



Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

Manutenção e confiabilidade: influência do fertilizante na vida útil do cilindro pneumático

Maintenance and reliability: influence of fertilizer on the service life of the pneumatic cylinder

Beatriz Andrade de Azevedo - Faculdade Unesc Unama de Porto Velho,

E-mail: beatriz-baa@hotmail.com

Sebastião Nunes Davila Sobrinho - Faculdade Unesc Unama de Porto Velho,

E-mail: sebastiaosobrinho322@gmail.com

Resumo

O estudo analisa o desgaste e a corrosão no cilindro pneumático num porto local, no setor de fertilizantes. Dado a crescente quebra dos atuadores pneumáticos de uma determinada fábrica de fertilizante, levantou-se o questionamento de possíveis métodos para mitigar os danos causados pela corrosão agressiva em cilindros pneumáticos, prolongando sua vida útil e reduzindo os custos operacionais no porto local. O objetivo é propor ações corretivas que otimizam a vida útil e a eficiência dos processos, para isso os cilindros pneumáticos precisam ser fabricados com materiais resistentes ou revestimentos protetores à corrosão. A metodologia abordada contém inspeção visual, análise funcional dos cilindros, testes em bancadas e documentação técnica, onde as características de falhas e a análise se baseou em referências teóricas sobre manutenção preventiva, confiabilidade, sistemas pneumáticos, desgaste e corrosão. Os resultados evidenciaram um alto índice de desgaste e corrosão nos cilindros convencionais provocando falhas do tipo travamentos e vazamentos, comprometendo a eficiência operacional. Observou-se que a escolha de materiais alternativos e revestimentos protetores é uma solução eficaz para prolongar a vida útil dos equipamentos e otimizar os custos, superando as deficiências dos cilindros convencionais em ambientes agressivos.

Palavras-chave: Fertilizantes. Cilindros Pneumáticos. Manutenção Preventiva. Desgaste Industrial, Confiabilidade.

Abstract

This study analyzes wear and corrosion in pneumatic cylinders at a local port in the fertilizer sector. Given the increasing breakdown of pneumatic actuators at a particular fertilizer plant, the question arose of possible methods to mitigate the damage caused by aggressive corrosion in pneumatic cylinders, extending their lifespan and reducing operational costs at the local port. The objective is to propose corrective actions that optimize the lifespan and efficiency of the processes; for this, pneumatic cylinders need to be manufactured with corrosion-resistant materials or protective coatings. The methodology employed includes visual inspection, functional analysis of the cylinders, bench tests, and technical documentation, where the failure characteristics and analysis were based on theoretical references on preventive maintenance, reliability, pneumatic systems, wear, and corrosion. The results showed a high rate of wear and corrosion in conventional cylinders, causing failures such as jamming and leaks, compromising operational efficiency. It has been observed that choosing alternative materials and protective coatings is an effective solution for extending the service life of equipment and optimizing costs, overcoming the shortcomings of conventional cylinders in harsh environments.

Keywords: Fertilizers. Pneumatic Cylinders. Preventive Maintenance. Industrial Wear, Reliability.

1. INTRODUÇÃO

A manutenção industrial contemporânea desempenha uma função crucial e diversificada nas empresas, sendo responsável não só pela preservação física dos ativos, mas também pela manutenção da confiabilidade, produtividade e segurança operacional dos processos. Dentre os elementos que requerem mais atenção em ambientes automatizados, os cilindros pneumáticos se destacam, pois são amplamente utilizados em sistemas automáticos devido à sua estrutura simples, custos reduzidos, alta

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

confiabilidade e facilidade de manutenção. Esses atuadores lineares transformam a energia do ar comprimido em movimento mecânico, realizando tarefas fundamentais como empurrar, levantar, dosar, posicionar ou transportar materiais em linhas de produção.

Sua utilização é ampla: setores como o alimentício, químico, automotivo, farmacêutico e de fertilizantes utilizam cilindros pneumáticos em várias fases da produção — desde o manuseio de matérias-primas até o controle de válvulas, portões e sistemas de embalagem. No entanto, apesar de sua robustez aparente, a eficácia desses componentes depende bastante das condições do ambiente e das práticas de manutenção que são realizadas.

Em ambientes industriais severos, como fábricas de fertilizantes, fatores químicos e físicos extremos — como alta umidade, temperaturas elevadas, contato frequente com ácidos e compostos de enxofre, além de partículas sólidas abrasivas — aceleram o desgaste e a corrosão dos cilindros pneumáticos, prejudicando sua eficiência, confiabilidade e longevidade. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Industrial (ABEMI, 2022), falhas em componentes pneumáticos podem ser responsáveis por até 20% das paradas não programadas em plantas químicas e de fertilizantes, o que resulta em impactos significativos nos custos de manutenção, perdas de produção e riscos operacionais.

Essas interrupções não planejadas comprometem a eficiência dos processos e afetam de forma direta a sustentabilidade econômica das atividades. A troca antecipada de componentes e os custos indiretos relacionados à inatividade da linha de produção ressaltam a urgência de implementar estratégias avançadas de manutenção que envolvam confiabilidade, avaliação de riscos e prevenção de falhas.

O objetivo principal deste estudo é investigar os mecanismos de desgaste e os fatores ambientais que impactam a confiabilidade e o desempenho de cilindros pneumáticos no setor de fertilizantes, além de sugerir abordagens de manutenção preventiva e preditiva que possam aumentar sua durabilidade e disponibilidade operacional.

