



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS KENNETH CARDOSO BEZERRA

**ANÁLISE DA MODELAGEM PARAMÉTRICA BASEADA EM FEATURES COM  
SIEMENS NX 11**

JOÃO PESSOA

2025

MATHEUS KENNETH CARDOSO BEZERRA

**ANÁLISE DA MODELAGEM PARAMÉTRICA BASEADA EM FEATURES COM  
SIEMENS NX 11**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado para a banca examinadora do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal da Paraíba como parte das  
exigências à obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos De Lima Júnior

JOÃO PESSOA

2025

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

B574aa Bezerra, Matheus Kenneth Cardoso.

ANÁLISE DA MODELAGEM PARAMÉTRICA BASEADA EM FEATURES  
COM SIEMENS NX 11 / Matheus Kenneth Cardoso Bezerra. -  
João Pessoa, 2025.  
66 f. : il.

Orientação: JOSE CARLOS DE LIMA JUNIOR.  
TCC (Graduação) - UFPB/TECNOLOGIA.

1. Modelagem Paramétrica. Siemens NX 11. CAD. I.  
JUNIOR, JOSE CARLOS DE LIMA. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

MATHEUS KENNETH CARDOSO BEZERRA

**ANÁLISE DA MODELAGEM PARAMÉTRICA BASEADA EM FEATURES COM  
SIEMENS NX 11**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de engenharia mecânica do centro de tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Data:

Resultado:

**Banca Examinadora**

Documento assinado digitalmente  
 JOSE CARLOS DE LIMA JUNIOR  
Data: 30/04/2025 19:03:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Carlos De Lima Júnior

Documento assinado digitalmente  
 HALANE MARIA BRAGA FERNANDES BRITO  
Data: 30/04/2025 19:27:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dra. Halane Maria Braga Fernandes Brito

Documento assinado digitalmente  
 JOAO BOSCO DE AQUINO SILVA  
Data: 30/04/2025 20:02:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. João Bosco De Aquino Silva

JOÃO PESSOA

2025

## RESUMO

Este trabalho investiga a aplicação da modelagem paramétrica baseada em características – features, utilizando o software Siemens NX 11, contextualizando a evolução do projeto assistido por computador (CAD) desde representações 2D até a modelagem sólida 3D e o surgimento da abordagem paramétrica como ferramenta essencial para capturar a intenção de projeto. Apresentam-se os conceitos fundamentais da modelagem paramétrica, como parâmetros, restrições, a árvore de histórico e as relações de dependência, contrastando-os com a modelagem direta. O Siemens NX 11 é destacado como uma plataforma robusta para essa metodologia. O objetivo foi verificar a viabilidade e aplicação prática do método através da modelagem e parametrização de três montagens mecânicas, morsa de bancada, manivela e motor monocilíndrico, com foco em atualizações proporcionais da geometria baseadas em dimensões-chave. A metodologia adotada permitiu confirmar que alterações nas dimensões relevantes se propagaram consistentemente pelos modelos, validando a capacidade da modelagem paramétrica no Siemens NX 11 para criar projetos flexíveis, adaptáveis e gerenciar modificações eficientemente, demonstrando vantagens sobre a modelagem direta na manutenção da intenção de design e na automação de alterações. Conclui-se sobre a eficácia da metodologia e a importância do planejamento para a robustez dos modelos paramétricos.

Palavras-chave: Modelagem Paramétrica. Siemens NX. CAD. Projeto Assistido por Computador. Modelagem Baseada em Features.

## **ABSTRACT**

This study investigates the application of feature-based parametric modeling using the Siemens NX 11 software, contextualizing the evolution of Computer-Aided Design (CAD) from 2D representations to 3D solid modeling and the emergence of the parametric approach as an essential tool for capturing design intent. Fundamental concepts of parametric modeling, such as parameters, constraints, history tree, and dependency relationships, are presented and contrasted with direct modeling. Siemens NX 11 is highlighted as a robust platform for this methodology. The objective was to verify the feasibility and practical application of the method through the modeling and parameterization of three mechanical assemblies – a bench vise, a crank, and a single-cylinder engine – focusing on proportional geometry updates based on key dimensions. The adopted methodology confirmed that changes in relevant dimensions propagated consistently through the models, validating the capability of parametric modeling in Siemens NX 11 to create flexible, adaptable designs and manage modifications efficiently, demonstrating advantages over direct modeling in maintaining design intent and automating changes. The work concludes on the effectiveness of the methodology and the importance of planning for the robustness of parametric models.

Keywords: Parametric Modeling. Siemens NX. CAD. Computer-Aided Design. Feature-Based Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1** - Geometrias Primitivas

**Figura 2** - Árvore de histórico

**Figura 3a** - Elemento de corte e as dependências geradas

**Figura 3b** - Relação de dependência

**Figura 4** - Restrições e seus símbolos no Siemens Nx 11

**Figura 5** - Vista isométrica do modelo 3D da morsa de bancada

**Figura 6** - Dimensão de controle

**Figura 7** - Rascunho 2D

**Figura 8** - Restrição Geométrica Aplicada ao Rascunho 2D

**Figura 9** - Tabela de restrições dimensionais parametrizadas

**Figura 10** - Expressão de usuário

**Figura 11** - Tabela de dimensões parametrizadas do elemento parte 2, Mandíbula

**Figura 12** - Valores em dimensão de projeto

**Figura 13a** - Valores em dimensão de projeto

**Figura 13b** - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 20% do seu valor

**Figura 14** - Manivela

**Figura 15a** - Valores em dimensão de projeto

**Figura 15b** - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 10% do seu valor

**Figura 16** - Motor monocilíndrico simplificado

**Figura 17a** - Valores em dimensão de projeto

**Figura 17b** - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 50% do seu valor

## **LISTA DE QUADROS**

**Quadro 1** - Comparação entre os principais tipos de modelagem computacionais

**Quadro 2** - Comparação entre GCS e B-Rep

**Quadro 3** - Modelagem Paramétrica X Modelagem Direta

**Quadro 4** - Comparativo entre Siemens Nx 11 e seus concorrentes

## LISTA DE ACRÔNIMOS

- B-Rep - Boundary Representation (Representação por fronteira)
- BIM - Building Information Modeling (Modelagem da Informação da Construção)
- CAD - Computer-Aided Design (Projeto Auxiliado por Computador)
- CAE - Computer-Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador)
- CAM - Computer-Aided Manufacturing (Manufatura Assistida por Computador)
- CE - Concurrent Engineering (Engenharia Simultânea)
- CFD - Computational Fluid Dynamics (Dinâmica de Fluidos Computacional)
- CSG - Constructive Solid Geometry (Geometria Construtiva de Sólidos)
- DM - Direct Modeling (Modelagem Direta)
- ES - Engenharia Simultânea
- FEA - Finite Element Analysis (Análise de Elementos Finitos)
- GCS - Geometria Construtiva de Sólidos
- IDA - Institute for Defence Analysis (Instituto de Análise de Defesa)
- MBD - Model-Based Definition (Definição Baseada em Modelo)
- MIT - Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
- NURBS - Non-Uniform Rational B-Splines (B-Splines Racionais Não Uniformes)
- PLC - Product Lifecycle (Ciclo de Vida do Produto)
- PLM - Product Lifecycle Management (Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto)
- PM - Parametric Modeling (Modelagem Paramétrica)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	11
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 BREVE HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CAD.....	13
2.2 MODELAGEM WIREFRAME .....	15
2.4 MODELAGEM DE SUPERFÍCIES .....	16
2.5 MODELAGEM DE SÓLIDOS .....	17
Quadro 1 - Comparação entre os principais tipos de modelagem computacionais .....	18
2.6 GEOMETRIA CONSTRUTIVA DE SÓLIDOS .....	19
Figura 1 - Geometrias Primitivas.....	20
2.7 REPRESENTAÇÃO POR CONTORNOS (B-REP - BOUNDARY REPRESENTATION).....	20
Quadro 2 - Comparação entre GCS e B-Rep.....	22
<b>2.8 ENGENHARIA SIMULTÂNEA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.9 MODELAGEM PARAMÉTRICA .....</b>	<b>23</b>
3.9.1 PARÂMETROS .....	24
2.9.2 MODELAGEM DE RESTRIÇÕES.....	25
2.9.3 CARACTERÍSTICAS OU FEATURES.....	25
2.9.4 ÁRVORE DE HISTÓRICO .....	26
Figura 2 - Árvore de histórico .....	26
2.9.5 INTENÇÃO DE PROJETO .....	26
2.9.6 DEPENDÊNCIAS PAI/FILHO.....	27
Figura 3a - Elemento de corte e as dependências geradas.....	28
Figura 3b - Relação de dependências .....	29
<b>2.11 PANORAMA GERAL DAS TÉCNICAS DA MODELAGEM PARAMETRIZADA .....</b>	<b>29</b>
2.11.1 TÉCNICA BORN.....	30
<b>2.12 MODELAGEM DIRETA .....</b>	<b>30</b>
Quadro 3 - Modelagem Paramétrica X Modelagem Direta.....	31
<b>2.13 SIEMENS NX 11 COMO PLATAFORMA DE MODELAGEM PARAMÉTRICA .....</b>	<b>32</b>
2.13.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA UNIGRAPHICS/NX .....	32
Quadro 4 - Comparativo entre Siemens Nx 11 e seus concorrentes .....	35
2.13.2 SÍMBOLOS E CARACTERÍSTICAS GEOMETRICAMENTE RESTRITIVAS.....	36
Figura 4 - Restrições e seus símbolos no Siemens Nx 11 .....	37
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
3.1 MODELAGEM PARAMETRIZADA - MORSAS DE BANCADA .....	39

Figura 5 - Vista isométrica do modelo 3D da morsa de bancada.....	40
Figura 6 - Dimensão de controle .....	41
Figura 8 - Rascunho 2D.....	41
Figura 9 - Restrição Geométrica Aplicada ao Rascunho 2D.....	42
Figura 10 - Tabela de restrições dimensionais parametrizadas .....	43
Figura 11 - Expressão de usuário .....	44
Figura 12 - Tabela de dimensões parametrizadas do elemento parte 2, Mandíbula.....	45
Figura 13a - Valores em dimensão de projeto .....	46
Figura 13b - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 20% do seu valor.....	46
<b>3.2 MODELAGEM PARAMETRIZADA - MANIVELA .....</b>	<b>47</b>
Figura 14 - Manivela .....	47
Figura 15a - Valores em dimensão de projeto .....	48
Figura 15b - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 10% do seu valor.....	49
<b>3.3 MODELAGEM PARAMÉTRICA - MONOCILINDRO.....</b>	<b>49</b>
Figura 16 - Motor monocilíndrico simplificado .....	50
Figura 17a - Valores em dimensão de projeto .....	51
Figura 17b -Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 50% do seu valor.....	51
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de produtos, ao longo das últimas décadas, foi profundamente transformado pela evolução das ferramentas de projeto assistido por computador, conhecidas pela sigla CAD (Computer-Aided Design). A jornada iniciou-se com sistemas focados na automação do desenho técnico bidimensional (2D). Embora tenham agilizado o processo tradicional, esses sistemas herdaram limitações na representação espacial complexa. A necessidade de visualizações mais completas impulsionou a transição para a modelagem tridimensional (3D), que progrediu através de abordagens como a modelagem *wireframe* — ou estrutura de arame —, a modelagem de superfícies e, finalmente, a modelagem de sólidos. Esta última oferece representações volumétricas precisas e inequívocas, utilizando métodos como a Geometria Construtiva de Sólidos (CSG) e a Representação por Contornos (B-Rep). Os primeiros sistemas CAD, embora revolucionários, apresentavam limitações na flexibilidade e na capacidade de incorporar facilmente a intenção do projeto ou de se adaptar a modificações, o que motivou a pesquisa por métodos mais avançados como a modelagem paramétrica, Shih (2015); Shih (2023).

Dentro desse panorama evolutivo, a modelagem paramétrica baseada em features, ou características, emergiu como um avanço crucial no final dos anos 80, alinhada aos princípios da engenharia simultânea. Diferente das metodologias anteriores, esta abordagem permite não apenas definir a geometria, mas também capturar a lógica e a intenção por trás do projeto. Isso é realizado por meio de parâmetros — variáveis que controlam dimensões e propriedades —, restrições — regras geométricas e dimensionais que definem relações entre elementos — e um histórico de construção editável, materializado na árvore de features. Essa capacidade de interligar elementos e automatizar atualizações confere uma flexibilidade notável ao processo de design.

A modelagem paramétrica, portanto, tornou-se fundamental no desenvolvimento moderno de produtos, constituindo também um paradigma essencial em metodologias como a Modelagem da Informação da Construção, ou BIM (*Building Information Modeling*). Sua relevância reside na criação de modelos digitais inteligentes, associativos e adaptáveis. Alterações em parâmetros ou features ancestrais, denominadas "pais", propagam-se automaticamente para os elementos dependentes, os "filhos", mantendo a consistência do projeto. Essa característica facilita a exploração de alternativas, a otimização e a implementação de modificações com maior eficiência e menor risco de erros, especialmente em ambientes colaborativos de Engenharia Simultânea (*Concurrent Engineering*). A integração com sistemas

de análise (CAE - *Computer-Aided Engineering*) e manufatura (CAM - *Computer-Aided Manufacturing*) reforça sua importância estratégica.

Nesse contexto, o Siemens NX estabelece-se como uma das principais plataformas integradas do mercado, amplamente utilizada em setores industriais exigentes. A versão NX 11, especificamente, consolidou a ferramenta como uma solução robusta para modelagem paramétrica, suportando plenamente a metodologia baseada em features detalhada por autores como Randy Shih. Funcionalidades avançadas do NX 11, como a Tecnologia Síncrona — que combina flexibilidade e controle paramétrico — e a *Convergent Modeling* — para trabalho direto com dados de malha facetada —, demonstram sua capacidade de lidar com desafios complexos de engenharia. A integração com o ecossistema de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (PLM - *Product Lifecycle Management*) da Siemens, como o *Teamcenter*, otimiza a colaboração e a gestão de dados.

A realização deste estudo justifica-se pela crescente demanda do mercado por profissionais capacitados em ferramentas CAD avançadas e pela necessidade contínua de otimização dos processos de design na indústria. A compreensão aprofundada da modelagem paramétrica e de softwares como o Siemens NX é essencial para a competitividade e inovação na engenharia de produtos. Este trabalho busca contribuir para a formação de profissionais mais qualificados e para a disseminação de boas práticas, através da análise das técnicas de modelagem parametrizada.

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, revisando a evolução do CAD, os tipos de modelagem 3D, os conceitos de engenharia simultânea e os princípios da modelagem paramétrica e direta, além das características do Siemens NX 11. O Capítulo 3 detalha a Metodologia empregada nos estudos de caso. Por fim, o Capítulo 4 traz a Conclusão, sintetizando os achados e respondendo aos objetivos propostos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Verificar a viabilidade de aplicação da modelagem paramétrica com o software Siemens Nx 11, realização de parametrização em casos para estudo e as considerações definidas após verificação e análise.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a parametrização em 3 diferentes sistemas, montagens de complexidades distintas com a finalidade de avaliar se a parametrização de sólidos por característica ou features é uma técnica viável e de grande abrangência nas suas aplicações para sistemas mecânicos utilizando a plataforma Siemens Nx 11;
- Comparar a modelagem paramétrica com a modelagem direta e as demais técnicas mais difundidas, desenvolvendo uma metodologia que permita a parametrização devida das peças propostas para este trabalho;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 BREVE HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CAD

Antes do surgimento do CAD, o desenho técnico manual, baseado em princípios rigorosos como a geometria descritiva, era a língua franca da comunicação de projetos em áreas como engenharia, arquitetura e design. Essa prática, aperfeiçoada ao longo de séculos, exigia não apenas destreza manual, mas também um profundo entendimento de normas e convenções. No entanto, era um processo de natureza lenta e propenso a erros, especialmente em projetos complexos ou que necessitavam de múltiplas alterações. A representação e visualização de geometrias tridimensionais complexas em um meio bidimensional também se apresentava como um desafio significativo. O desenvolvimento do CAD percorreu um longo caminho, iniciando com sistemas 2D focados em desenho técnico e evoluindo para complexas ferramentas de modelagem tridimensional, que hoje integram até mesmo aspectos de animação e análise, Allen; Kouppas (2012).

