



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Should Cost aplicado a prótese para artroplastia total do joelho fabricado a partir de
liga Cr-Co-Mo

ARTHUR RODRIGUES DA SILVA
LUCAS FERREIRA BATISTA

UBERLÂNDIA-MG

2025

ARTHUR RODRIGUES DA SILVA
LUCAS FERREIRA BATISTA

Should Cost aplicado a prótese para artroplastia total do joelho fabricado a partir de
liga Cr-Co-Mo

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia (UFU),
como requisito para a obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA-MG

2025

ARTHUR RODRIGUES DA SILVA
LUCAS FERREIRA BATISTA

SHOULD COST APLICADO A PRÓTESE PARA ARTROPLASTIA TOTAL DO
JOELHO FABRICADO A PARTIR DE LIGA CR-CO-MO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia (UFU),
como requisito para a obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano José Arantes
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva
Universidade Federal de Uberlândia

Mestre Felipe Chagas Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradecemos a Deus pela vida, pela saúde e pelo discernimento que nos permitiu a realização desse trabalho. Somos gratos também pelo nosso Criador por ter colocado em nosso caminho pais incríveis, que fizeram e fazem parte da nossa história desde o início de nossa formação como seres humanos como também no incentivo nos estudos desde os anos iniciais. No contexto geral, nossa família e cada ombro amigo ao longo desse ciclo possibilitaram que atingíssemos nossos objetivos e trilhássemos nosso caminho. Manifestamos também nosso reconhecimento mútuo pelo empenho, dedicação e pela confiança depositada no trabalho de cada um.

Agradecemos também pelo Professor e Orientador Dr. Luciano José Arantes, principalmente por seu apoio, paciência, incentivo e confiança em nosso potencial durante a realização deste trabalho de conclusão de curso. Por fim, também agradecer a Universidade Federal de Uberlândia por fornecer o ensino gratuito e de qualidade, com professores especializados e dedicados a nossa formação. E também à banca examinadora, que contribuiu diretamente para a avaliação e aprimoramento deste trabalho.

SILVA, A., BATISTA, L., 2025, “**SHOULD COST APLICADO A PRÓTESE PARA ARTROPLASTIA TOTAL DO JOELHO FABRICADO A PARTIR DE LIGA CR-CO-MO**”. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG.

RESUMO

A tecnologia é a vantagem adaptativa humana frente às adversidades do meio externo. Assim, com o aumento da busca por soluções que auxiliem na locomoção e reabilitação, vê-se uma grande oportunidade de empreendimento na fabricação de próteses para atender à alta demanda emergente. Nesse viés, esse trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade econômica dos custos de fabricação de uma fábrica de médio porte especializada na fabricação de próteses para Artroplastia Total do Joelho a partir da liga de CoCrMo, tendo como ferramenta de trabalho o *Should Cost*.

Esta metodologia busca decompor todos os custos envolvidos na fabricação da peça, permitindo que o gestor visualize a viabilidade econômica do empreendimento. Para isso, foi necessário estudar os métodos de fabricação a fim de esboçar uma linha de produção para cada componente e, em seguida, verificar a capacidade produtiva, considerando o processo de fabricação escolhido e os tempos de execução. Em uma segunda fase, foram analisados todos os principais custos diretos e indiretos envolvidos na fabricação, para que, com esses dados, fosse possível determinar o custo de produção por unidade.

O preço de custo do produto mostrou-se economicamente viável, confirmando que a técnica de fabricação escolhida é eficiente e de alto rendimento para a produção de próteses para artroplastia total do joelho. Os resultados mostraram que, devido à distribuição uniforme dos custos ao longo dos anos, o valor unitário da prótese não teve uma alteração significativa, e que a diferença de valores observada ocorreu devido aos reajustes decorrentes da inflação.

Palavras-chave: *Should Cost*, custos diretos e indiretos, femoral, tibial, espaçador, usinagem, cera perdida.

ABSTRACT

Technology is the human adaptive advantage in facing external challenges. Thus, with the increasing demand for solutions that assist in mobility and rehabilitation, there is a significant business opportunity in the manufacturing of prostheses to meet the growing market demand. In this context, this study aimed to assess the economic feasibility of the manufacturing costs for a mid-sized factory specializing in the production of prostheses for Total Knee Arthroplasty using CoCrMo alloy, employing the Should Cost methodology as an analytical tool.

This methodology seeks to break down all the costs involved in manufacturing the part, allowing the manager to visualize the economic viability of the venture. To do this, it was necessary to study manufacturing methods in order to outline a production line for each component and then check production capacity, taking into account the chosen manufacturing process and lead times. In a second phase, all the main direct and indirect costs involved in manufacturing were analyzed so that, with this data, it was possible to determine the production cost per unit.

The product's cost price proved to be economically viable, confirming that the chosen manufacturing technique is efficient and highly productive for the production of prostheses for total knee arthroplasty. The results showed that, due to the uniform distribution of costs over the years, the unit price of the prosthesis did not undergo a significant change and that the observed variation in values resulted from adjustments due to inflation.

Keywords: Should Cost, direct and indirect costs, femoral, tibial, spacer, machining, lost-wax casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representa ilustração anatômica de um joelho normal (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).	15
Figura 2 - Representação da osteoartrose no joelho (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).....	17
Figura 3 - Representa a esquerda Osteoartrose grave e direita ilustração do implante (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).	18
Figura 4 - Representação dos dois tipos de molde na fundição. (a) Molde aberto; (b) Molde fechado (GROOVER, 2014).	24
Figura 5 - Expansão de uma célula cristalina para o desenvolvimento de uma dendrita (CHIAVERINI, 1986).....	25
Figura 6 - Representação esquemática das fases do fenômeno de contração durante a solidificação do metal líquido (CHIAVERINI, 1986).	26
Figura 7 - Exemplo de uma peça fundida utilizando-se o “alimentador”, observa que aqui o alimentador tem uma seção maior, de forma que o fluxo de metal líquido chegue regiões periféricas da peça sem que ocorra solidificação antes (CHIAVERINI, 1986).	27
Figura 8 - Representação da segregação de impurezas no material solidificado (CHIAVERINI, 1986).....	27
Figura 9 - A esquerda tem-se uma peça com porosidades devido a retenção de gases CO e CO ₂ , a direita, tem-se a solidificação feita nas mesmas condições, no entanto adicionando em composição de liga o Al (FUOCO, 2014).	28
Figura 10 - Representação das etapas no processo de fundição por precisão (GROOVER, 2014).....	29

Figura 11 - Representação a osteólise induzida pelas partículas provenientes do desgaste do UHMWPE (SILVA, 2018).....	44
Figura 12 - Fluxograma da primeira etapa para produção do molde de cera.....	47
Figura 13 - Arvore montada com 32 moldes femorais de cera, em destaque o pino para extração de cera no molde cerâmico (MACHADO, 2018).	48
Figura 14 - Árvore montada com 36 moldes tibiais de cera (ROCHA, 2014), é relevante observar que o sistema utilizado comportará 32 moldes, portanto essa imagem é meramente ilustrativa.	48
Figura 15 - Fluxograma da segunda etapa para produção do molde cerâmico.	49
Figura 16 - Depósito com moldes em diferentes fases de recobrimento cerâmico. Disponível em: < https://omnidexmining.com/ >	50
Figura 17 - Fluxograma da terceira etapa para produção da peça metálica.	51
Figura 18 - Configuração de ensaio de fadiga para platô tibial segundo a norma ASTM F1800 (SÁ, 2022).	53
Figura 19 - Configuração de ensaio de fadiga para componente femoral, segundo a norma ASTM F3210 (SÁ, 2022).	53
Figura 20 - Fluxograma para fabricação do componente espaçador.	54
Figura 21 - Fluxograma de etapas para usinagem com braço robótico (ALONSO, 2012).	57
Figura 22 - Equipamento para medição de desgaste conhecido como pino sobre disco, na figura observa-se o disco que seria o par tribológico de material Co-Cr-Mo, a qual em condições de uso estaria em atrito constante (SILVA, 2019).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os principais metais e ligas metálicas utilizados na fabricação de próteses de joelho, destacando suas vantagens e desvantagens (DAVIS, 2003).	22
Tabela 2 - Composição química da liga ASTM F75 (DAVIS, 2003).	43
Tabela 3 - Detalhamento do dimensionamento de peso e volume para cada componente da prótese.....	45
Tabela 4 - Principais aplicações de robôs na indústria e as principais razões de sua implementação (HORIKAWA et al., 2002).	56
Tabela 5 - Estimativa de tempo de cada etapa e quantas peças podem ser produzidas por ciclo para componente Femoral e Tibial.....	60
Tabela 6 - Estimativa de produção diária para cada etapa para produção do componente Femoral e Tibial.	62
Tabela 7 - Estimativa de tempo de cada etapa e quantas peças podem ser produzidas por ciclo para o componente Espaçador.	63
Tabela 8 - Estimativa de produção diária para cada etapa para produção do componente Espaçador.....	64
Tabela 9 - Tabela com informações de divisão de operadores na fabricação de componente Tibial e Femoral para cada área.	66
Tabela 10 - Tabela com informações de divisão de operadores na fabricação de componente espaçador para cada função.	67
Tabela 11 - Quantidade de operários de linha e total em horas que cada grupo realizará para um turno.	67

Tabela 12 - Quadro de gastos com mão de obra direta para dois turnos.	68
Tabela 13 - Tabela de dados com volume, peso e custo total unitário com matéria prima para cada componente.....	69
Tabela 14 - Tabela de custos de maquinário e depreciação.....	71
Tabela 15 - Custos de energia elétrica para fabricação.	72
Tabela 16 - Tabela de custo com manutenção acumulado.....	74
Tabela 17 - Mão de obra indireta para indústria de prótese.	75
Tabela 18 - Projeção de custos com aluguel para um período de 10 anos.	76
Tabela 19 - Custos indiretos com EPIs.....	77
Tabela 20 - Resumo dos Custos Diretos e Indiretos para o Período de Operação ...	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAOS	American Academy of Orthopaedic Surgeons
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
Co-Cr-Mo	Liga de Cobalto-Cromo-Molibdênio
Cr ₂ O ₃	Trióxido de Cromo
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MMA	Metilmetacrilato
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OMS	Organização Mundial da Saúde
PMMA	Polimetilmetacrilato
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Revisão Bibliográfica	15
2.1. Descrição da Artroplastia Total do joelho	15
2.2. Parâmetros de fixação	19
2.3. Material de fabricação	19
2.4. Processos de fabricação	22
2.4.1. Fundição	23
2.4.2. Fenômenos que ocorrem na Fundição	25
2.4.3. Fundição de precisão	29
2.4.4. CNC	30
2.4.5. Vantagens e desvantagens do processo CNC	32
2.4.6. Elementos básicos de uma CNC	33
2.4.7. Robótica CNC	33
2.4.8. Elementos de um robô industrial	35
2.4.9. Tratamento térmico	36
2.5. <i>Should Cost</i>	38
2.5.1. Fundamentos básicos de contabilidade industrial	39
2.5.2. Classificação dos tipos de custos	40
3. Metodologia	42
3.1. Composição do material e dimensões	42
3.2. Linha de produção para componente femoral e tibial	46
3.3. Linha de produção para componente inserto meniscal ou espaçador articulator	53
4. <i>Should Cost</i> e Discussões	59
4.1. Dimensionamento de capacidade produtiva	59

4.2. Análise de Custos Diretos	64
4.3. Análise de Custos Indiretos	74
4.4. Avaliação de custos.....	77
5. Conclusão.....	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

A melhoria da qualidade de vida humana sempre foi posta como prioridade do avanço das novas tecnologias, nesse viés, a área de próteses ortopédicas sempre foi pauta da indústria médica, que vem investindo em novas tecnologias e atingindo maior público a cada ano. Além de se produzir algo essencial a sociedade, este tipo de investimento, geralmente tem bons retornos para seus financiadores, devido à alta demanda constante desse mercado. Vale ressaltar, que é um modelo de negócio que se alimenta de muitos investimentos em pesquisas na área, devido busca pela liderança de mercado.

