por projeto e denominados modos de falha. Outro ponto é a análise de criticalidade, segundo Sakurada (2001). Ao adicionar essa análise ao termo FMEA, tem-se a metodologia FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*). O risco associado a uma falha está relacionado aos seguintes fatores: a) detecção: probabilidade de percepção da falha antes das consequências; b) recorrência: frequência de ocorrência da falha; e c) severidade: gravidade das consequências decorrentes da falha. Esses parâmetros determinam o RPN (*Risk Priority Number*), ou número de prioridade do risco, gerando uma escala usada para priorizar a necessidade de ações corretivas e a efetividade destas.

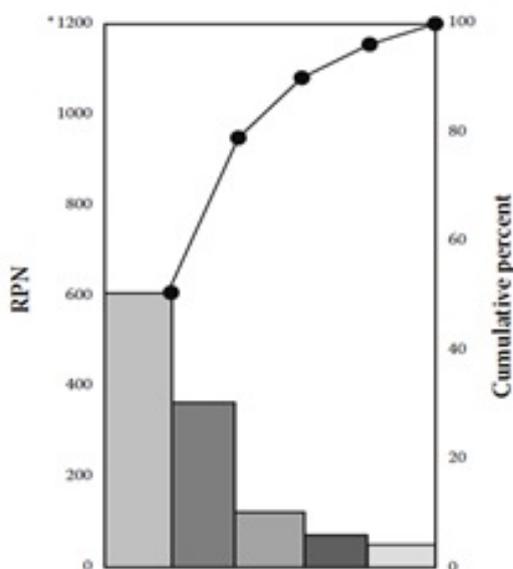
Segundo Mzougui e Felsouf (2019), dificilmente o grupo destinado a avaliar os riscos atinge consenso quanto ao valor concedido às categorias, normalmente de 1 a 10. A principal função da FMEA é identificar os potenciais de falha nos estágios iniciais do desenvolvimento do projeto e otimizar o *design* final (SHARMA; SRIVASTAVA, 2018). Busca-se entender como uma falha no processo pode afetar o produto final, a eficiência de processamento ou a segurança, reduzindo o processo de fabricação em cinco elementos: meio ambiente, métodos, equipamentos, materiais e pessoas (McDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008; TENG; HO, 1996; SAKURADA, 2001).

Por sua vez, a metodologia FMECA consiste no cumprimento de dez etapas, tanto para análises de produto quanto de processo, conforme a explicação a seguir (SHARMA; SRIVASTAVA, 2018). Etapa 1: a revisão do processo ou produto



consiste na compreensão, por todo o grupo envolvido, do funcionamento e dos principais detalhes do produto ou do fluxograma operacional do processo, a depender do caso, garantindo familiaridade com o objeto da análise. Etapa 2: a listagem de ideias sobre possíveis modos de falha é feita por *brainstorming*. Assim, o grupo se reúne e discute ideias prévias e novas conforme o foco da sessão de debate. Após a conclusão das sessões e listagem das possibilidades, as ideias devem ser organizadas conforme categorias estipuladas pelo time. Etapa 3-6: a correlação de cada modo de falha às possíveis consequências deve ser minuciosa. Na sequência, cada modo de falha é classificado conforme três critérios. A severidade é um parâmetro da gravidade da consequência listada que pode ser atribuída com base nas experiências passadas ou estimativas do grupo. O valor de detecção, por sua vez, trata, inversamente, de quão provável é esse efeito de ser capturado por alguma ferramenta de controle. Quão menor for a chance de uma falha ser observada previamente, maior será seu valor atribuído. Assim, cada uma dessas etapas possui como saída um valor de 1-10, sendo 10 o maior valor atribuído às piores condições, conforme critérios estabelecidos e acordados previamente pelo time do FMEA. Etapas 7-8: para calcular o RPN de cada modo de falha, basta multiplicar os valores encontrados nas etapas anteriores, e para classificá-los, é recomendado o uso de um diagrama de Pareto (Figura 3).