Pioneiros das décadas de 1950 e 1960 começaram a explorar o potencial dos primeiros computadores desenvolvidos, para criar e manipular imagens. O sistema *Sketchpad*, desenvolvido por Ivan Sutherland no MIT em 1963, emergiu como um marco fundamental para o nascimento do CAD interativo. Ao utilizar um display interativo e uma caneta de luz, o *Sketchpad* possibilitou que os usuários desenhassem diretamente na tela, introduzindo conceitos revolucionários como a manipulação direta de elementos gráficos e o uso de restrições geométricas que preservavam relações predefinidas, mesmo com modificações no desenho. Reconhecido como o precursor do software CAD moderno, o *Sketchpad* evidenciou o potencial da computação gráfica como uma ferramenta poderosa para o desenho técnico e o projeto.

Inicialmente, o termo CAD estava mais associado ao Desenho Auxiliado por Computador, acrônimo em inglês (*Computer-Aided Drafting*), com foco na automação das tarefas de representação gráfica. Contudo, com a evolução das capacidades computacionais, o termo expandiu-se para Projeto Auxiliado por Computador (*Computer-Aided Design*), refletindo uma ferramenta mais abrangente que oferece suporte em várias etapas do processo de design. Essa evolução não apenas acelerou o processo de desenho e projeto, mas também aumentou a precisão, flexibilidade e capacidade de interação, permitindo explorar e expandir as fronteiras do design, buscando incessantemente por soluções inovadoras e aprimoradas que não apenas atendam, mas superem as expectativas e necessidades.

As primeiras gerações de sistemas CAD, nas décadas seguintes ao *Sketchpad*, concentraram-se predominantemente na automação do desenho técnico bidimensional, buscando replicar e otimizar as funcionalidades do desenho técnico tradicional. Softwares como o AutoCAD foram pioneiros nesse período, popularizando o CAD 2D e aumentando significativamente a produtividade na elaboração de desenhos técnicos. Contudo, esses sistemas ainda herdaram a limitação fundamental da representação bidimensional, dependendo da interpretação do usuário para a compreensão completa da geometria espacial e tornando análises volumétricas e detecção de interferências tarefas difíceis.

As limitações inerentes aos desenhos bidimensionais, como a dificuldade em representar profundidade e perspectiva de maneira precisa, tornaram-se um obstáculo para profissionais que necessitavam de uma visualização mais completa e realista. Desenhos 2D, apesar de úteis para certas aplicações, não conseguiam transmitir a complexidade espacial de muitos projetos, especialmente na arquitetura, engenharia e design de produtos. Conforme Shih (2023), o CAD evoluiu de ferramentas bidimensionais para plataformas tridimensionais associativas que integram esboços e parâmetros em um fluxo contínuo de projeto.

A modelagem tridimensional emergiu como uma resposta direta a essas limitações. Ao permitir a representação e manipulação de objetos em um ambiente virtual 3D, essa tecnologia revolucionou a maneira como os profissionais concebiam e comunicavam suas ideias. A profundidade, a perspectiva e as relações espaciais, antes representadas de forma limitada em desenhos 2D, agora podiam ser visualizadas e compreendidas de maneira muito mais intuitiva e completa. Segundo Eastman et al. (2018), essa evolução permitiu maior integração entre disciplinas e maior controle sobre a geometria ao longo do ciclo de vida do produto.

A adoção inicial do CAD foi impulsionada por setores industriais com necessidades complexas e recursos para investir em novas tecnologias. As indústrias automobilística e aeroespacial foram pioneiras. A General Motors (GM), com o sistema DAC-1 na década de 1960, demonstrou as primeiras aplicações no design automotivo. Similarmente, a indústria aeroespacial impulsionou o desenvolvimento de sistemas como o CADAM da Lockheed e o CATIA da *Dassault Aviation*, amplamente utilizados globalmente para o design de aeronaves. Outras indústrias, como a construção naval, também se beneficiaram progressivamente.

Paralelamente ao desenvolvimento industrial, o ambiente acadêmico desempenhou um papel crucial. Universidades foram centros de pesquisa fundamental, estabelecendo as bases teóricas e algorítmicas da computação gráfica e modelagem geométrica, como o próprio *Sketchpad* no MIT. O ensino de CAD foi gradualmente incorporado aos currículos de cursos de engenharia, arquitetura e design, complementando e, em muitos casos, substituindo o

desenho técnico tradicional. No Brasil, a obrigatoriedade do ensino de informática e CAD em cursos de arquitetura a partir de 1994 refletiu essa crescente importância. A relação simbiótica entre indústria e academia, com a indústria fornecendo o ímpeto e financiamento e a academia os avanços teóricos e a formação de profissionais, foram essenciais para a rápida evolução e disseminação da tecnologia CAD.

## 2.2 MODELAGEM WIREFRAME

A modelagem *wireframe* representa objetos 3D utilizando exclusivamente linhas e curvas para delinear suas arestas, como um esqueleto ou uma estrutura feita de arame. É a forma mais antiga e fundamental de modelagem 3D. O modelo contém informações apenas sobre a localização dos vértices e a conectividade das arestas. Crucialmente, não há definição explícita das superfícies que compõem o objeto nem do volume que ele ocupa.

Sua simplicidade permite a criação e manipulação muito rápidas dos modelos. É útil para visualizações estruturais básicas, permitindo verificar a disposição geral das arestas, e frequentemente serve como ponto de partida para a construção de modelos mais complexos. Também facilita a obtenção automática de vistas ortográficas e estudos simplificados de posicionamento espacial.

Apesar de vantagens contundentes, a sua maior limitação é a ambiguidade visual inerente, sem superfícies definidas, pode ser difícil para o observador distinguir entre as partes frontal e traseira do objeto, ou entre o interior e o exterior. Não é possível realizar a remoção automática de linhas ocultas, nem gerar sombreamento ou renderizações foto-realistas. A ausência de informações sobre superfícies e volume impede o cálculo de propriedades físicas importantes, como massa, volume, centro de gravidade, e torna o modelo inadequado para uso direto em análises de engenharia (FEA) ou na geração de programas para manufatura (CAM). Além disso, é possível criar modelos *wireframe* que representam objetos fisicamente impossíveis, com arestas que não definem superfícies coerentes. Sendo assim o que é mantido é o seu valor histórico e o que representou durante o desenvolvimento da modelagem geométrica.

## 2.4 MODELAGEM DE SUPERFÍCIES

Este paradigma de modelagem geométrica 3D descreve a fronteira externa de um objeto, assemelhando-se à sua "casca". Essa fronteira é definida por um conjunto de entidades bidimensionais, que podem ser superfícies planas ou curvas, interconectadas no espaço tridimensional para delinear a forma do objeto. É importante notar que, em geral, um modelo de superfície não contém informações intrínsecas sobre o interior do objeto ou sobre a sua espessura. Ele se concentra exclusivamente na representação da camada externa.

A modelagem de superfície representa um nível de detalhe intermediário quando comparado com a representação simplificada de um *wireframe* e a descrição volumétrica completa fornecida pela modelagem sólida. Essa abordagem é particularmente eficaz para representar formas complexas que exibem curvaturas suaves e contínuas, frequentemente referidas como superfícies de forma livre ou *freeform*. A representação da superfície pode ser alcançada através de malhas poligonais, que oferecem aproximações facetadas da superfície contínua, ou por meio de formulações matemáticas mais sofisticadas, como as NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*). As NURBS, em particular, possibilitam a descrição precisa de superfícies curvas complexas com alto grau de controle sobre sua forma e suavidade, Farin (2002).

A principal vantagem da modelagem de superfície reside na sua capacidade de representar formas geometricamente complexas, incluindo aquelas de natureza orgânica ou estilizada, que seriam extremamente difíceis ou até mesmo impossíveis de criar utilizando técnicas de modelagem sólida baseadas unicamente em primitivas geométricas simples. Além disso, a representação de superfície oferece uma qualidade de visualização significativamente superior à do *wireframe*, permitindo a remoção de linhas ocultas, a aplicação de sombreado para realçar a forma e a geração de imagens renderizadas com maior realismo visual. Essa técnica é essencial em áreas como design industrial, indústria automotiva e aeroespacial, onde a estética e a definição precisam das superfícies externas são cruciais, por exemplo, para realizar análises aerodinâmicas detalhadas. Adicionalmente, modelos de superfície bem definidos podem ser utilizados para gerar percursos de ferramenta para a usinagem de superfícies complexas em sistemas CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).

Uma das principais limitações dos modelos de superfície é que eles não garantem inerentemente a criação de um volume fechado. É possível construir modelos que apresentem aberturas, lacunas entre superfícies adjacentes ou até mesmo superfícies que se auto intersectam, resultando em representações geometricamente inválidas ou fisicamente

irrealizáveis. Outra desvantagem é que, como não há informação explícita sobre o volume interno do objeto, o cálculo direto de propriedades físicas como massa, centro de massa e momento de inércia é limitado ou requer etapas adicionais de processamento. Por fim, a manipulação de modelos de superfície complexos pode exigir um alto nível de habilidade e atenção por parte do modelador para assegurar a continuidade, suavidade visual e geométrica, e a conectividade adequada entre as diferentes seções de superfície que compõem o objeto.

## 2.5 MODELAGEM DE SÓLIDOS

A modelagem de sólidos visa representar o volume completo do objeto, fornecendo uma descrição geométrica e topológica não ambígua tanto do seu interior quanto do seu exterior. Um modelo sólido válido sempre representa um objeto fisicamente realizável, com um volume bem definido e uma fronteira fechada.

É a forma mais completa e informativa de representação geométrica 3D. Um modelo sólido contém informações detalhadas não apenas sobre a geometria (a forma exata das faces, arestas e vértices), mas também sobre a topologia (como esses elementos estão conectados entre si para formar uma fronteira fechada).

A principal vantagem é a representação completa e não ambígua do objeto. Isso permite o cálculo preciso de propriedades de massa e volumétricas (volume, área de superfície, centro de gravidade, momentos de inércia), que são essenciais para a engenharia. Modelos sólidos formam a base ideal para análises de engenharia (FEA, CFD) e simulações de comportamento físico. A definição completa do volume facilita a integração direta com sistemas CAM para a geração automática de percursos de ferramenta para usinagem. Crucialmente, a modelagem de sólidos impede a criação de representações geometricamente inválidas ou fisicamente impossíveis, ao contrário do *wireframe* e da modelagem de superfície. Suporta operações booleanas (união, subtração, interseção) de forma robusta, facilita a pré-montagem digital de componentes e a detecção automática de interferências.

No geral, a criação e manipulação de modelos sólidos exigem mais recursos computacionais (poder de processamento e memória) em comparação com *wireframe* ou superfícies. Embora poderosa, a modelagem de sólidos pode ser menos intuitiva para criar formas extremamente complexas ou orgânicas em comparação com técnicas avançadas de modelagem de superfície, como superfícies aerodinâmicas, utilizadas na indústria aeroespacial. O quadro 1 apresenta a comparação entre os três pilares da modelagem computacional moderna Shih (2023).

Quadro 1 - Comparação entre os principais tipos de modelagem computacionais

<b>Característica</b>	<b>Wireframe (Estrutura de Arame)</b>	<b>Modelagem de Superfícies</b>	<b>Modelagem de Sólidos</b>
<b>Definição</b>	Representa arestas do objeto	Representa a "casca" externa do objeto	Representa o volume completo do objeto
<b>Representação</b>	Vértices e Arestas	Faces (Superfícies), Arestas, Vértices	Volume, Faces, Arestas, Vértices (com topologia)
<b>Informação Contida</b>	Geometria de Arestas/Vértices	Geometria da Fronteira Externa	Geometria e Topologia completas (Interior e Exterior)
<b>Ambiguidade</b>	Alta (visualização)	Baixa (visualização), Média (validade física)	Nenhuma (se válido)
<b>Capacidade de Análise</b>	Nenhuma (Massa/FEA)	Limitada (sem volume/massa)	Completa (Massa, Volume, FEA etc.)
<b>Adequação CAM</b>	Inadequada	Adequada para usinagem de superfícies	Ideal (base para percursos de ferramenta)
<b>Complexidade Criação</b>	Baixa	Média a Alta (depende da forma)	Média a Alta (depende da forma e técnica)
<b>Recursos Computacionais</b>	Baixos	Médios	Altos
<b>Vantagens Principais</b>	Rapidez, Simplicidade	Modela formas complexas/livres, Boa visualização	Representação completa, Análise/Manufatura, Robustez
<b>Desvantagens Principais</b>	Ambiguidade, sem análise/CAM, pode ser irreal	Sem volume/massa, pode ser "aberto"/irreal	Maior demanda computacional, menos intuitivo para formas orgânicas extremas
<b>Aplicações Típicas</b>	Esboços iniciais, Estruturas simples	Design industrial/automotivo, aerodinâmica	Engenharia Mecânica/Civil, Análise, Manufatura, BIM

Fonte: Autor

Apesar de suas desvantagens, a modelagem de sólidos é imprescindível quando se necessita modelar, ou analisar, elementos, sistemas que tenham quantidade não desprezível de

massa. Ela é amplamente utilizada na modelagem de montagens, peças, sistemas mecânicos, e em diversas outras áreas. Suas principais representações são a geometria construtiva de sólidos (GCS) e a representação por fronteira (B-rep).

## 2.6 GEOMETRIA CONSTRUTIVA DE SÓLIDOS

A GCS define objetos sólidos complexos através da combinação hierárquica de primitivas geométricas simples – como prismas, cilindros, esferas, cones e tubos – utilizando operações booleanas de união, interseção e diferença e transformações geométricas como translação e rotação. O processo é semelhante à construção de um objeto a partir de blocos básicos ou à simulação de processos de manufatura por adição ou subtração de material.

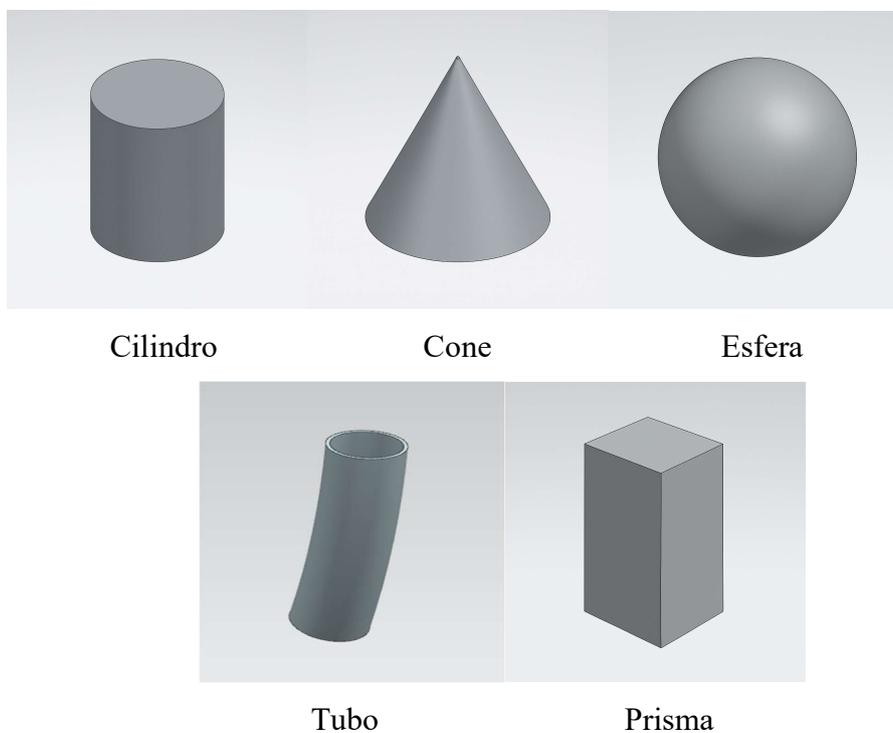
A estrutura é tipicamente armazenada como uma árvore binária, conhecida como Árvore GCS, acrônimo na língua inglesa. Tal nomenclatura se dá devido a analogia de que as folhas, nós terminais, desta árvore representam as instâncias das geometrias primitivas, já submetidas às transformações necessárias. Os nós internos da árvore representam as operações booleanas que combinam os sub-objetos representados por seus filhos. A raiz da árvore corresponde ao objeto sólido final resultante de todas as operações.

A representação GCS é inerentemente concisa e de alto nível, geralmente exigindo menos espaço de armazenamento em comparação com a B-Rep, pois armazena apenas as primitivas e a sequência de operações. Garante a validade do sólido resultante por construção, desde que as primitivas iniciais sejam sólidos válidos. A própria estrutura da árvore GCS armazena implicitamente o histórico de construção do modelo, o que pode ser vantajoso para a parametrização e edição baseada em histórico. O processo de construção pode ser bastante intuitivo para objetos que podem ser facilmente decompostos em formas geométricas simples.