A indústria de próteses funciona como qualquer outro empreendimento, nasce da ideia de uma necessidade de se produzir algo que indivíduos desejam comprar, nesse ramo há a necessidade insubstituível pelo produto, pois isso afeta diretamente na qualidade de vida do ser humano. Como é o caso da artroplastia do joelho, que basicamente é um tratamento cirúrgico de substituição por próteses das extremidades ósseas do fêmur, tíbia e menisco, responsáveis pela articulação do joelho, com o objetivo de mitigar a dor e retomar o movimento ao paciente.

Existem diversos tipos de doenças tratadas com a artroplastia total do joelho, contudo a mais comum é a artrose que é uma doença articular degenerativa que evolui com processo inflamatório crônico, causando desgaste ou degeneração da articulação. Esse tipo de doença pode ser caracterizado por dor, crepitação, atrofia muscular, rigidez matinal, afeta o espaço da articulação verificando-se um estreitamento ou desgaste da cartilagem (SILVA, 2010). Pode ser idiopática ou pós-traumática, em relação a pós-traumática pode acontecer em qualquer idade, enquanto que a idiopática ocorre principalmente em idosos, estima-se que cerca de 50% da população acima de 65 anos irá sofrer com algum grau de Osteoporose (MANINE, 2010). De forma mais ampla, de acordo com a matéria do site O Globo (2023), para a população com mais de 30 anos cerca de 15% terá artrose.

De acordo com o Ministério da Saúde (2023), 15 milhões de brasileiros sofrem de artrose, o que representa cerca de 7% da população. Outro dado importante é que apesar da crescente globalização das próteses, órteses e meios auxiliares de locomoção, somente 10% da população mundial tem acesso a elas (OMS, 2017). Diante disso, observa que há uma necessidade pelo produto, principalmente países

subdesenvolvidos que podem ser uma grande oportunidade impulsionar o acesso a próteses concomitantemente obter lucro.

Assim, o trabalho propõe realizar um estudo de viabilidade econômica de uma pequena fábrica de próteses ortopédicas, voltadas especificamente a artroplastia total do joelho. Utilizando-se da ferramenta *Should Cost*, que consiste em decompor todos os elementos de custos agregados ao produto de forma a estimar o quanto custaria para produzir.

A partir desse contexto, este projeto teve como metodologia reuni todas as despesas envolvidas no processo de fabricação seja por custos matéria prima, custo com mão de obra, maquinário, manutenção, impostos, e outros partes envolvidas que considerou relevantes para composição do valor do produto final. De forma, que cada componente individual seja detalhado criteriosamente, para identificar eficiências e ineficiências no processo.

Por meio dessa técnica, é possível visualizar além do custo de fabricação, também ter a visão do passo-a-passo do processo: da matéria prima ao produto final, e através do método, detectar possíveis formas de otimizar custos e implementar melhorias que agregam qualidade final do produto. Por fim, será possível discutir os resultados obtidos utilizando-se os processos de fabricação escolhidos e matéria prima da liga de Co-Cr-Mo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descrição da Artroplastia Total do joelho

O joelho desempenha funções essenciais, como suporte de peso, absorção de impactos, estabilidade e mobilidade. Essas funcionalidades possibilitam uma variedade de movimentos, como flexão, extensão e rotação limitada, sendo, portanto, de extrema importância para as atividades diárias. A capacidade funcional do joelho está diretamente relacionada à integridade de suas principais estruturas, incluindo a parte óssea composto fêmur, tíbia e patela, ligamentos, tendões, meniscos e músculos ao redor (AAOS,2015).

Entre o fêmur e a tíbia estão os meniscos, que agem como amortecedores. Grandes ligamentos unem o fêmur e a tíbia, proporcionando estabilidade, enquanto os músculos da coxa oferecem força ao joelho. A membrana sinovial cobre todas as superfícies internas do joelho, liberando um líquido lubrificante que reduz o atrito. Em um joelho saudável, todos esses componentes funcionam harmoniosamente. No entanto, doenças ou lesões podem romper essa harmonia, causando dor, fraqueza muscular e redução da função (AAOS, 2015). A Figura 2.a apresenta uma ilustração de um joelho.

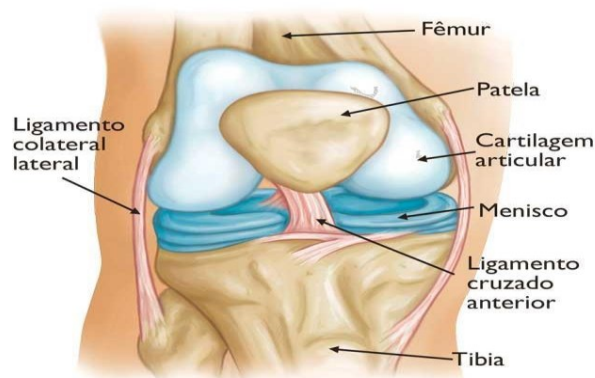


Figura 1 - Representa ilustração anatômica de um joelho normal (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).

A articulação fêmoro-tibial, por exemplo, é responsável por absorver impactos e dissipar energia devido à sua ampla superfície e à presença dos meniscos, que auxiliam na absorção de cargas axiais. A estabilidade dessa articulação depende de estruturas como os ligamentos cruzados, colaterais e meniscos, sendo que os

ligamentos cruzados são essenciais para evitar deslocamentos exagerado da tíbia em relação ao fêmur. Além disso, a estabilidade dinâmica do joelho é reforçada por grupos musculares, como o quadríceps femoral na região anterior e os músculos isquiotibiais, gastrocnêmio e poplíteo na região posterior (NETTER,2009).

A movimentação da articulação fêmur - tibial do joelho pode ocorrer por flexão, extensão, rotação interna e rotação externa, sendo que as rotações só ocorrem com o joelho flexionado a pelo menos 5°. Já a articulação fêmur-patelar faz o deslizamento crânio-caudal (para cima e para baixo) e látero-lateral (de um lado para o outro) da patela sobre a tróclea do fêmur. Por fim, a articulação tíbio-fibular proximal é classificada como sindesmose, uma articulação de pouca movimentação que auxilia na transmissão de forças entre a tíbia e a fíbula, contribuindo para a estabilidade da perna (NETTER, 2009).

Diante da anatomia do joelho as dores crônicas e a disfunção do joelho estão frequentemente associadas à artrite, sendo a osteoartrose, a artrite reumatoide e a artrose pós-traumática as principais responsáveis por esse quadro. A osteoartrose, geralmente relacionada ao envelhecimento, leva ao desgaste da cartilagem, causando atrito entre os ossos e resultando em dor e rigidez. Já a artrite reumatoide, uma doença inflamatória, provoca o espessamento da membrana sinovial e danos à cartilagem. Por fim, a artrose pós-traumática pode surgir após lesões no joelho, como fraturas ou rupturas ligamentares, comprometendo a função articular ao longo do tempo (AAOS,2015).

De acordo com a American Academy of Orthopaedic Surgeons (2015), quando tratamentos não cirúrgicos para aliviar dores no joelho causadas por artrite ou outras lesões graves não são mais eficazes, a artroplastia de joelho pode ser indicada. Esse procedimento cirúrgico, realizado pela primeira vez em 1968, é conhecido por sua segurança e eficácia em corrigir deformidades e restaurar a funcionalidade, permitindo que os pacientes retomem suas atividades diárias (AAOS,2015).

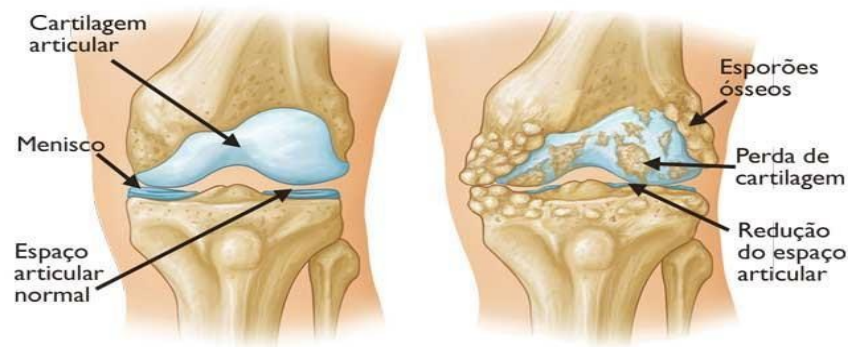


Figura 2 - Representação da osteoartrose no joelho (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).

A artroplastia do joelho teve início a partir de inovações na artroplastia total de quadril, que na época era pioneira. A artroplastia do quadril aproveitou os avanços em materiais cirúrgicos e técnicas de baixa fricção. Esse procedimento foi adaptado para o joelho em meados da década de 1960 pelo ortopedista Sir John Charnley. No método cirúrgico do joelho, são substituídas as superfícies ósseas e a cartilagem danificada é substituída por material polimérico. Esse processo é indicado com base na dor do paciente e não na idade, e pode ser recomendada em casos de dor intensa, inflamação crônica, deformidades no joelho e falha de outros tratamentos. Essa técnica cirúrgica se caracteriza de grande porte e envolve a substituição das superfícies ósseas do fêmur, tíbia e patela por componentes metálicos, enquanto a cartilagem desgastada é substituída por polímero. Os benefícios da cirurgia incluem alívio da dor e melhora na mobilidade e funcionalidade, com a maioria dos pacientes relatando melhora na qualidade de vida. A evolução dessas técnicas ressalta a importância da inovação médica, mas é fundamental avaliar os possíveis riscos, como infecções e falha do implante.

As próteses de joelho são compostas pela parte femoral apresenta um formato curvo que se ajusta à extremidade do fêmur e possui um sulco troclear para permitir o deslizamento adequado sobre o menisco. Já parte tibial se configura por uma superfície plana, que configura como base de apoio para o polietileno meniscal, que pode ter formato curvo e, em alguns casos, pode não existir dependendo das condições do paciente e do tipo de procedimento cirúrgico adotado (ROCHA,2017).



Figura 3 - Representa a esquerda Osteoartrose grave e direita ilustração do implante (Academy of Orthopaedic Surgeons, 2015).

O procedimento necessário para a cirurgia de artroplastia total do joelho, de acordo com Ulson (2024), exige a realização de uma série de exames antes da cirurgia para garantir a segurança do procedimento. Esses exames incluem hemograma completo, exames de função renal, níveis de eletrólitos, glicemia de jejum, coagulograma, análise de urina, eletrocardiograma e radiografia de tórax. Esse conjunto de testes é particularmente importante para pacientes idosos, que devem passar por uma avaliação detalhada de um clínico geral ou cardiologista para determinar o risco cirúrgico.

No hospital, algumas etapas preparatórias são realizadas antes da cirurgia, como a remoção dos pelos ao redor do joelho e a limpeza da área com uma solução antisséptica. Além disso, o paciente deve jejuar por pelo menos 8 horas para evitar complicações relacionadas à anestesia. A cirurgia dura cerca de duas horas e envolve um corte de 15 centímetros e a remoção da cartilagem danificada e partes comprometidas do osso, que são substituídas por implantes metálicos nas superfícies do fêmur e da tíbia, com um componente polimérico inserido entre essas estruturas para reduzir o atrito. Em alguns casos, a menisco também pode ser remodelada e coberta com um disco de plástico. A fixação dos implantes pode ser feita por cimentação ou por pressão, dependendo das características clínicas do paciente (ULSON, 2024).

No período pós-operatório, o paciente permanece internado por alguns dias para monitoramento médico. O controle da dor é uma prioridade, e a prevenção de complicações como trombose venosa profunda e inchaço na perna é realizada com o uso de botas e meias pneumáticas para melhorar a circulação sanguínea. A reabilitação fisioterapêutica começa no dia seguinte à cirurgia, com exercícios para

fortalecer a musculatura da perna e restaurar os movimentos do joelho, permitindo que o paciente retome gradualmente suas atividades diárias (ULSON, 2024).

2.2. Parâmetros de fixação

Existem duas abordagens na artroplastia do joelho, garantindo uma fixação eficaz da prótese ao osso, assegurando assim estabilidade e segurança ao paciente. O primeiro método de fixação da porção femoral e tibial é através de cimento, usando o polimetilmetacrilato (PMMA) como produto. O segundo método é sem cimento, promovendo uma integração direta ao tecido ósseo (TAKATSU, 2024).