Figura 3 – Diagrama de Pareto de RPN



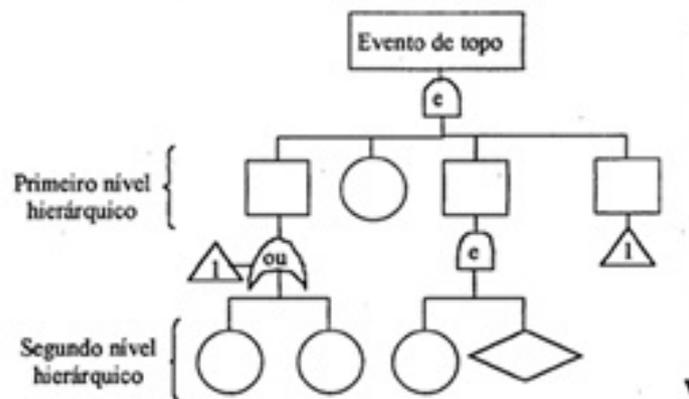
Fonte: McDermott; Mikulak; Beauregard (2008).

A Figura 3 apresenta o diagrama de Pareto, no qual se relacionam o RPN de cada modo de falha, no eixo vertical esquerdo; o percentual cumulativo que essa falha representa sobre o somatório de RPNs do FMEA, no eixo vertical direito; e os modos de falha em si, ordenados em ordem decrescente por RPN, no eixo horizontal.

Etapas 9-10: neste momento, deve-se elaborar um plano de ações que enfoque as principais falhas expostas na etapa anterior. Após implementação das ações estipuladas, deve-se refazer as etapas 4-7 e comparar os valores obtidos ao estado original.

Vários *templates* para a coleta e o registro das informações descritas, que comumente consistem em averiguações iniciais para a condução do FMEA/FMECA, e grandes tabelas que relacionam modos de falha aos respectivos efeitos, assim como a elaboração da árvore de falhas que define eventos e simbologias específicas, são encontrados em bibliografias (Figura 4) (McDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008; SAKURADA, 2001; XING, 2008).

Figura 4 – Árvore de falhas e identificação de níveis hierárquicos



Fonte: Sakurada (2001).

O retângulo identifica um evento de falha proveniente de combinações de falhas anteriores e usado para o evento de topo; o círculo corresponde a uma falha básica, a partir da qual não surgem novos eventos; e o losango é usado para falhas cujas causas básicas não serão desenvolvidas na análise vigente, por falta de informações adicionais, limitação temporal ou outros impeditivos.



MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho será utilizado como base o *template* apresentado pela AIAG (*Automotive Industry Action Group*) (FITHRI et al., 2018). A metodologia de análise de falhas consiste em uma tabela (Tabela 1); na primeira coluna é definido o item chave para o FMEA.

Tabela 1 – FMEA inicial

DFMEA					
Design Failure Mode and Effect Analysis					
Item	Função	Requerimento	Modo de falha	Efeitos	Severidade
O'ring	Vedar interfaces	Pressão de trabalho determinada por projeto	Não vedar	Vazamento	8
	Preencher espaço entre superfícies	Taxa de preenchimento conforme memória de cálculo	Excesso de preenchimento da cavidade	Dano à interface do selo	6
			Preenchimento insuficiente do espaço de vedação	Vedação insuficiente	8
	Resistir aos esforços exercidos pela aplicação dinâmica	Vida útil conforme projeto	Falha estrutural	Dano à interface do selo	6

Fonte: elaborada pelos autores.