Em contrapartida, uma limitação significativa é o conjunto restrito de primitivas e operações disponíveis, o que pode dificultar ou tornar impraticável a criação de formas geometricamente mais complexas ou superfícies de forma livre, *freeform*. A avaliação do limite exato do sólido final, necessária para visualização detalhada, cálculo de propriedades ou análise, não é trivial e pode ser computacionalmente intensiva, pois requer a execução de todas as operações booleanas na árvore. O acesso direto e a manipulação de elementos específicos da fronteira, como uma face ou aresta particular, não são imediatos, pois esses elementos não são armazenados explicitamente na estrutura GCS primária. Por isso, a GCS é muitas vezes considerada uma representação "não avaliada" ou "não estimada". Pode ser menos intuitiva para representar diretamente objetos do mundo real com formas irregulares.

A figura (1) apresenta as geometrias primitivas, formas fundamentais para a modelagem de todas as demais formas de acordo com os princípios da GCS.

**Figura 1 - Geometrias Primitivas**



**Fonte: Autor**

## **2.7 REPRESENTAÇÃO POR CONTORNOS (B-REP - *BOUNDARY REPRESENTATION*)**

A B-Rep adota uma abordagem diferente: define um sólido descrevendo explicitamente sua fronteira, o limite entre o interior e o exterior do objeto. Essa descrição envolve um conjunto de elementos topológicos – vértices, arestas e faces – juntamente com suas geometrias associadas.

A principal característica da B-Rep é o armazenamento explícito tanto da topologia quanto da geometria. A topologia descreve as relações de adjacência e conectividade entre os elementos da fronteira, por exemplo, quais vértices definem uma aresta, quais arestas definem o contorno de uma face, quais faces se encontram em uma aresta. A geometria define a forma precisa e a localização no espaço de cada vértice, aresta e face.

Uma delimitação explícita e bem detalhada é a maior vantagem da representação B-Rep. Isso facilita enormemente a visualização precisa do modelo, com remoção de linhas

ocultas e sombreamento, a renderização foto-realista e a interação direta do usuário com elementos específicos da fronteira como seleção de faces, arestas e vértices. É um esquema muito mais flexível para representar formas complexas e arbitrárias, incluindo aquelas com superfícies curvas e de forma livre. A disponibilidade explícita da fronteira torna a B-Rep a base natural para muitos algoritmos que operam sobre ela, como a geração de malhas para análise de elementos finitos (FEA) ou o cálculo de percursos de ferramenta para manufatura (CAM). Permite a fácil extração de propriedades de massa e área a partir da descrição da fronteira.

As estruturas de dados necessárias para armazenar a rica informação topológica e geométrica da B-Rep tendem a ser mais complexas e podem consumir significativamente mais memória em comparação com a representação concisa da GCS. Garantir a validade topológica do modelo B-Rep, assegurando que a fronteira seja fechada, sem auto interseções e representando um volume válido, requer verificações mais complexas e a aplicação cuidadosa de operações que preservem a topologia, muitas vezes baseadas em operadores de Euler. A implementação de operações booleanas robustas e eficientes diretamente em modelos B-Rep pode ser desafiadora. Manter o modelo B-Rep atualizado de forma consistente durante modificações pode ser um processo tedioso se não for gerenciado por mecanismos de mais alto nível, como a modelagem baseada em fatores e a parametrização.

O quadro 2 vai apresentar as diferenças entre Geometria Construtiva Sólida e Representação de Fronteira, com as informações obtidas dos autores Hoffmann, (1996); Hoffmann; Shapiro, (1997); Karunakaran Et Al., (2010); Mortenson, (2006); Mount; Eastman, (2018); Pacheco (2011).

Quadro 2 - Comparação entre GCS e B-Rep

<b>Critério</b>	<b>GCS (Geometria Construtiva Sólida)</b>	<b>B-Rep (Representação de Fronteira)</b>
<b>Princípio Fundamental</b>	Combinação de primitivas via operações booleanas	Descrição explícita da fronteira do sólido
<b>Representação Primária</b>	Árvore de operações e primitivas	Grafos de topologia (faces, arestas, vértices) e geometria
<b>Armazenamento de Fronteira</b>	Implícito (requer avaliação)	Explícito
<b>Histórico de Construção</b>	Implicitamente na árvore	Geralmente não armazenado (requer estrutura adicional)
<b>Manipulação Direta</b>	Difícil (elementos da fronteira)	Fácil (faces, arestas, vértices)
<b>Robustez Booleana (Impl.)</b>	Conceitualmente simples, mas avaliação pode ser cara	Implementação mais complexa, mas resultado direto
<b>Adequação a Formas Complexas</b>	Limitada (depende das primitivas)	Alta (flexível para formas arbitrárias)
<b>Tamanho dos Dados</b>	Geralmente menor (conciso)	Geralmente maior (detalhado)
<b>Verificação de Validade</b>	Garantida por construção (se primitivas válidas)	Requer verificações explícitas (e.g., Operadores Euler)
<b>Facilidade de Parametrização</b>	Natural (parâmetros das primitivas/operações)	Requer mecanismos de features/histórico sobrepostos
<b>Uso em Aplicações Finais</b>	Requer conversão para B-Rep (Render/FEA/CAM)	Base direta para Render/FEA/CAM
<b>Vantagens</b>	Concisão, Validade inerente, Histórico implícito	Detalhe da fronteira, Flexibilidade geométrica, Base para apps
<b>Desvantagens</b>	Acesso à fronteira, Limitação de formas, Avaliação cara	Tamanho, Complexidade de validade/booleanos

Fonte: diversos autores

## 2.8 ENGENHARIA SIMULTÂNEA

Foi em meados de 1980 que a engenharia simultânea surgiu como concepção de eficiência de processo dos esforços de equipes de projetistas, arquitetos, engenheiros, analistas, fabricantes e outros profissionais da área, a fim de integrar em um sistema ou plataforma todo o processo do ciclo de vida de um de um produto, da sua idealização até sua fabricação.

A Engenharia Simultânea (ES), frequentemente referida pelo termo em inglês *Concurrent Engineering* (CE) é também conhecida como Engenharia Concorrente ou Engenharia Paralela, representa uma abordagem estratégica e metodológica fundamental no desenvolvimento moderno de produtos. Formalmente, é definida como uma abordagem sistemática para o projeto integrado e simultâneo de produtos e seus processos correlatos, abrangendo desde a manufatura até o suporte e a manutenção pós-venda. Esta definição, consolidada por autores como Winner et al. (1988) e adotada por instituições como o *Institute for Defence Analysis* (IDA), ressalta a integração entre departamentos, setores e o paralelismo de atividades como seus pilares centrais Kolarevic (2003).

A essência da ES reside na sua capacidade de incorporar, desde as fases mais incipientes do desenvolvimento, uma visão holística que engloba todos os elementos do ciclo de vida do produto (*Product Lifecycle* - PLC). Kolarevic (2003) afirma que a engenharia simultânea exige modelos dinâmicos e adaptáveis que possibilitem alteração sem comprometer a estrutura do projeto. Isso significa que, já na concepção, são considerados não apenas os aspectos de desenho, projeto e funcionalidade, mas também fatores cruciais como a qualidade intrínseca e percebida, os custos de desenvolvimento e produção, os prazos de entrega ao mercado e, de forma central, os requisitos e as expectativas dos clientes e usuários finais. Eastman et al. (2018) apontam que a integração entre os domínios técnicos é viabilizada por ambientes CAD paramétricos. Shih (2023) afirma que foi utilizando os princípios de engenharia paralela que uma nova técnica foi introduzida na indústria: A modelagem parametrizada baseada em features, características;

## 2.9 MODELAGEM PARAMÉTRICA

A modelagem paramétrica, ou modelagem paramétrica baseada em características, ou *features*, representa um avanço significativo em relação às abordagens anteriores de modelagem sólida, que se concentravam na criação de uma forma geométrica específica, mas oferecem pouco suporte intrínseco para a edição e alteração dessa forma. Antes da modelagem

paramétrica, modificar um design frequentemente exigia a importação da forma existente e a aplicação de passos adicionais de modificação, sem a capacidade de alterar fundamentalmente os passos originais de criação.

Com foco nos passos de criação e parametrização, a modelagem paramétrica introduziu uma flexibilidade sem precedentes. Ela permite aos designers não apenas criar um objeto, mas definir uma família inteira de objetos relacionados, que podem ser instanciados simplesmente alterando os valores dos parâmetros. Esta capacidade tem implicações profundas, facilitando a exploração de alternativas de design de forma rápida e eficiente. Os designers podem experimentar diferentes configurações, tamanhos e proporções ajustando parâmetros, levando a designs mais inovadores e otimizados.

Além da exploração, a modelagem paramétrica contribui significativamente para a otimização do design, permitindo associar parâmetros a indicadores de desempenho (como estabilidade ou eficiência energética) para avaliar e refinar o projeto com base em critérios específicos. A automação de tarefas repetitivas e a propagação automática de alterações reduzem o tempo e o esforço necessários para modificações, diminuindo a probabilidade de erros e resultando em economia de custos. A manutenção da integridade do design é outra vantagem crucial; as relações e restrições garantem que o modelo permaneça consistente e preciso mesmo após múltiplas alterações.

A evolução da modelagem paramétrica está ligada ao desenvolvimento de representações de modelos sólidos, como a Representação por Contornos (B-Rep), e à combinação de diferentes abordagens, como a Geometria Sólida Construtiva (CSG) e B-Rep em modeladores híbridos. Esta evolução tecnológica forneceu a base para sistemas que podiam não só representar a geometria, mas também capturar a lógica por trás da sua construção.

### **3.9.1 PARÂMETROS**

Os parâmetros são variáveis nomeadas e ajustáveis que definem as características quantitativas do modelo, como dimensões lineares e angulares, comprimento, largura, raio, ângulo, propriedades de materiais, contagens em padrões, ou até mesmo expressões matemáticas que relacionam diferentes métricas e dimensões. Essas características são divididas em classes e tornam-se conceitos fundamentais de suas técnicas de modelagem paramétrica.

## 2.9.2 MODELAGEM DE RESTRIÇÕES

Restrições ou *constrains*, são condições aplicadas a um projeto nas etapas iniciais de sua elaboração com o objetivo de manter previsível a sua forma e geometria, elas são conceitos, fundamentais, regras lógicas, na modelagem paramétrica que definem as relações geométricas e dimensionais entre os elementos de um modelo 3D, garantindo a consistência e o comportamento desejado durante as modificações dos parâmetros. As restrições são divididas em dois grupos: restrição geométrica e dimensional;

As restrições geométricas controlam a forma e as relações entre elementos, como ponto de fixação, perpendicularidade, tangente, paralelismo, igualdade, angularidade, entre outros, ou seja, as características que restringem a forma de um elemento serão classificadas como restrição geométrica.

Enquanto as restrições geométricas controlam a forma, as restrições dimensionais definem o tamanho e a posição do elemento no espaço de esboço através de valores numéricos e expressões matemáticas.

É importante ressaltar que na modelagem paramétrica é mais vantajoso priorizar restrições geométricas em detrimento das dimensionais sempre que o projeto permitir, aplicação do conceito e filosofia foram antes do tamanho ou conforme Shih (2023 “*shape before size*”. As restrições geométricas capturam relações lógicas fundamentais, por exemplo em uma situação em que o ângulo entre duas retas concorrentes é sempre, e tendem a ser mais estáveis e representativas da intenção funcional do que dimensões específicas. O uso excessivo de dimensões pode tornar um esboço rígido e difícil de modificar de forma inteligente, enquanto as restrições geométricas mantêm a estrutura lógica intacta mesmo quando as dimensões gerais mudam. Dessa maneira é exercido uma das filosofias mais importantes da modelagem paramétrica, a necessidade de analisar e definir a intenção do design antes de sequer começar um rascunho ou característica, *feature*.

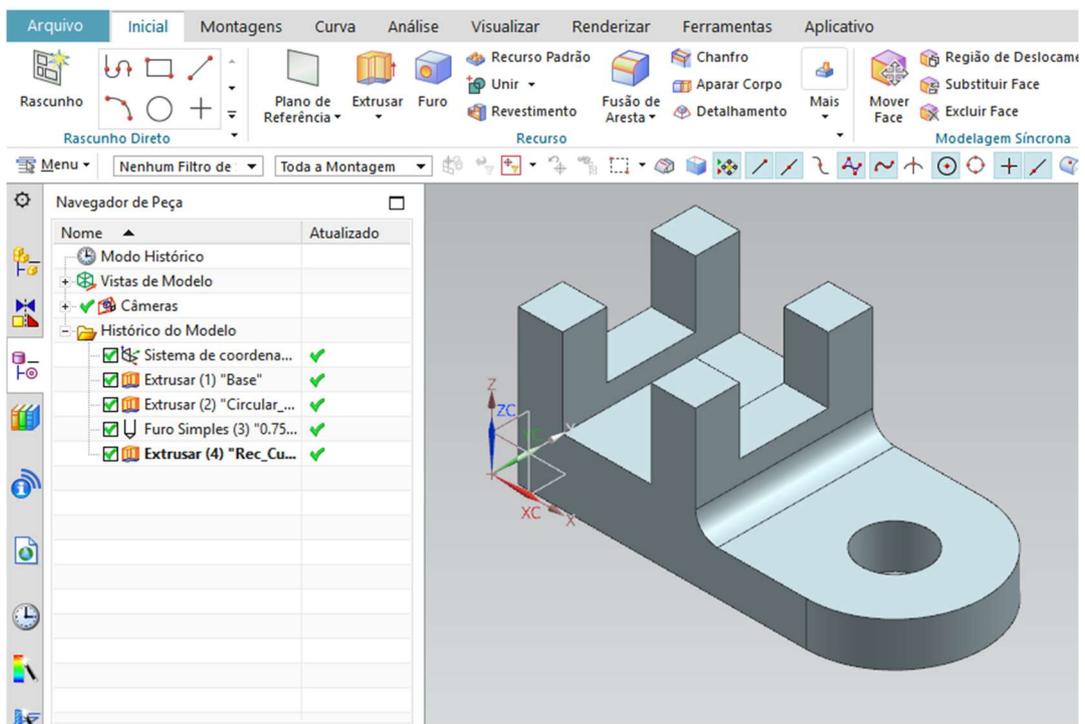
## 2.9.3 CARACTERÍSTICAS OU *FEATURES*

A construção de um modelo paramétrico é baseada em características, operações que transformam a modelagem em duas dimensões para três. Neste contexto, *features* são as ações de extrudar um modelo bidimensional, sendo as principais operações de extrusão, furo, revolução. Estas características podem ser aplicadas a outras definindo a progressão da forma final desejada. É das técnicas, uma das mais difundidas na modelagem parametrizada

## 2.9.4 ÁRVORE DE HISTÓRICO

O Nx 11 registra cada característica criada em uma sequência cronológica, formando uma árvore de histórico, ou linha do tempo. Essa árvore não é apenas um registro passivo; ela representa a lógica de construção do modelo e as dependências entre as features. É possível selecionar qualquer *nodo*, ou característica, na árvore para editar seus parâmetros ou definição, e o software tentará atualizar o modelo a partir daquele ponto, propagando as alterações para todas as características subsequentes que dependem dela. Essa estrutura sequencial e interdependente é o fator para a automação de mudanças, mas também introduz um risco: uma modificação em uma feature inicial pode invalidar a geometria de referência para uma feature posterior, resultando em falhas na reconstrução do modelo. Por isso, o planejamento cuidadoso da sequência e da lógica das features é essencial para a robustez de um modelo paramétrico. A figura 2 apresenta uma árvore histórico.

Figura 2 - Árvore de histórico



Fonte: Autor

### 2.9.5 INTENÇÃO DE PROJETO

A intenção do projeto é talvez o conceito mais importante na modelagem paramétrica. Ele é atribuído à inteligência incorporada ao modelo que define como ele deve se comportar e se adaptar quando sujeito a alterações, garantindo que as modificações respeitem os requisitos funcionais e objetivos pretendidos originalmente. Essa intenção é capturada através da aplicação estratégica e criteriosa de parâmetros, features, restrições e suas relações.