A técnica cimentada teve seu início na artroplastia do quadril e posteriormente foi aplicada à artroplastia do joelho. A fixação com cimento é altamente eficaz, pois proporciona uma solidificação rápida após a aplicação do implante no osso. Inicialmente, o PMMA é encontrado em pó e é misturado a um monômero líquido chamado metilmetacrilato (MMA) durante o procedimento cirúrgico, onde endurece rapidamente, oferecendo um processo seguro ao paciente.

O método sem cimento utiliza hidroxiapatita na superfície da prótese para facilitar o crescimento ósseo, uma vez que a superfície porosa permite a formação do osso. Este método é mais comum entre jovens com ossos saudáveis, devido à sua maior durabilidade e menor risco de liberação durante atividades diárias. Ambos os procedimentos dependem das condições de saúde óssea do paciente (TAKATSU, 2024).

2.3. Material de fabricação

Para que possam ser empregados com segurança no organismo humano, é necessário que os materiais que constituem o implante tenham algumas características para que não haja complicações durante o uso da prótese. De acordo com Rocha (2017), esses requisitos podem ser divididos em quatro categorias principais: biocompatibilidade, alta resistência à corrosão, biofuncionalidade e processabilidade.

A biocompatibilidade não é uma propriedade característica do material e não pode ser tratada como tal, pois o nível de biocompatibilidade depende da funcionalidade e da sua aplicação. Essa propriedade representa a capacidade do material exercer determinada aplicação tendo o mínimo de reações alérgicas,

inflamatórias ou tóxicas quando em contato com fluidos orgânicos do corpo (ROCHA, 2017).

Outro critério importante é a resistência à corrosão. Certos fluidos corporais em contato com a liga metálica podem ser prejudiciais para os metais, pois contêm vários íons e hidróxidos, proteínas e oxigênio dissolvido na solução aquosa. Como consequência, podem formar óxidos ou outros compostos que danificam as próteses. Com isso, a resistência à corrosão é adquirida por meio de uma fina camada de óxidos formada pela reação do metal com o meio em que está inserido. Esse processo é conhecido como passivação, que impede a troca de elétrons e protege a superfície do metal. Dessa forma, é essencial que o material da prótese possua uma resistência adequada à corrosão para evitar a degradação no ambiente biológico (ROCHA, 2017).

Já a biofuncionalidade abrange as propriedades mecânicas e físicas dos materiais e assim sendo compatíveis com a atividades do corpo humanos no dia a dia. As propriedades necessárias das ligas metálicas são módulo de elasticidade, resistência à fadiga, resistência à fratura, resistência à tração, resistência ao desgaste e extensão após ruptura (ROCHA, 2017).

O módulo de elasticidade das próteses metálicas deve ser semelhante ao do osso, situando-se entre 15 e 23 GPa, para evitar problemas como a reabsorção óssea, fenômeno causado pela diferença excessiva de rigidez entre o material e o osso natural. Esse efeito pode resultar na perda de densidade óssea e no enfraquecimento da estrutura esquelética. Além disso, propriedades como resistência à fadiga, fratura, tração e desgaste são cruciais para a durabilidade dos implantes, visto que falhas podem ocorrer devido a tensões cíclicas, propagação de fissuras ou degradação do material ao longo do tempo (ROCHA, 2017).

Um fator determinante na escolha do metal, de suas ligas e do processo de fabricação, segundo Rocha (2017), é a capacidade do material de ser moldado, cortado, soldado ou usinado sem comprometer suas propriedades mecânicas e estruturais. Esse critério é essencial, pois afeta não apenas a eficiência da produção, mas também a viabilidade e a durabilidade da prótese. A seleção do método mais adequado deve levar em conta a aplicação específica do implante, uma vez que diferentes processos podem potencializar ou comprometer suas características. Dessa forma, a escolha criteriosa do processo de fabricação é crucial para garantir a qualidade, segurança e funcionalidade dos implantes metálicos no corpo humano. Os métodos mais comuns incluem fundição, usinagem, forjamento e manufatura aditiva,

cada um apresentando características específicas que influenciam diretamente o desempenho do implante (ROCHA, 2017).

Diante, de todas as características mencionadas os biomateriais metálicos tem papel fundamental na medicina moderna, por ter os requisitos necessário descrito anteriormente para os implantes. Os três matérias metálicos mais utilizados em próteses são titânio e suas ligas, ligas à base de cobalto-cromo e o aço inoxidável.

O primeiro a ser descrito são os aços inoxidáveis, notáveis por suas excelentes propriedades mecânicas, mas baixa resistência ao desgaste. Eles possuem fácil manuseio e são amplamente utilizados devido ao seu baixo custo em comparação com outros materiais. São ligas à base de ferro que contêm cromo em proporções de 12%, característica essencial para a formação da camada passivadora de trióxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície do metal, sendo essa camada responsável pelo fator inoxidável.

Enquanto as ligas de cobalto-cromo se destacam por sua excelente resistência ao desgaste e à corrosão, sendo preferidas para aplicações médicas devido à sua durabilidade e biocompatibilidade, o titânio, por sua vez, oferece elevada biocompatibilidade, baixa densidade e rigidez menor do que o aço inoxidável, permitindo uma melhor integração da prótese com o osso do paciente. No entanto, é um material de alto custo.

Uma das propriedades do titânio é sua elevada resistência à corrosão, pois tem a capacidade de formar um filme de óxido estável na superfície, mesmo quando em contato com os tecidos e fluidos corporais. No entanto, o titânio puro (Ti-CP) tem baixa resistência ao desgaste, o que o torna inadequado para cenários de elevadas solicitações. Considerando essas informações, é comum utilizar outros elementos para melhorar essa propriedade de resistência ao desgaste (ROCHA, 2017).

Tabela 1 - Comparativo entre os principais metais e ligas metálicas utilizados na fabricação de próteses de joelho, destacando suas vantagens e desvantagens (DAVIS, 2003).

Material	Vantagens	Desvantagens	Temperatura Fusão(°C)	Dureza Vickers(HV)
Titânio e ligas	Alta Biocompatibilidade, menor módulo de Young. Resistência à corrosão e fadiga	Mediana resistência ao desgaste, custo elevado.	1600-1660	330-360
Aços inoxidáveis	Custo mais acessível, maior disponibilidade e facilidade de fabricação.	Módulo de Young elevado, baixo resistência ao desgaste.	1370 –1400	200 - 220
Ligas CoCrMo	Excelente resistência à corrosão, ao desgaste e a fadiga.	Alto módulo de Young e menor biocompatibilidade.	1330 –1400	500-650

2.4. Processos de fabricação

A fabricação de próteses ortopédicas para artroplastia total do joelho envolve diversas etapas, essenciais para garantir a conformidade com as especificações do projeto. Estas etapas de fabricação são necessárias de forma a garantir (geometria, dimensões, acabamentos superficiais) ao metal puro ou liga metálica de acordo com as especificações determinadas pelo projeto, além de também ter que conferir características mecânicas (resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade etc.), (KIMINAME, 2013).

Segundo Miranda (2012), entende-se como conformação dos metais a transformação de um corpo metálico em outra forma definida. Esse processo pode ser dividido em dois grupos distintos: processos metalúrgicos e processos mecânicos. Os processos metalúrgicos têm como base a modificação de sua forma utilizando altas temperaturas na fabricação e podem ser subdivididos em duas categorias: conformação por solidificação, quando realizada em temperaturas superiores ao ponto de fusão do metal, e conformação por sinterização, quando a temperatura é inferior ao ponto de fusão do metal (metalurgia do pó).

Já os processos mecânicos são provocados pela aplicação de forças externas, sendo assim, pode ser também dividido em subcategorias: a conformação plástica que as quais as tensões aplicadas são inferiores ao limite de resistência à ruptura do

material e a conformação por usinagem as quais as tensões aplicadas são superiores ao limite de resistência à ruptura do material gerando cavaco (MIRANDA, 2012). Neste trabalho, será descrito alguns desses processos que são utilizados na fabricação de próteses para artroplastia total do joelho.

2.4.1. Fundição

O processo de fundição faz parte desde os tempos mais remotos na produção de ferramentas para o ser humano. Compreende-se fundição de metais e ligas metálicas o processo no qual o metal fundido flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde que tem formato dado pelas paredes de sua cavidade interna (GROOVER, 2014). Em geral materiais metálicos sempre tem sua origem de um metal líquido, pois a fundição pode gerar peça semiacabadas que possui geometrias mais complexas e próximas da forma final ou também lingotes que faz parte da indústria metalúrgica primária.

Dentre as vantagens segundo Kiminame (2013), pode se destacar a possibilidade de utiliza-la em peças de geometrias complexas, tanto para com seus formatos internos e externos. Algumas peças podem ser produzidas em sua forma final não necessitando de etapas adicionais. Capacidade de produzir peças de grandes dimensões (até mais do que 100 toneladas) e peças pequenas de poucas gramas, possibilitando a manipulação de composições das ligas. Além do aspecto de ser um processo que consome sucata, portanto tem um ponto positivo quanto a sustentabilidade.

Quanto as desvantagens associadas a esse processo podem incluir limitações em propriedades mecânicas, porosidade, baixa precisão dimensional e acabamento superficial (GROOVER, 2014). O projeto de uma peça fundida se inicia pelo molde, a determinação de sua geometria e forma deve leva em conta alguns fatores como o caso do metal líquido se contrai ao solidifica, dessa forma a cavidade projetava deve ser ligeiramente maior. Os moldes são feitos de uma variedade de materiais o que dá nome as suas classificações, dentre eles destaca-se areia, gesso, cerâmica e metal, o que também são características de projeto.

Para início de discussão, os moldes podem ser classificados em dois tipos: molde aberto e molde fechado. No molde aberto o metal é despejado até que preencha a cavidade. Enquanto, que no molde fechado existe um sistema de

alimentação de forma que o metal líquido flua da parte externa do molde até atingir todas as cavidades internas, é o mais utilizado por ser possível a produção de peças com maior complexidade que molde aberto.

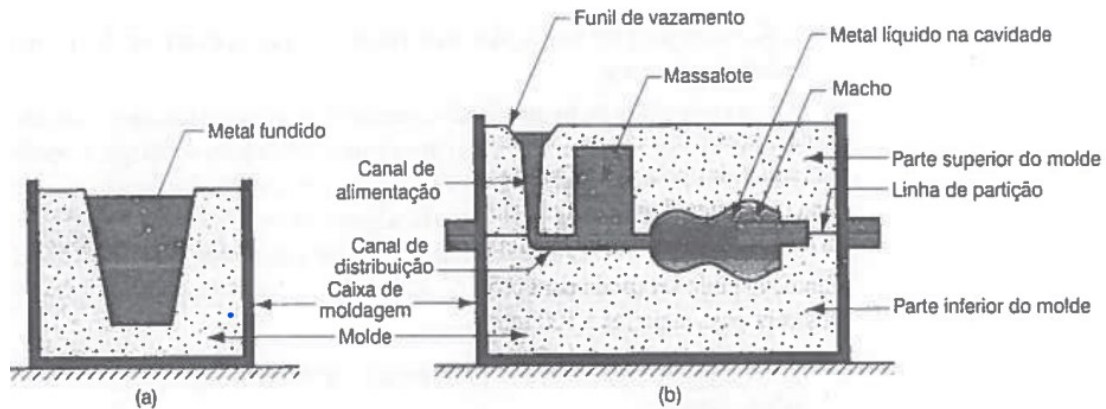


Figura 4 - Representação dos dois tipos de molde na fundição. (a) Molde aberto; (b) Molde fechado (GROOVER, 2014).

Quando o metal líquido perde calor, ele começa a ter transformação para seu estado sólido, uma vez completada a solidificação, o molde é removido. Geralmente em peças que exigem boas tolerâncias dimensionais, são necessárias etapas posteriores para remoção do excesso de metal (rebarbação), acabamento superficial e tratamentos térmicos para melhorarem suas propriedades mecânicas. Outra divisão do processo da fundição quanto aos moldes é sobre o fato de existirem moldes que são destruídos após a solidificação (molde perecível), exemplos, de moldes com areia, gesso, ou materiais similares. Já no molde permanente, é possível utilizá-lo diversas vezes para produção de peças fundidas. Normalmente, estes moldes são feitos em metal ou cerâmica refratária capaz de resistir a elevadas temperaturas (GROOVER, 2014).

