

ESTUDO DE CASO: DFMA APLICADO A COMPRESSORES INDUSTRIAIS

CASE STUDY: DFMA APPLIED TO INDUSTRIAL COMPRESSORS

Recebido em: 23/04/2025

Reenviado em: 26/08/2025

Aceito em: 04/09/2025

Publicado em: 29/10/2025

Welton Conceição Araujo¹ 
Centro Universitário SENAI SP

Leandro Cardoso da Silva² 
Centro Universitário SENAI SP/FATEC

Lucas Almeida Willenshofer³ 
Centro Universitário SENAI SP

Edgard Gonçalves Cardoso⁴ 
Centro Universitário SENAI SP

Manuel Patricio da Silva Bisneto⁵ 
Centro Universitário SENAI SP

Resumo: O mercado de compressores tem apresentado crescimento contínuo, impulsionado pela demanda crescente de setores como refrigeração, climatização, automação e transporte. Esses equipamentos são fundamentais em sistemas que envolvem pressurização de gases e fluidos, desempenhando papel estratégico em diversos processos industriais. Nesse contexto, a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis tem fomentado avanços tecnológicos significativos. A aplicação da metodologia *Design for Manufacturing and Assembly* (DFMA) destaca-se como uma abordagem promissora no desenvolvimento de compressores. O DFMA visa à otimização do projeto, com ênfase na simplificação do design, redução de custos e aumento da eficiência nos processos de fabricação e montagem. Um dos principais benefícios da metodologia reside na facilitação da manutenção ao longo do ciclo de vida do produto. A incorporação de estratégias de manutenção preventiva, bem como o fácil acesso a componentes críticos, contribui para a redução de paradas não programadas e do tempo de inatividade dos sistemas. Obteve-se diminuição da complexidade estrutural, com menos peças sujeitas a desgaste, resultando em equipamentos mais confiáveis e com menor custo de produção além de menos tempo de manutenção. Assim, a integração dos princípios do DFMA no projeto de compressores apresentou uma oportunidade relevante para o aumento da eficiência produtiva e de manutenção e competitividade no cenário industrial global.

Palavras-chave: Compressores; DFMA; Eficiência; Custo; Manutenção.

¹ Aluno do Programa de Pós-graduação Projetos de Mecânica Industrial pelo Centro Universitário SENAI SP. E-mail: welton951@hotmail.com

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo. Centro Universitário SENAI SP e Faculdade de Tecnologia (FATEC). E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

³ Mestre em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de São Paulo. Centro Universitário SENAI SP. E-mail: lucas.willenshofer@sp.senai.br

⁴ Mestre em Energia pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Centro Universitário SENAI SP. E-mail: edgard.cardoso@sp.senai.br

⁵ Doutor em Nano Ciências e Materiais Avançados pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Centro Universitário SENAI SP. E-mail: manuel.bisneto@sp.senai.br



Abstract: The compressor market has experienced continuous growth, driven by increasing demand from sectors such as refrigeration, HVAC, automation, and transportation. These machines are essential in systems involving the pressurization of gases and fluids, playing a strategic role in various industrial processes. In this context, the pursuit of more efficient and sustainable solutions has fostered significant technological advancements. The application of the Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) methodology stands out as a promising approach in compressor development. DFMA aims to optimize the design, with an emphasis on design simplification, cost reduction, and increased efficiency in manufacturing and assembly processes. One of the main benefits of this methodology lies in facilitating maintenance throughout the product's life cycle. The incorporation of preventive maintenance strategies, as well as easy access to critical components, helps reduce unplanned downtime and system inactivity. Structural complexity has been decreased, with fewer components subject to wear, resulting in more reliable equipment, lower production costs, and reduced maintenance time. Thus, integrating DFMA principles into compressor design presents a significant opportunity to enhance production and maintenance efficiency, as well as competitiveness, in the global industrial landscape.

Keywords: Compressors; DFMA; Efficiency; Cost; Maintenance.

INTRODUÇÃO

O DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) é uma abordagem estratégica utilizada na engenharia e desenvolvimento de produtos para otimizar tanto a manufatura quanto a montagem de componentes e sistemas. O conceito combina princípios do DFM (Design for Manufacturing), que visa facilitar a fabricação de peças individuais, com o DFA (Design for Assembly), que busca simplificar o processo de montagem, reduzindo custos, tempo de produção e complexidade. A aplicação do DFMA é particularmente relevante na indústria de fabricação e reforma de compressores, onde a necessidade de redução de custos e confiabilidade estrutural impulsiona a inovação no design e nos processos produtivos (Boothroyd; Dewhurst; Knight, 2002).

MERCADO

Nos processos industriais modernos de fabricação, a necessidade de ar comprimido tornou-se um fator indispensável, uma vez que muitas máquinas e equipamentos dependem desse recurso para operar de forma eficiente. Dessa maneira, a aplicação de compressores torna-se fundamental, garantindo o suprimento adequado de ar comprimido e viabilizando o funcionamento contínuo e otimizado dos sistemas industriais (Eletrobrás, 2010)

Os compressores desempenham um papel fundamental em diversas aplicações industriais e domésticas, incluindo sistemas de refrigeração, ar-condicionado, equipamentos pneumáticos, setor automotivo, processos petroquímicos e indústria de alimentos e embalagens. O mercado global de compressores abrange diferentes tipos, como os alternativo tipo pistão, mais comuns em aplicações de alta pressão com opções de baixa e grande vazões; os rotativos, como os parafuso e scroll, que oferecem maior eficiência e menor manutenção; e os centrífugos, utilizados em processos industriais de grande porte devido à sua alta capacidade de vazão. Cada

tipo de compressor apresenta desafios específicos de design e manufatura, tornando essencial a aplicação de estratégias como o DFMA para aprimorar sua produção (Brown, 2011).