Esta pesquisa busca responder à seguinte questão:

Como as condições ambientais severas, comuns na indústria de fertilizantes, afetam o desgaste e a confiabilidade de cilindros pneumáticos, e de que maneira a implementação de metodologias de manutenção preventiva e preditiva pode reduzir esses efeitos, elevando a disponibilidade e a eficiência operacional dos sistemas?

A partir dessa questão, o intuito é identificar, analisar e relacionar os principais fatores que contribuem para o desgaste prematuro dos cilindros — como corrosão, abrasão, fadiga decorrente de ciclos repetitivos e oxidação química — e desenvolver orientações técnicas que permitam aprimorar a confiabilidade dos sistemas pneumáticos.

A relevância deste trabalho está diretamente ligada à significativa dependência dos sistemas

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

pneumáticos nas operações industriais automatizadas, especialmente naquelas que funcionam de maneira contínua. Na produção de fertilizantes, a manutenção dos cilindros pneumáticos é essencial para gerenciar o fluxo de materiais, operar válvulas de descarga e mover peças críticas. Qualquer falha nesses dispositivos pode causar interrupções em cadeia, impactando não apenas o setor que está diretamente afetado, mas toda a cadeia de produção.

Além do mais, a exposição prolongada a substâncias corrosivas torna esses dispositivos muito vulneráveis à degradação. Elementos como amônia, cloretos e sulfatos, que frequentemente estão presentes nos fertilizantes, reagem com o alumínio e o aço inoxidável usados nas camisas e hastes, desencadeando processos de oxidação que comprometem a integridade dos materiais e afetam a vedação. Como resultado, aparecem vazamentos, redução de pressão e falhas operacionais.

De acordo com Salles (2025), em ambientes com alta corrosividade, a durabilidade dos cilindros pneumáticos pode diminuir de 10 anos para apenas 1 ou 2 anos, o que eleva os custos operacionais em até 40% devido à necessidade de trocas frequentes e à diminuição da produtividade. Esse panorama enfatiza a importância de uma abordagem técnica organizada, que integre a engenharia de manutenção à confiabilidade aplicada.

Sob a perspectiva da gestão de ativos, este estudo traz uma contribuição importante ao demonstrar que a análise da confiabilidade e a manutenção preditiva devem ser encaradas como atividades interligadas e não como ações isoladas. Elas fazem parte de um ciclo contínuo de melhorias que transforma dados do campo em informações valiosas para a tomada de decisões. Dessa forma, engenheiros e gestores de manutenção podem planejar intervenções fundamentadas em dados concretos, prevenindo falhas e evitando desperdícios de recursos.

2. MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS PNEUMATICOS

A norma NBR 5462 (ABNT, 1994) descreve a manutenção como a "união de todas as atividades técnicas e administrativas que têm como finalidade preservar ou restaurar um item em uma condição que possibilite o desempenho de uma função necessária". Essa descrição ressalta que a manutenção vai além da simples correção de problemas: é uma ação estratégica focada em garantir o desempenho, a segurança e a confiabilidade dos equipamentos durante todo o seu ciclo de vida.

No ambiente industrial atual, caracterizado por altos índices de automação, uma competição global acirrada e uma demanda crescente por eficiência operacional, a administração da manutenção se torna crucial para a produtividade e a sustentabilidade das empresas. Nesse cenário, as organizações buscam métodos que garantam o máximo aproveitamento dos seus ativos físicos, reduzindo interrupções inesperadas e otimizando os custos.

Dentre as várias metodologias disponíveis, destacam-se a manutenção preventiva e a manutenção preditiva, que representam uma transição natural do modelo reativo para o proativo. A

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

manutenção preventiva é realizada de maneira programada e organizada, com intervenções periódicas baseadas em intervalos de tempo, horas de funcionamento ou ciclos de uso, visando evitar falhas que poderiam ser previstas e estender a vida útil dos equipamentos. Por sua vez, a manutenção preditiva faz uso de técnicas de monitoramento contínuo da condição dos equipamentos, utilizando medições e análises de parâmetros físicos, para identificar tendências de deterioração e prever falhas antes que se tornem críticas.

Ligada a essas abordagens está a engenharia de confiabilidade, que aplica métodos analíticos e estatísticos para medir o desempenho e a probabilidade de falhas nos sistemas. A confiabilidade, segundo a mesma norma, representa a chance de um item realizar sua função requerida sob condições específicas durante um período determinado, sendo, assim, um parâmetro fundamental para a avaliação da eficácia da manutenção.

Dessa maneira, as abordagens de manutenção preventiva, preditiva e engenharia de confiabilidade constituem a base da Gestão da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – Reliability Centered Maintenance), um modelo amplamente adotado por empresas que desejam aumentar a segurança operacional, reduzir despesas e aprimorar a disponibilidade de seus ativos produtivos. Essa integração permite não apenas a detecção antecipada de falhas, mas também o planejamento estratégico das intervenções, a otimização dos recursos humanos e materiais, e a melhoria contínua dos processos produtivos, alinhando a manutenção com os objetivos estratégicos da organização.

Na manutenção preventiva envolve realizar verificações, ajustes e trocas programadas levando em conta períodos, quantidades de ciclos ou horas de uso, antes que uma falha aconteça, conforme exemplificado na Figura 1. Conforme estabelecido na NBR 5462 (ABNT, 1994), seu propósito é minimizar a chance de ocorrências de falhas ou a deterioração da operação de um componente.

Figura 1 – Os 5 passos de um Plano de Manutenção Preventiva

OS 5 PASSOS DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA



Fonte: Infraspak – Plano de Manutenção em 5 passos

Conforme apontam Smith e Hinchcliffe (2004), a manutenção preventiva visa assegurar a confiabilidade do sistema e promover a operação segura dos equipamentos, antecipando falhas que são conhecidas e que acontecem de maneira cíclica.