Em geral, dentre as vantagens pode-se destacar que moldes perecíveis são amplamente utilizados para processos com geometria mais complexa, já a vantagem de moldes permanentes é o fato de apresentarem algumas vantagens econômicas em situações de alta produção.

2.4.2. Fenômenos que ocorrem na Fundição

Durante a solidificação do metal, ocorre alguns fenômenos importantes que devem ser estudados ante ao projeto do molde, para definir qual metodologia será utilizada na fundição do material. Tais fenômenos devem ser controlados de forma que evite heterogeneidades indesejáveis, e prejudique a qualidade do componente produzido. Os fenômenos descritos pela literatura Chiaverini (1986) incluem cristalização, contração de volume, concentração de impurezas e desprendimento de gases.

A cristalização ocorre exclusivamente nos metais, durante a solidificação, surgem as primeiras células cristalinas unitárias, que servem como precursores para posterior desenvolvimento ou crescimentos da rede cristalina, dando origem aos grãos definitivos e à estrutura granular típica dos metais (CHIAVERINI, 1986). De fato, o crescimento dos grãos não ocorre de maneira uniforme em todas direções, variando de acordo com os diferentes eixos cristalográficos. O desenvolvimento e expansão desses núcleos cristalográficos dão origem ao tipo de cristal chamado de dendrita.

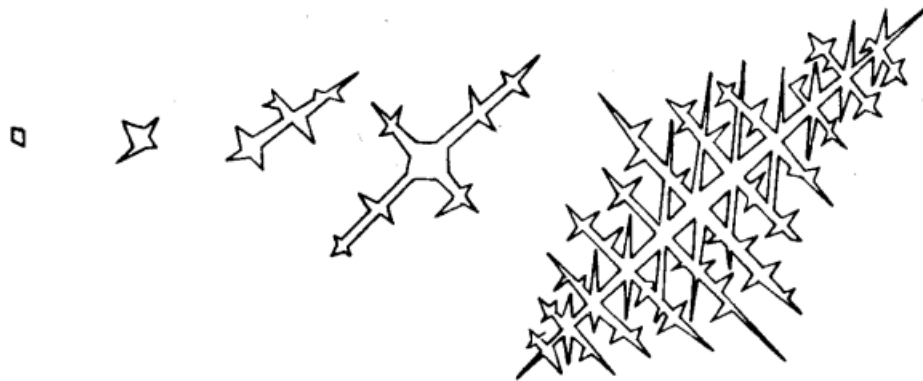


Figura 5 - Expansão de uma célula cristalina para o desenvolvimento de uma dendrita (CHIAVERINI, 1986).

O crescimento das dendritas é esbarrado pelo crescimento de dendritas adjacentes na solidificação do metal, originando assim os grãos e os contornos de grão na rede cristalina do material. Quanto aos efeitos negativos da cristalização, que devem ser analisados no projeto da peça, destaca-se o fato de que nas diagonais da peça fundida tem-se um ponto de fragilidade, a qual pode ser corrigido através do arredondamento destes cantos concentradores de tensão.

Outro fenômeno na fundição é a contração de volume, essa variação de volume deve ser levada em conta pois influi diretamente nas dimensões finais da peça. De acordo com Chiaverini (1986), as contrações de volume podem ser classificadas em três tipos:

Contração líquida – corresponde ao abaixamento da temperatura até o início da solidificação.

Contração de solidificação – corresponde à variação de volume que ocorre durante a mudança do estado líquido para o sólido.

Contração sólida – corresponde à variação de volume que ocorre já no estado sólido, desde a temperatura de fim de solidificação até a temperatura ambiente.

Dentre os efeitos negativos da contração, que dão origem a heterogeneidades na peça, o mais conhecido pela literatura é o vazio ou chupagem. A figura abaixo, está representado como este fenômeno acontece:

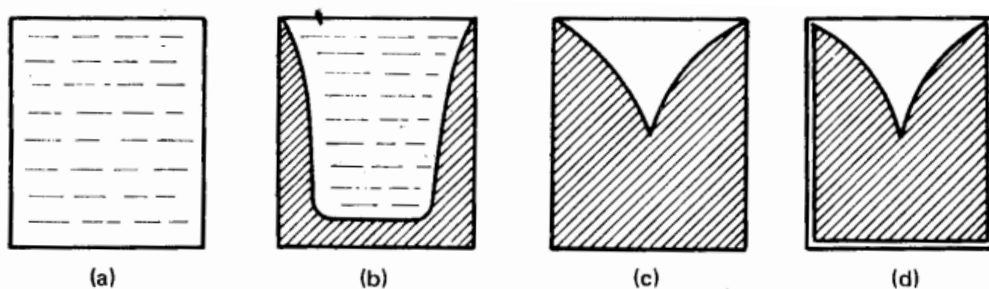


Figura 6 - Representação esquemática das fases do fenômeno de contração durante a solidificação do metal líquido (CHIAVERINI, 1986).

Inicialmente o metal se encontra no estado líquido (a), a perda de calor do metal se dá sobretudo pelas paredes do molde (b), tendo em vista que é a região com temperaturas mais baixas. A solidificação se dá, portanto, das regiões periféricas para o centro (c). Em (d), tem-se o estado final da fundição, a qual a contração sólida gerou uma diminuição das dimensões da peça solidificada. Um detalhe, é que o vazio pode acontecer internamente e não ser visível aos olhos por uma análise externa da peça. Além de alteração nas dimensões, esse fenômeno pode gerar trincas a quente e surgimento de tensões residuais, este último pode ser tratado por meio de tratamento térmico posterior.

Para controle desse fenômeno, no projeto de fundição de lingotes eles adiciona um artifício sobre o topo da lingoteira, conhecido como cabeça quente ou massalote, essa peça postiça, que pode ser de material refratário, retém o calor por um tempo

mais longo. Por conseguinte, será o último ponto a se solidificar na peça e, conseqüentemente, será onde o vazio se concentrará. Essa peça postiça de metal pode ser retirada posteriormente. No caso das peças fundidas, utiliza-se o alimentador, que também segue o mesmo princípio: concentrar os vazios na peça.

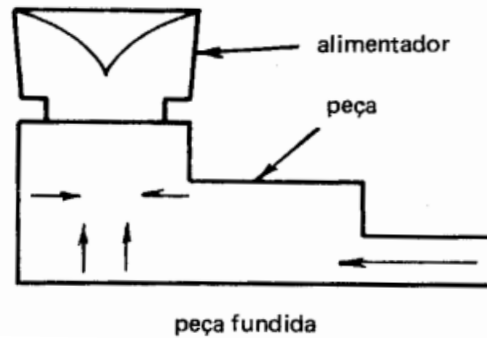


Figura 7 - Exemplo de uma peça fundida utilizando-se o “alimentador”, observa que aqui o alimentador tem uma seção maior, de forma que o fluxo de metal líquido chegue regiões periféricas da peça sem que ocorra solidificação antes (CHIAVERINI, 1986).

Uma liga metálica pode conter impurezas em sua composição, como é o caso das ligas ferro-carbono possui o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o próprio carbono. No estado líquido, essas impurezas formam uma característica homogênea que ao solidificarem juntamente com o metal, pode acontecer destas impurezas acumularem na última parte solidificada formada, quando isso acontece dá-se o nome de segregação (CHIAVERINI, 1986).

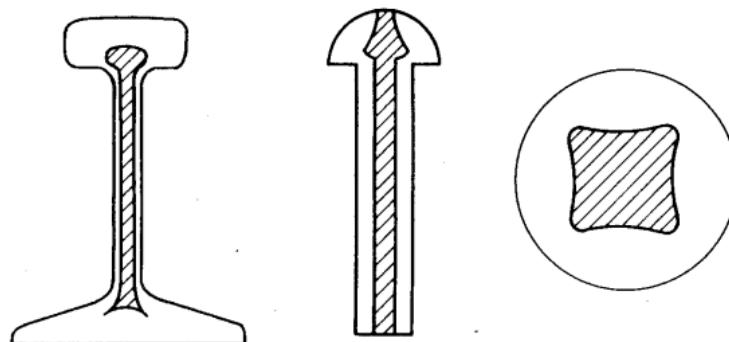


Figura 8 - Representação da segregação de impurezas no material solidificado (CHIAVERINI, 1986).

O grande inconveniente da segregação é o fato de que essa não uniformidade química na possa gerar uma heterogeneidade de propriedades mecânicas da peça, e assim terem regiões concentradoras de tensão. Normalmente, pelo fato da solidificação caminhar das paredes do molde para o interior da peça, as impurezas se concentram no “núcleo” da peça e assim torna menos preocupante o problema da heterogeneidade química. Para controlar esse fenômeno, é necessário o controle rigoroso sobre a composição química da liga e da velocidade de resfriamento da solidificação.

Em ligas que contém oxigênio, por exemplo, como é o caso de ligas de ferro-carbono, esse elemento tende a combinar com o carbono e formar gás CO e CO₂ que em condições adequadas são liberados para atmosfera. Entretanto, devido a massa líquida se torna mais viscosa à medida que a temperatura cai, a ruptura desses gases presentes no líquido viscoso se torna mais difícil. E dessa forma, esses gases presos acabam ficando retidos nas proximidades da superfície de peças ou lingotes (CHIAVERINI, 1986).

Vale ressaltar, que em metais de baixo carbono as bolhas retidas podem ser desejáveis, como no processo conformação mecânica, onde suas paredes porosas são soldadas (CHIAVERINI, 1986). Contudo, em aços de alto carbono deve ser evitadas, para isso uma estratégia recorrente é utilizar outros elementos de liga como Si, Mn e Al, para formarem óxidos com esses oxigênios liberados, impedindo a formação de CO e CO₂ responsável pelas bolhas.

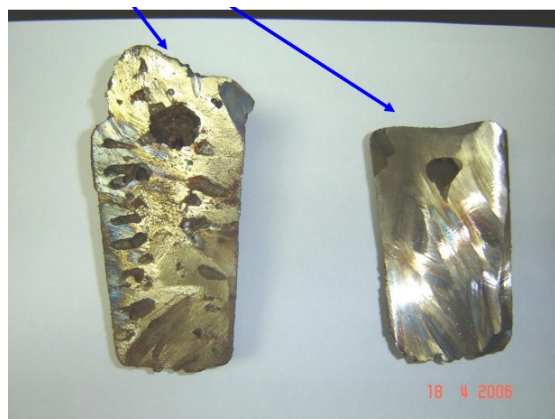


Figura 9 - A esquerda tem-se uma peça com porosidades devido a retenção de gases CO e CO₂, a direita, tem-se a solidificação feita nas mesmas condições, no entanto adicionando em composição de liga o Al (FUOCO, 2014).

2.4.3. Fundição de precisão

Como dito anteriormente, a principal característica utilizada para dividir os processos de fundição está relacionada ao tipo de molde utilizado. Tendo isso em vista, no processo de fundição de precisão, o molde de matéria refratária é fabricado a partir do recobrimento de um modelo feito de cera, nesse caso a cera é derretida antes do vazamento do metal sobre o molde. É dado esse nome pois através desse processo de fundição é possível fabricar peças complexas com boa precisão dimensional. Vale ressaltar, que esse processo também é conhecido pela literatura como processo de cera perdida (GROOVER, 2014).