MATERIAIS

Além da tipologia dos compressores, a seleção de materiais é um fator determinante para garantir desempenho, durabilidade e eficiência dos equipamentos. Materiais como ferro fundido, aço inoxidável, ligas de alumínio e até polímeros de alto desempenho são amplamente utilizados, dependendo dos requisitos de resistência mecânica, peso e dissipação térmica. A escolha do material impacta diretamente o custo de produção e o método de fabricação adotado, o que reforça a necessidade de um projeto otimizado desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto (Brown, 2011).

Técnicas de Fabricação

As técnicas de fabricação utilizadas na produção de compressores incluem processos como fundição, usinagem de precisão, conformação mecânica e manufatura aditiva, sendo selecionadas de acordo com a complexidade geométrica das peças e a viabilidade econômica da produção. O DFMA permite reduzir a quantidade de componentes, simplificar geometrias e minimizar a necessidade de operações secundárias, resultando em um processo produtivo mais eficiente e sustentável (Kerbrat; Mognol; Hascoët, 2011)

OBJETIVO

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a aplicação dos princípios do DFMA no desenvolvimento de melhorias nos conjuntos de válvulas de sucção e descarga de um compressor. Buscou-se investigar como o design poderia ser otimizado para facilitar os processos de manufatura e montagem, reduzir custos e aprimorar a eficiência operacional.

Foram exploradas diferentes abordagens, iniciando-se pela melhoria na manufatura do conjunto e, posteriormente, na montagem, passando pela escolha adequada dos materiais até a aplicação de tecnologias avançadas de fabricação. Dessa forma, o estudo contribui para o avanço da engenharia de produtos nesse setor.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

DFMA (Design for Manufacture and Assembly) Design para Fabricação e Montagem o conceito de DFMA surgiu no século XIX com o engenheiro Eli Whitney, desenvolvedor de um sistema de manufatura padronizado para armas nos Estados Unidos. Antes disso, a produção era artesanal, com peças específicas para cada armamento. Whitney propôs a padronização dos componentes, tornando a produção mais eficiente, econômica e rápida, sem comprometer a qualidade. Esse método revolucionou a manufatura, permitindo aos trabalhadores operar máquinas sem necessidade de conhecimento mecânico aprofundado, bastando seguir diretrizes estabelecidas no plano de produção (Kalpakjian; Schmid, 2014).

O DFMA, é uma abordagem abrangente voltada para o desenvolvimento de produtos, combinando duas metodologias essenciais: DFA (Design para Montagem) e DFM (Design para Fabricação). Essa metodologia auxilia os designers a otimizar a estrutura dos produtos, minimizando custos de produção e montagem, além de aprimorar a qualidade, ao considerar esses aspectos desde as etapas iniciais do projeto (Boothroyd; Dewhurst; Knight, 2010).

O DFMA pode ser aplicado em qualquer produto mecânico ou eletromecânico pois tem uma abordagem versátil e aplicável no processo de fabricação de peças metálicas e plásticas. Seu uso pode ser feito em diversas indústrias, como a alimentícia, de embalagens, automotiva, eletrônica, aeroespacial e de utensílios médicos (Anderson, 2020).

O DFMA impacta positivamente diversos setores e profissionais ao longo do ciclo de vida de um produto. Para designers e engenheiros, sua aplicação resulta em projetos mais inovadores e viáveis. Fabricantes se beneficiam da redução da complexidade da produção, tornando os processos mais ágeis e econômicos. Gerentes de projeto ganham maior previsibilidade em prazos e orçamentos, enquanto executivos e proprietários de empresas observam melhorias na eficiência operacional e no retorno financeiro. Por fim, os clientes usufruem de produtos mais confiáveis, acessíveis e de melhor qualidade, impulsionando a competitividade do mercado (Formentini; Boix Rodríguez; Favi, 2022)

O DFM visa desenvolver produtos ou conjuntos que sejam confiáveis e seguros para sua aplicação, com custo reduzido de fabricação, evitando geometrias ou características de fabricação indesejadas. Essa abordagem busca simplificar o design, otimizar processos e reduzir custos, sem comprometer a qualidade e a funcionalidade do produto (Anderson, 2020). Seu principal objetivo é eliminar aspectos desnecessários ou inadequados que possam dificultar a produção. Um exemplo disso é a otimização de acabamentos e tolerâncias dimensionais,

evitando desperdícios de tempo e recursos ao aplicar exigências superiores às realmente necessárias (Mears, 2017).

O DFM é baseado nas seguintes diretrizes para se obter sucesso em um produto ou conjunto: desenvolver um projeto para um número mínimo de partes; projeto que seja modular, possível de ser usado em várias plataformas; mínimo de variações de componentes; desenvolver componentes multifuncionais; projetar componentes de fácil fabricação e montagem; projetar evitando elementos de fixação como rebites e parafusos; diminuir ao máximo direções de montagem; minimizar o manuseio de componentes; eliminar ajustes; evitar componentes flexíveis; e enfatizar a padronização (Lee; Kang, 2025).

Um componente eliminado tem custo zero de fabricação, montagem, manipulação, orientação, armazenagem, compra, controle de estoque, inspeção, retrabalho e serviços de pós-venda. Com um elemento eliminado, também não há falha, este nunca funciona mal e não necessita de ajuste (Barbosa, 2007).

DFA tem como objetivo a simplificação do processo de montagem visando gerar ganhos econômicos. Segundo o DFMA.com:

Enquanto o Design for Manufacturing (DFM) otimiza a capacidade de fabricação de componentes individuais, o DFA prioriza como esses componentes se juntam para formar um produto completo. O DFA reduz a complexidade, otimiza os fluxos de trabalho e minimiza o desperdício, resultando em produtos de alta qualidade e fáceis de montar (DFMA.com, 2024, s.p.).