Aplicar corretamente a intenção de projeto é vital porque permite modificações previsíveis, controladas e eficientes. Facilita a automação de mudanças, como a criação de famílias de peças onde um modelo base pode gerar múltiplas variações dimensionais, ou configurações de montagens. Assegura a consistência do design ao longo de múltiplas revisões e reduz a probabilidade de erros introduzidos durante as modificações. Não se trata apenas de conhecer os comandos de um software da área, mas de possuir a capacidade de planejar a estrutura do modelo, antecipar futuras necessidades de modificação e traduzir os requisitos funcionais em um conjunto robusto de relações paramétricas. Um modelo paramétrico mal planejado, mesmo que tecnicamente funcional, pode se tornar tão ou mais difícil de modificar do que um modelo direto, especialmente se a árvore de histórico for propensa a falhas. Portanto, a curva de aprendizado associada à modelagem paramétrica envolve não apenas a familiarização com as ferramentas, mas o desenvolvimento de um de um pensamento estratégico.

### 2.9.6 DEPENDÊNCIAS PAI/FILHO

Quando um novo recurso (o 'filho') é criado utilizando geometria, referências ou parâmetros de um recurso existente (o 'pai'), uma dependência é estabelecida. Esta relação pai-filho é a base da propagação automática de alterações no modelo paramétrico.

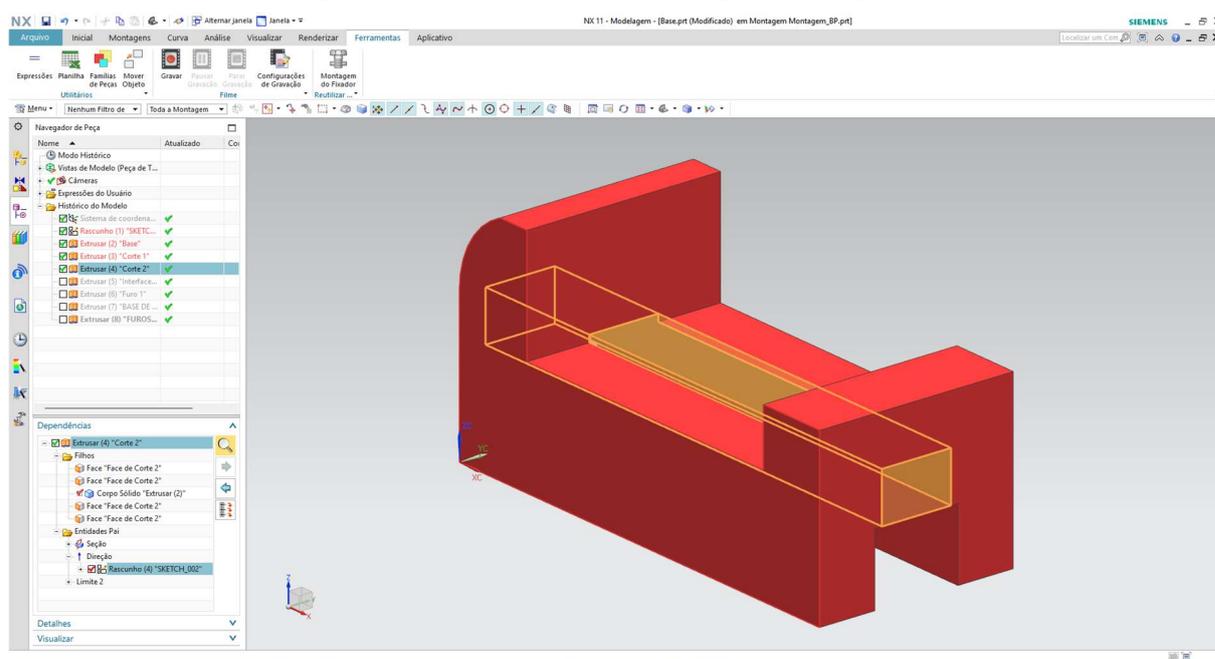
Se um parâmetro ou a geometria de um recurso pai for modificado, o sistema CAD calcula novamente e atualiza automaticamente todos os seus recursos filhos com base nas restrições e relações definidas. Por exemplo, se o diâmetro de um eixo (pai) for alterado, um rasgo de chaveta (filho) posicionado nesse eixo pode atualizar sua posição ou tamanho automaticamente.

Esta estrutura de dependência é o que confere robustez e previsibilidade aos modelos paramétricos para alterações antecipadas. Ela captura eficazmente a intenção do projeto (por exemplo, um furo que deve permanecer sempre centrado numa face, independentemente do

tamanho da face). No entanto, essa mesma estrutura cria uma rigidez inerente. Alterações não antecipadas ou fundamentais, especialmente em recursos criados no início da árvore de histórico (pais primários), podem invalidar as referências ou suposições usadas por muitos recursos filhos dependentes. Isso pode levar a falhas em cascata na regeneração do modelo, exigindo um retrabalho significativo para corrigir as dependências quebradas ou até mesmo remodelar partes da árvore. Este é o problema do "modelo quebradiço" (brittle model). Modelos muito complexos com longas cadeias de dependência também podem se tornar lentos para regenerar após alterações. Isso evidencia uma tensão fundamental na modelagem paramétrica baseada em histórico: a estrutura que permite atualizações automáticas e captura de intenção também impõe rigidez e risco de falha se o planejamento inicial for inadequado ou se mudanças radicais forem necessárias. A modelagem direta, por outro lado, oferece maior flexibilidade para edições não antecipadas, mas sacrifica as atualizações automáticas baseadas na intenção. Portanto, a modelagem paramétrica eficaz exige um planejamento cuidadoso e a aplicação de melhores práticas para criar modelos robustos e flexíveis, como minimizar dependências desnecessárias e usar referências estáveis.

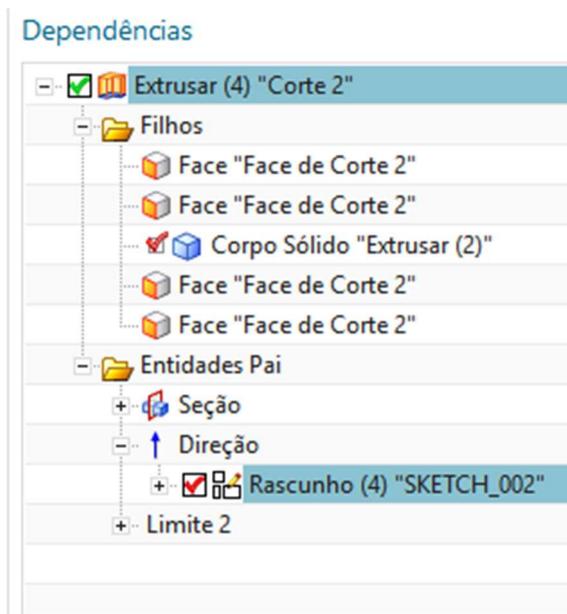
A figura (3a) vai mostrar como o Siemens Nx 11 apresenta as dependências, assim como um exemplo prático do que a literatura aborda. É possível ver com mais detalhes na figuras 3b qual é a entidade pai e a entidade filhos.

**Figura 3a - Elemento de corte e as dependências geradas**



Fonte: Autor

Figura 3b - Relação de dependências



Fonte: Autor

## 2.11 PANORAMA GERAL DAS TÉCNICAS DA MODELAGEM PARAMETRIZADA

A modelagem parametrizada é composta da aplicação de um conjunto de conceitos e fatores que podem ser categorizados em diversas técnicas relacionadas, como modelagem de restrição conforme já abordada neste trabalho, expressões paramétricas, modelagem baseada em características, modelagem síncrona, modelagem baseada em planilhas e modelagem baseada em templates. A modelagem por restrição pratica os conceitos estabelecidos no tópico 3.4.2.

Expressões paramétricas é uma técnica utilizada na qual relaciona as dimensões do projeto com expressões e fórmulas matemáticas quando utilizada em elementos complexos, torna-se necessário o acesso aos dados na forma de planilha para melhor manipulação das informações, sendo assim a técnica passa a ser conhecida também como modelagem baseada em planilhas.

A modelagem parametrizada baseada em templates configura-se de partes de modelos projetados em uma biblioteca de modelagem pré-estabelecida, e então quando se há a necessidade de uma nova parametrização, tais templates são consultados para compor a proposta do desenho.

### 2.11.1 TÉCNICA BORN

A técnica BORN consiste em iniciar o modelo com um sistema de coordenadas cartesiano como primeira feature, em vez de um sólido base. Isso significa que o primeiro elemento no histórico de modelagem é um sistema de referência geométrica (eixos e planos XY, YZ e ZX), e não uma geometria sólida. Por isso, esse primeiro elemento é chamado de órfão — pois não possui dependência histórica anterior a nenhuma outra característica ou sistema de referência.

### 2.12 MODELAGEM DIRETA

A modelagem direta representa uma abordagem fundamentalmente diferente para a criação e edição de modelos 3D. Neste paradigma, os usuários interagem diretamente com a geometria do modelo – faces, arestas e vértices – para modificar sua forma, sem a necessidade de gerenciar parâmetros, restrições explícitas ou uma árvore de histórico sequencial. A analogia frequentemente utilizada é a de um escultor trabalhando com argila: a forma é manipulada diretamente, adicionando, removendo ou alterando material de forma intuitiva.

As principais características da manipulação direta de geometria é a capacidade de selecionar elementos geométricos, como uma face ou um conjunto de faces, e aplicar transformações diretas, como empurrar, puxar para extrudar ou cortar material, mover, rotacionar ou aplicar escala. A ausência de árvore de histórico e a independência das características.

O quadro 3 apresenta as comparações e características entre a modelagem direta e a modelagem paramétrica, tendo as informações sido obtidas através das fontes: Autodesk (C2025 ) E Dassault Systèmes (C2024 ), Dassault Systèmes (C2024 ) E Shapr3d (2023 ), Autodesk (2022 ) E Bluentcad (2022 ), Alibre (2024 );

Quadro 3 - Modelagem Paramétrica X Modelagem Direta

<b>Critério</b>	<b>Modelagem Paramétrica (PM)</b>	<b>Modelagem Direta (DM)</b>
<b>Princípio Fundamental</b>	Baseada em features, parâmetros, restrições e histórico	Baseada na manipulação direta da geometria (faces, arestas, vértices)
<b>Fluxo de Trabalho</b>	Sequencial, baseado em esboços controlados e features dependentes; requer planejamento	Livre, iterativo, focado na forma 3D; menos planejamento inicial necessário
<b>Método de Modificação</b>	Edição de parâmetros, restrições ou features na árvore de histórico; propagação automática	Manipulação direta da geometria (push/pull, mover, rotacionar); alterações locais
<b>Árvore de Histórico</b>	Presente e fundamental; registra sequência e dependências; editável	Ausente (ou apenas log de 'undo'); não há histórico de features editável
<b>Intenção de Projeto</b>	Explicitamente capturada e mantida através de parâmetros e restrições	Não documentada explicitamente no modelo; depende da interpretação do usuário
<b>Flexibilidade</b>	Menor para mudanças radicais/imprevistas; limitada pela estrutura histórica	Alta; ideal para exploração, formas orgânicas e alterações inesperadas
<b>Controle/Precisão</b>	Alto controle dimensional e de relações; modificações previsíveis	Controle dimensional preciso pode ser mais desafiador; menos previsibilidade inerente
<b>Curva de Aprendizagem</b>	Mais acentuada; requer aprendizado da lógica paramétrica e planejamento	Geralmente mais fácil e intuitiva para iniciantes
<b>Automação</b>	Alta capacidade (famílias de peças, configurações, regras de design)	Muito baixa ou inexistente
<b>Edição Dados Importados</b>	Difícil ou impossível (sem histórico); requer reconstrução	Excelente; edita diretamente a geometria B-rep remanescente
<b>Casos de Uso Ideais</b>	Engenharia detalhada, manufatura, montagens complexas, famílias de produtos, BIM	Design conceitual, prototipagem rápida, design industrial, eng. reversa, edição de dados importados

Fonte: Diversos autores

## 2.13 SIEMENS NX 11 COMO PLATAFORMA DE MODELAGEM PARAMÉTRICA

### 2.13.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA UNIGRAPHICS/NX

A história do software começa em 1963 com a fundação da *United Computing*. A empresa lançou seu primeiro produto CAM, UNIAPT, em 1969, seguido pelo sistema CAD 2D UNI-GRAPHICS em 1973, baseado no código ADAM adquirido da MCS.

Em 1976, a McDonnell Douglas (através de sua divisão McAuto) adquiriu a United Computing. Sob a McAuto, o desenvolvimento foi impulsionado, incluindo a introdução da linguagem de programação GRIP e a primeira capacidade de modelagem sólida interativa com o *UniSolids*, lançado por volta de 1981/1983. Uma mudança tecnológica fundamental ocorreu no final dos anos 80 (1988/1989) com a aquisição da Shape Data Ltd e a subsequente adoção do *kernel* de modelagem geométrica *Parasolid*, que forneceu uma base mais robusta para o software.

Em 1991, a EDS adquiriu o negócio Unigraphics da McAuto. A EDS, na época ligada à General Motors, ajudou a estabelecer o Unigraphics como o sistema CAD padrão da GM. O desenvolvimento continuou sob a EDS, com lançamentos importantes como o Unigraphics V11.0 em 1996. Um passo significativo na consolidação do mercado ocorreu em 2001, quando a UGS (sucessora da divisão Unigraphics da EDS) adquiriu a concorrente SDRC, desenvolvedora do software I-DEAS.

Esta aquisição levou diretamente à criação da plataforma unificada "*Next Generation*" (NX) em 2002, com o objetivo de integrar as funcionalidades do Unigraphics e do I-DEAS em um único produto. Em 2007, a gigante industrial Siemens AG adquiriu a UGS, integrando o NX em seu amplo portfólio de automação industrial e PLM (*Product Lifecycle Management*). Sob a propriedade da Siemens, inovações importantes como a Tecnologia Síncrona (*Synchronous Technology*) foram introduzidas por volta do NX 5, e o desenvolvimento contínuo culminou no lançamento do Siemens NX 11 em outubro de 2016.

O *Siemens NX 11* representou um marco significativo, oferecendo uma plataforma altamente integrada que abrange funcionalidades avançadas de Desenho Assistido por Computador (CAD), Engenharia Assistida por Computador (CAE) e Manufatura Assistida por Computador (CAM).

No domínio do CAD, o NX 11 introduziu a revolucionária *Convergent Modeling*<sup>TM</sup>, uma tecnologia que permitiu aos engenheiros trabalharem diretamente com dados de malha facetada, como os provenientes de digitalização 3D ou otimização de topologia, em conjunto

com a geometria B-rep tradicional. Isso simplificou drasticamente os fluxos de trabalho que envolviam engenharia reversa ou a necessidade de reconstruir modelos a partir de dados digitalizados. A modelagem avançada foi aprimorada com ferramentas como *Swept Volume*, *Bounding Volume*, e funcionalidades sofisticadas de superfícies como *Flatten and Re-form* e *Variable Offset Faces*. O módulo *Advanced Sheet Metal* foi notavelmente reestruturado, incorporando funcionalidades anteriormente exclusivas do módulo *Aerospace*, como *Advanced Flange* (para flanges em arestas complexas e não lineares), *Joggle* (para criar offsets precisos) e *Lightening Cutout* (para recortes flangeados), tornando essas capacidades essenciais para as indústrias automotiva e aeroespacial mais acessíveis. A Tecnologia Síncrona continuou a evoluir, oferecendo flexibilidade incomparável na edição de geometria, independentemente de sua origem, enquanto o ambiente de *Sketching* recebeu melhorias significativas de usabilidade e controle, incluindo um novo Navegador de Relações para facilitar a depuração de esboços complexos. Além disso, o suporte a PMI, *Product and Manufacturing Information*, foi fortalecido, promovendo a adoção da Definição Baseada em Modelo (MBD).

Para Engenharia Assistida por Computador (CAE), o lançamento do NX 11 coincidiu com a introdução do *Simcenter 3D*. Esta nova plataforma começou a consolidar as diversas ferramentas de simulação da Siemens (análise estrutural, térmica, de fluidos, movimento, acústica, etc.) em uma única interface, profundamente integrada ao ambiente NX. Essa integração visava simplificar os fluxos de trabalho de simulação, melhorar a associatividade entre design e análise, e tornar a simulação mais acessível, incluindo capacidades como otimização de topologia Öztürk(2010).

Na área de Manufatura Assistida por Computador (CAM), o NX 11 focou em aumentar a produtividade e expandir as capacidades. Foram introduzidas melhorias na automação da furação, estratégias de usinagem otimizadas para moldes e matrizes, e controle visual aprimorado para usinagem complexa de 5 eixos Kravchik(2023). Novas ferramentas como *Machining Line Planner e Post Hub* (uma biblioteca de pós-processadores baseada em nuvem) foram lançadas, juntamente com suporte expandido para programação de robôs industriais e processos de Manufatura Aditiva.