Para entendimento de como funciona esse processo de fundição, a figura abaixo tem as etapas desse processo:

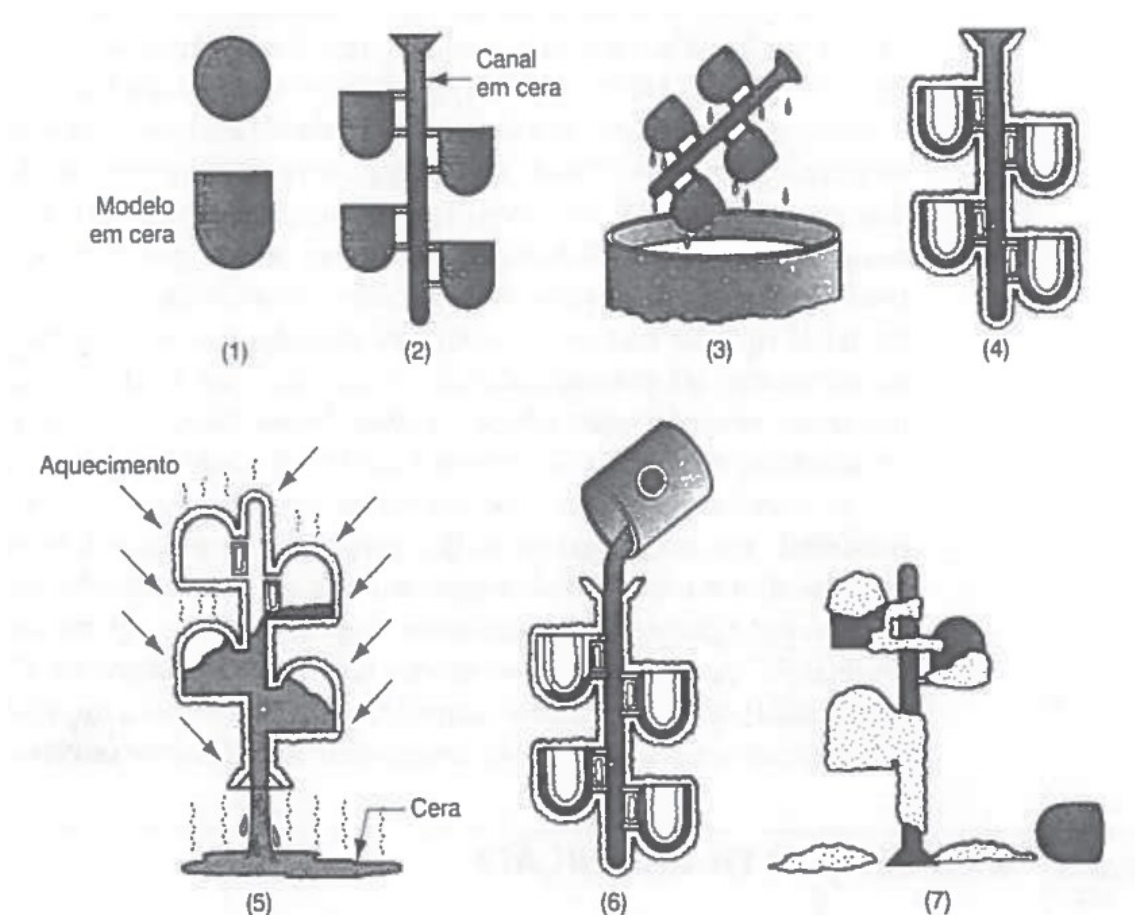


Figura 10 - Representação das etapas no processo de fundição por precisão (GROOVER, 2014).

Para que o molde de matéria refratária seja fabricado, são necessários a produção de modelos (1), normalmente feitos de cera, que pode ser fabricado através

da moldagem, ou então, o mais comum para produção em larga escala, vazamento ou injeção de cera quente numa matriz padrão. Para um processo de larga escala, vários modelos podem ser conectados a um canal (2), que também é preenchido com cera, e assim formar uma árvores-modelo (ou cacho) (GROOVER, 2014).

Em seguida, o a árvore-modelo é imersa numa lama de sílica (3) com partículas muito finas ou pode ser outro material refratário, misturado com gesso para dar forma ao molde. A etapa (4) é para salientar que a árvore é imersa várias vezes na lama sílica com gesso para dar uma compactação sobre o modelo de cera e garantir qualidade no produto. Outro ponto, é que o fato de se utilizar partículas muito finas na concepção do negativo do fundido é que dá a vantagem desse modelo de reproduzir com boa acurácia a geometria da peça.

O processo seguinte é realizado após a secagem do molde coberto pelo material refratário, a árvore-modelo é então colocada de forma invertida para que sobreaquecendo o molde, a cera em seu interior derreta e escoe facilmente (5). E então após a saída completa da cera, a árvore é submetida a mais um pré-aquecimento antes de receber o metal líquido fundido, para retirada de contaminantes e umidade, e logo em seguida é despejado o metal no canal de alimentação (6). Por fim, o molde é separado da peça fundida destruindo o molde (7).

Dentre as vantagens desse processo destaca-se a capacidade de se reproduzir peças fundidas complexas, controle dimensional com baixas tolerâncias, bom acabamento superficial, outro ponto a destacar é que a cera pode ser recuperada e reutilizada várias vezes, além disso esse tipo de processo geralmente não necessita de usinagem posterior (GROOVER, 2014). Dentre as desvantagens é que é um processo que se limita a peças menores, e o fato de ser um processo com várias etapas, diminui a produtividade e encarece o valor do produto.

2.4.4. CNC

Desde os primórdios com a fabricação de armas e pedras na idade da pedra até os dias atuais na fabricação de nano chips, a usinagem se faz presente ao ser humano, a busca por novas tecnologias para atender e melhorar as necessidades humanas sempre foi o motor propulsor para desenvolvimento dessa área. Nesse cenário, a primeira CNC surgiu-se em 1952, a qual foi projetada para controlar uma

fresadora americana da empresa Cincinnati a qual sofreu modificações para receber um controlador eletrônico (GENEROSO, 2011).

No início, o primeiro controlador eletrônico era várias vezes maior que o tamanho da própria máquina-ferramenta, além de consumir muita energia elétrica, sua capacidade de cálculo era muito limitada em comparação com as máquinas atuais. E por isso, devido aos custos, inicialmente as fábricas não aderiram a essa nova tecnologia. Com o tempo, com a melhoria contínua na capacidade de processamento dos computadores, a tecnologia CNC popularizou-se entre as pequenas e grandes empresas de maneira que hoje seja impossível imaginar a indústria sem a CNC.

Denomina-se máquina CNC para usinagem, segundo Azevedo (2017), o equipamento eletromecânico computadorizado que por meio de um computador, recebe informações em linguagem de máquina via computador próprio. Este irá compila-las e transmiti-las em linguagem decodificada a servo-motores e a outros mecanismos, fazendo, com que movimente os eixos ou realize uma sequência de ações necessárias para que se fabrique aquele projeto de peça. A usinagem segundo Bacci (2004), pode ser entendida como processo de fabricação com remoção de material, ou de forma mais detalhada, operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco.

Dentre os processos que se destacam na usinagem CNC tem-se o torneamento e o fresamento, pela alta aplicabilidade e volume de produção. O torneamento é destinado a fabricação de peças com superfície de revolução: cilíndricas, cônicas, esféricas e/ou curvilíneas. Enquanto que o fresamento, é realizado o desbaste de superfícies com geometria variada a qual utiliza ferramentas multicortantes (brocas, fresas ou alargadores). Em relação aos parâmetros de grandezas de corte a serem definidas são: velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte (MARTINS, 2020).

Dentre as características que usualmente distinguem um CNC de operações de máquinas-ferramentas convencionais, segundo (GROOVER, 2014) são:

- Operações múltiplas em um setup: peças complexas exigem dezenas de operações separadas, cada uma exigindo sua própria máquina, setup e ferramenta. Em Centros de Usinagem, como uma CNC, é possível a maior

parte das operações em um único local, o que minimiza tempo e torna as operações de fabricação mais simples.

- Troca automática de ferramenta: ao mudar de um tipo de operação para outra de usinagem, o centro de usinagem altera de forma automática de acordo com script programado de fabricação. Dessa forma, a CNC possui um eixo que contém um magazine de armazenamento de ferramentas, geralmente esse magazine contém de 16 a 80 ferramentas de corte.
- Trocadores de Pallets: alguns centros de usinagem possuem trocadores de pallets que é um mecanismo que permite que uma estação lateral seja transladada para a posição de usinagem. Isso possibilita que o operador retire a peça usinada para fixar a outra, enquanto em um pallet outra está sendo usinada, assim aumenta significativamente a produtividade.
- Posicionamento automático de peças: existem muitos centros de comando numérico que possuem mais de três eixos. O eixo adicional é projetado para ser uma mesa rotativa, que posiciona a peça em um ângulo específico em relação ao eixo da ferramenta, e, portanto, é possível usinar os quatro lados da peça com um só setup.

2.4.5. Vantagens e desvantagens do processo CNC

A utilização de um centro de usinagem CNC possui alguns vantagens e desvantagens, em relação a outros processos produtivos, de acordo com (GENEROSO, 2011). Os benefícios de implementar uma CNC são:

- Possibilita a fabricação de peças complexas, com tolerâncias geométricas muito estreitas, e em muitos casos não há necessidade de processos posteriores.
- Maior repetibilidade de características do produto, de forma que uma grande quantidade de lote de peças não possui diferenças dimensionais e geométricas;
- Pelo fato de não haver muito trabalho braçal, para está movimentando e realizando trocas no equipamento, reduz a fadiga dos operadores da máquina ferramenta, o que também contribui para uma maior produtividade.

Dentre as desvantagens de optar pela utilização de um processo CNC tem-se:

- Elevado custo de aquisição e implementação de maquinário;
- Requer mão de obra especializada e custosa para operar todo potencial tecnológico das máquinas;

2.4.6. Elementos básicos de uma CNC

Segundo Azevedo (2017), uma máquina CNC possui alguns elementos básicos que a compõem e que estão presentes em todas, independentemente do modelo. Partindo desse pressuposto, após a análise de resistência mecânica e o desenvolvimento do modelo CAD da peça, é necessário estruturar o programa CNC para enviá-lo ao primeiro elemento, conhecido como Unidade de Entrada de Dados, responsável por receber os dados dos programas e repassá-los ao computador. Para máquinas mais antigas, a entrada de dados era feita utilizando cartões ou fitas perfuradas, e até mesmo disquetes, atualmente, as máquinas permitem até conexão com rede Ethernet tornando mais flexível a comunicação, como também, não só receber dados, mas também transmitir informações do processo (OEE, etc.).

A segunda unidade básica recebe esses dados, o Computador, e interpreta esse conjunto instruções e envia as informações já decodificadas aos servo-motores que irão acionar os eixos (X, Y, Z, e outros caso tiver adicionais), de maneira sincronizada e controlada para realizar as operações desejadas. Esse componente também é responsável por ativar e controlar dispositivos em geral, para realizar entre outras funções importantes ao processo produtivo.

O terceiro componente básico essencial são os Mecanismos Comandados, que são os equipamentos e dispositivos de controle acionados pela sequência de informações decodificadas do programa CNC, tais como servomotores, PLC, micro *switchs*, atuadores etc. E por fim, o quarto elemento diz respeito a Máquina Ferramenta, que é a estrutura física da máquina integrada ao CNC, como: base, eixos, mesa, fusos, sistemas mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos que em conjunto formam a máquina de usinagem.

2.4.7. Robótica CNC

Com a crescente informatização dos meios tecnológicos produtivos a indústria viu a possibilidade de automatizar seus processos em várias áreas da manufatura.

Através desses interesses, o mercado se especializou e desenvolveu diversos robôs para atender as necessidades da indústria. Devido às características de flexibilidade de programação e adaptação para os sistemas integrados da manufatura, o robô se tornou um aliado nesse contexto.

Para Vale (2011), os robôs manipuladores são em tese máquinas de posicionar e possuem inúmeros graus de liberdade, a depender da aplicação desejada, a qual em sua extremidade está fixa o que se chama de efetuador ou ferramenta, cuja função é realizar algum tipo de operação previamente programada. A implementação de robôs industriais está associada aos seguintes critérios (BOUTEILLE et al., 1997):

- Redução de custos: diminuição de custos com mão de obra (substituição do homem pela máquina), aumento da produtividade, otimização do uso de matéria-prima (menores perdas), economia de energia e etc;
- Segurança no meio de trabalho, substituição do homem pela máquina em atividades insalubres e perigosas, como manipulação de materiais tóxicos ou operações em altas temperatura ou corte de metais;
- Melhor qualidade do produto, garante altos níveis de precisão com uniformidade no padrão das peças fabricadas;
- Reprodução de atividades controladas manualmente ou intelectualmente impossíveis para o ser humano, como montagem de peças em miniaturas, realização de movimentos complexos e rápidos.