O DFA é uma abordagem estratégica voltada a tornar o processo de montagem mais eficiente e econômico. Para isso, algumas diretrizes fundamentais são seguidas: a primeira delas é a redução do número de peças, eliminando componentes desnecessários para evitar desalinhamentos, danos e custos logísticos (Boothroyd; Dewhurst; Knight, 2010). A padronização de componentes permite o uso de peças comuns em diferentes produtos, reduzindo a necessidade de ferramentas especializadas e facilitando o treinamento de funcionários (Tan *et al.*, 2023)

A adaptação do design para montagem automática é outra estratégia essencial, garantindo que as peças sejam fáceis de manipular por sistemas robóticos por meio de recursos como simetria, auto localização e encaixes rápidos (Tan *et al.*, 2023). Também é crucial minimizar os requisitos de orientação e manuseio, projetando componentes possíveis de serem montados sem necessidade de ajustes precisos, agilizando o fluxo de trabalho (Costa; Silva; Silva, 2005).

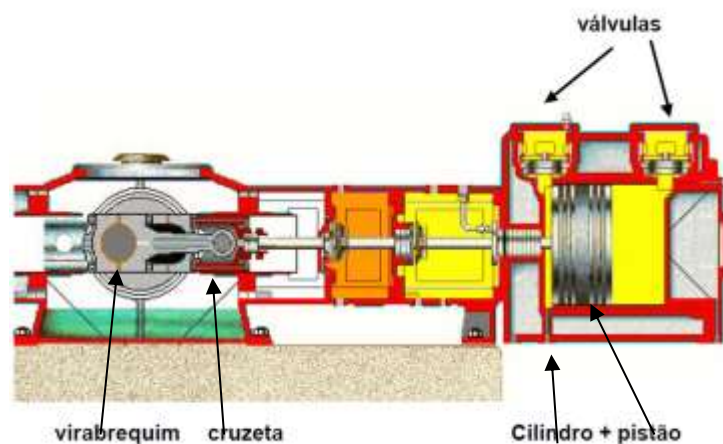
Por fim, a redução do uso de fixadores mecânicos, como parafusos e porcas, elimina etapas adicionais do processo de montagem. Alternativas como encaixes rápidos, adesivos ou soldagem tornam a fabricação mais ágil e reduzem a necessidade de ferramentas especializadas, promovendo um processo mais eficiente e acessível (Zobov *et al.*, 2023).

O Design for Assembly (DFA) traz vantagens significativas em diversas fases do ciclo de vida de um produto. Na etapa de design, ele facilita a colaboração entre as equipes de design e de fabricação, assegurando que as questões relacionadas à montagem sejam consideradas desde o início (Monetti; Lundström; Maffei, 2024). Durante a produção, o DFA contribui para a redução de tempos de ciclo, diminui erros de montagem e cortes nos custos, resultando em uma produção mais ágil e escalável, o que também acelera o tempo de lançamento no mercado. Para os consumidores, o uso do DFA leva à criação de produtos mais robustos, confiáveis e de longa duração, o que fortalece a confiança do cliente e a imagem da marca no mercado (Juniani *et al.*, 2022).

METODOLOGIA

O objeto de estudo deste trabalho se refere a uma parte de um compressor tipo alternativo para ar comprimido, do tipo pistão de quatro estágios. Na Figura 1, é possível verificar alguns itens componentes principais de um compressor. Entre eles estão o virabrequim, com a função de converter o movimento rotativo do motor (ou de um motor externo) em movimento alternativo (para cima e para baixo) para o pistão do compressor. Isso permite a compressão do gás ou ar dentro do cilindro.

Figura 1 – Compressor alternativo a pistão – BURTON CORBLIN.



Fonte: Unicamp (2003).

A cruzeta em um compressor alternativo tem a função de transmitir o movimento rotativo do eixo virabrequim para o movimento alternativo do pistão. Ela está localizada na articulação entre o eixo virabrequim e a biela do compressor.

A função do cilindro em um compressor alternativo é fornecer o espaço onde ocorre a compressão do ar ou gás. O cilindro é a cavidade na qual o pistão se move para cima e para baixo, comprimindo o fluido que entra no compressor através das válvulas de sucção. O pistão, conectado à biela e ao virabrequim e à cruzeta, realiza o movimento alternativo dentro do cilindro para comprimir o gás ou o ar. Já as válvulas de sucção e descarga em um compressor alternativo têm funções essenciais para controlar o fluxo de ar ou gás dentro do compressor durante os ciclos de operação. Elas garantem o funcionamento correto do compressor, permitindo a compressão eficiente do fluido.

A válvula de sucção controla a entrada do ar/gás no cilindro durante o movimento de admissão. E a válvula de descarga controla a saída do ar/gás comprimido durante o movimento de compressão.

Neste modelo de compressor alternativo do tipo pistão temos quatro estágios de compressão, cada um tendo um cilindro com diâmetro diferente, sendo o primeiro estágio com o cilindro de compressão de maior diâmetro e o quarto estágio o cilindro de compressão de menor diâmetro. Isso se dá para tornar possível elevar as pressões gradativamente até 40,0 Bar. Cada cilindro de compressão contém uma câmara de refrigeração a água responsável por refrigerar todo o cilindro, retirando o calor gerado do processo de compressão e preservando os anéis guias e de compressão do pistão, evitando o desgaste prematuro deles. Além da câmara de refrigeração, cada cilindro contém sedes de válvulas de sucção e sede de válvula de descarga onde é feita a montagem do conjunto. Cada válvula de descarga e sucção necessita de vários outros componentes para que a válvula, tanto de sucção como descarga, fique fixada em seu local sem se movimentar. Caso ocorra uma montagem errada ou uma montagem mal feita isso pode gerar severos danos ao compressor.

Seu ciclo de funcionamento inicia aspirando uma determinada vazão de ar do ambiente – vazão essa já determinada na concepção do seu projeto. Esse ar passa pelas válvulas de sucção, é comprimido dentro do cilindro e descarregado através das válvulas de descarga em alta temperatura. Após isso o ar comprimido quente é resfriado por um trocador de calor e levado até o próximo estágio de compressão. Isso acontece sucessivamente nos quatro estágios.

Em um trabalho de retrofit do compressor é possível ter acesso a todos os conjuntos e peças. Deste modo, foi encontrada uma possibilidade de melhora com redução de número de

peças no conjunto do cilindro do 3º estágio, especificamente na fixação das válvulas de sucção e válvulas de descarga. Na figura 2, circulado de vermelho, encontra-se o cilindro do 3º estágio selecionado para o caso de estudo e para aplicação do DFMA.