Finalmente, a integração com o ecossistema PLM da Siemens permaneceu como um pilar central. O NX 11 ofereceu uma conexão robusta e nativa com o Teamcenter, facilitando o gerenciamento centralizado de dados, a automação de fluxos de trabalho e a colaboração. O *Active Workspace*, uma interface incorporada, forneceu acesso contextual às funcionalidades do Teamcenter diretamente de dentro do ambiente NX, agilizando ainda mais os processos.

Em suma, o Siemens NX 11 consolidou sua herança como uma solução de engenharia de ponta, introduzindo tecnologias transformadoras como o *Convergent Modeling* e o *Simcenter 3D*, ao mesmo tempo que refinava extensivamente suas capacidades centrais de CAD, CAM e integração PLM, tornando-se uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de produtos complexos.

É possível ver as características que tornam o Siemens Nx único e suas vantagens em relação a seus concorrentes no Quadro 4. Nela foi levantada informações adquiridas dos portais oficiais da Autodesk, (2024); Korolev Et Al., (2023); Plm Nordic, (2024); Siemens Blogs, (2016);

Quadro 4 - Comparativo entre Siemens Nx 11 e seus concorrentes

Característica	Siemens NX 11	Autodesk Fusion	SolidWorks	CATIA
Foco Principal	Modelagem 3D Paramétrica, CAE, CAM, PLM	Plataforma integrada CAD/CAM/CAE/PC B na nuvem, Colaboração	Modelagem 3D Paramétrica	Modelagem de Superfícies Complexas, Grandes Assemblies
Vantagens Principais	Integração PLM, Modelagem Avançada, Simulação	Integração, Colaboração na Nuvem, Custo Acessível, Atualizações Frequentes, Versatilidade	Facilidade de Uso, Intuitivo 3D	Modelagem de Superfícies, Indústria Automotiva/Aeroespacial
Desvantagens Principais	Custo Elevado, Curva de Aprendizado, Complexidade	Curva de Aprendizado (avançado), Desempenho/Estabilidade, Funcionalidades Limitadas vs High-End, Dependência da Nuvem	Custo Inicial, Requisitos de Hardware	Custo Elevado, Curva de Aprendizado Íngreme
Indústrias Típicas	Automotiva, Aeroespacial, Manufatura em Geral	Manufatura, Engenharia Mecânica, Design de Produto, Eletrônica, Educação/Hobbyists	Engenharia Mecânica, Design de Produtos	Automotiva, Aeroespacial, Engenharia Pesada
Facilidade de Uso	Considerada Complexa por Alguns Usuários	Geralmente Intuitivo, Curva de Aprendizado Variável	Geralmente Mais Intuitivo	Considerada Complexa
Custo	Elevado	Assinatura Acessível, Opções Gratuitas Limitadas, Extensões Pagas	Custo Inicial Significativo, Assinatura Obrigatória	Elevado

Fonte: diversos autores

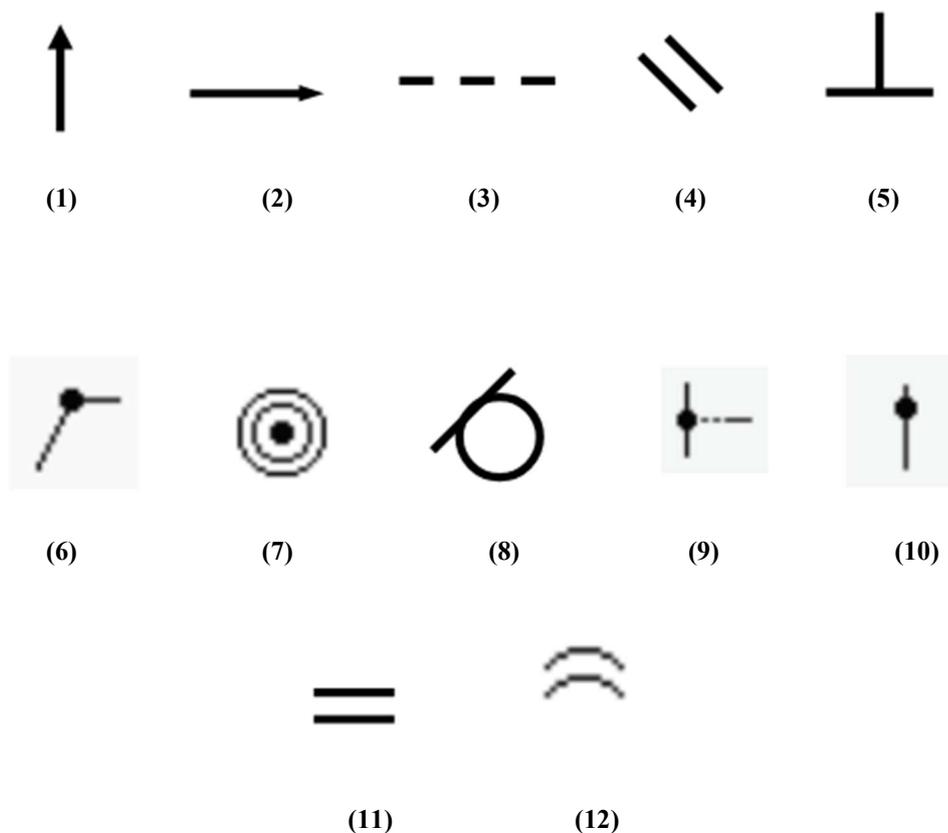
### 2.13.2 SÍMBOLOS E CARACTERÍSTICAS GEOMETRICAMENTE RESTRITIVAS

O Siemens Nx 11 identifica as restrições geométricas através de símbolos como apresenta a figura (4). Estas restrições são aplicadas ao selecionar os elementos que se deseja restringir através da ferramenta select e então escolher o símbolo que representa a restrição desejada.

Na figura (4) são representados os principais os símbolos de de restrições geométricas de acordo com suas posições estabelecidas na figura, eles são respectivamente:

1. Vertical: Restringe a linha para a orientação vertical;
2. Horizontal: Restringe a linha para a orientação horizontal;
3. Tracejado: Indica o alinhamento para o ponto central ou último ponto de um objeto;
4. Paralelo: Garante que duas ou mais linhas permanecem paralelas;
5. Perpendicular: Força o encontro de linhas em ângulo de  $90^\circ$ ;
6. Coincidente: Mantém dois pontos, ou elementos, compartilhando a mesma localização;
7. Concêntrico: Mantém círculos/arcs compartilhando o mesmo centro;
8. Tangente: Mantém a tangência entre curvas
9. Ponto Médio: Posiciona um ponto exatamente no meio de uma linha ou arco;
10. Ponto na Curva: Garante que o ponto esteja localizado sobre uma curva;
11. Comprimento Igual: Força duas ou mais linhas a terem o mesmo comprimento;
12. Raio Igual: Garante que círculos ou arcs tenham o mesmo raio.

Figura 4 - Restrições e seus símbolos no Siemens Nx 11



Fonte: Autor

De acordo com Shih(2023), o processo de modelagem paramétrica de uma peça ou elemento em Siemens NX 2212 envolve as seguintes etapas:

1. Definir as unidades de medida, polegadas ou milímetros, e nomear o arquivo da peça;
2. Identificar o primeiro recurso sólido do design, que geralmente é a forma principal. Operações comuns para o recurso base incluem Extrusão (*Extrude*), Revolução (*Revolve*) ou Varredura (*Sweep*);
3. Desenhar a forma básica do recurso base em um esboço bidimensional;
4. Adicionar restrições geométricas, como horizontal, vertical, tangente, angular, paralelo, colinear, concêntrica, e dimensionais, tamanho e posição no espaço de trabalho da peça, ao esboço 2D para definir completamente a geometria e capturar a intenção do design;
5. Converter o esboço paramétrico bidimensional em um recurso sólido tridimensional concluindo as operações iniciadas no passo 2;

6. Construir o modelo adicionando mais recursos como cortes, furos, filetes, identificando as relações entre eles para completar o design;
7. Usar o modelo computacional para análises – como análise de elementos finitos (FEA), ou simulações para refinar o design conforme necessário.
8. Criar os desenhos técnicos 2D/3D necessários para a documentação do projeto.

Esta sistematização do processo de parametrização enfatiza a criação de formas primeiro "*shape before size*" e, em seguida, a aplicação de dimensões e restrições para definir com precisão a geometria, isso garante ao projetista identificar geometrias não conformes no início da modelagem para realizar as devidas correções.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo consiste em apresentar o total de 3 montagens com complexidades distintas, aplicando os conceitos de modelagem parametrizada baseada em recursos. As técnicas utilizadas nas três montagens, incluem: estabelecer a intenção do projeto ao decidir que dimensão será relevante para a parametrização da montagem; definir a característica; modelagem direta; restrição geométrica; restrição dimensional; relações paramétricas; finalizar a primeira característica e fazer a próxima utilizando a primeira como base; repetir o processo até finalizar o sólido.

Para maior eficiência da parametrização na relação matemática, foi utilizada a técnica de modelagem baseada em planilhas, dado que no estudo foi aplicado extensamente a expressão matemática em todas as restrições dimensionais, tendo em vista que o objetivo da parametrização foi para alteração de toda a peça a fim de atualizar proporcionalmente sua forma e tamanho de acordo com os dados inseridos.

Foi utilizado como ferramenta para modelagem o software Siemens Nx, e o equipamento laptop, modelo ideapad gaming 3i nas configurações: processador intel i5 11300H, placa de vídeo GTX 1650, vram 4gb e 16gb memória ram de memória ram.

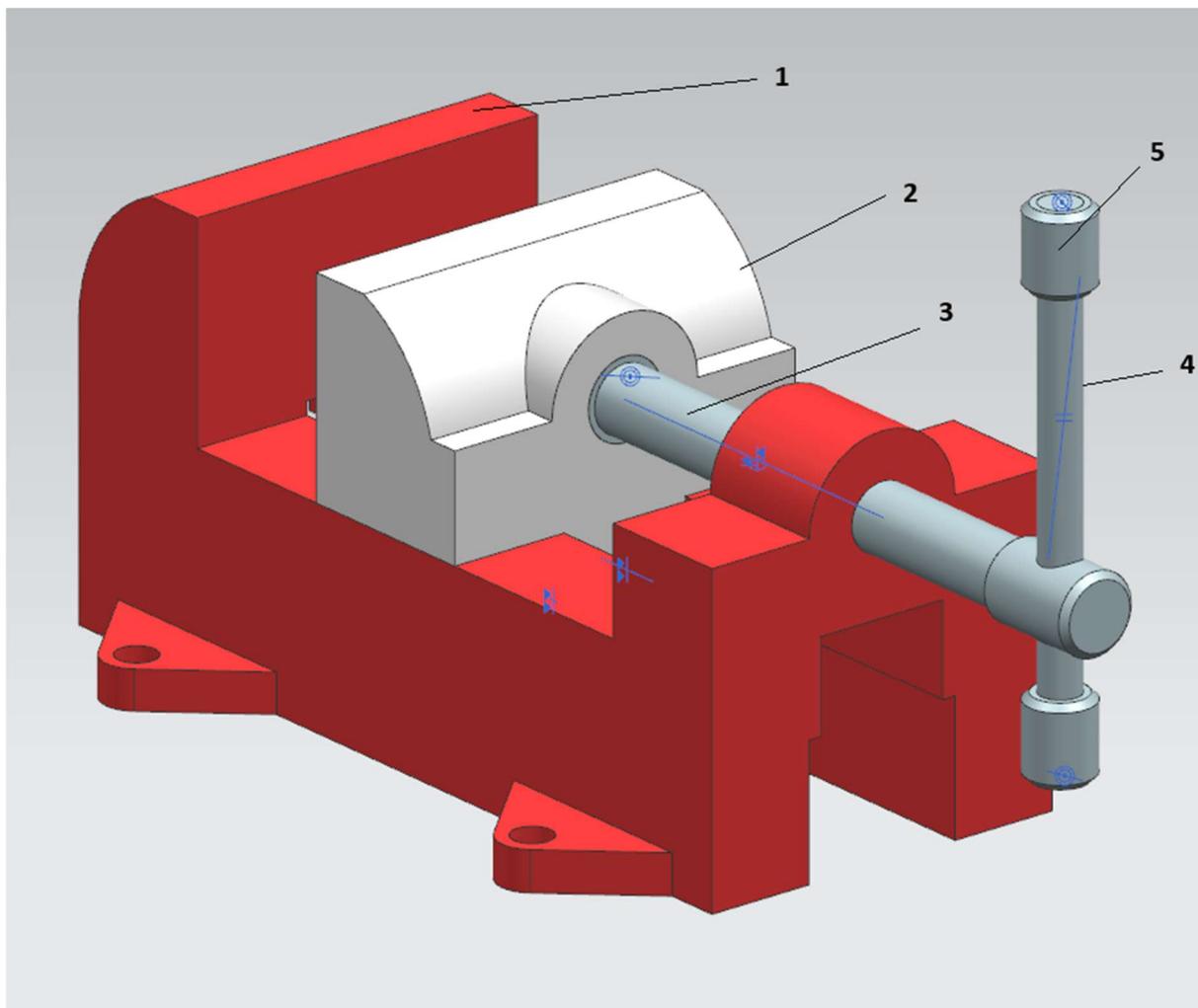
Em suma, a metodologia aplicada para a modelagem parametrizada baseada em features com Siemens Nx 2122 apresentada no subcapítulo 2.13.2, foi adaptada para que fosse alcançado o objetivo de atualização de forma proporcional nos casos estudados nas seções 4.2, 4.2 e 4.3, essa adaptação configurou-se na retirada dos últimos passos;

#### 3.1 MODELAGEM PARAMETRIZADA - MORSA DE BANCADA

A figura (5) apresenta um modelo de uma morsa de bancada que foi parametrizado conforme a metodologia apresentada neste trabalho. A unidade de medidas utilizada foi o Sistema Inglês, caracterizando as dimensões por polegadas. Esta morsa é composta pelas seguintes partes:

1. Base;
2. Mandíbula;
3. Parafuso de Potência;
4. Alavanca;
5. Apoios da Alavanca;

Figura 5 - Vista isométrica do modelo 3D da morsa de bancada.



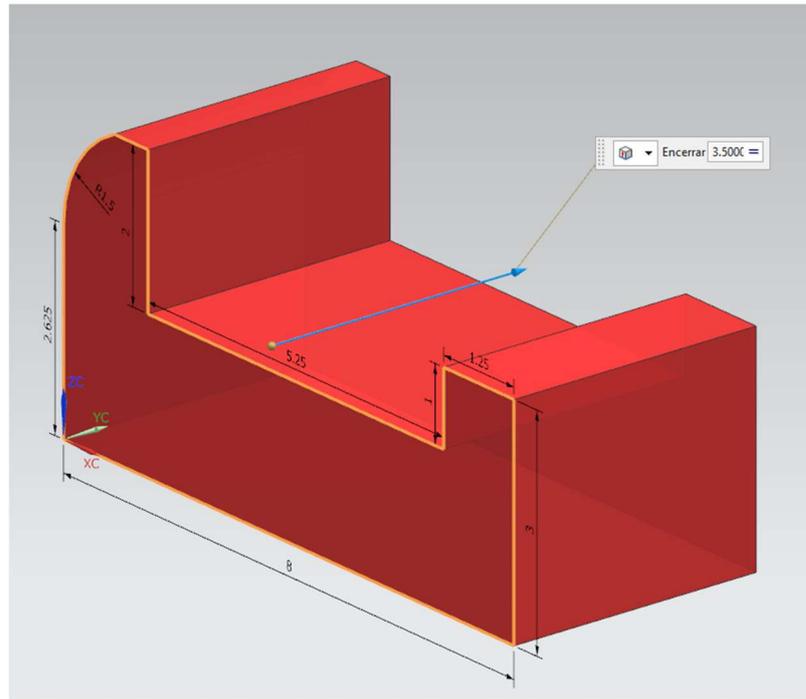
Fonte: Autor

O modelo da morsa de bancada, utilizada para demonstrar os fundamentos da modelagem paramétrica neste trabalho, foi inspirado no exercício proposto por Shih (2023).