Nesse cenário, vale mencionar três modelos de produção que são utilizados de acordo com a necessidade da produção. Um deles é a automação fixa, caracterizada pela sua rigidez da configuração do equipamento, uma vez estabelecido uma configuração inicial não é possível alterá-la para realização de outros tipos de tarefas, é muito utilizada quando se deseja um elevado volume de produção, em que a máquina é destinada a fabricar um único tipo de produto de forma rápida e eficiente. Consequentemente, essa alta produção promove baixos custos de produção, logo também menores custos unitários (SILVA, 2003). A desvantagem é que se precisar mudar o produto terá que ser feito outro projeto, e, consequentemente, novos investimentos.

Outro tipo de produção é automação programável, é quando a planta fabril almeja produzir uma gama de produtos diversificados através de instruções

previamente carregadas na máquina (SILVA, 2003). Este tipo de método de fabricação permite produzir diversos produtos e modelos, no entanto devido ao fato de ter que selecionar o programa diferente no controlador, ou seja, reprogramar a máquina despende de um tempo que pode ser prejudicial em termos de alta produtividade. Já automação flexível seria uma combinação desses dois tipos de modelo, ou seja, seria possível produzir grandes lotes de produtos diversificados com equipamento capaz de modificar as tarefas realizadas de forma ágil através de comandos fornecidos por códigos, a vantagem é que ele não tem perdas significativas de tempo de produção para realização de ajustes de programa a cada novo produto.

Os robôs industriais se encaixam no modelo de automação programável flexível, são máquinas capazes de realizar diversos movimentos programados, adaptando-se a cada operação com troca de ferramentas tarefas e funções (ROMANO, 2002). Dentre as desvantagens, pode-se destacar alto investimento para implementação, manutenção e instalação que requer mão de obra especializada. A robótica também pode substituir outras máquinas usuais em determinada função, por isso a sua implementação vai de acordo com o que melhor se adequa ao projeto.

2.4.8. Elementos de um robô industrial

O robô pode ser definido como uma máquina multifuncional capaz de mover objetos, como também possibilita acoplar ferramentas de operação como solda, usinagem, pintura, montagem, etc. Através da programação de sua trajetória por meio de vários conjuntos de ângulos e translações, associados a movimentos angulares e lineares em cada grau de liberdade do robô, e por meio de sensores que dão sinal como referência para o controlador e assim executa uma determinada tarefa repetidas vezes. Um robô industrial atualmente é composto pelos seguintes conjuntos principais, de acordo com (ROMANO, 2002):

- Manipulador mecânico: basicamente é o aspecto mecânico e estrutural do robô. Formado por elementos estruturais rígidos (corpos ou elos) conectados entre si por meio de articulações(juntas);
- Atuadores: são os dispositivos que convertem energia elétrica, hidráulica ou pneumática, em potência mecânica. A potência mecânica gerada é transferida para os elos, provocando seu deslocamento.

- Sensores: fornecem informações de referencial de posição e velocidade dos elos, além da interação entre o robô e as variáveis de operação (força, torque, sistema de visão) à unidade de controle.
- Unidade de controle: responsável por comandar e monitorar parâmetros de operação durante a execução das tarefas. A função de comandar o acionamento aos atuadores são gerados por controladores de movimento (como computadores industriais, CLPs ou placas controladas de passo) e baseados em dados fornecidos pelos sensores.
- Unidade de potência: tem como função fornecer potência necessária para movimentação dos atuadores. Em geral as unidades de potência podem ser uma bomba hidráulica, compressor pneumático ou fonte de energia elétrica que irá fornecer energia necessária para atuadores hidráulico, pneumático e eletromagnético, respectivamente.
- Efetuador: é o componente que será capaz de promover interação da extremidade do terminal do manipulador mecânico e o objeto de trabalho. Assim, o efetuador utilizado pode ser de dois tipos: garra ou ferramenta. A primeira tem como atributo de agarrar e transportar o objeto a uma posição pré-estabelecida, enquanto a segunda tem por prioridade realizar uma ação ou trabalho sobre a peça. Isso inclui operações como soldagem, corte, usinagem, aplicação de pintura, montagem de equipamentos, entre outros.

2.4.9. Tratamento térmico

Há milhares de anos há humanidade vem utilizando os metais e as suas inúmeras aplicações de uso no seu cotidiano. E com isso aprendeu a moldá-lo conforme a geometria desejada e descobriu que aquecendo e resfriando os metais, podem influenciar nas suas propriedades mecânicas, tornando os mais duros, moles, resistentes, frágeis, tenaz e outras características mecânicas. A prática ancestral de utiliza o calor para desenvolvimento de seus produtos, foram aprimoradas ao longo dos anos para que conseguisse controlar e atingir as propriedades mecânicas dos metais que são conhecidas hoje.

O processo de Tratamento Térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento dos metais com o objetivo de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem que altere sua forma final. Em muitos casos, o tratamento térmico

está associado a melhoria no desempenho do material. No entanto, esse processo é muito empregado como um mediador entre outros processos de conformação ou usinagem, pois permite alterar características de fabricabilidade, tais como usinabilidade, estampabilidade ou restauração de ductilidade, após intenso trabalho de conformação a frio. Portanto, percebe-se que o tratamento térmico pode ser entendido como uma operação que tem por objetivo facilitar outros processos de fabricação como também aumentar o desempenho dos seus produtos através do aumento da resistência mecânica e outras propriedades.

De maneira simples, o tratamento térmico consiste em realizar o controle das seguintes operações aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento, em um determinado intervalo de tempo. Segundo Do Vale (2011), com esse controle é possível obter os seguintes benefícios, a depender do objetivo:

- Remoção de tensões internas.
- Aumento ou diminuição da dureza.
- Aumento da resistência mecânica.
- Melhoria da ductilidade.
- Melhoria da usinabilidade.
- Melhoria da resistência ao desgaste.
- Melhoria da resistência à corrosão.
- Melhoria da resistência ao calor.
- Melhoria das propriedades elétricas e magnéticas.

Dentre os principais tipos de tratamento térmico, tem-se o Recozimento (alívio de tensões), tem por efeito reduzir a dureza, remover tensões e ainda melhorar a tenacidade. Esse tipo de tratamento térmico, normalmente é aplicado após processos de trabalho a frio, em que se tem o endurecimento do material devido ao fenômeno físico de encruamento, como acontece nos processos de conformação à frio. Além dessa aplicação, é muito utilizada no tratamento pós-soldagem a fim de diminuir a dureza de uma zona endurecida e fragilizada. Quando se tem por objetivo, além de aliviar as tensões do material como também recristalizar (refinar o grão do material), e, conseqüentemente, gerar maior homogeneidade nas propriedades, utiliza-se o processo de Normalização.

Além de tornar o material mais dúctil, o tratamento térmico também pode ser utilizado visando aumentar a resistência mecânica do metal, tal como acontece nos processos Têmpera, Revenimento e Tratamentos Termoquímicos. De acordo Ferraresi (2022), a Têmpera consiste em aquecer o aço até a completa austenitização seguido por um resfriamento rápido e assim promovendo a formação de uma estrutura martensítica. A estrutura cristalina formada possui características mecânicas de ser muito dura e assim mais resistente ao desgaste, no entanto pode torna o material quebradiço devido ao aumento da fragilidade.

O processo de Revenimento tem por critério controlar o processo de têmpera, fazendo atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade. Após o processo de têmpera, o metal é submetido ao processo de revenimento, que consiste em aquecer uniformemente o material abaixo da temperatura de austenitização e deixa-lo por um tempo suficiente para equalização da temperatura e obtenção de características desejadas. Por fim, é valido destacar que existe os tratamentos termoquímicos, que consistem em enriquecer a superfície do metal com algum elemento químico, realizando o controle de temperatura e tempo do soluto em contato com a peça, e assim obtendo peças de alta resistência, os solutos mais comuns são o carbono, nitrogênio e boro.

2.5. *Should Cost*

Na maior parte dos modelos de negócio atuais depara-se com a pergunta: quanto esse projeto ou investimento custará para o bolso da empresa? Partindo dessa premissa, impulsionados a estimar resultados futuros, os gerentes e projetistas utilizam uma ferramenta contábil conhecida como *Should Cost*. Através dessa metodologia, é possível que o analista do modelo consiga realizar uma estimativa do valor total de se fabricar uma única unidade do produto almejado, para um determinado período, considerando uma economia estável.

É interessante pontuar que essa metodologia foi desenvolvida a partir do interesse do Departamento de Defesa dos EUA em auxiliar os oficiais na aquisição de materiais para as unidades de defesa a um preço justo e condizente, garantindo um controle eficiente dos gastos. A partir desse conceito inicial, as empresas, desafiadas a buscar constantemente melhorias em seus processos e impulsionadas a tomar

decisões mais assertivas sobre seus investimentos, passaram a adotar o método antes da execução de suas operações.

Além de ser uma ferramenta de negociação, pois permite a empresa discutir valores com o fornecedor com base em uma estimativa de custos de fabricação. É implícito, que investidor tem por interesse em saber a projeção de receitas de se produzir ou entregar algum tipo de serviço, assim, o *Should Cost* consegue eliminar as ineficiências do processo e otimizar o custo do produto e verificar a viabilidade econômica. Em geral, as empresas estão sempre em constante transformação, de forma a sobreviverem no mercado perante a forte concorrência, por isso a necessidade de sempre calcular o próximo passo.

Por meio do *Should Cost*, o empreendedor consegue negociar valores com os fornecedores de forma a obter melhores preços, tendo em vista que esse modelo será posto como uma informação em que o empreendedor poderá confrontar com as propostas dadas pelos fornecedores. E por fim, por meio dessa análise é possível tomar conhecimento dos possíveis riscos de produção além de vantagens e rentabilidade do processo.

2.5.1. Fundamentos básicos de contabilidade industrial

Para que seja possível atingir o objetivo proposto pelo *Should Cost*, é imprescindível o entendimento de alguns conceitos contábeis, de modo a definir e identificar os possíveis gastos com o projeto em questão. Como nas normas nacionais e internacionais, que padronizam o modo de utilizar, projetar, analisar, dentre outros feitos, a contabilidade determinou conceitos de forma a padronizar os processos contábeis administrativos.

As terminologias gastos, despesas e custos frequentemente são tratadas como sinônimos, no entanto no mundo contábil esses termos possuem algumas diferenças fundamentais que os distinguem. O primeiro termo a ser conceituado são gastos, segundo Martins (2003), trata-se de compra de um produto ou serviço que seja, e que gera algum dispêndio financeiro, geralmente representado por algum compromisso de enviar ativos (normalmente dinheiro) para a entidade a quem você está solicitando.

Enquanto despesas, entende-se todos os gastos necessários para a geração de receita. Assim, não existe receita sem que haja antes gastos (CUNHA, 2011). São gastos, por exemplo, destinados às fases de administração, comissão de vendas,

impostos sobre vendas e salários administrativos. Enfim, estão relacionados a atividades separadas da produção dos bens e serviços, durante as operações de comercialização (BORGES, 2015).

Para o planejamento e execução do *Should Cost* industrial é imprescindível definir e categorizar os custos necessários, tendo em vista que custo é todo gasto relativo a bem ou serviço utilizado para promover a produção de outros bens ou serviços (MARTINS, 2003). Para compressão do conceito, como exemplo, tem-se a matéria prima, ela foi um gasto para sua aquisição, e, portanto, tornou-se imediatamente um investimento, ou seja, gasto que tem por objetivo gerar retorno lucrativo futuro. Entretanto, a partir do momento que essa matéria prima sai do estoque para ser consumida e gerar produto, tem-se o custo que é quando o gasto se torna integrante ao valor agregado do produto. Outro exemplo, é a energia elétrica que também é um gasto, no entanto, a partir do momento que ele passar a ser usada na confecção do produto, ela se torna um custo de produção.

2.5.2. Classificação dos tipos de custos

Os custos podem ser classificados quanto a sua relação com o produto ou bem produzido, podem assim serem distinguidos em diretos e indiretos relacionado a dificuldade em atribuir aquele valor ao produto. E também, podem ser classificados em fixos e variáveis, como o próprio nome sugere é levado em conta a variação do custo devido a variação de uma atividade numa unidade de tempo.