Figura 2 – Compressor 4HA-4TER-LT.



Fonte: acervo dos autores (2025).

Para melhor compreensão, o conjunto de válvulas de descarga estão localizadas na parte superior e o conjunto de válvulas de sucção estão na parte inferior do cilindro do 3º Estágio. Isso é melhor indicado por setas vermelhas na figura 3.

Figura 3 – Cilindro 3º Estágio Válvulas de descarga – Original.

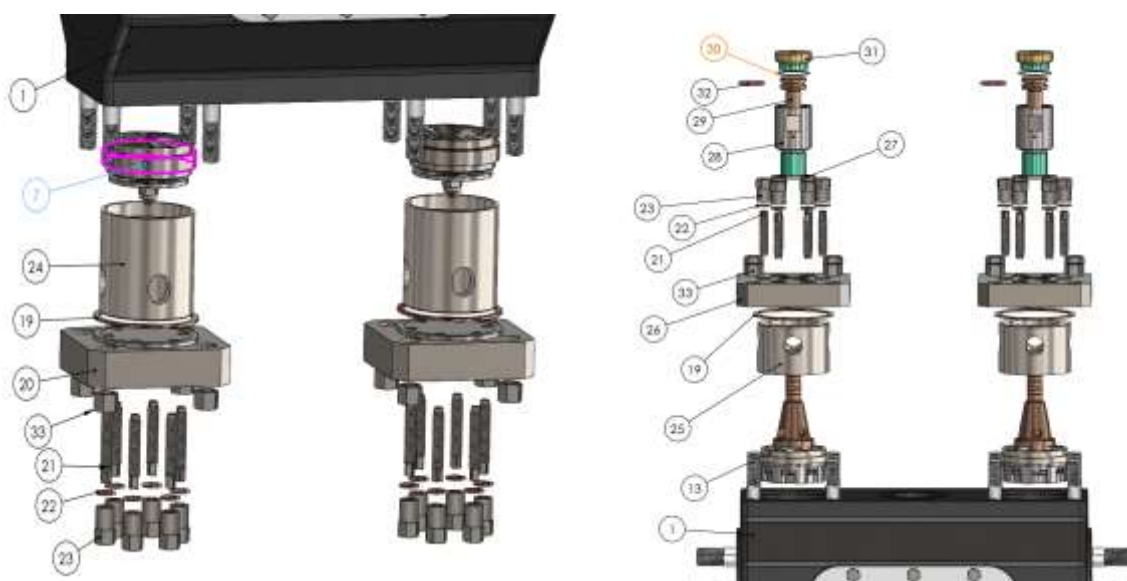


Fonte: acervo dos autores (2025).

MODELO ORIGINAL

Na figura 4 podemos ver o modelo em formato 3D igual ao modelo original com a vista explodida de todos os itens.

Figura 4 – Vista explodida - modelo original.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na figura 4 foram numerados os itens do modelo original sob análise. São eles:

Quadro 1 – itens do modelo original.

Número	Descrição
Nº 1	Cilindro de compressão
Nº 7	Válvula de descarga
Nº 13	Válvula de Sucção
Nº 19	Arruela de cobre entre cilindro de compressão e tampa de válvula de sucção
Nº 20	Tampa de válvula de descarga
Nº 21	Parafuso de Ajuste
Nº 22	Arruela de cobre entre tampa de válvula de sucção e porca cega
Nº 23	Porca cega
Nº 25	Espaçador da válvula de sucção
Nº 24	Espaçador de válvula de descarga
Nº 26	Tampa de Válvula de sucção
Nº 27	Arruela de cobre entre tampa de válvula de sucção e corpo guia do pistão aditivo
Nº 28	Corpo guia do pistão aditivo
Nº 29	Pistão Aditivo
Nº 30	Arruela de cobre entre corpo guia do pistão aditivo e tampa de redução
Nº 31	Tampa de Redução
Nº 32	O'Ring do Pistão Aditivo
Nº 33	Porca M18

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

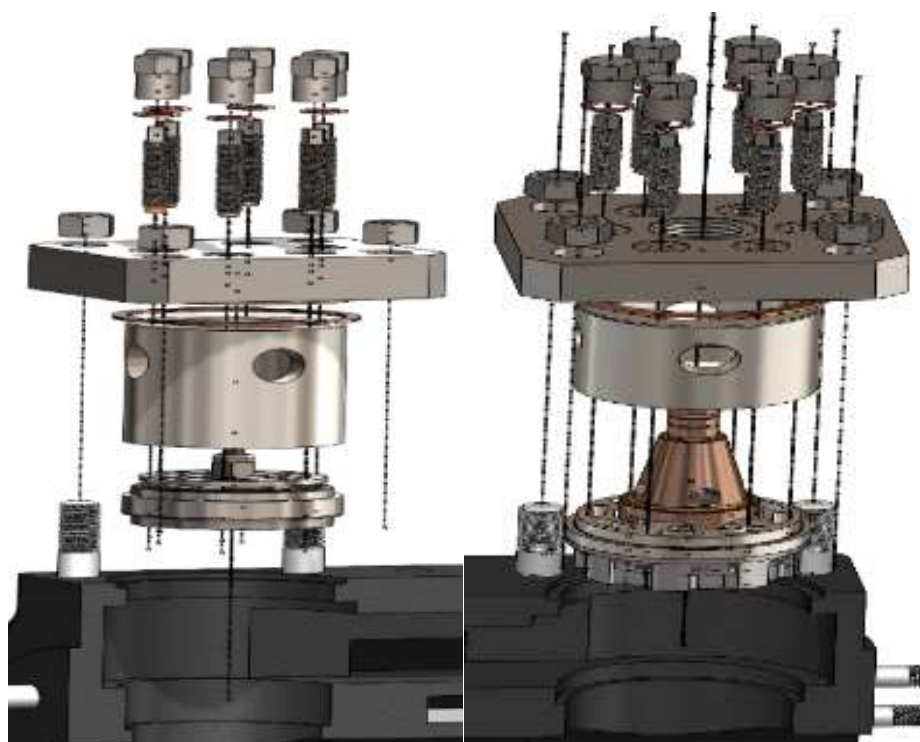
No modelo original as válvulas de sucção e descarga são montadas da seguinte forma:

1º: Coloca-se as válvulas de sucção ou descarga em suas sedes dentro do cilindro; 2º: Após tem-se que inserir o espaçador que encaixa sobre as válvulas de sucção e descarga; 3º: Após coloca-

se uma junta de cobre no cilindro que faz a vedação entre o cilindro e a tampa de válvula; 4º: Encaixa-se as tampas de válvulas de descarga ou sucção; 5º: Rosqueia-se as porcas no prisioneiro que já vem montado no cilindro; 6º: Aplica-se o torque determinado nas porcas para que faça a vedação das tampas com os cilindros; 7º: Depois é rosqueado os parafusos de ajuste para que eles empurrem por igual o espaçador contra a válvula de descarga ou sucção; 8º: Após encostar esses parafusos por igual nos espaçadores para que não fiquem soltos é necessário aplicar torque em cada parafuso de ajuste esse processo é o que demanda maior atenção pois deve ser feito de forma cruzada o torque de cada parafuso de ajuste para que o espaçador não fique torto apoiando mais um lado do que o outro no espaçador; 9º: Próximo passo é coloca arruelas de cobre nos parafusos de ajuste; 10º Após isso rosqueia-se a porcas cegas nos parafusos de ajuste até pressionar as arruelas de cobre contra a tampa de válvula de sucção ou descarga isso é essencial para que aconteça a vedação evitando vazamento do ar comprimido.

A figura 5 demonstra a sequência de montagem da válvula de sucção e descarga. O conjunto de válvula de descarga está à esquerda e o conjunto de válvula de sucção à direita.

Figura 5 - Conjunto Válvula de descarga e sucção – Original.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Outro ponto crítico no modelo original é a questão de manutenção. A manutenção preventiva deste modelo de compressor deve ser realizada a cada 8.000 horas ou a cada um ano

após a última manutenção preventiva. A troca das válvulas de sucção e descarga é de suma importância para evitar paradas para manutenção corretiva indesejada até a próxima manutenção preventiva.

Tendo isso como condição, em todas as manutenções se faz necessário a desmontagem dos conjuntos de válvulas de sucção e descarga. Pode se encontrar, em alguns casos, na desmontagem do conjunto das válvulas de sucção e descargas, porcas cegas emperradas no parafuso de ajuste, ou parafuso de ajuste emperrado na tampa de válvula, demandando muito mais tempo de manutenção, maior gasto com uso de desengripante. Em alguns casos, se faz necessário até o uso de maçarico para poder aquecer as peças e realizar a desmontagem.

MODELO PROPOSTO

Na figura 6 temos os itens do modelo 3D Proposto após uso do DFMA com base no modelo original. Foram realizadas as mudanças propostas, e o conjunto de válvula de sucção está à esquerda e o conjunto de válvula de descarga à direita.

Figura 6 – Vista explodida do modelo proposto.



Fonte: elaborado pelos autores, (2025).

Na figura 6 temos os itens do modelo proposto que está sendo analisado.

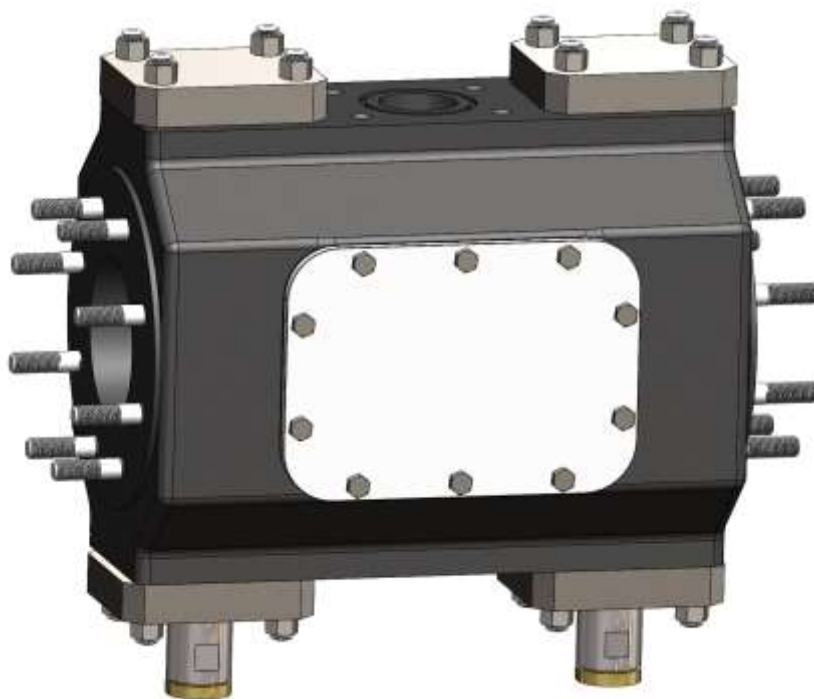
Quadro 2 – itens do modelo proposto (figura 6).

Número	Descrição
Nº 1	Cilindro de compressão
Nº 7	Válvula de descarga
Nº 16	Válvula de sucção
Nº 19	Tampa de válvula de descarga
Nº 20	Espaçador de válvula de descarga
Nº 21	Espaçador de válvula de sucção
Nº 22	Tampa de válvula de sucção
Nº 23	Corpo guia do pistão aditivo
Nº 24	Pistão aditivo
Nº 25	Arruela entre corpo guia do pistão aditivo e tampa de redução
Nº 26	Tampa de redução
Nº 27	O’Ring Válvula de sucção
Nº 28	Anel O’Ring do pistão aditivo
Nº 29	Porca M18
Nº 30	Junta entre tampa de válvula de sucção e corpo guia do pistão aditivo.