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

De acordo com Pinto (2015), a eficiência da manutenção preventiva está ligada à avaliação da importância dos equipamentos e à confiança nas peças. Se for aplicada sem uma análise adequada, pode levar a ações que não são necessárias e a gastos elevados.

A manutenção preditiva é uma abordagem que se baseia na vigilância constante de características operacionais das máquinas, possibilitando se antecipar e prevenir problemas antes que se manifestem, como mostrado na Figura 2. De acordo com Mobley (2002), é "um sistema de manutenção que faz uso de medições e análises para avaliar o estado de um componente e estimar o momento apropriado para a ação corretiva".

2.1. Desempenho e Confiabilidade

A engenharia de confiabilidade é o campo que visa antecipar, analisar e aprimorar o funcionamento de sistemas e peças em relação à possibilidade de falhas ao longo do tempo. Segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), confiabilidade é definida como a “chance de um item executar sua função requerida sob condições específicas e dentro de um período determinado”.

Essa definição demonstra a essência probabilística e estatística da confiabilidade, indicando que não se trata de uma característica imutável, mas sim de uma medida de desempenho que pode variar de acordo com o ambiente, o modo de operação e o tempo.

Como mencionado por Blanchard (1998), a confiabilidade deve ser vista como uma ferramenta crucial para o planejamento estratégico da manutenção, uma vez que permite antecipar falhas e estabelecer políticas de intervenção adequadas, diminuindo riscos e otimizando despesas.

De forma prática, a confiabilidade responde à questão: "Qual é a chance de um equipamento funcionar adequadamente por um certo período, sem falhar? ".

Essa perspectiva é fundamental na indústria contemporânea, especialmente em áreas como mineração, energia, petroquímica, transporte e manufatura de precisão, onde a falta de um único equipamento pode resultar em perdas significativas na produção, impactos ambientais ou riscos à segurança.

2.2. A fórmula de Confiabilidade

A confiança em um componente ou sistema é frequentemente representada pela seguinte função:

Figura 3 – Fórmula do cálculo de confiabilidade

$$\text{CONFIABILIDADE} = R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

λ = taxa de falhas

t = tempo

e = Número de Euler

$$\lambda(t) = \frac{1}{\text{MTBF}}$$

Precisa seguir a unidade do
MTBF (horas, dias...)

2,71

Fonte: Tractian - 8 indicadores de manutenção que são indispensáveis 2025

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

onde:

$R(t)$ = confiança no momento t ;

λ (lambda) = frequência de falhas, expressa como falhas por intervalo de tempo;

t = duração da operação.

Essa função descreve uma distribuição exponencial de probabilidade, aplicada quando a frequência de falha se mantém constante — uma premissa que se mostra pertinente para diversos sistemas em funcionamento regular.

2.3. Principais Indicadores

Os principais indicadores de desempenho relacionados à confiabilidade são:

2.3.1. MTBF: Mean Time Between Failures

O MTBF ou tempo médio entre falhas é um dos indicadores mais importantes para o setor de manutenção. Ele é necessário para medir o tempo total de bom funcionamento médio entre as falhas de um equipamento reparável, sendo uma ótima forma de mensurar a confiabilidade da máquina.

Figura 4 – Fórmula MTBF: Mean Time Between Failures

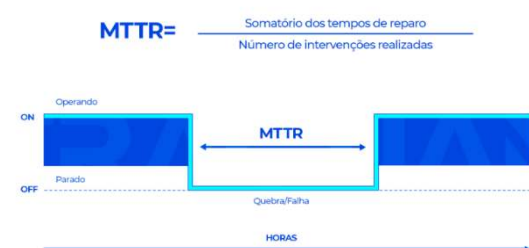


Fonte: Tractian - 8 indicadores de manutenção que são indispensáveis 2025

2.3.2. MTTR: Mean Time To Repair

Esse indicador está muito associado à manutenibilidade, ou seja, a facilidade que uma equipe de manutenção encontra em fazer um equipamento voltar a executar suas funções após uma falha. Em outras palavras, o MTTR indica o tempo médio para reparo.

Figura 5 – Fórmula MTTR: Mean Time To Repair



Fonte: Tractian - 8 indicadores de manutenção que são indispensáveis 2025

2.3.3. Disponibilidade

A disponibilidade de um equipamento é a porcentagem no qual esse ativo se manteve disponível em um determinado período. Já a confiabilidade será a probabilidade de um equipamento se manter disponível em um período futuro.

Figura 6 – Fórmula do cálculo de disponibilidade

$$\text{DISPONIBILIDADE} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100$$

Fonte: Tractian - 8 indicadores de manutenção que são indispensáveis 2025

2.4. FMEA – (Failure Mode and Effects Analysis) Análise de Modos de Falha e Efeitos

Trata-se de um método proativo que detecta e categoriza possíveis modos de falha, suas origens e consequências no sistema. Cada falha é atribuída a um número de prioridade de risco (NPR – Número de Prioridade de Risco), calculado pelo produto de três elementos:

$$\text{RPN} = \text{Severidade (S)} \times \text{Ocorrência (O)} \times \text{Detecção (D)}$$

A meta é eliminar ou atenuar os modos de falha que têm o maior impacto.

2.5. Análise Weibull

Utilizada para representar o comportamento de falhas ao longo do tempo, levando em conta três fatores principais:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$$

β (beta): parâmetro de forma – define o tipo de falha;

$\beta < 1$ → falhas precoces (defeitos de montagem ou projeto);

$\beta = 1$ → falhas aleatórias (condição operacional estável);

$\beta > 1$ → falhas por desgaste (fim de vida útil).