A segunda coluna identifica a função do item citado. Na terceira coluna são listadas as exigências que regem as funções da coluna dois. Os modos de falha, compilados na coluna quatro, são, por definição, a negativa da função; assim, pode representar o não cumprimento do requisito, não atendimento à função ou atendimento parcial ao estipulado em projeto. Os efeitos, indicados na coluna cinco, são as consequências das falhas. A coluna anexa, referente à severidade, indica, em uma escala de 0-10, o impacto desse efeito. São atribuídos os seguintes valores a cada falha: falha de segurança abrupta = 10; falha de segurança com certo aviso prévio ou falha no cumprimento a regulamentos = 9; perda abrupta da função primária = 8; degradação da função primária = 7; perda de função secundária = 6; degradação de função secundária = 5; falha estética de fácil identificação = 4; falha estética de média percepção = 3; falha estética dificilmente identificada = 2; e falha imperceptível = 1.



Considerando como função primária a capacidade de vedação do selo elastomérico, vazamentos têm criticidade 8 na escala. A coluna seguinte, referente às causas, será determinada pela metodologia da árvore de falhas, conforme o detalhado a seguir. O principal efeito – a saber, vazamento – é investigado a partir de revisão da literatura, compilando falhas já registradas e suas respectivas causas.

Metodologia de análise de falhas

Para a metodologia de análise de falhas, sabe-se que o'rings podem permanecer livres de vazamento mesmo após a perda da força de vedação e degradação das características do material devido às condições estáticas (KÖMMLING et al., 2019). A efetividade do sistema como um todo depende do desempenho dos elementos envolvidos (SHAO; KANG, 2014). As etapas que compõem o processo de utilização de um o'ring são: *design*, modos de fabricação, uso e vida útil.

Design

Um dos primeiros, e mais importante, pontos de falha de uma estrutura de vedação reside no projeto (HU et al., 2005). O início do projeto é caracterizado pela definição das condições de atuação do selo, como temperatura, pressão de trabalho e aplicação, se estática ou dinâmica entre outras. A partir desses dados, controlados majoritariamente pelo cliente, e vistos o nível de criticidade atribuído e o orçamento disponível, determina-se os parâmetros internos conforme normas (CAETANO, 2010). Essas causas podem levar à possível extrusão ou a uma vedação insuficiente e conseqüente vazamento em condições de subdimensionamento (TARKKA, 2019).

Segundo Tarkka (2019), existem três parâmetros para o princípio de vedação: i) *Squeeze*: representa a compressão radial sofrida pelo o'ring durante a instalação na região apropriada, entre o groove e interface oposta. Tal valor costuma variar de 20% a 30% a depender das características do selo, como dureza, condições de aplicação – estática ou dinâmica – e condições ambientais – temperatura de trabalho; ii) *Stretch*: indica o alongamento tangencial após instalação no groove. Quando a esse parâmetro, não é recomendado sobrepor 5%, visto que altos valores reduzem a seção transversal e afetam o valor de *squeeze*; e iii) *Volume de preenchimento*: indica o percentual do alojamento ocupado pelo selo ou conjunto destes. Esse parâmetro representa se há espaço para montagem dos



componentes e deve-se atentar para mantê-lo abaixo de 85%, em razão de expansões conforme oscilação da temperatura (CAETANO, 2010).