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Tendo como base a situação atual através de estudos das geometrias aplicada à técnica de DFMA, o objetivo é obter menor número de peças e menor quantidade de peças manuseadas, com a finalidade de diminuir custos de produção, tendo menos espaço de peças alocadas em almoxarifado, número de fornecedores reduzido, e evitando variações dos mesmos produtos e diminuição das inspeções de qualidade. Obteve-se a seguinte geometria do conjunto de válvulas de sucção e descarga no cilindro do 3º Estágio (ver figura 7).

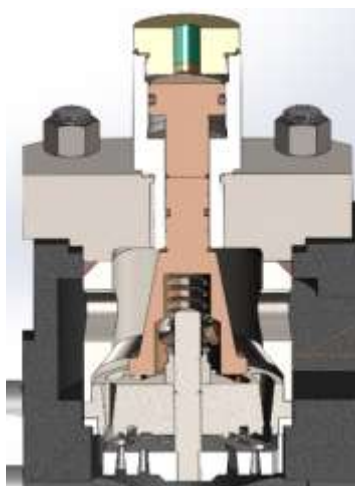
Figura 7 – Conjunto Cilindro de compressão 3º Estágio - Modificado



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Foi obtida a seguinte configuração na válvula de sucção com a eliminação de 4 componentes (ver figura 8).

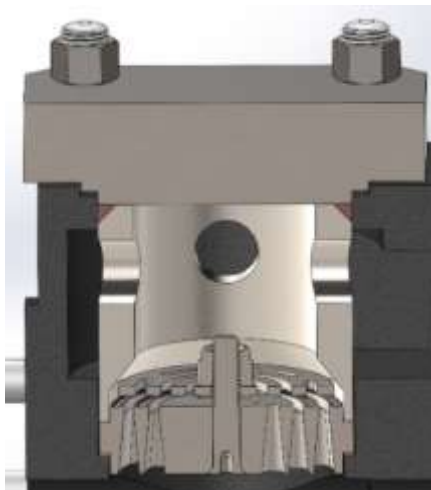
Figura 8 - Conjunto Válvula de sucção – Modificada



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Foi obtida a seguinte configuração na válvula de sucção com a eliminação de 4 componentes (ver figura 9).

Figura 9 - Conjunto Válvula de descarga – Modificada.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comparando o modelo original com o modelo proposto, obteve-se um ganho com a redução de quatro componentes. Estes tiveram suas funções substituídas apenas por um único componente, sendo necessário a modificação de outros dois componentes para a validação do conjunto.

Os itens retirados foram: 1) Parafuso de ajuste que tinha como função pressionar o espaçador de válvula contra a válvula e consequentemente a válvula contra a sede no cilindro tornando os imóveis quando o compressor entra em funcionamento; 2) Junta de cobre entre cilindro e tampa de válvula de descarga ou sucção tinha como função vedar para que o ar comprimido não vaze entre a tampa e o cilindro; 3) Junta de compra entre Tampa de válvula de sucção ou descarga e porca cega, está tinha por finalidade não deixar o ar comprimido vasar pois o ar comprimido consegue passar pelos filetes de rosca do parafuso de ajuste; 4) Porca cega a principal função é fazer uma contra porca no parafuso de ajuste evitando que ele se solte por conta da vibração e consequentemente esmagar a junta de cobre contra a tampa de válvula de sucção ou descarga para que o ar comprimido que passa pela rosca da tampa não vaze para o ambiente.

Sobre as modificações, com o intuito de realizar o menor número delas nos itens já existentes, foi proposto o seguinte: 1) As tampas de válvulas de sucção e descarga já, necessariamente, teriam de ser fabricadas novamente, pois não seriam mais feitas roscas para os parafusos de ajuste; foi-se apenas acrescentado material na sua altura compensando a função do pino de ajuste; 2) No espaçador de válvula foi apenas necessário realizar um chanfro na parte superior para alojar o anel Orign; 3) Anel Orign foi incluído no conjunto com a função de vedar o ar comprimido para evitar escape entre a tampa da válvula de sucção ou descarga e o cilindro, além de manter pressionado o espaçador de válvula contra a válvula e consequentemente a válvula contra a sede no cilindro tornando-os imóveis.

Utilizando os dados extraído das quantidades de operações de montagem do modelo original e comparando com as quantidades de operações necessárias do modelo novo proposto, obteve-se os seguintes dados:

Tabela 1 – Operações de montagem de válvula de descarga modelo original.

OPERÇÕES DE MONTAGEM VÁLVULA DE DESCARGA - MODELO ORIGINAL			
ITEM	OPERAÇÃO	QUANTIDADE DE PEÇAS	TOTAL DE OPERAÇÕES
VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	2	100
ESPAÇADOR VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	2	
JUNTA ENTRE TAMPA E CILINDRO	ENCAIXAR	2	
TAMPA DE VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	2	
PORCA M18	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	8	
	TORQUEAR	8	
PARAFUSO DE AJUSTE	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	12	
	TORQUEAR	12	
ARRULEA DE COBRE	ENCAIXAR	12	
PORCA CEGA	ROSQUEAR	12	
	TORQUEAR	12	

Fonte: Autores (2025).

Na tabela 1 após levantamento das operações de montagem necessárias para dois conjuntos válvulas de descarga do modelo original obteve-se um total de 100 operações entre que são encaixar, rosquear, torquear e lubrificar.

Tabela 2 – Operações de montagem de válvula de descarga modelo original.

OPERAÇÕES DE MONTAGEM VÁLVULA DE DESCARGA - MODELO PROPOSTO			
ITEM	OPERAÇÃO	QUANTIDADE DE PEÇAS	TOTAL DE OPERAÇÕES
VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	2	31
ESPAÇADOR VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	2	
ANEL ORING	LUBRIFICAR	2	
	ENCAIXAR		
TAMPA DE VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	1	
PORCA M18	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	8	
	TORQUEAR	8	

Fonte: Autores (2025).

Na tabela 2 do modelo proposto depois da aplicação das técnicas do DFMA após levantamento das operações de montagem necessárias para dois um conjunto válvulas de descarga do modelo proposto obteve-se um total de 31 operações de montagem.