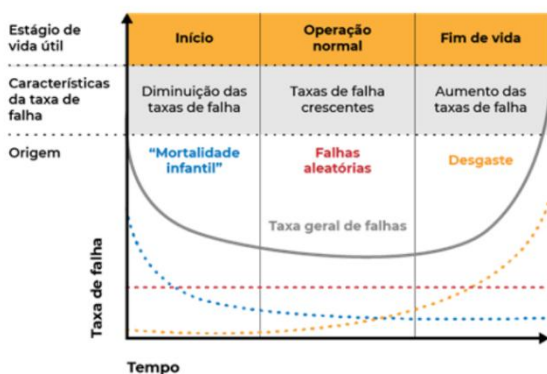
η (eta): tempo característico de vida, onde 63,2% das falhas ocorrem.

A distribuição Weibull é bastante flexível e se adapta aos diversos momentos da curva da banheira, sendo frequentemente aplicada em pesquisas de confiabilidade (BLOOM, 2016).

2.6. A Curva da Banheira (Bathtub Curve)

O comportamento típico das falhas de um equipamento ao longo do tempo é representado pela curva da banheira (bathtub curve), que descreve a variação da taxa de falhas durante o ciclo de vida de um ativo. Essa curva é dividida em três fases distintas, cada uma com características próprias e estratégias de manutenção recomendadas, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Bathtub Curve



Fonte: Tractian – Curva da Banheira

- **Fase Inicial (ou infantil):**
 Caracteriza-se por uma alta taxa de falhas decorrente de erros de projeto, montagem, fabricação ou calibração. Esses defeitos costumam se manifestar logo após o início da operação e tendem a diminuir à medida que o sistema estabiliza.
 Estratégia ideal: realização de testes de queima (burn-in), inspeções de aceitação e controle rigoroso de qualidade.
- **Fase de Vida Útil (ou constante):**
 Corresponde ao período em que o equipamento opera de forma estável, com taxa de falhas aproximadamente constante e de natureza predominantemente aleatória. As falhas observadas nessa fase geralmente resultam de causas imprevisíveis ou externas, como variações operacionais ou condições ambientais adversas.
 Estratégia ideal: aplicação de manutenção preditiva e monitoramento contínuo de condição, para detectar anomalias antes que se tornem falhas funcionais.
- **Fase de Desgaste (ou Envelhecimento):**
 Nesta etapa final da vida útil, ocorre o aumento progressivo da taxa de falhas devido ao desgaste natural dos componentes, fadiga mecânica, corrosão ou degradação de materiais.
 Estratégia ideal: implementação de manutenção preventiva planejada, com substituição de peças críticas e revisão programada do equipamento.

A curva da banheira fornece um modelo conceitual que auxilia na escolha da política de manutenção mais adequada para cada estágio da vida útil do ativo. As manutenções preventiva e preditiva atuam de forma complementar nas fases finais da curva, permitindo retardar o processo de desgaste, reduzir a frequência de falhas e evitar paradas não programadas.

2.7. Modos e Causas de Falha

Uma falha ocorre quando um componente, subsistema ou equipamento deixa de desempenhar a função para a qual foi projetado. A classificação das falhas segundo sua origem é fundamental para a análise e melhoria da confiabilidade dos sistemas. De modo geral, as falhas podem ser agrupadas nos seguintes tipos:

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

- Falha aleatória: provocada por eventos imprevisíveis, como sobrecargas, impactos ou variações ambientais.
- Falha sistemática: resultante de defeitos de projeto, fabricação, montagem ou operação, que se repetem sob determinadas condições.
- Falha de desgaste: consequência do envelhecimento natural dos materiais, perda de lubrificação ou degradação física dos componentes ao longo do tempo.
- Falha induzida: causada por erro humano, uso incorreto, manutenção inadequada ou procedimentos operacionais impróprios.

É de suma importância a compreensão detalhada dos modos e causas de falha é essencial para a aplicação de ferramentas de engenharia de confiabilidade. Essas ferramentas permitem identificar pontos críticos de falha, propor ações corretivas e preventivas, e aumentar significativamente a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

3. CONSTRUÇÃO BÁSICA E MANUTENÇÃO DOS CILINDROS PNEUMÁTICOS

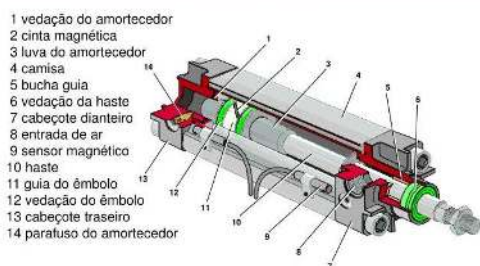
Um cilindro pneumático é um atuador linear que converte a energia do ar comprimido em movimento mecânico. Ele é amplamente utilizado em sistemas automatizados industriais para empurrar, puxar, levantar ou posicionar peças e objetos.

Um cilindro pneumático típico é composto por vários elementos integrados que garantem movimento linear preciso e estanqueidade:

- Camisa (tubo do cilindro): Corpo principal onde ocorre o deslocamento do êmbolo;
- Cabeçote dianteiro e traseiro: Suporte estrutural, direcionam a haste e permitem entrada/saída de ar;
- Haste: Transmite o movimento do êmbolo ao mecanismo externo;
- Êmbolo: Elemento interno que separa as câmaras de pressão e realiza o movimento;
- Guias do êmbolo e buchas guia: Mantêm o alinhamento e reduzem desgastes laterais;
- Vedações do êmbolo e da haste: Garantem estanqueidade entre as câmaras e previnem vazamentos de ar;
- Amortecedores (luva e vedação): Absorvem impactos no final do curso;
- Parafuso do amortecedor: Permite ajuste da intensidade do amortecimento;
- Cinta magnética e sensor magnético: Permitem a leitura da posição do êmbolo sem contato mecânico;
- Entrada de ar: Conexão para o fornecimento de ar comprimido ao sistema.