Modos de fabricação

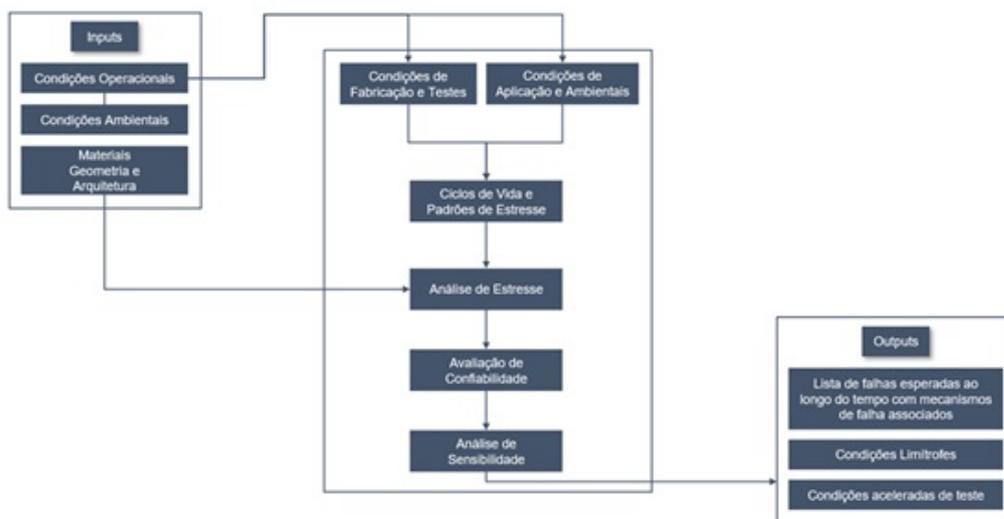
O processo de fabricação de o'rings é detalhado e preciso, conforme etapas principais descritas a seguir (PPE, 2018): i) o'rings são fabricados a partir de moldes, normalmente produzidos em aço e usinados sob alta precisão a fim de garantir cotas de projeto; ii) a matéria-prima usada é de suma importância, visto que elastômeros herdam suas características primárias dos materiais e aditivos usados. Assim, tanto a seleção quanto o processo de adição desses ingredientes à mistura são controlados; iii) a seção transversal do o'ring é obtida a partir do processo de extrusão. Dessa forma, a matéria, acrescida de aditivos, é aquecida e forçada contra moldes referentes à seção transversal, gerando fios elastoméricos; iv) tais fios são cortados conforme comprimento necessário e prensados contra moldes aquecidos a fim de selar as interfaces de corte e iniciar o processo de cura; v) o acabamento consiste na remoção do excesso de matéria restante após o processo de prensa e pode ser realizado de diversos modos, como criogenia ou pelo uso de lixas, a depender da criticidade e diâmetro final do anel como um todo; e vi) a cura final do o'ring é realizada em fornos, em um processo que envolve horas sob calor, sendo esta a última etapa do processo de fabricação.

As superfícies em contato também sofrem processos de preparação para exercer tal função. Processos de usinagem e polimento, comuns para a obtenção das características buscadas, possuem imprecisões e modos de falha próprios, a depender das características particulares do método (PÁDOA, 2018; WANG; JIA; JIANG, 2000).

Uso e vida útil

A metodologia da física da falha consiste na incorporação da confiabilidade às etapas de projeto como um esforço adicional na prevenção de falhas (Figura 5) (SHAO; KANG, 2014; PECHT; DASGUPTA, 1996).

Figura 5 – Processo da física da falha



Fonte: Pecht e Dasgupta (1996).