- Operações iniciais: 100
- Operações após melhoria: 31
- Redução absoluta: $100 - 31 = 69$

Redução percentual = $(69 \div 100) \times 100 = 69\%$

Deste modo para os dois conjuntos de válvulas de descarga obteve-se uma queda significativa de 69% de operações apontando que no modelo proposto reduz o tempo de montagem além de diminuir a possibilidade de erros e esquecimento de operações essenciais para funcionamento correto e seguro da válvula de descarga.

Tabela 3 – Operações de montagem de válvula de sucção.

OPERAÇÕES DE MONTAGEM VÁLVULA DE SUÇÃO - MODELO ORIGINAL			
ITEM	OPERAÇÃO	QUANTIDADE DE PEÇAS	TOTAL DE OPERAÇÕES
VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	1	116
ESPAÇADOR VÁLVULA DE SUÇÃO	ENCAIXAR	1	
JUNTA ENTRE TAMPA E CILINDRO	ENCAIXAR	1	
TAMPA DE VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	1	
PORCA M18	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	8	
	TORQUEAR	8	
JUNTA ENTRE TAMPA E CORPO GUIA	ENCAIXAR	2	
CORPO GUIA	ROSQUEAR	2	
	APERTAR	2	
ANEL ORING	ENCAIXAR	2	
	LUBRIFICAR	2	
PISTÃO ADTIVO + ANEL ORING	ENCAIXAR	2	
	LUBRIFICAR	2	
ARRUELA ENTRE CORPO GUIA E TAMPA DE REDUÇÃO	ENCAIXAR	2	
TAMPA DE REDUÇÃO	ROSQUEAR	2	
	APERTAR	2	
PARAFUSO DE AJUSTE	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	12	
	TORQUEAR	12	
ARRUELA DE COBRE	ENCAIXAR	12	
PORCA CEGA	ROSQUEAR	12	
	TORQUEAR	12	

Fonte: Autores (2025).

Na tabela 3 após levantamento das operações de montagem necessárias para dois conjuntos válvulas de sucção do modelo original obteve-se um total de 116 operações que são encaixar, rosquear, torquar e lubrificar.

Tabela 4 – Operações de montagem de válvula de sucção.

OPERÇÕES DE MONTAGEM VÁLVULA DE SUÇÃO - MODELO PROPOSTO			
ITEM	OPERAÇÃO	QUANTIDADE DE PEÇAS	TOTAL DE OPERAÇÕES
VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	1	49
ESPAÇADOR VÁLVULA DE SUÇÃO	ENCAIXAR	1	
ANEL ORING	LUBRIFICAR	2	
	ENCAIXAR		
TAMPA DE VÁLVULA DE DESCARGA	ENCAIXAR	1	
PORCA M18	LUBRIFICAR	8	
	ROSQUEAR	8	
	TORQUEAR	8	
JUNTA ENTRE TAMPA E CORPO GUIA	ENCAIXAR	2	
CORPO GUIA	ROSQUEAR	2	
	APERTAR	2	
ANEL ORING	ENCAIXAR	2	
	LUBRIFICAR	2	
PISTÃO ADTIVO + ANEL ORING	ENCAIXAR	2	
	LUBRIFICAR	2	
ARRUELA ENTRE CORPO GUIA E TAMPA DE REDUÇÃO	ENCAIXAR	2	
TAMPA DE REDUÇÃO	ROSQUEAR	2	
	APERTAR	2	

Fonte: Autores (2025).

Na tabela 4 do modelo proposto depois da aplicação das técnicas do DFMA após levantamento das operações de montagem necessárias para dois um conjunto válvulas de sucção do modelo proposto obteve-se um total de 49 operações de montagem

- Operações iniciais: $100 + 116 = 246$
- Operações após melhoria: $31 + 49 = 80$
- Redução absoluta: $246 - 80 = 67$

Redução percentual = $(67 \div 116) \times 100 \approx 57,76\%$

Deste modo para os dois conjuntos de válvulas de sucção obteve-se uma queda significativa de 57,8% de operações apontando que no modelo proposto reduz o tempo de montagem além de diminuir a possibilidade de erros e esquecimento de operações essenciais para funcionamento correto e seguro da válvula de sucção.

- Operações iniciais: $100 + 116 = 216$
- Operações após melhoria: $31 + 49 = 80$
- Redução absoluta: $216 - 80 = 136$

Redução percentual = $(136 \div 216) \times 100 = 62,96\% (\approx 63\%)$.

Somando-se todas as operações de montagem dos dois conjuntos válvulas de sucção e descarga do modelo original e todas operações de montagem do conjunto das válvulas de sucção e descarga do modelo proposto obteve-se uma redução de 63% de etapas de montagens.

Estas quantidades de operações do modelo proposto foram levantadas através de um teste realizado fisicamente simulando a montagem do conjunto proposto.

Levando em consideração os valores de compra das peças retiradas do conjunto após a aplicação da técnica DFMA, e comparado com o valor de compra da peça substituta, as quatro peças retiradas, conforme a Tabela 5, resultaram em uma redução nos valores de compra em 96,1%. Tal redução é considerável em questões de valores de compra, pois todo custo reduzido é um ganho para a empresa.

Tabela 5 – Custos de compra.

CUSTO MODELO ORIGINAL		
ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITARIO DE COMPRA
1	4	R\$ 28,00
2	24	R\$ 38,00
3	24	R\$ 5,30
4	24	R\$ 63,00
CUSTO TOTAL		R\$ 2.663,20
CUSTO MODELO PROPOSTO		
ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO DE COMPRA
1	4	R\$ 26,00
CUSTO TOTAL		R\$ 104,00
REDUÇÃO DE CUSTO PERCENTUAL		-96,1

Fonte: Autores (2025).

Além da redução de custos de compra destes itens a dependência de peças fornecidas por terceiros consequentemente diminui as quantidades de inspeções, reduz a quantidade de locais físicos para estocar peças em almoxarifado tornando o controle mais eficaz.