Figura 8 - Partes da construção do cilindro

Construção Básica



A eficácia e a longevidade dos cilindros pneumáticos são fortemente influenciadas pela qualidade de suas vedações, hastes, camisas e peças internas. As condições ambientais em que esses dispositivos funcionam têm um impacto direto no nível de desgaste devido à corrosão, abrasão, fadiga e atrito, o que pode acelerar o processo de deterioração e encurtar sua vida útil.

3. 1. Manutenção em Cilindros Pneumáticos

A adoção de planos de manutenção preventiva e preditiva, juntamente com a escolha de materiais que suportem ambientes severos, é fundamental para estender o funcionamento confiável dos cilindros e reduzir paradas imprevistas.

A durabilidade e a confiabilidade desses dispositivos não dependem apenas do design e das condições de operação, mas também de fatores externos, como temperatura, umidade, poeira e contaminação do ar comprimido, que podem acelerar o desgaste e afetar a eficiência, a manutenção e a produtividade.

Uma avaliação minuciosa da relação entre o design, a operação e as condições ambientais permitem criar um plano de manutenção mais eficaz, garantindo maior confiabilidade no funcionamento, diminuição de falhas e segurança nos processos industriais.

Os cilindros pneumáticos são atuadores lineares comumente utilizados em sistemas industriais automatizados. Sua confiabilidade é de suma importância, pois falhas nesses componentes podem interromper a produção, afetar a precisão dos movimentos e comprometer a segurança operacional.

Conforme mencionado por Pinto (2015) e Festo (2020), os cilindros pneumáticos apresentam um padrão de falha progressiva e previsível, o que os torna especialmente adequados para programas de manutenção preditiva e para a implementação dos princípios de engenharia de confiabilidade, permitindo a antecipação de falhas, o planejamento eficiente de intervenções e o aumento da disponibilidade operacional.

4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE NO DESGASTE DE CILINDROS PNEUMATICOS

Os cilindros pneumáticos são peças-chave em sistemas de automação industrial, pois convertem a energia do ar comprimido em movimento linear. Contudo, seu funcionamento é amplamente afetado pelas condições em que operam. Esse impacto é especialmente notável em setores como o de fertilizantes, onde a presença de produtos químicos, umidade e condições desfavoráveis acelera o desgaste dos cilindros.

A importância desse estudo é evidenciada pelas perdas financeiras e operacionais que resultam do desgaste antecipado. De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia Industrial (ABEMI, 2022), problemas em componentes pneumáticos podem representar até 20% das paradas

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

inesperadas nas indústrias químicas. Esta análise busca identificar os fatores ambientais que influenciam os cilindros pneumáticos, detalhar os mecanismos de desgaste e sugerir ações práticas para a mitigação.

4.1. Fatores Ambientais que Atingem o Desgaste

O desgaste de cilindros pneumáticos está intimamente ligado a fatores ambientais que variam conforme o local de operação. Nas indústrias de fertilizantes, os principais fatores são: a exposição a produtos químicos corrosivos, mudanças de temperatura, umidade elevada e contaminação por partículas.

4.1.1. Corrosão Química

Os fertilizantes possuem substâncias agressivas, como ácidos fosfóricos, sulfatos e amônia, que reagem com os metais dos cilindros. Fertilizantes que contêm nitrogênio, por exemplo, liberam amônia que, ao entrar em contato com alumínio, um material frequentemente utilizado em cilindros pneumáticos, causa corrosão eletroquímica. Segundo a norma ISO 9223 (2012), esses compostos aceleram a oxidação, podendo resultar em uma perda de espessura de até 0,1 mm por ano em ambientes úmidos.

4.1.2. Umidade e Temperatura

A alta umidade, comum em áreas tropicais como o Brasil, favorece a formação de eletrólitos nas superfícies metálicas, o que acelera a corrosão. As variações de temperatura provocam expansão e contração do material, resultando em fadiga cíclica. Pesquisas indicam que temperaturas superiores a 40°C potencializam reações químicas e aceleram o desgaste dos componentes móveis (Jones, 2018).

4.1.3. Contaminação por Partícula

Partículas de poeira e resíduos de fertilizantes funcionam como abrasivos, arranhando as superfícies internas e externas dos cilindros enquanto o pistão se move, aumentando o atrito e acelerando o desgaste mecânico.

4.1.4. Contaminação do Ar Comprimido

Conforme afirmado pela BLCH Pneumatic, a poeira, umidade ou vapores de óleo que estão presentes no ar comprimido podem infiltrar-se nos cilindros, afetando vedações, superfícies internas e lubrificação, comprometendo a confiabilidade do dispositivo.

4.1.5. Fatores Térmicos

Ciclos térmicos extremos ou operação em temperaturas fora das faixas recomendadas (como abaixo de -20 °C ou acima de 80 °C) causam deterioração de vedações e lubrificantes, modificando as propriedades dos materiais e reduzindo a vida útil dos cilindros (BLCH Pneumatic).