Após a modelagem de todas as partes da morsa iniciou-se a parametrização baseada em feature através das seguintes etapas:

**Etapa 1:** Antes de começar a modelar a base da peça, foi decidido qual seria a dimensão mais relevante ou de controle, responsável por comandar o comportamento de todo o modelo após a parametrização. A figura (6) mostra a dimensão escolhida como base para parametrizar toda peça, pois a intenção do projeto foi permitir a utilização da morsa para peças e elementos que de maior dimensão que a morsa projetada consegue suportar.

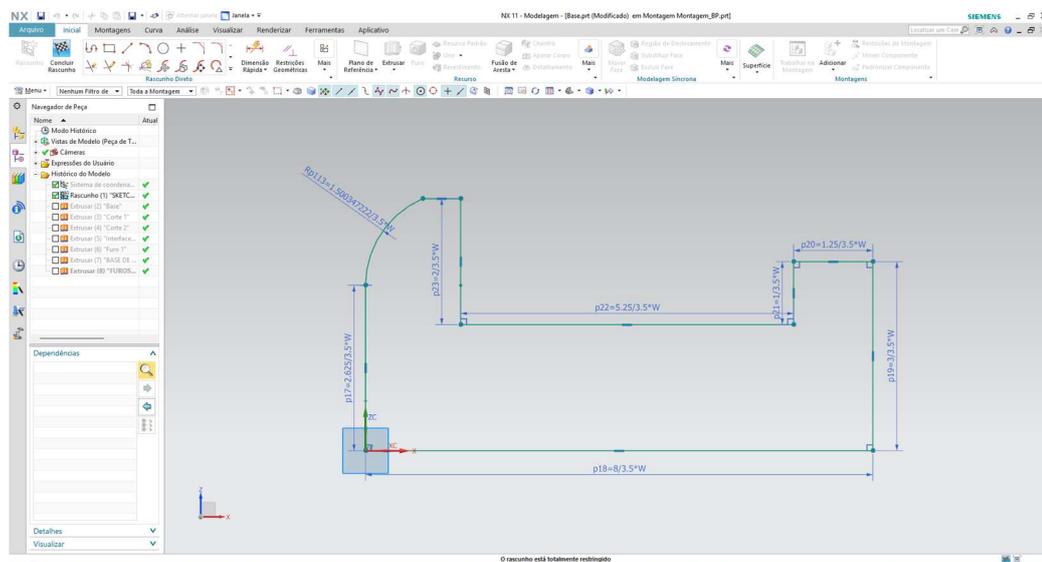
**Figura 6 - Dimensão de controle**



**Fonte: Autor**

**Etapa 2:** Partindo da filosofia de projeto ‘forma antes do tamanho’, do inglês ‘shape before size’, foi aplicado, através dos princípios da modelagem direta, o rascunho em um esboço 2D da forma fundamental da parte 1. A figura (7) apresenta o rascunho em 2D da parte da morsa que denominamos de base.

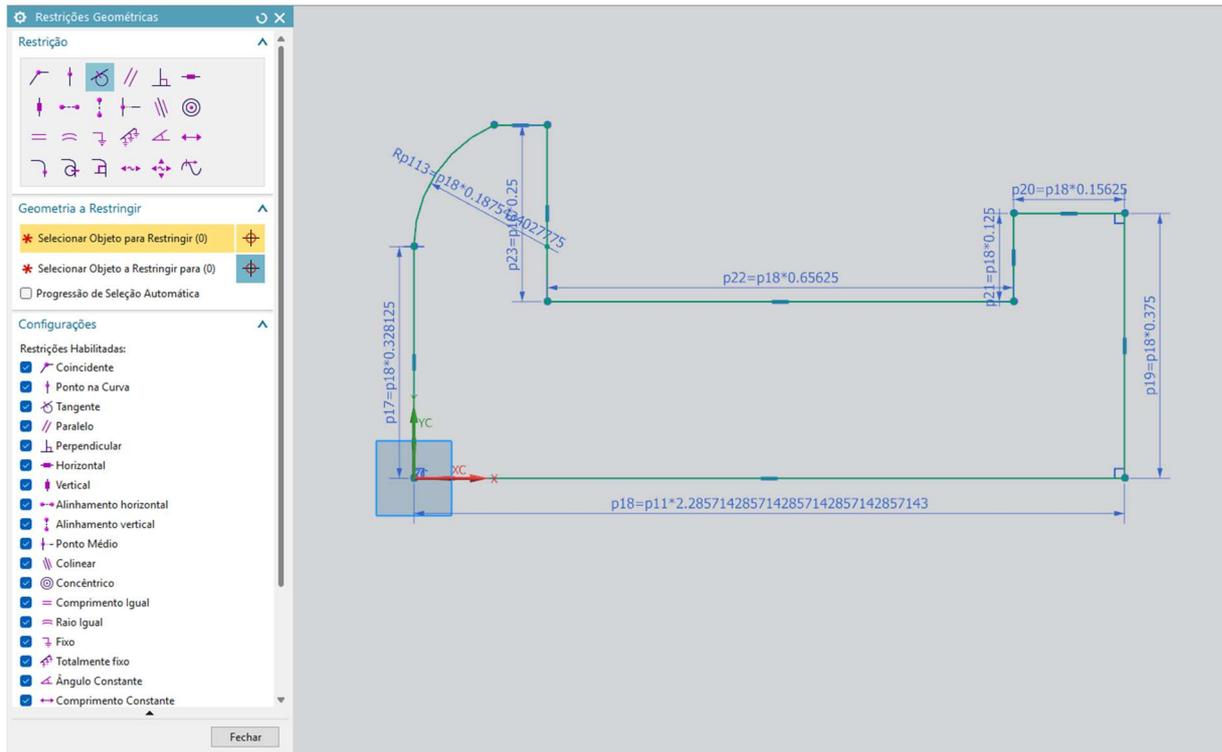
**Figura 8 - Rascunho 2D**



**Fonte: Autor**

**Etapa 3:** A partir do rascunho, aplica-se todas as restrições geométricas disponíveis sem que provoque o desenho ficar super restrito. Super restrição é uma condição em que o desenho perde a capacidade de atualização de sua geometria, não importando o quanto seja alterado seus parâmetros. A figura (8) mostra bem todas as restrições geométricas disponíveis a serem aplicadas ao desenho.

**Figura 9 - Restrição Geométrica Aplicada ao Rascunho 2D**



**Fonte: Autor**

**Etapa 4:** Emprega-se a restrição dimensional, declarando os valores desejados, buscando obter a restrição completa do desenho. Por meio do caminho “Ferramenta>Expressões;” é possível acessar a tabela gerada das relações dimensionais aplicadas ao esboço. A figura (9) apresenta uma parte da tabela para a parte da morsa denominada Base.

**Etapa 5:** É finalizado o rascunho, e configurado a dimensão da extrusão, feature, selecionada; Como foi mostrado na figura (6), é possível visualizar a forma e a direção de extrusão conforme essa etapa.

Figura 10 - Tabela de restrições dimensionais parametrizadas

	↑ Nome	Fórmula	Valor	Unidades	Dimensionalidade	Tipo	Origem	Status	Comentário
1				pol	Comprimento	Número			
2	p10	0	0	pol	Comprimento	Número	(Base(2) Limite I...		
3	p11	W	3.5	pol	Comprimento	Número	(Base(2) Limite Fi...		
4	p17	2.625/3.5*W	2.625	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
5	p18	8/3.5*W	8	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
6	p19	3/3.5*W	3	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
7	p20	1.25/3.5*W	1.25	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
8	p21	1/3.5*W	1	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
9	p22	5.25/3.5*W	5.25	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
10	p23	2/3.5*W	2	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...		
11	p24	0	0	pol	Comprimento	Número	(Corte 1(3) Limit...		
12	p31	1.5/3.5*W	1.5	pol	Comprimento	Número	(Corte 1(3) Cota ...		
13	p32	p20	1.25	pol	Comprimento	Número	(Corte 1(3) Cota ...		
14	p33	0	0	pol	Comprimento	Número	(Corte 2(4) Limit...		
15	p40	p20	1.25	pol	Comprimento	Número	(Corte 2(4) Cota ...		
16	p41	0.875/3.5*W	0.875	pol	Comprimento	Número	(Corte 2(4) Cota ...		
17	p42	0	0	pol	Comprimento	Número	(Interface 1(5) Li...		
18	p49	p31	1.5	pol	Comprimento	Número	(Interface 1(5) C...		
19	p50	p20	1.25	pol	Comprimento	Número	(Interface 1(5) Li...		
20	p51	0	0	pol	Comprimento	Número	(Furo 1(6) Limite ...		
21	p58	0.625/3.5*W	0.625	pol	Comprimento	Número	(Furo 1(6) Cota ...		
22	p59	0	0	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
23	p60	0.375/3.5*W	0.375	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
24	p67	p23	2	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
25	p70	p58	0.625	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
26	p71	0	0	pol	Comprimento	Número	(FUROS PARA FI...		
27	p78	p60	0.375	pol	Comprimento	Número	(FUROS PARA FI...		
28	p85	p23	2	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
29	p87	p70	0.625	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
30	p88	p19	3	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
31	p89	p23	2	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
32	p91	p70	0.625	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
33	p93	p23	2	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
34	p95	p70	0.625	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAÇ...		
35	p101	W	3.5	pol	Comprimento	Número	(BASE DE FIXAC...		

Fonte: Autor

**Etapa 6:** Impõe-se as relações paramétricas, ou matemáticas, que promovem o comportamento esperado da alteração proporcional dos elementos parametrizados. A relação paramétrica se deu pela Equação (1):

$$d = \frac{cota}{3,5} \times W \quad (1)$$

Onde,  $d$  é a dimensão parametrizada que se pretende obter,  $cota$  é a dimensão atual do design, 3,5 é o valor de projeto da dimensão relevante, que age como uma constante, ou fator de escala.  $W$  é o novo valor imposto pelo projetista para a dimensão relevante. A Equação

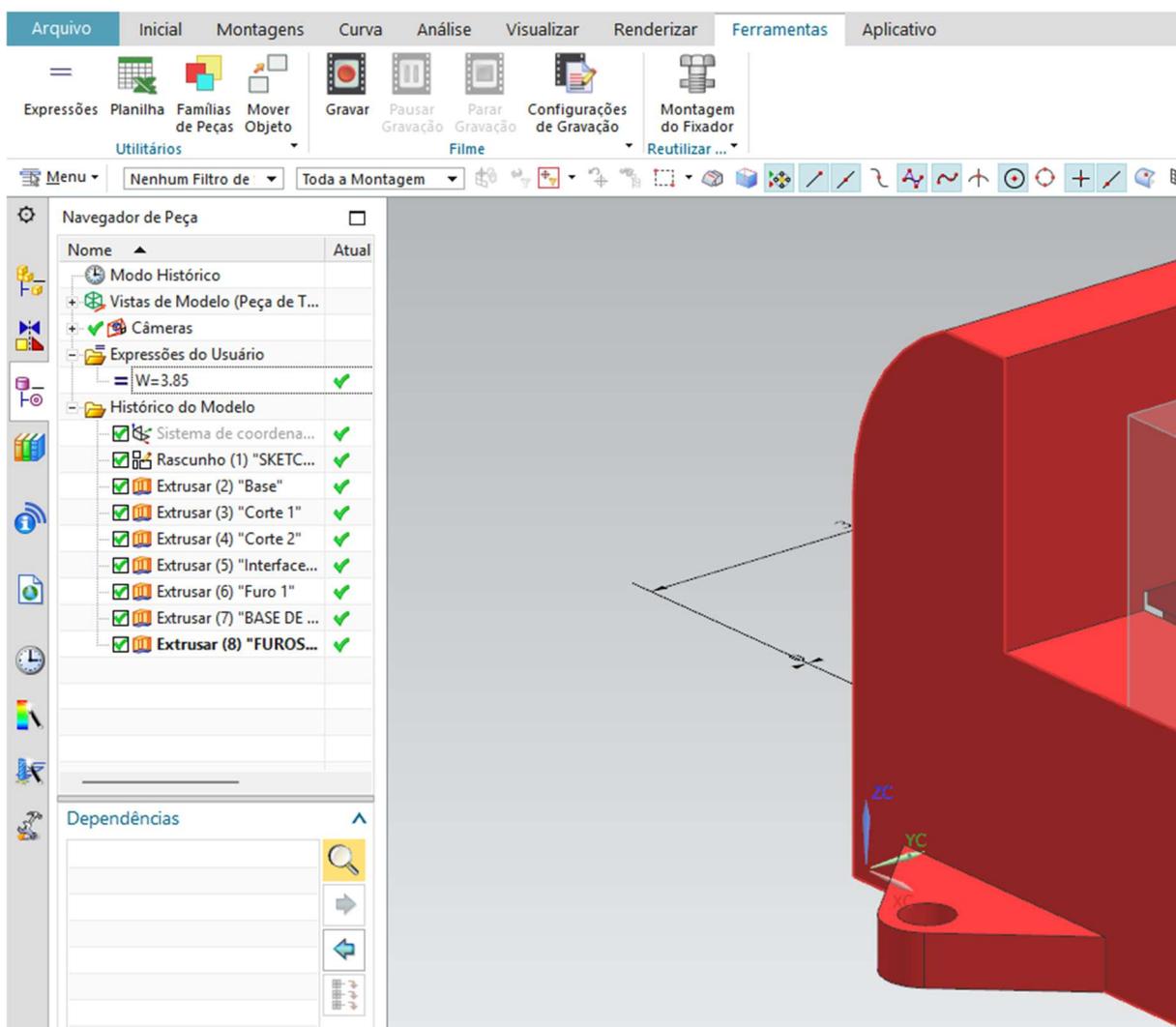
(1) foi aplicada na tabela apresentada na figura (10), a fim de relacionar matematicamente todas as restrições dimensionais do design.

**Etapa 7:** Repetir as etapas anteriores para as demais features até que a modelagem dos demais elementos e partes estejam concluídas para ser dado início ao processo de relação paramétrica a ser realizada na etapa 8.

**Etapa 8:** A título de exemplificação será realizada a relação paramétrica entre a BASE e a MANDÍBULA da morsa, para isso realizou-se os seguintes passos:

1. Foi realizada a importação da variável de controle da Base denominada para a tabela de dimensões parametrizada da Parte 2, Mandíbula;
2. Utilizando o valor importado como dimensão de controle e parametrizando em relação a dimensão mais relevante da Mandíbula;

**Figura 11 - Expressão de usuário**



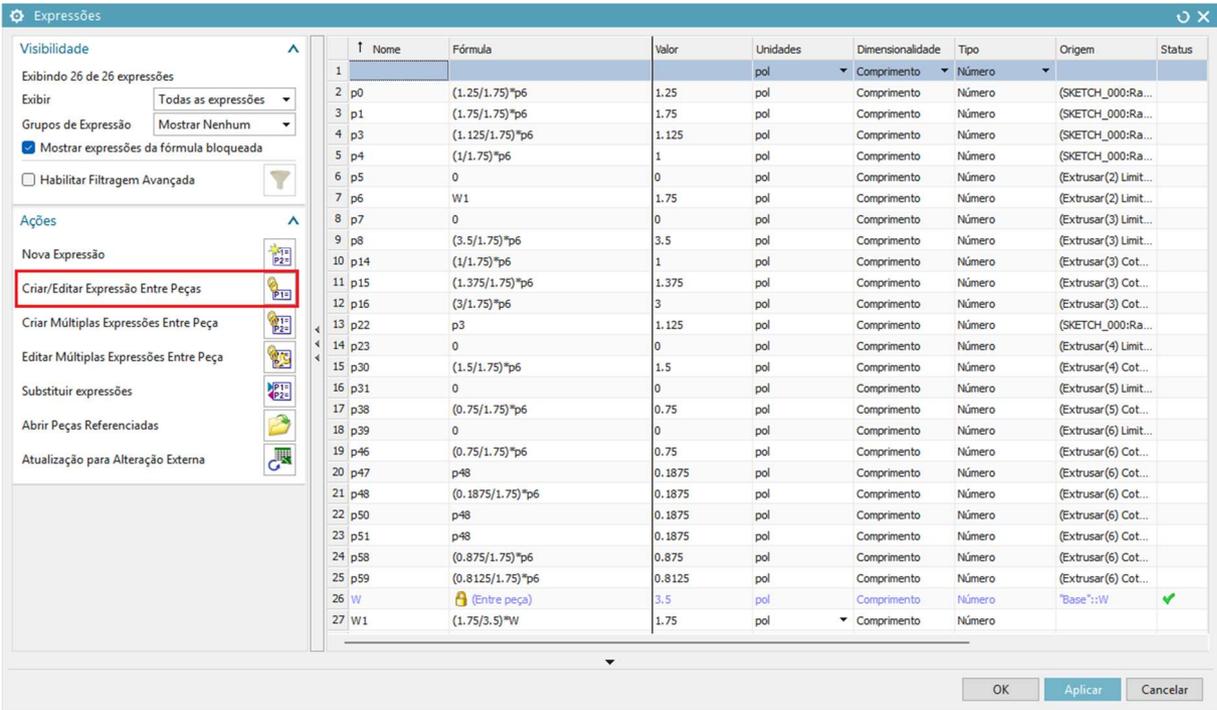
Fonte: Autor

A figura 11 mostra em “Expressão do Usuário” a dimensão de controle que é exportada para os demais elementos da morsa a fim de serem parametrizados em relação a ela, garantindo assim a uniformidade e proporcionalidade desejadas.