Analisando os técnicos responsáveis pela montagem dos conjuntos das válvulas de sucção e descarga e tomando os tempos de montagem de cada conjunto obteve-se uma redução em torno de 50% sendo que no modelo original o tempo médio de montagem varia entre 10 e 12 minutos já no modelo proposto contabilizou-se um tempo médio de 5 a 7 minutos isso mostra o quanto o modelo proposto é eficiente e econômico. Veja a tabela 4

Quadro 4 – Custo mão de obra.

Custo médio da mão de obra / Minuto		
Modelo Original	R\$	4,62
Modelo proposto	R\$	2,52

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

No Quadro 4 temos o custo médio da montagem de cada conjunto de válvula de sucção e descarga, considerando o valor médio pago ao técnico mecânico como sendo de R\$ 500,00. Considerando o trabalho por 22 dias no mês, 9 horas por dia, totaliza-se 11.800 minutos trabalhados por mês. Com isso obtemos o valor do minuto trabalhado (R\$ 0,42) usando o tempo médio de 11 minutos como parâmetro para o modelo original e 6 minutos para o modelo proposto. Assim, os custos são de R\$ 4,62 e R\$ 2,52, respectivamente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos dados técnicos apresentados ao longo deste estudo, observou-se que a aplicação da metodologia DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) demonstrou significativa eficiência na otimização dos processos de fabricação e montagem. Os resultados evidenciam a integração de princípios do DFMA não apenas reduzindo custos e tempo de produção, mas também melhorando a qualidade e confiabilidade dos produtos.

Os dados analisados apontam que a simplificação do design, aliada à padronização de componentes e processos, desempenha um papel crucial na redução de desperdícios e na maximização da produtividade. Conforme demonstrado nas Tabelas 2 e 4, a redução no número de peças resultou em uma diminuição média de 50% nos tempos de montagem, além de uma economia de 96,1% nos custos de compra dos itens retirados. A eliminação de elementos desnecessários e a minimização da complexidade das peças contribuem diretamente para a eficiência operacional, tornando o processo de manufatura mais sustentável e economicamente viável.

Além disso, a metodologia DFMA possibilita uma abordagem proativa na identificação de potenciais desafios na fase de desenvolvimento do produto, permitindo a implementação de soluções de maior robustez e facilidade de montagem. Esse fator se traduz em uma maior competitividade para as indústrias que adotam essa metodologia, pois há uma redução significativa de retrabalho, falhas e custos relacionados à fabricação.

Conclui-se que a adoção do DFMA é uma estratégia fundamental para empresas em busca de aprimorar sua eficiência produtiva e competitividade no mercado. A contínua aplicação e aprimoramento dessa abordagem podem gerar benefícios a longo prazo, promovendo um ciclo de inovação e melhoria contínua dentro do setor industrial.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, David M. **Design for manufacturability**: how to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.

BARBOSA, G. F. **Aplicação da metodologia DFMA – Design for Manufacturing and Assembly no projeto e fabricação de aeronaves**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – [Local não identificado].

BOOTHROYD, Geoffrey; DEWHURST, Peter; KNIGHT, Winston. **Product design for manufacture and assembly**. 2. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2002.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. A. **Product design for manufacture and assembly**. Boca Raton: CRC Press, 2010.

BROWN, R. N. **Compressors**: selection and sizing. 3. ed. Gulf Professional Publishing, 2011.

COMPRESSORES: guia básico. Brasília: IEL/NC, 2009. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/guia-bsico-para-compressores/62732973>. Acesso em: 1 mar. 2025.

COSTA, J. E.; SILVA, M. R.; SILVA, C. E. S. Reprojetado de um produto fundamentado no design for assembly. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 5., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: [s. n.], 2005.

DFMA. **DFMA**. [S. l.]: DFMA, [20--]. Disponível em: <https://www.dfma.com/resources/dfma.asp>. Acesso em: 5 mar. 2025.

FORMENTINI, Giovanni; BOIX RODRÍGUEZ, Núria; FAVI, Claudio. Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 118, p. 1-19, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08837-6>. Acesso em: 16 ago. 2025.

JUNIANI, A.; SINGGIH, M. L.; KARNINGSIH, P. Design for manufacturing, assembly, and reliability: an integrated framework for product redesign and innovation. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 6, n. 5, p. 88, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2411-9660/6/5/88>. Acesso em: 16 ago. 2025.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. **Manufacturing engineering and technology**. Pearson, 2014.

KERBRAT, O.; MOGNOL, P.; HASCOËT, J.-Y. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS, 2011, [S. l.]. **Anais...** [S. l.: s. n.], 2011. p. 110-117.

LEE, S.; KANG, N. Modular mechanism design optimization in large-scale systems with manufacturing cost considerations. **arXiv preprint**, arXiv:2503.12709, 2025.

MEARS, L. Manufacturing for design: approaches to reduce waste and improve efficiency. **Procedia Manufacturing**, v. 15, p. 45-52, 2017.

MONETTI, F. M.; LUNDSTRÖM, A.; MAFFEI, A. Barriers to adopting design for assembly in modular product architecture: development of a conceptual model through content analysis. **arXiv preprint**, arXiv:2411.17768, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2411.17768>. Acesso em: 16 ago. 2025.

TAN, T. *et al.* Digital-enabled design for manufacture and assembly: integrating modularity and sustainability. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 98, p. 574-585, 2023.

UNICAMP. **Máquinas térmicas**: aulas 15-16 – compressores alternativos. Campinas: UNICAMP, 2003. Disponível em: <https://sites.fem.unicamp.br/~em672/Aulas%2015-16%20-2003%20-%20compressores%20alternativos.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2025.

YUMUS, M. I. B. M. **Design and development of grass cutting machine using DFMA methodology**. 2008. Tese (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universiti Teknikal Malaysia Melaka, [S. l.], 2008.

ZOBOV, S. *et al.* Auto-assembly: a framework for automated robotic assembly directly from CAD. **arXiv preprint**, arXiv:2301.02643, 2023.