A primeiro entendimento é quanto a facilidade de atribuição do custo, o tipo de custo direto é quando o gasto está relacionado diretamente a confecção do produto, e assim, podendo ser usualmente medido por uma unidade de consumo Borges (2015), como exemplo, quilogramas de matéria prima consumida, horas mão de obra, etc. Já em relação a custos indiretos, não são facilmente identificados aos bens ou serviços, é difícil atribuir um valor a cada unidade produzida, a exemplo, tem o aluguel do espaço alocado, o salário das chefias, marketing, etc.

Outra classificação, refere-se aos custos que variam a depender do volume de produção por uma unidade de tempo, ditos custos fixos e variáveis. Quando o gasto permanece constante, independente do montante produzido em determinado período, ele é identificado como custo fixo Cunha (2011), a exemplo, é o valor do aluguel que é pago mensalmente, apesar de ocorrer variações, é um valor contratual que o

empreendedor tem por responsabilidade quita-lo periodicamente, como também salários que seguem a mesma lógica. Já em relação a custos variáveis, como o próprio nome sugere, diz respeito aos que variam a depender do volume de produção, a título de exemplo, matéria prima e energia elétrica, que são diretamente proporcionais ao aumento e decréscimo de produção.

Para atingir o objetivo proposto desse trabalho que é realizar a análise de custos, será necessário montar a linha de produção para cada um dos componentes da prótese para artroplastia total do joelho. E assim, através desse layout do fluxo de processos, definir todos os custos necessários (diretos e indiretos), tais como composição da matéria prima, qual maquinário será utilizado, quantos colaboradores serão necessários. Em seguida, trazer todos dados estipulados para a ferramenta Excel e levantar discussões sobre os resultados obtidos.

3. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo proposto desse trabalho que é realizar a análise de custos, será necessário montar a linha de produção para cada um dos componentes da prótese para artroplastia total do joelho. E assim, através desse layout do fluxo de processos, definir todos os custos necessários (diretos e indiretos), tais como composição da matéria prima, qual maquinário será utilizado, quantos colaboradores serão necessários. Em seguida, trazer todos dados estipulados para a ferramenta Excel e levantar discussões sobre os resultados obtidos.

3.1. Composição do material e dimensões

Com base nas informações apresentadas sobre as principais ligas metálicas utilizadas para esta aplicação, que incluem Titânio e suas ligas, Aços Inoxidáveis e ligas de Co-Cr-Mo, foi escolhido o material Co-Cr-Mo, mais especificamente a liga ASTM F75. Dentre as características analisadas, levou-se em conta a excelente tolerância do corpo humano, atribuída à sua resistência à corrosão em fluidos fisiológicos, característica essencial para a durabilidade e a redução da rejeição ou de reações adversas, além de não ser magnética. Além disso, possui alta resistência à tração e à fadiga.

Por fim, um dos principais fatores que diferenciam esta liga das demais é sua relativa facilidade de fundição, aliada à excelente resistência ao desgaste, resultado de sua alta dureza, característica fundamental para a conservação da prótese de joelho a longo prazo (ROCHA, 2017). Outro aspecto determinante é o melhor custo-benefício da liga de Co-Cr-Mo, pois apresenta um custo inferior ao das ligas de titânio, seu principal concorrente em termos de propriedades mecânicas, além de oferecer durabilidade e resistência mecânica significativamente superior em comparação ao aço inoxidável.

Um aspecto importante que precisa ser analisado é a composição química das ligas de cobalto-cromo que influencia diretamente seu desempenho em implantes ortopédicos. O cromo, por exemplo, tem uma característica fundamental na resistência ao desgaste e à corrosão, pois forma uma camada protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície do material, diminuindo a degradação corrosiva. Além disso, o cromo interage com o carbono para formar carbonetos de cromo, como

$M_{23}C_6$, M_7C_3 e M_3C_2 , que reforçam a estrutura da liga e aumentam sua durabilidade (ROCHA, 2017).

Outros elementos também desempenham funções essenciais na melhoria das propriedades dessas ligas. O molibdênio tem função de aumentar a resistência a corrosão devido uma camada protetora formada na superfície do metal, assim dificultando que fluidos corporais penetre no implante. Outra característica relevante é o refino dos grãos, que se tornam mais uniformes. Esse efeito ocorre quando o molibdênio é adicionado ao metal fundido, formando um composto com o carbono. Esse composto atua como núcleo durante a solidificação do metal, contribuindo para a formação de grãos menores, o que resulta em maior dureza e resistência (ROCHA, 2017). Outro elemento importante é o tungstênio, que, em conjunto com o molibdênio, melhora a resistência da matriz. Isso ocorre porque seu grande raio atômico dificulta o deslocamento do fluxo entre o soluto e o átomo, aumentando a estabilidade estrutural do material (ROCHA, 2017).

O níquel também exerce um papel crucial na composição dessas ligas, pois reforça a resistência à corrosão e possibilita o endurecimento do material por meio da formação de soluções sólidas. Dessa forma, a combinação desses elementos faz com que as ligas ASTM F75 e suas variações sejam altamente adequadas para implantes ortopédicos, garantindo não apenas durabilidade, mas também um desempenho mecânico eficiente e seguro para os pacientes (ROCHA, 2017). A tabela abaixo, descreve a percentagem de composição para cada elemento químico formado da liga ASTM F75.

Tabela 2 - Composição química da liga ASTM F75 (DAVIS, 2003).

Designação ASTM	Designação Comercial	Co	Cr	Mo	Ni	Fe	C	Si	Mn	W	P	S
F 75	Vitallium; Haynes 21	Bal.	21,0 - 30,0	5,0 - 7,0	1,00	0,75	0,35	1,00	1,00	0,20	0,02	0,01

Já a parte meniscal é feita de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). Na confecção do componente meniscal das próteses de joelho, a escolha ocorre devido às excelentes propriedades mecânicas, como a alta resistência ao desgaste e a redução do atrito durante os movimentos articulares, conforme descrito

por Silva (2019). A biocompatibilidade do UHMWPE é outra característica importante, pois, durante a aplicação, diminui os riscos de inflamação e rejeição no organismo (SILVA, 2019).

No entanto, a utilização do UHMWPE gera desafios relacionados ao desgaste progressivo, que pode levar à osteólise, liberando micropartículas absorvidas pelos macrófagos e desencadeando a liberação de citocinas pró-inflamatórias, impactando negativamente a regeneração do tecido ósseo. Para mitigar esses efeitos, foram desenvolvidas técnicas de processamento, como a reticulação induzida por radiação e agentes químicos, além de processos como a refusão e o recozimento, resultando em gerações de UHMWPE altamente reticulado (HXLPE), com menor taxa de desgaste (SILVA, 2019).



Figura 11 - Representação a osteólise induzida pelas partículas provenientes do desgaste do UHMWPE (SILVA, 2018).

Entretanto, o aumento da reticulação pode diminuir a resistência à fadiga, um fator preocupante nas próteses de joelho devido às elevadas tensões e à complexidade dos movimentos articulares. Estudos sugerem que a adição de antioxidantes, como a vitamina E, pode melhorar significativamente a resistência à fadiga e ao desgaste do material, tornando o UHMWPE uma opção promissora para artroplastias de joelho (Holland et al., 2018). Apesar de suas vantagens, o UHMWPE também apresenta desafios, como o desgaste progressivo, a baixa resistência à temperatura, o processamento complexo, o custo elevado, a degradação mecânica e os riscos de rejeição ou inflamação. Esses fatores devem ser considerados ao escolher o UHMWPE para uma aplicação específica (SILVA, 2019).

Para determinar as dimensões dos componentes femoral, tibial e meniscal, foi utilizado o catálogo Rotaflex como referência. A partir das informações contidas neste catálogo, foram calculados os volumes dos três componentes. Em seguida, com base nos volumes obtidos, foram calculados os pesos das partes femoral e tibial. Esse processo permitiu uma análise precisa e detalhada das características físicas essenciais para a composição da prótese. Este procedimento foi detalhado e visualizado na tabela 3, que apresenta de forma clara os volumes e dos componentes analisados.

Tabela 3 - Detalhamento do dimensionamento de peso e volume para cada componente da prótese.

Parte	Medidas (cm)	Fórmula	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Peso(g)
Femoral	6,4 x 5,4 x 1	Comprimento x Largura x Espessura	34,56	8,4	290,3
Tibial	6,7 x 4,2 x 1	Comprimento x Largura x Espessura	28,14	8,4	236,38
Meniscal	Raio = 3,35; Espessura = 0,9	$\pi \times (3,35)^2 \times 0,9$	31,73	0,92	29,35

Com base nos cálculos aproximados, o componente femoral, com um volume de 34,56 cm³ e a densidade da liga CoCrMo, resultou em um peso de aproximadamente 290,3 g. Já a parte tibial, com um volume de 28,14 cm³, apresentou um peso estimado de 236,38 g. O componente meniscal, fabricada em UHMWPE, um polímero de baixa densidade (0,92 g/cm³), teve seu peso calculado em 29,35 g. Dessa forma, o peso total do conjunto protético é de aproximadamente 555 g, um fator relevante para a biomecânica da articulação e o conforto do paciente. Além disso, o peso encontrado está dentro dos limites de um membro natural, garantindo uma adaptação adequada e minimizando impactos na mobilidade do usuário.

3.2. Linha de produção para componente femoral e tibial

Para a escolha do método de fabricação possível para a produção dos componentes femoral e tibial, é importante ressaltar que cada fabricante possui seu “know-how” e, assim, cada um defenderá que seu processo de fabricação é o melhor, apresentando suas vantagens. No entanto, segundo Leite (2014), a fundição é destacada como um processo ideal, pois apresenta custos de fabricação reduzidos e o produto final está próximo das especificações finais. Portanto, optou-se pelo processo de fundição por cera perdida, amplamente utilizado em indústria automobilística, aeroespacial, eletrônica, agrícola, mecânica, petroquímica, joalheria e também ortopédica, foco deste trabalho. O processo por cera perdida tem uma importante característica que é a possibilidade de utilizar um catálogo ilimitado de liga ferrosas, não ferrosas e ligas leves, na produção de peças de alta complexidade com excelente acabamento superficial.

Além desses benefícios, destaca-se a eliminação de desperdícios, haja vista que obtém peças do tamanho desejado, sem a necessidade de processos intermediários como usinagem ou conformação, como também, é um processo de alta repetibilidade, que garante homogeneidade das peças produzidas. Quanto as desvantagens, devido ao fato de ser um processo de muitas etapas, que requer um molde resistente, e, portanto, vários passes repetitivos, ocasiona lentidão, dessa forma não é ideal para grandes volumes de produção. Além de exigir um alto nível de controle, é necessário monitorar todas as variáveis do processo de fundição e as condições atmosféricas para evitar defeitos de fabricação.

Sendo assim, comparando-se o processo de cera perdida com os demais processos de fabricação existente viu-se que esse processo é muito eficiente para a aplicação em uma pequena indústria de prótese. Em relação a suas vantagens mais atraentes para aplicação no estudo de caso, foi levado em conta a complexidade da peça produzida, custos, possibilidade de empregar inúmeras ligas não ferrosas. Em confrontação a um método muito comum e amplamente utilizado que é a usinagem, este tipo de operação acarretaria menor volume de produção, pois o processo de transformar o bloco em peça final é demorado, além de gerar maiores custos hora-máquina, outra questão muito importante é o valor de investimento inicial que é muito mais dispendioso do que o método de cera perdida.

Em perspectiva a outro processo muito comum na indústria, o forjamento, este possui alguns aspectos negativos para essa aplicação, como a necessidade de investimento maior, principalmente devido a necessidade de várias matrizes para conformação gradual até chegar no produto final. Como também, uma necessidade maior de processos intermediários para acabamento final da peça. Apesar de seus produtos apresentarem resistência mecânica e tenacidade maiores, devido ao encruamento, o processo de cera perdida consegue atingir propriedades mecânicas suficientes as exigidas para aplicação em questão (ROCHA, 2014).