A figura 12 vai apresentar a opção de importação de expressão utilizada para importar o elemento da posição 26, do elemento denominado Base.

As figuras 13 e 14 apresentam o comparativo da Parte 1, elemento denominado base tendo o valor da sua dimensão de controle aumentada em 20%. É possível ver como todos os valores da tabela de dimensões também são alterados, obedecendo as relações paramétricas estabelecidas.

**Figura 12 - Tabela de dimensões parametrizadas do elemento parte 2, Mandíbula**



Nome	Fórmula	Valor	Unidades	Dimensionalidade	Tipo	Origem	Status
1							
2	p0	(1.25/1.75)*p6	1.25	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...
3	p1	(1.75/1.75)*p6	1.75	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...
4	p3	(1.125/1.75)*p6	1.125	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...
5	p4	(1/1.75)*p6	1	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...
6	p5	0	0	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(2) Limit...
7	p6	W1	1.75	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(2) Limit...
8	p7	0	0	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(3) Limit...
9	p8	(3.5/1.75)*p6	3.5	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(3) Limit...
10	p14	(1/1.75)*p6	1	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(3) Cot...
11	p15	(1.375/1.75)*p6	1.375	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(3) Cot...
12	p16	(3/1.75)*p6	3	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(3) Cot...
13	p22	p3	1.125	pol	Comprimento	Número	(SKETCH_000:Ra...
14	p23	0	0	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(4) Limit...
15	p30	(1.5/1.75)*p6	1.5	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(4) Cot...
16	p31	0	0	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(5) Limit...
17	p38	(0.75/1.75)*p6	0.75	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(5) Cot...
18	p39	0	0	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Limit...
19	p46	(0.75/1.75)*p6	0.75	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
20	p47	p48	0.1875	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
21	p48	(0.1875/1.75)*p6	0.1875	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
22	p50	p48	0.1875	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
23	p51	p48	0.1875	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
24	p58	(0.875/1.75)*p6	0.875	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
25	p59	(0.8125/1.75)*p6	0.8125	pol	Comprimento	Número	(Extrusar(6) Cot...
26	W	(Entre peça)	3.5	pol	Comprimento	Número	"Base":;W
27	W1	(1.75/3.5)*W	1.75	pol	Comprimento	Número	

Fonte: Autor

Figura 13a - Valores em dimensão de projeto

Nome	Fórmula	valor	Unidades	Dimensionalidade
p10	0	0	pol	Comprimento
p11	W	3,5	pol	Comprimento
p17	2,625/3,5*W	2,625	pol	Comprimento
p18	8/3,5*W	8	pol	Comprimento
p19	3/3,5*W	3	pol	Comprimento
p20	1,25/3,5*W	1,25	pol	Comprimento
p21	1/3,5*W	1	pol	Comprimento
p22	5,25/3,5*W	5,25	pol	Comprimento
p23	2/3,5*W	2	pol	Comprimento
p24	0	0	pol	Comprimento
p31	1,5/3,5*W	1,5	pol	Comprimento
p32	p20	1,25	pol	Comprimento
p33	0	0	pol	Comprimento
p40	p20	1,25	pol	Comprimento
p41	0,875/3,5*W	0,875	pol	Comprimento
p42	0	0	pol	Comprimento
p49	p31	1,5	pol	Comprimento
p50	p20	1,25	pol	Comprimento
p51	0	0	pol	Comprimento
p58	0,625/3,5*W	0,625	pol	Comprimento
p59	0	0	pol	Comprimento
p60	0,375/3,5*W	0,375	pol	Comprimento
p67	p23	2	pol	Comprimento
p70	p58	0,625	pol	Comprimento
p71	0	0	pol	Comprimento
p78	p60	0,375	pol	Comprimento

Fonte: Autor

Figura 13b - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 20% do seu valor

Nome	Fórmula	valor	Unidades	Dimensionalidade
p10	0	0	pol	Comprimento
p11	W	4,2	pol	Comprimento
p17	2,625/3,5*W	3,15	pol	Comprimento
p18	8/3,5*W	9,6	pol	Comprimento
p19	3/3,5*W	3,6	pol	Comprimento
p20	1,25/3,5*W	1,5	pol	Comprimento
p21	1/3,5*W	1,2	pol	Comprimento
p22	5,25/3,5*W	6,3	pol	Comprimento
p23	2/3,5*W	2,4	pol	Comprimento
p24	0	0	pol	Comprimento
p31	1,5/3,5*W	1,8	pol	Comprimento
p32	p20	1,5	pol	Comprimento
p33	0	0	pol	Comprimento
p40	p20	1,5	pol	Comprimento
p41	0,875/3,5*W	1,05	pol	Comprimento
p42	0	0	pol	Comprimento
p49	p31	1,8	pol	Comprimento
p50	p20	1,5	pol	Comprimento
p51	0	0	pol	Comprimento
p58	0,625/3,5*W	0,75	pol	Comprimento
p59	0	0	pol	Comprimento
p60	0,375/3,5*W	0,45	pol	Comprimento
p67	p23	2,4	pol	Comprimento
p70	p58	0,75	pol	Comprimento
p71	0	0	pol	Comprimento
p78	p60	0,45	pol	Comprimento

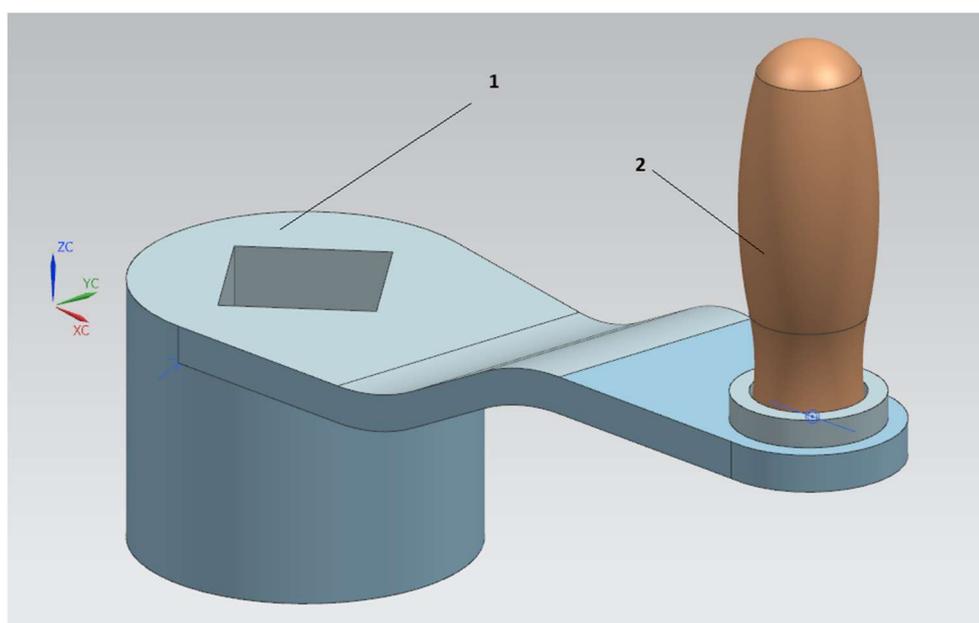
Fonte: Autor

### 3.2 MODELAGEM PARAMETRIZADA - MANIVELA

A figura (14) apresenta um modelo de uma manivela com rasgo central retangular que foi parametrizado conforme a metodologia apresentada neste trabalho. A unidade de medidas utilizada foi o Sistema Internacional, caracterizando as dimensões por milímetros. Esta manivela é composta pelas seguintes partes:

1. Base;
2. Apoio;

Figura 14 - Manivela



Fonte: Autor

O que torna esta peça relevante para este estudo é a complexidade aparente que sua forma apresenta e como a metodologia de parametrização aplicada a ela pode ser extrapolada para modelos com geometrias aparentemente mais complexas.

Esta peça foi parametrizada utilizando a mesma metodologia e etapas do item 4.1, com ressalvas para a expressão matemática que passa a ser:

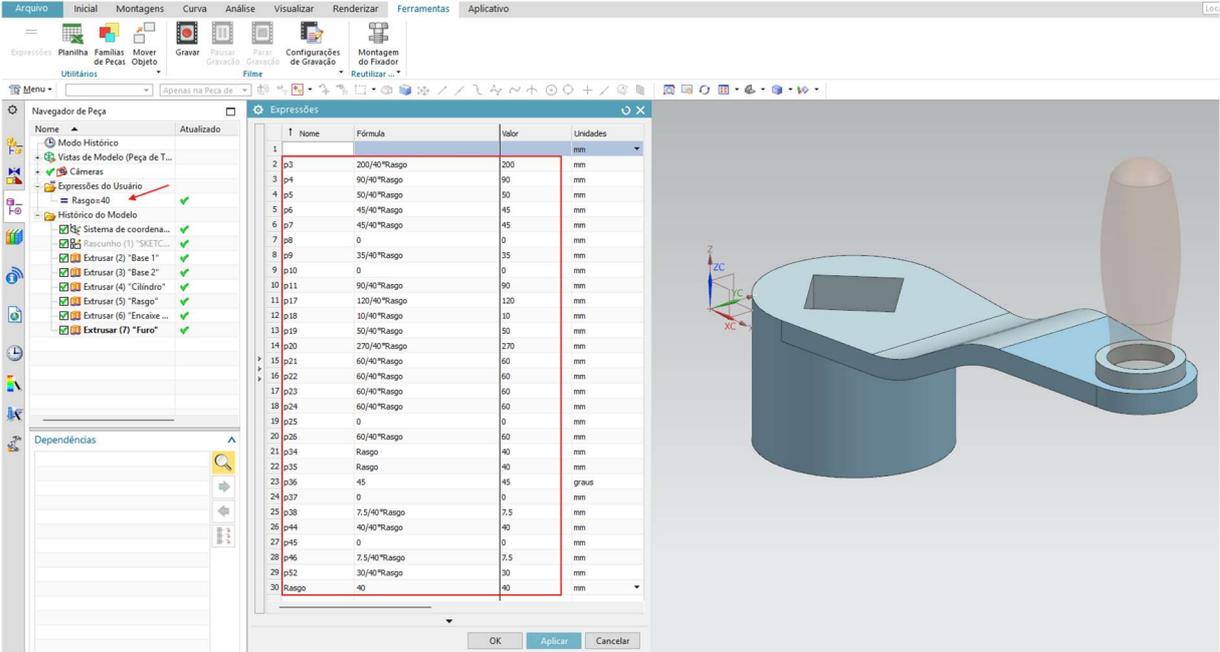
$$d = \frac{cota}{40} \times Rasgo \quad (2)$$

Considerando que assim como no ponto 4.1,  $d$  vai representar o valor parametrizado,  $cota$  o valor original da peça antes da parametrização, 40 será o fator de parametrização e  $Rasgo$ , o novo valor da dimensão mais relevante.

O que torna esta peça relevante ao estudo é a sua forma e como a parametrização se comporta. Foi aplicada a operação booleana de interferência para obter a sua geometria curva desejada.

A etapa 8 aplicada na seção 3.1 é realizada também nesta peça, com a finalidade de demonstração, foi realizado o incremento de 10% do valor inicial da dimensão de controle. Isso é bem exposto nas figuras (15a) e (15b).

**Figura 15a - Valores em dimensão de projeto**



Nome	Fórmula	Valor	Unidades
1			
2	p3	200	mm
3	p4	90	mm
4	p5	50	mm
5	p6	45	mm
6	p7	45	mm
7	p8	0	mm
8	p9	35	mm
9	p10	0	mm
10	p11	90	mm
11	p17	120	mm
12	p18	10	mm
13	p19	50	mm
14	p20	270	mm
15	p21	60	mm
16	p22	60	mm
17	p23	60	mm
18	p24	60	mm
19	p25	0	mm
20	p26	60	mm
21	p34	Rasgo	mm
22	p35	Rasgo	mm
23	p36	45	graus
24	p37	0	mm
25	p38	7.5	mm
26	p44	40	mm
27	p45	0	mm
28	p46	7.5	mm
29	p52	30	mm
30	Rasgo	40	mm

Fonte: Autor

**Figura 15b - Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 10% do seu valor**

Nome	Fórmula	valor	Unidades
1			
2	p3	200/40*Rasgo	220 mm
3	p4	90/40*Rasgo	99 mm
4	p5	50/40*Rasgo	55 mm
5	p6	45/40*Rasgo	49,5 mm
6	p7	45/40*Rasgo	49,5 mm
7	p8	0	0 mm
8	p9	35/40*Rasgo	38,5 mm
9	p10	0	0 mm
10	p11	90/40*Rasgo	99 mm
11	p17	120/40*Rasgo	132 mm
12	p18	15/40*Rasgo	11 mm
13	p19	50/40*Rasgo	55 mm
14	p20	220/40*Rasgo	297 mm
15	p21	60/40*Rasgo	66 mm
16	p22	60/40*Rasgo	66 mm
17	p23	60/40*Rasgo	66 mm
18	p24	60/40*Rasgo	66 mm
19	p25	0	0 mm
20	p26	60/40*Rasgo	66 mm
21	p34	Rasgo	44 mm
22	p35	Rasgo	44 mm
23	p36	45	45 graus
24	p37	0	0 mm
25	p38	7,5/40*Rasgo	8,25 mm
26	p44	40/40*Rasgo	44 mm
27	p45	0	0 mm
28	p46	7,5/40*Rasgo	8,25 mm
29	p52	30/40*Rasgo	33 mm
30	Rasgo	44	44 mm

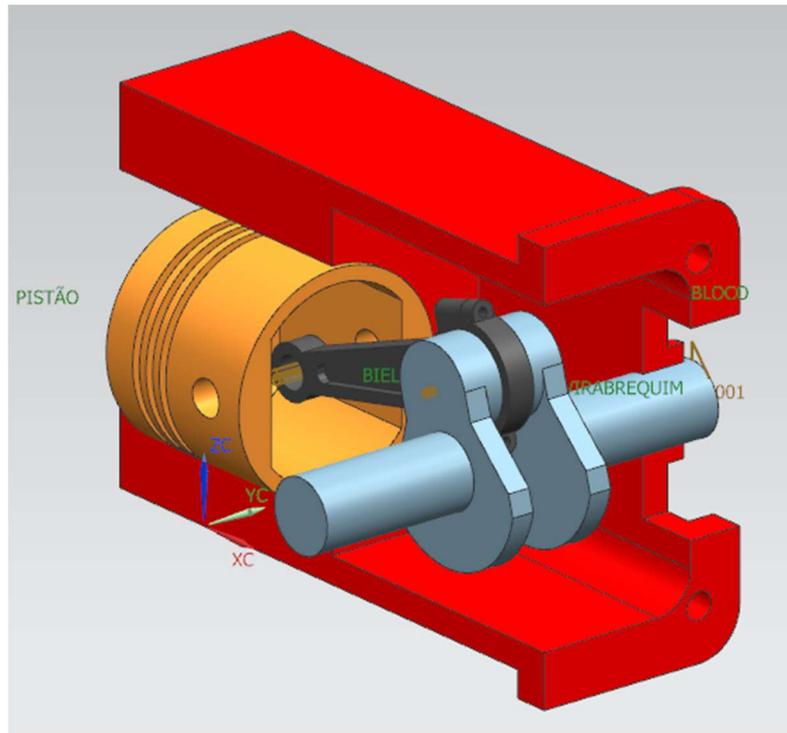
Fonte: Autor

### 3.3 MODELAGEM PARAMÉTRICA - MONOCILINDRO

Este estudo de caso apresenta um modelo de um motor monocilíndrico que foi parametrizado conforme a metodologia apresentada neste trabalho. A unidade de medidas utilizada foi o Sistema Inglês, caracterizando as dimensões por polegadas. Este motor é composto pelas seguintes partes:

1. Bloco;
2. Virabrequim;
3. Biela;
4. Pistão;
5. Anilha;

**Figura 16 - Motor monocilíndrico simplificado**



**Fonte: Autor**

A figura (16) apresenta o modelo inspirado no estudo de caso proposto por Shih (2023) no qual foi explorada a análise de movimento do motor. A metodologia de parametrização utilizada foi a mesma das seções 4.1 e 4.2, seguindo as mesmas etapas 1 a etapa 8, com a observação da expressão matemática na relação paramétrica, com a exceção de que a modelagem direta foi utilizada não só no início da formação das features, mas também na finalização.