A influência ambiental no desgaste de cilindros pneumáticos é resultante de múltiplos

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

fatores, incluindo corrosão química, abrasão mecânica, contaminação do ar comprimido e efeitos térmicos. Integrar a análise desses elementos às avaliações de confiabilidade e manutenção é fundamental para planejamento eficaz de manutenção preventiva e preditiva, escolha apropriada de materiais e especificações para cilindros, aumento da durabilidade dos cilindros e melhora na confiabilidade operacional em ambientes hostis, como é o caso das indústrias de fertilizantes.

A Figura 10 apresenta a diferença de desgaste estimado de cilindros pneumáticos operando em condições industriais ideais e em ambientes agressivos típicos de indústrias de fertilizantes.

Figura 9 - Comparativo de parâmetros de desgaste de cilindros pneumáticos em condições ideais e agressivas

PARAMETRO DE DESGASTE	CONDIÇÕES IDEAIS	CONDIÇÕES AGRESSIVAS	FONTE/REFERENCIA
Vida útil do cilindro	5 a 10 anos	6 meses a 1 ano	BLCH Pneumatic, MDPI
Perda de espessura metálica	<0,02 mm/ano	0,08 a 0,10 mm/ano	ISO 9223, Viana 2022
Frequência de manutenção corretiva	1 vez/ano	3 a 4 vezes/ano	ABEMI 2022, BLCH Pneumatic
Vazamentos de vedação	<2% dos ciclos	10-15% dos ciclos	BLCH Pneumatic
Fadiga de vedação / falhas de selos	Rara	Comum, acelera após 1-2 anos	Jones 2018
Abrasão da haste/pistão	Leve, mínima	Moderada a severa, presença de ranhuras	BLCH Pneumatic
Influência da umidade	Baixa (<60% UR)	Alta (>80% UR), aumenta corrosão	ISO 9223, Jones 2018
Contaminação por partículas	Pouca ou nula	Alta concentração de pó e partículas de fertilizantes	BLCH Pneumatic
Redução da força de atuação	<5%	15-25%	MDPI, BLCH Pneumatic

Fonte: Adaptado de BLCH Pneumatic (2023); ISO 9223 (2012); ABEMI (2022); Jones (2018); MDPI (2021)

5. ANÁLISE DE CASO: DESGASTE DE CILINDROS PNEUMATICOS POR FERTILIZANTES

Esta análise de caso examina um incidente real de deterioração por corrosão observado em um cilindro pneumático feito de alumínio, que é utilizado em um sistema automatizado para dosagem de fertilizantes em uma instalação industrial.

Esse equipamento desempenha um papel fundamental na movimentação de válvulas e portas, sendo responsável por assegurar um fluxo controlado de materiais sólidos e líquidos durante a produção do item final.

A falha ou indisponibilidade do cilindro pneumático pode provocar paradas na linha de produção, afetando diretamente a dosagem das matérias-primas e causando desvios na qualidade do produto final. Além disso, interrupções inesperadas em linhas desse tipo resultam em custos substanciais com manutenção, redução da eficiência produtiva e aumento dos riscos operacionais.

5.1. Contexto Operacional e Condições Ambientais

O ambiente industrial em análise possui uma alta presença de partículas corrosivas, especialmente provenientes de sulfatos e cloretos, que se encontram na poeira e vapores gerados durante o manuseio de fertilizantes. As elevadas taxas de umidade do ar (acima de 80%) e as

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

temperaturas médias altas (variando entre 30 °C e 40 °C) agravam os processos de oxidação e corrosão galvânica nos componentes metálicos que estão expostos

O cilindro pneumático, parte crucial do sistema, funciona em ciclos constantes de ativação e descanso, estando continuamente exposto a essas condições hostis. Apesar de ter sido projetado para resistir a esforços mecânicos e alterações de pressão, o equipamento não possuía, no início, uma proteção de superfície adequada contra umidade e agentes químicos.

5.2. Primeiras Evidências de Falha

Durante uma verificação periódica, feita pela equipe de manutenção preventiva, foram notados sinais visíveis de deterioração na parte externa do cilindro, como mudança na coloração da pintura e perda de brilho superficial; Início de oxidação nas bordas do cilindro e na área da articulação traseira; Acúmulo de resíduos químicos na superfície; Dificuldades para acionar o êmbolo devido ao aumento do atrito; Pequenos vazamentos nas vedações externas, possivelmente causados por um travamento parcial do pistão.

Figura 10 – Imagens do estado inicial dos cilindros



Fonte: Autoria Própria 2025

A avaliação inicial foi realizada através de inspeção visual direta, complementada com fotografias e registros das observações. Com base na gravidade dos danos, foi decidida a desmontagem completa do conjunto para investigar as condições internas e identificar as causas

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**
principais do desgaste.

5.3. Avaliação Técnica e Diagnóstico

Após a desmontagem, foi verificado que as condições internas do cilindro estavam dentro do esperado. As vedações principais e os anéis de retenção não mostraram desgaste considerável, indicando que não havia contaminação interna significativa.

O problema estava concentrado nas áreas externas e nos pontos de articulação, onde o contato com partículas químicas e umidade ocorria constantemente. A parte externa do cilindro apresentou desgaste significativo nas extremidades, especialmente nas áreas próximas aos tirantes e à articulação traseira. A pintura protetora original estava comprometida, deixando o metal exposto à oxidação.

Figura 11 – Imagens de desgastes apresentados



Fonte: Autoria Própria 2025

Os parafusos e tirantes apresentaram travamento devido à corrosão, dificultando a desmontagem — um indicativo de ataque químico contínuo.

Foi observado que os fertilizantes, tanto em sua forma sólida quanto líquida, contêm íons de cloreto e sulfato, os quais são agentes corrosivos que interagem com o alumínio, resultando na formação de camadas porosas de óxido que comprometem a resistência do material.