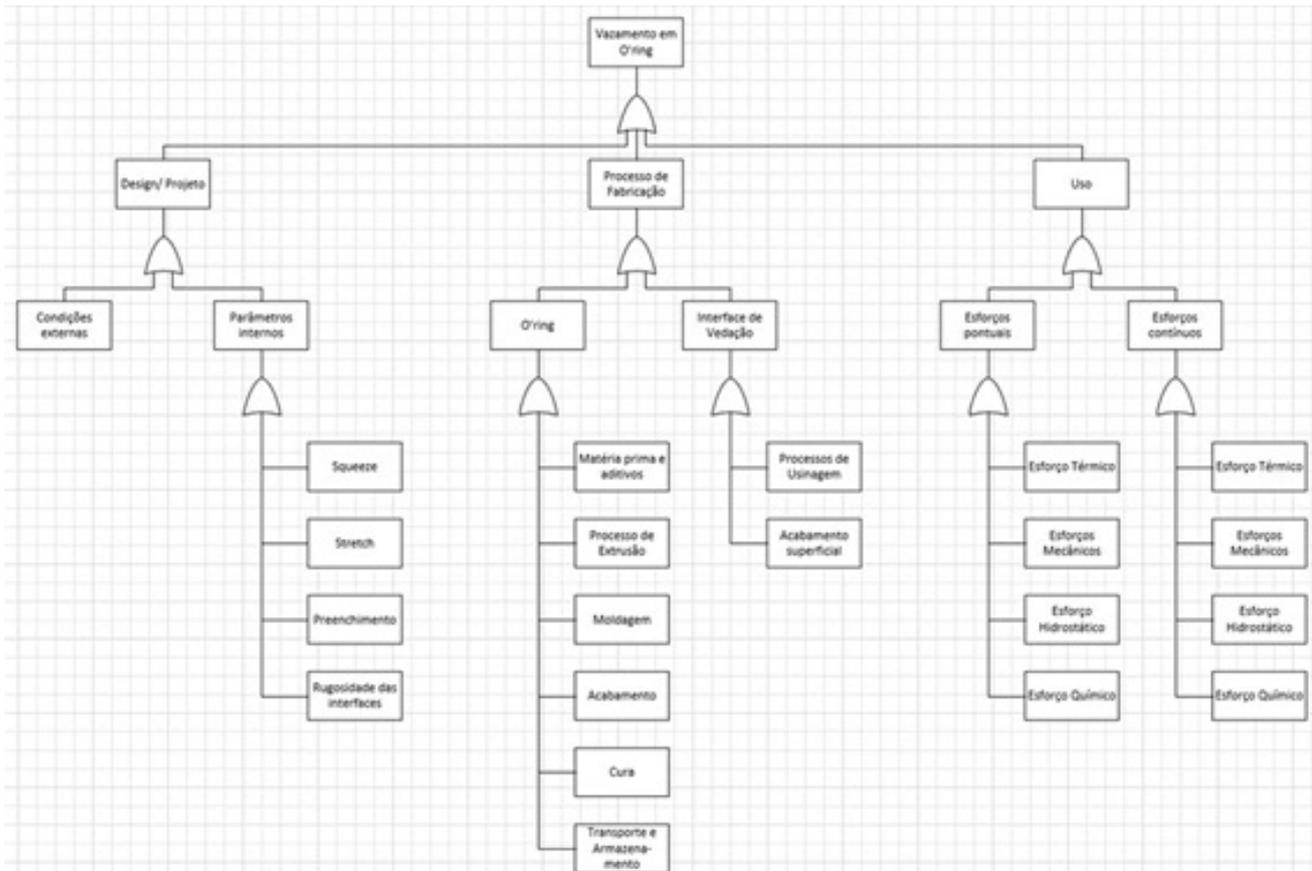
Na sequência, são combinados os conhecimentos de análise de estresse com as respectivas respostas a essas situações a fim de identificar possíveis pontos, modos e mecanismos de falha. Enquanto modos de falha podem ser definidos pela resposta à questão “qual foi a falha?”, mecanismos de falhas são aqueles que respondem à pergunta “como houve a falha?”. Nesse estágio, são especialmente úteis pesquisas de modos de falha prévios (PECHT; DASGUPTA, 1996; PARKER, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Árvore de falhas

Com os pontos de falha listados acima, constrói-se a árvore de falha sobre o efeito de maior criticidade listado no FMEA do material. A primeira etapa, de *design*, possui parâmetros que correlacionam os elementos envolvidos no processo de vedação às falhas atreladas aos processos de fabricação, que se subdividem ainda nas possibilidades de falha de cada um dos componentes (Figura 6).

Figura 6 – Árvore de falhas relativa à falha de o'rings



Fonte: elaborada pelos autores.

Plano de ações

Nesta etapa, retorna-se às possíveis causas da falha listadas novamente para o FMEA, completando-o. Objetiva-se, nesta seção, listar as ações que busquem minimizar o percentual de cada causa ou reduzir os impactos causados, visando maximizar a confiabilidade do sistema. A partir da Tabela 2 – padrão normalmente usado para elaboração de FMEAs, prévia e parcialmente apresentado na seção 4.1 –, retorna-se o preenchimento das colunas posteriores.