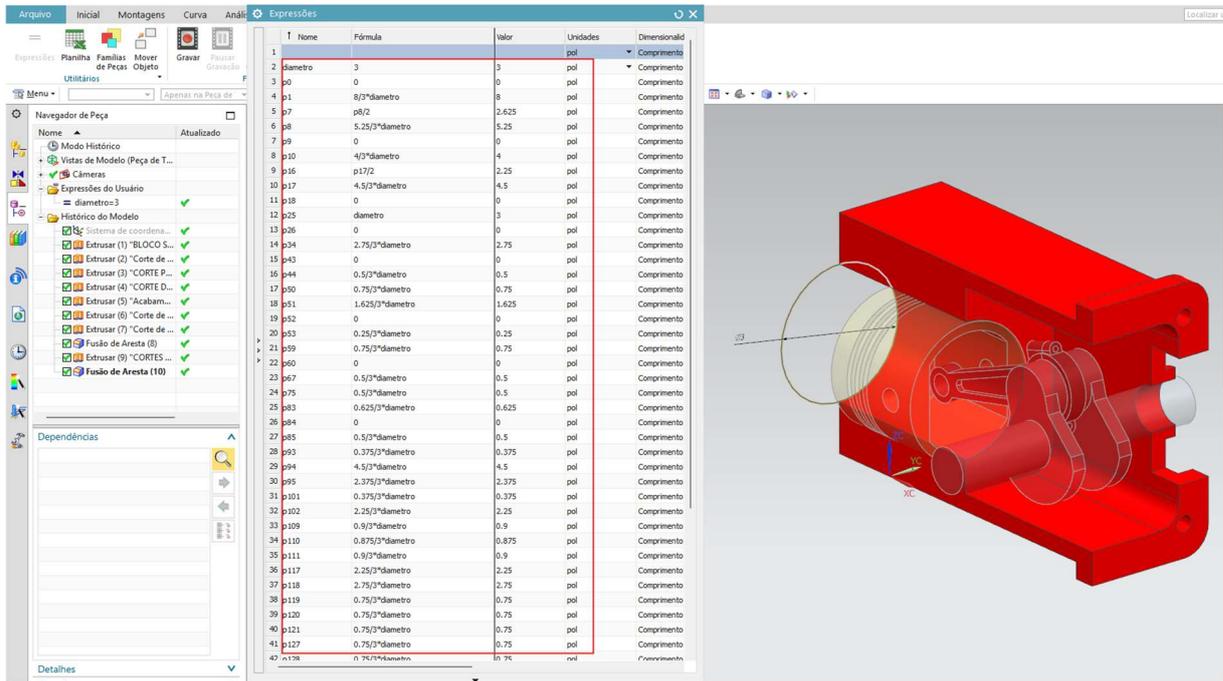
A relação paramétrica do motor monocilindro vai constar para a seguinte expressão:

$$d = \frac{cota}{3} \times diametro \quad (3)$$

Da mesma forma que apresentado nas seções 4.1 e 4.2, a mudança na expressão será pelo fator de parametrização e a variável *diámetro* de entrada da dimensão relevante.

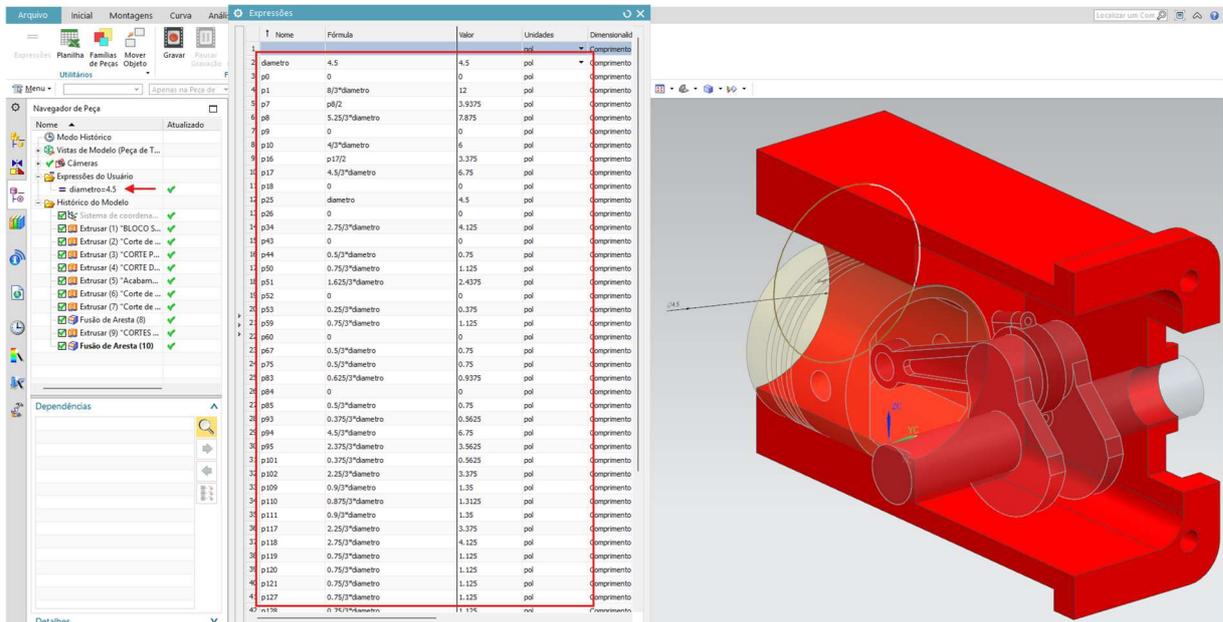
A etapa 8 executada na seção 3.1 é também realizada nesta peça motor monocilíndrico, porém para mais variedade de resultados foi realizado o incremento de 50% do valor inicial da dimensão de controle. Isso é bem exposto nas figuras (17a) e (17b)

Figura 17a - Valores em dimensão de projeto



Fonte: Autor

Figura 17b -Valores da tabela de cotas após aumentar a dimensão de controle em 50% do seu valor



Fonte: Autor

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho foi importante pois foi estudado as práticas da modelagem paramétrica baseada em features e desenvolvido uma metodologia própria para o Siemens Nx 11 com base na metodologia de Shih (2023) para parametrização no Siemens Nx 2212. Foi possível ver o qual controlável e escalável fica o sistema parametrizado.

Futuramente, os engenheiros e estudantes poderão utilizar da base estabelecida neste estudo para aprofundarem as aplicações da modelagem paramétrica. Assim como trabalhos futuros podem envolver a aplicação de inteligência artificial para auxiliar na relação paramétrica de componentes e elementos de alta complexibilidade, como a modelagem de superfície.

O objetivo de verificar a possibilidade de alteração de todo um sistema de montagem das 3 peças estudadas foi alcançado, pois em todos as três peças com seus variados níveis de complexidades em suas modelagem e montagens foi possível realizar a parametrização geral ao passo que alterando a dimensão escolhida, toda a montagem da peça como suas dimensões, foram atualizadas proporcionalmente. Algo que na modelagem direta não é possível dado que não há nenhuma relação de restrição ou escolha de parâmetros realizada como apresentado no capítulo de fundamentação teórica seção 3.6.2.

O comportamento das peças após parametrização deixa claro a capacidade de condicionar um sistema para receber valores pré-determinados e de controlar a razão ou relação entre partes. Isso não só valida a metodologia implementada, como abre novos caminhos para a parametrização de sistemas mais complexos, assim como o aumento do ciclo de vida dos produtos parametrizados.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, Jonathon; KOUPPAS, Paul. Computer Aided Design: Past, Present, Future. *In: GARNER, Steve; EVANS, Chris (Eds.). Design & Designing: A Critical Introduction.* Oxford: Berg, 2012. p. 97-111.

BUIVAL, Liliia. Method of three-dimensional parametric modeling of a typical bracket based on primitives using the Siemens NX computer integrated system. **Technical Sciences and Technologies**, n. 4(34), p. 104-114, 2023.

CHU, Chih-Hsing; SONG, Mu-Chi; LUO, Vincent C. S. Computer aided parametric design for 3D tire mold production. **Computers in Industry**, v. 57, n. 1, p. 11-25, 2006.

DURGUN, İsmail; UTANIR, İbrahim; ÖZTÜRK, Özgür. Parametric Design with Unigraphics NX. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE DESIGN AND PRODUCTION (UMTIK)*, 14., 2010, [Turkey]. **Proceedings [...]**. [Turkey]: [s.n.], 2010. (approx.)

EASTMAN, Charles M. *et al.* **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers.** 3. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

FARIN, Gerald. **Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide.** 5. ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002.

FLORIO, Wilson. Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (SBQP)*, 11.; *WORKSHOP BRASILEIRO DE GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS*, 9., 2009, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: ANTAC, 2009. p. 571-580.

JANSSEN, Patrick; STOUFFS, Rudi. Types of parametric modelling. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA)*, 20., 2015, Daegu. **Proceedings [...]**. Hong Kong: CAADRIA, 2015. p. 157-166.

KIM, Yeoung-il; KIM, Li-ra; JUN, Cha-soo. Parametric design of a part with free-form surfaces. **Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering**, v. 7, n. 9, p. 1530-1534, 2006.

KOLAREVIC, Branko. (Ed.). **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New York: Taylor & Francis, 2003.

KRAVCHIK, Tatyana. CAM model parameterisation methodology and its further unification in Siemens NX environment. **E3S Web of Conferences**, v. 389, p. 01009, 2023.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de máquinas**. 46. ed. São Paulo: Editora F. Provenza, 1991.

SCHILLING, Paul J.; SHIH, Randy H. **Parametric Modeling with SOLIDWORKS 2015**. Mission, KS: SDC Publications, 2015.

SHIH, Randy H. **Parametric Modeling with Siemens NX (2212 Series)**. Mission, KS: SDC Publications, 2023.

YANG, Qu *et al.* A Rapid Parametric Modeling Method of SWATH Based on Siemens NX Extended Development. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER MODELING, SIMULATION AND ALGORITHM (CMSA)*, 2018, [China]. **Proceedings [...]**. Paris: Atlantis Press, 2018. p. 4-8. (Advances in Intelligent Systems Research, v. 151).

ANCIFEROV, S.; KARACHEVCEVA, A.; SIVACHENKO, L. DESIGN AND PRODUCT DESIGN IN CAD/CAM/CAE NX SYSTEM MANAGED BY TEAMCENTER PLM SYSTEM. **Technical Aesthetics and Design Research**, v. 1, n. 2, p. 45–52, 2020.

AUTODESK. *Fusion 360 Design Extension*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/design-extension>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 Extensions*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/extensions>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 Features*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/features>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 for Consumer Products*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/consumer-products>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 for Personal Use*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 Offerings*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/campaigns/fusion-360/offerings>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 Overview*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion 360 Pricing*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/campaigns/fusion-360/pricing.mobile.mobile.html>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *Fusion Manage Features*. San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-manage/features>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. *What Is CAD Software?* San Rafael, CA: Autodesk, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/solutions/cad-software>. Acesso em: 16 maio 2024.

EXPERTCAM.GR. Siemens NX11 - What's new in NX11. *ExpertCAM.gr*, 2016. Disponível em: <https://www.expertcam.gr/index.php/en/about/profile/9-news/97-siemens-nx11-what-s-new-in-nx11.html>. Acesso em: 16 maio 2024.

JANUS ENGINEERING. NX Release 2212 - Update of the license server! *Janus Engineering News*, 2022. Disponível em: [https://www.janus-engineering.com/at\\_en/news/news-feed/news-detail/news/nx-release-2212-update-of-the-license-server-1/](https://www.janus-engineering.com/at_en/news/news-feed/news-detail/news/nx-release-2212-update-of-the-license-server-1/). Acesso em: 16 maio 2024.

JANUS ENGINEERING. Ready for the NX Release 2212? *Janus Engineering News*, 2022. Disponível em: [https://www.janus-engineering.com/at\\_en/news/news-feed/news-detail/news/ready-for-the-nx-release-2212/](https://www.janus-engineering.com/at_en/news/news-feed/news-detail/news/ready-for-the-nx-release-2212/). Acesso em: 16 maio 2024.

KOROLEV, A. *et al.* CAM model parameterisation methodology and its further unification in Siemens NX environment. *In: E3S WEB OF CONFERENCES*, v. 371, 2023. p. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202337101009. Disponível em:

[https://www.google.com/search?q=https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/07/e3sconf\\_interagromash2023\\_01009.pdf](https://www.google.com/search?q=https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/07/e3sconf_interagromash2023_01009.pdf). Acesso em: 16 maio 2024.

PLM NORDIC. *NX*: PLM Nordic, 2024. Disponível em: <https://www.plmnordic.com/nx/>. Acesso em: 15 maio 2024.

SHIH, Randy H. **Parametric Modeling with Siemens NX**. Mission, KS: SDC Publications, 2022. ISBN 978-1630575218.

SIEMENS BLOGS. NX December 2022 Release | Now Available. *Siemens Software Blog*, 2022. Disponível em: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/nx-december-2022-now-available/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SIEMENS BLOGS. What's new in NX 11 for design engineering. *Siemens Software Blog*, 2016. Disponível em: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/whats-new-in-nx-11-for-design-engineering/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SIEMENS BLOGS. What's new in NX for Manufacturing – December 2022. *Siemens Software Blog*, 2022. Disponível em: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/whats-new-in-nx-for-manufacturing-december-2022/>. Acesso em: 16 maio 2024.

YAMADA, Hiroyuki. A practical methodology of utilizing CAD/CAM system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUSINESS & TECHNOLOGY TRANSFER, 3., 2006,. **Proceedings** [...], 2006. p. 140–45. Disponível em: <https://zienjournals.com/index.php/tjet/article/download/4224/3501/4127>. Acesso em: 16 maio 2024.

ALIBRE. Design Intent: A Guide to 3D Parametric Modeling. *Alibre Blog*, 19 jan. 2024. Disponível em: <https://www.alibre.com/blog/design-intent-a-guide-to-3d-parametric-modeling/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. Direct Modeling: It's Importance and Benefits. *Autodesk Fusion 360 Blog*, 14 fev. 2025. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/direct-modeling-its-importance-and-benefits/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. Direct Modeling vs. Parametric Modeling in Fusion 360. *Autodesk Fusion 360 Blog*, 25 mar. 2022. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/direct-modeling-parametric-modeling-fusion-360/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AUTODESK. Parametric Modeling Software. *Autodesk Solutions*. Autodesk, c2025. Disponível em: <https://www.autodesk.com/solutions/parametric-modeling>. Acesso em: 30 abr. 2025.

HOFFMANN, C. M. A road map to solid modeling. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 2, n. 1, p. 3-10, Mar. 1996.

HOFFMANN, C. M.; SHAPIRO, V. Solid Modeling. *In*: GOODMAN, J. E.; O'ROURKE, J. (Eds.). **Handbook of Discrete and Computational Geometry**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

KARUNAKARAN, K. P. et al. (Ano: 2010 - *Detalhes completos da citação não disponíveis nos trechos fornecidos*).

MORTENSON, M. E. *Geometric Modeling*. 3rd ed. New York: Industrial Press Inc., 2006.

MOUNT, D.; EASTMAN, R. *Lecture Notes CMSC 425: Solid Modeling*. University of Maryland, 2018.

PACHECO, D. *Fundamentos da Modelagem Geométrica e Aplicações em CAD/CAE/CAM*. 2011. Projectemathical models of rigid solid objects. **Tech. Memo. 28**, Production Automation Project, University of Rochester, 1977.

REQUICHA, A. A. G.; ROSSIGNAC, J. R. Solid modeling and beyond. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 12, n. 5, p. 31-44, 1992.

REQUICHA, A. A. G.; VOELCKER, H. B. Constructive solid geometry. **Tech. Memo. 25**, Production Automation Project, University of Rochester, 1977.

## ANEXOS

## DESENHOS BASE UTILIZADOS NESTE TRABALHO.