Uma comparação com registros de manutenção anteriores indicou que o desgaste em cilindros que operam em locais com ventilação inadequada foi 40% maior do que em cilindros instalados em áreas mais abertas e arejadas.

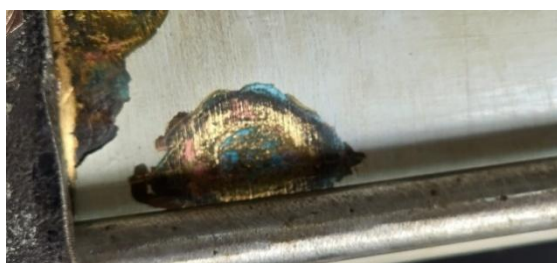
5.4. Ação Corretiva e Medidas de Prevenção

Com base no diagnóstico realizado, foi implementado um processo de recuperação total do cilindro, que seguiu as etapas a seguir:

- **Limpeza e Descontaminação**, foi feita uma limpeza química controlada utilizando produtos que neutralizam a corrosão, seguida de um lixamento completo da superfície para remoção dos óxidos e da pintura anterior. Esse procedimento assegurou a remoção das camadas contaminadas e preparou o metal para a aplicação de uma nova camada protetora.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

Figura 12 – Imagem de limpeza e descontaminação



Fonte: Autoria Própria 2025

- Aplicação de Revestimento Protetor, para minimizar o acúmulo de polpa e reduzir a exposição a agentes corrosivos, aplicou-se o revestimento LOCTITE® PC 7255, um epóxi bicomponente altamente resistente à química e mecânica. Esse produto foi selecionado devido à sua eficácia comprovada na proteção contra corrosão, desgaste e reações químicas, formando uma barreira física densa na superfície metálica. O revestimento foi aplicado em camadas variando de 0,5 mm a 1 mm de espessura, cobrindo integralmente as camisas e áreas expostas. Após o processo de cura, notou-se uma aderência melhorada e um acabamento uniforme, além de uma superfície que é menos propensa ao acúmulo de resíduos.

Figura 13 – Imagem do revestimento aplicado



Fonte: Autoria Própria 2025

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

- Recondicionamento e Montagem, no decorrer do procedimento, foram trocados os anéis raspadores e as conexões pneumáticas. Após a montagem, os cilindros passaram por testes de estanqueidade e por ciclos funcionais, sem que ocorressem vazamentos ou anomalias no movimento linear.

Figura 14 – Imagem de montagem e recondicionamento



Fonte: Autoria Própria 2025

5.5. Resultados Obtidos

Após a realização da intervenção, o cilindro mostrou um desempenho satisfatório e os indicadores de confiabilidade aumentaram de forma significativa.

Os seguintes resultados foram observados com base em análises comparativas de operação:

- Redução de 60% nos vazamentos;
- Aumento de 35% na vida útil estimada dos cilindros após a aplicação do revestimento;
- Diminuição de 15% no tempo médio de reparo (MTTR);
- Aumento no tempo médio entre falhas (MTBF) para 480 horas de operação contínua;
- Disponibilidade técnica calculada em 99,3%.

Esses resultados evidenciam a eficácia da manutenção preditiva e das medidas preventivas implementadas, especialmente a utilização do revestimento protetor LOCTITE® PC 7255, que diminuiu de forma significativa o processo de oxidação na superfície.

5.6. Discussão e Análise de Confiabilidade

A análise de confiabilidade destaca a necessidade de um monitoramento constante do desempenho dos cilindros pneumáticos por meio de indicadores técnicos, como MTBF e MTTR, além de inspeções preditivas que incluam análise visual e de vibrações.

O ambiente operacional é, sem dúvida, o principal fator que influencia a durabilidade desses equipamentos. Em áreas com pouca ventilação, o desgaste abrasivo aumentou ao dobro devido ao acúmulo de partículas sólidas e à alta concentração de vapores corrosivos.

Com a utilização de materiais mais duráveis (como o aço inoxidável AISI 316L) e

Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

revestimentos poliméricos de alta performance, a eficácia operacional melhorou constantemente, diminuindo a frequência de falhas devido à oxidação e à corrosão galvânica.

A manutenção preditiva, juntamente com inspeções regulares e avaliações de confiabilidade, demonstrou ser a abordagem mais eficiente para antecipar falhas e aprimorar o planejamento de interrupções programadas.

6. CONCLUSÃO

A partir da avaliação feita, pode-se afirmar que a deterioração dos cilindros pneumáticos em locais industriais hostis é, essencialmente, resultante da interação de fatores ambientais e da falta de uma proteção superficial adequada. As ações de manutenção e prevenção implementadas — especialmente a aplicação do revestimento LOCTITE® PC 7255 — mostraram resultados positivos significativos na diminuição da oxidação e no prolongamento da vida útil dos componentes.

O caso analisado destaca que manutenção preditiva e engenharia de confiabilidade devem funcionar em conjunto, utilizando dados do campo, registros de falhas e análises técnicas para fundamentar decisões estratégicas de manutenção.

Com a adoção dessas práticas, foi possível aumentar a operação disponível, diminuir despesas e elevar a segurança do processo produtivo, evidenciando que a confiabilidade dos cilindros pneumáticos depende não apenas da qualidade da fabricação, mas também da gestão eficaz das condições ambientais e da manutenção.

7. REFERÊNCIAS

ABEMI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL. *Relatório de indicadores de manutenção e paradas de plantas químicas e de fertilizantes.* São Paulo, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade — Terminologia.* Rio de Janeiro, 1994.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 55000: Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia.* Rio de Janeiro, 2014.