Tabela 2 – FMEA relativo a o'rings

FMEA												
Failure Mode and Effect Analysis												
Item	Função	Requerimento	Modo de falha	Efeitos	Severidade	Causas	Métodos de Controle				RPN	Ação Recomendada
							Prevenção	Ocorrência	Deteção	Deteção		
O'ring	Vedar interfaces	Pressão de trabalho determinada por projeto	Não vedar	Vazamento	8							
	Preencher espaço entre superfícies	Taxa de preenchimento conforme memória de cálculo	Preenchimento insuficiente do espaço de vedação									

Fonte: elaborada pelos autores.

É possível, então, elaborar uma construção que determina o efeito, a causa, os métodos de controle e as ações recomendadas. O principal foco da análise é relativo à capacidade de vedação; logo, o vazamento é o efeito foco da análise de falha. A partir disso, tem-se três possíveis causas: *design*, fabricação e, por fim, uso e vida útil. Para o vazamento por *design*, tem-se as seguintes possibilidades: i) definição de condições de trabalho do sistema; e ii) cumprimento de parâmetros internos – para estes, os métodos de controle e ações recomendadas são, respectivamente, prevenção e delimitação das condições externas de forma clara e em acordo com o cliente. Etapas conhecidas como *design review*, ou revisão do projeto, ocorrem após a conclusão desta etapa, mas ainda antes da evolução para etapas posteriores. A revisão do estado atual, comparando-o ao ideal, via testes e inspeções, faz com que se poupe tempo, custos e transtornos contratuais (KIRBY; FURRY; HICKS 1988), com o cumprimento de normas e catálogos tabelados, que respeitam os parâmetros indicados como aceitáveis pela comunidade acadêmica. Salvos os casos de usos específicos e exclusivos, que possam requerer dimensões que fujam dos valores tabelados, recomenda-se o uso de valores padronizados (TARKKA, 2019).

Quando a causa do vazamento é uma questão de fabricação, tem-se as seguintes possibilidades: i) o'ring; e ii) interface. Os métodos de fabricação de o'rings, assim como das interfaces expostas à ação do processo de vedação, devem ser estudados a fundo pela empresa detentora do processo, listando-se as etapas envolvidas, com respectivos *inputs* e *outputs*, assim como responsáveis. Ao cliente final, recomenda-se optar por companhias que exerçam essas análises de falhas, haja vista a melhora na confiabilidade (McDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008). Quanto à detecção, inspeções visuais e testes são comumente performados visando à captura desse modo de falha.



Por fim, quando a causa é o uso e a vida útil, tem-se dois cenários: i) esforços pontuais; e ii) esforços contínuos. Esses dois cenários geram como possibilidade de métodos de controle e ações recomendadas: controle dos parâmetros externos, como válvulas de barreira a picos de pressão, e monitoramento das variáveis, medidas de controle convencionais na indústria. Adicionalmente, o respeito às condições estipuladas em projeto é fundamental para o resultado positivo da durabilidade do sistema como um todo e para a prevenção de falhas possivelmente catastróficas, como previamente exemplificado. Sugere-se a aplicação do FMEA modificado ao processo/produto utilizado neste trabalho. Conforme Mzougui e Felsouf (2019), nessa variação, combina-se o FMEA, metodologia amplamente utilizada, ao AHP (*Analytical Hierarchy Processes*), ou método de análise hierárquica. Este é uma metodologia de multicritério de análise de problemas de decisão hierárquica, que consiste em combinações de dois elementos de cada nível hierárquico.