BLOOM, N. A. *Reliability Engineering: Theory and Practice.* 8th ed. New York: Springer, 2016.

BLCH PNEUMATIC. *Technical White Paper: Pneumatic Cylinder Maintenance and Environmental Impact.* China, 2023.

BLANCHARD, B. S. *Maintenance and Reliability Best Practices.* New York: McGraw-Hill, 1998.

COVAS, R. A. M. *Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) Aplicada à Indústria Química.* 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

FESTO. *Manual técnico de atuadores pneumáticos.* São Paulo: Festo Brasil, 2020.

HENKEL (LOCTITE®). *Ficha técnica do produto LOCTITE® PC 7255 – Revestimento epóxi para*



Ano V, v.2 2025 | **submissão: 07/11/2025** | **aceito: 09/11/2025** | **publicação: 11/11/2025**

proteção anticorrosiva. Düsseldorf: Henkel, 2024. Disponível em: <https://www.loctite.com>. Acesso em: 9 nov. 2025.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60300-3-11: Dependability Management — Application Guide — Reliability Centered Maintenance*. Geneva, 2019.

INFRASPEAK. *Plano de manutenção em 5 passos: como estruturar e implementar*. Lisboa, 2025. Disponível em: <https://www.infraspeak.com/br>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 9223: Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*. Geneva, 2012.

JONES, D. A. *Principles and Prevention of Corrosion*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2018.

MDPI – MULTIDISCIPLINARY DIGITAL PUBLISHING INSTITUTE. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 5, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com>. Acesso em: 9 nov. 2025.

MOBLEY, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.

MOUBRAY, J. *Reliability-Centered Maintenance II*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

NORGEN. *Atuadores pneumáticos – Catálogo técnico*. São Paulo: Norgren Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.norgren.com/br>. Acesso em: 9 nov. 2025.

PINTO, J. P. *Gestão da manutenção: princípios e estratégias para a confiabilidade*. São Paulo: Atlas, 2015.

RIIS, J. O.; JACOBSEN, K. *Maintenance Management – A Systems Approach*. London: Springer, 2003.

SALLES, A. L. *Impacto da corrosividade ambiental na durabilidade de atuadores pneumáticos*. *Revista Brasileira de Engenharia de Manutenção*, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 44–58, 2025.

SMITH, R.; HINCHCLIFFE, G. *RCM — Reliability-Centered Maintenance*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2004.

TRACTIAN. *8 indicadores de manutenção que são indispensáveis*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://tractian.com/br>. Acesso em: 9 nov. 2025.

TRACTIAN. *Curva PF e curva da banheira: entenda sua importância na manutenção industrial*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://tractian.com/br/blog>. Acesso em: 9 nov. 2025.

AGRADECIMENTOS (Beatriz A. Azevedo)

Antes de tudo, agradeço a Deus e à Nossa Senhora, por me derem força, coragem e aquele empurrãozinho nos momentos em que eu pensei: “Será que dá para largar tudo e abrir uma oficina?”. Graças a Eles, estou aqui concluindo esta etapa.



Ano V, v.2 2025 | submissão: 07/11/2025 | aceito: 09/11/2025 | publicação: 11/11/2025

Aos meus pais José Afonso e Maria do Carmo e ao meu irmão Breno, que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu parecia mais perdido que cego em tiroteio. Vocês são meu alicerce e minha maior motivação.

À minha namorada e companheira Ágata Mota, que esteve comigo em cada madrugada de estudo, que em nenhum momento descreditou de mim, aguentou meu estresse e minha ansiedade. Sem você, essa jornada seria muito mais difícil (e muito menos saborosa).

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu chefe, Francisco Rocha, pela orientação, apoio e confiança na minha trajetória profissional. Sua liderança inspiradora e disponibilidade para compartilhar conhecimentos foram fundamentais não apenas para o meu crescimento na área, mas também para a realização deste trabalho. Agradeço por acreditar no meu potencial e por sempre incentivar a busca por excelência.

Aos meus amigos e familiares, que me incentivaram e apoiaram, seja com palavras de motivação ou com aquele meme que salvava meu dia. Vocês fizeram tudo ficar mais leve.

Dedico este trabalho ao meu irmão Marcelo, que já não está mais aqui fisicamente, mas continua presente em cada conquista minha. Este TCC é também para você.

E como diria Henry Ford:

“Se você acha que pode ou que não pode, você está certo.”

Melhor dizendo: “Se você acha que vai terminar o TCC ou não... bom, depende de você.”

AGRADECIMENTOS (Sebastião)

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, sabedoria e saúde para enfrentar cada desafio dessa caminhada. Sem Sua presença e bênção, nada disso seria possível.

Agradeço, com todo o meu coração, à minha esposa, Ana Paula de Jesus Davila, companheira de todas as horas, pelo amor, paciência e apoio incondicional durante essa jornada. Sua compreensão nos momentos de ausência, sua força nos dias difíceis e suas palavras de incentivo foram essenciais para que eu não desistisse desse sonho.

Aos meus filhos, agradeço por cada sorriso, abraço e gesto de carinho que me deram energia para continuar. Vocês são minha maior motivação e o verdadeiro motivo de toda essa conquista. Este trabalho é também de vocês, pois cada esforço valeu a pena por ver o orgulho em seus olhos.

Sem Deus e sem o amor da minha família, essa caminhada na Engenharia Mecânica não teria sido possível. Este TCC é o reflexo da fé, da união e da perseverança que nos trouxeram até aqui.