REFERÊNCIAS

- CAETANO, M. **Norma Técnica**. 2010-2014.
- CLAVELARIO, R. F. **Processamento de elastômeros na fabricação de pneumáticos**. 2012. 67 f. TCC (Graduação) – Curso de Tecnologia em Produção de Polímeros, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2012.
- FITHRI, P. et al. Safety Analysis at Weaving Department of PT. X Bogor Using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA). **Proceedings...** 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, National University of Singapore, Singapore, 2018, p. 382-385.
- FLINTNEY, B. International O-ring Standards: Where are they? **Sealing Technology**, v. 10, p. 8-10, 2003.
- GORNI, A. Introdução aos plásticos. **Revista Plástico Industrial**. v. 10, n. 09, p. 1- 33, 2003.
- GREEN, I.; ENGLISH, C. Analysis of elastomeric O-ring seals in compression using the finite element method. **Tribology Transactions**, v. 35, n. 1, p. 83-88, 1992.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 31000:2018 Risk Management**. Geneva, 2018.
- KÖMMLING, A. et al. Analysis of O´ring Seal Failure under Static Conditions and Determination of End of Lifetime Criterion. **Polymers MDPI**. v. 11, n. 8, p. 1251, 2019.
- HU, D. et al. Investigation of design parameters and failure criteria of O-ring seal structure. In: **Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**. 2005. p. 405-412.
- KARASZKIEWICZ, A. Geometry and Contact Pressure of an O'ring Mounted in a Seal Groove. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 29, n. 10, p. 2134-2137, 1990.



- KIRBY, J. G. et al. Improvements in design review management. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 114, n. 1, p. 69-82, 1988.
- KRÜTZMANN, M. H. **Comportamento numérico e vida em fadiga de elastômeros clorados em função da temperatura**. 2015. 68 f. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- McDERMOTT, R.; MIKULAK, R.; BEAUREGARD, M. **The basics of FMEA**. 2ª ed. New York, 2008.
- MODY, R.; GERRARD, D.; GOODSON, J. Elastomers in the oil field. **Rubber Chemistry and Technology**. v. 86, n. 3, p. 449-469, 2013.
- MZOUGUI, I.; FELSOUFI, Z. Proposition of a modified FMEA to improve reliability of product. **Procedia Cirp.**, v. 84, p. 1003-1009, 2019.
- TARKKA. **O'RINGS: How to select, design and install o'ring seals**. Tarkka, Publicado por Tarkka, Autodesk Technology Center, 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=aweDWuNkPw0>. Acesso em: 19 de abr. 2024.
- PÁDOA, C. A. F. **Avaliação experimental da influência da rugosidade, dureza e pressão de contato no desempenho da vedação estática metálica de gases**. 128 f. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.
- PARKER. **Princípios básicos da vedação com o'rings**. Parker. 150 f. 2018, Disponível em: https://mocautomacao.com.br/wp-content/uploads/2018/07/Parker-rings_Whitepaper-Abril-18-2018_BR.pdf. Acesso em: 19 de abr. 2024.
- PECHT, M.; DASGUPTA, A. **Physics-of-Failure: An approach to reliable product development**. CALCE Electronic Packaging Research Center, University of Maryland. College Park, 1996.
- RICHTER, B. The O-Ring as Standardized Rubber Component. **O-Ring Prüflabor Richter: Testing Consulting Developing**. Großbottwar, p. 1- 10, 2016.
- SAKURADA, E. Y. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na Avaliação de Produtos**. 2001. 145 f. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- SHARMA, K. D.; SRIVASTAVA, S. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review. **Journal of Advance Research in Aeronautics and Space Science**, v. 5, n. 1&2, p. 1-17, 2018.
- SHAO, Y.; KANG, R. A Life Prediction Method for O-ring Static Seal Structure Based on Physics of Failure. **School of Reliability and Systems Engineering**, Beihang University. Beijing, 2014.
- TENG, S.; HO, S. Failure Mode and Effects Analysis: An Integrated Approach for Product Design and Process Control. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 5, p. 8-26, 1996.
- VENTURA, A. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009.
- WANG, Y.; JIA, Y.; JIANG, W. Early failure analysis of machining centers: a case study. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, p. 91-97, 2001.