Em passo, antes de realizar uma análise de custos, é necessário compreender e definir todas etapas do processo. Portanto, foi idealizado e mapeada a operação através dos fluxogramas abaixo. É importante destacar que as etapas do processo é o mesmo para o componente femoral quanto tibial, e cada processo realizado tem se um subproduto até chegar à peça final, inclusive foi subdivido em etapas para melhor compreensão:

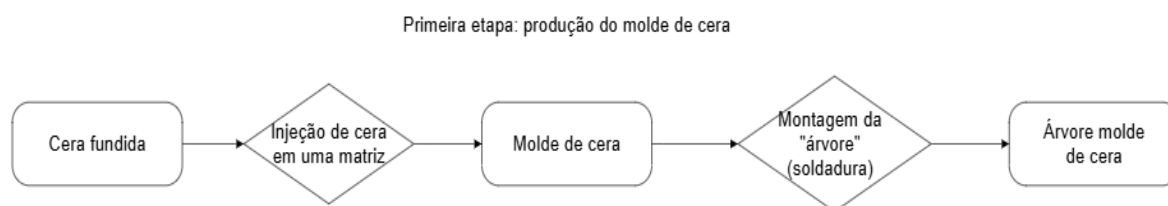


Figura 12 - Fluxograma da primeira etapa para produção do molde de cera.

Nessa primeira etapa, teve como objetivo a produção do molde de cera para produção do componente. Esta etapa utiliza uma máquina de injeção semiautomática de cera sob pressão, utilizando cera virgem Cerita. As matrizes geralmente são produzidas a partir de ligas de alumínio ou aço e fabricadas por usinagem, conforme a American Foundrymen's Society (1993). Além disso, ela é projetada com uma sobredimensão para compensar a contração da cera após a injeção da cera e também do metal em processo posterior. Vale salientar, que na indústria existem empresas especializadas em produzir moldes, como não é o intuito detalhar a produção de matrizes, não será discutido esse assunto. Para atender as diversas anatomias de pacientes, esta pequena indústria idealizada terá que compor de várias matrizes disponíveis.

Com o molde de cera em mãos, os operadores retiram as rebarbas das réplicas produzidas, em seguida, os modelos obtidos por injeção são soldados uns aos outros conectados por um canal ou rede, e assim formar a árvore modelo. Esta rede servirá de caminho para que o metal flua suavemente para preenchimento da cavidade do molde em etapa posterior. Para análise de custos foram consideradas a fabricação de uma árvore para agregar 32 moldes para o componente femoral, e uma árvore com 32 moldes para o componente tibial.



Figura 13 - Árvore montada com 32 moldes femorais de cera, em destaque o pino para extração de cera no molde cerâmico (MACHADO, 2018).

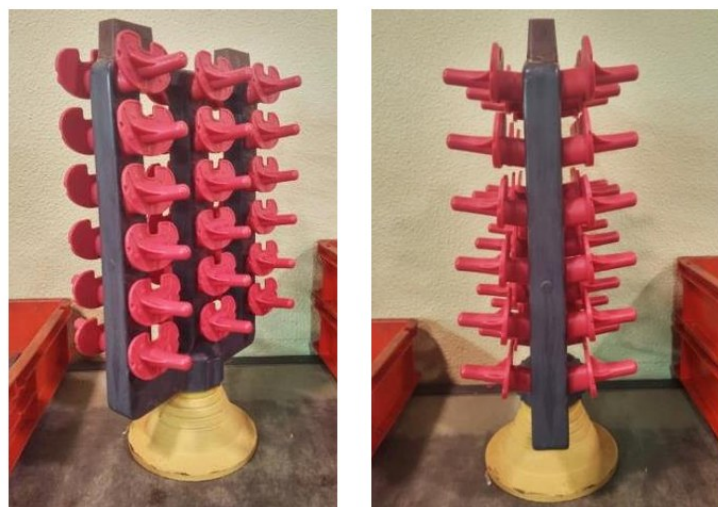


Figura 14 - Árvore montada com 36 moldes tibiais de cera (ROCHA, 2014), é relevante observar que o sistema utilizado comportará 32 moldes, portanto essa imagem é meramente ilustrativa.

A etapa seguinte tem por objetivo a produção do molde cerâmico submetido a sucessivas camadas de material refratário (MACHADO, 2018). Conforme o fluxograma abaixo:

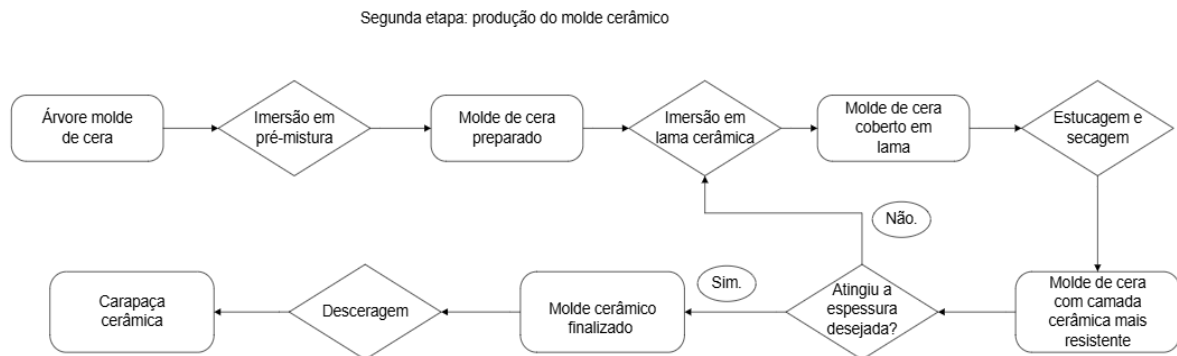


Figura 15 - Fluxograma da segunda etapa para produção do molde cerâmico.

Antes de iniciar a imersão da árvore de cera na lama cerâmica, inicialmente realiza-se um pré-mergulho em uma solução com água, molhante e antiespumante. De forma, a melhorar a aderência do material refratário sobre toda a superfície do molde de cera (MACHADO, Catarina, 2018). Assim sendo, esse molde passa estar apto a receber a camada de lama-cerâmica, o operador então mergulha o molde em um reservatório realizando a movimento de rotação de maneira a cobrir uniformemente toda a superfície. A seguir, o molde segue para a estucagem, que consiste em aplicar partículas de estuco sobre o cacho, semelhante a um chuveiro, entretanto com particulares de areia. E, posteriormente, é armazenado em um local de baixa umidade e com circulação de ar, de forma a secar e enrijecer a camada.

O processo de imersão e formação de camada cerâmica se repete geralmente por aproximadamente 6 a 9 vezes, portanto foi determinado para esse estudo de caso repetir 8 vezes, a fim de atingir uma espessura suficiente rígida para suportar tensões de manuseio, pressões de desceragem e às forças (físicas e térmicas) do metal durante o vazamento (MACHADO, Ioná, 2005). A imagem abaixo ilustra, como seria um depósito com várias moldes em diferentes fases de camada.



Figura 16 - Depósito com moldes em diferentes fases de recobrimento cerâmico. Disponível em:
<<https://omnidexmining.com/>>

Ao atingir a espessura adequada de revestimento cerâmico, o molde segue para retirada da parafina, processo conhecido como descerificação. Nele utilizara-se de um equipamento conhecido como autoclave de vapor de água, empregando uma temperatura de 185°C a uma pressão de 9 bar, por cerca de 15 minutos (MACHADO, Catarina, 2018). Esta etapa é o primeiro teste de tensão na carapaça, provocada pela expansão da cera, ocasionalmente pode aparecer fissuras, por isso é um processo minucioso que deve se ater sempre as especificações de espessura e condições na autoclave. Nessa etapa, a cera é derretida e extraída quase por completo, vale salientar que o pino colocado anteriormente será o ponto de extração nesse estágio. É interessante pontuar também, que a cera pode ser reutilizada se filtrada e eliminada as impurezas do processo.

Por conseguinte, obteve-se o molde pronto para receber o metal líquido e partir para etapa de produção da peça de fato. Conforme o fluxograma abaixo:

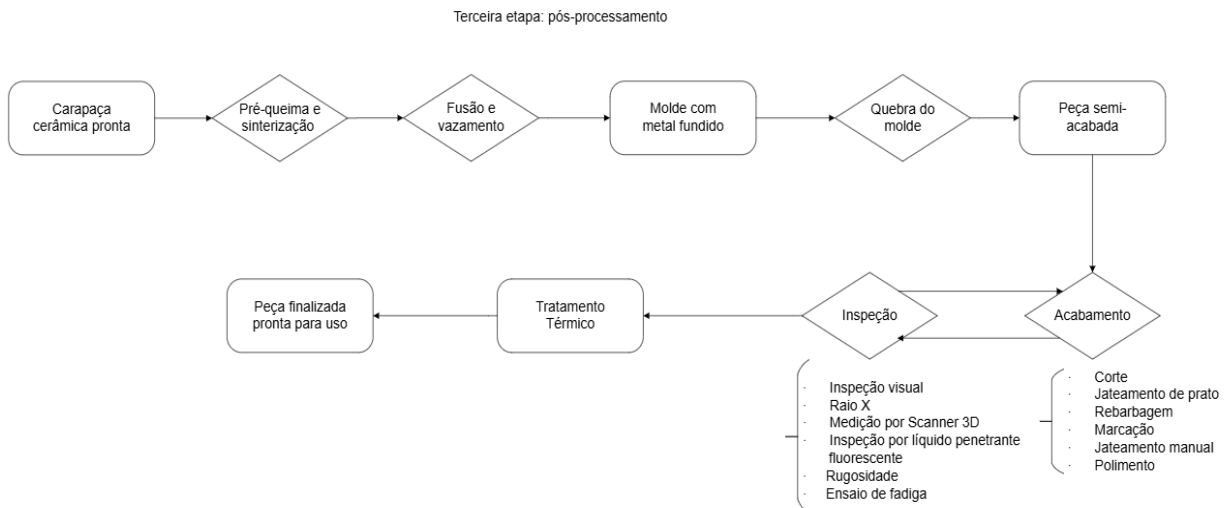


Figura 17 - Fluxograma da terceira etapa para produção da peça metálica.

A carapaça cerâmica a fim de aumentar a resistência e eliminar toda a cera, o molde então passa por uma pré-queima há uma temperatura de 900 a 960 °C durante 1 hora e meia (MACHADO, Catarina, 2018). Após a remoção, o molde é colocado em um forno rotativo com o intuito de reforçar estruturalmente e também realizar um pré-aquecimento e seguido imediatamente para recebimento do metal fundido. O vazio é então preenchido uniformemente com metal fundido através da rede de canais da árvore no molde. Essa fase é a mais crítica desse processo de fabricação devido as chances de ocorrer os defeitos de fundição como cristalização desordenada, contração de volume, concentração de impurezas e poros. Por isso, a necessidade de controlar taxa de resfriamento, tamanho do bocal do molde, canais de distribuição, geometria do molde, etc. Pós-resfriamento, utiliza-se um martelo pneumático para retirar da camada cerâmica, e assim, com a peça semiacabada resta fazer os acabamentos e inspeção até atingirmos as características geométricas desejadas.

A primeira etapa de acabamento consiste em separar a árvore em 4 subcomponentes com 8 componentes femorais cada, utilizando uma ferramenta de corte. Em seguida, essas peças são passadas para o processo de jateamento, para estudo de caso foi utilizado uma grenalhadora de prato para retirada dos resíduos de cerâmica que restaram, é interessante utiliza-la em quatro posições diferentes (MACHADO, Catarina, 2018). Essa etapa, tem como intuito fazer o jateamento dos resíduos grosseiros, em seguida, é feito o corte individualizado separando os componentes da árvore, para dar os acabamentos finais.

O primeiro passo para dar os refinamentos finais é remover as rebarbas presentes, isso será feito de forma manual por meio de uma motoesmeril, logo após, segundo a norma NBR ISO 22523 é obrigatório identificação do lote para rastreabilidade do produto, algumas informações devem ser gravadas na prótese, para isso utilizara-se de uma máquina de gravação à laser. Prosseguindo, novamente é feito o jateamento, porém de forma manual, para retirada de resíduos ainda presentes em cavidades. A peça em seguida passa por um processo de inspeção via Raio X, para identificação de defeitos internos, e assim uma etapa de polimento e inspeção visual do operador. Adiante, é realizado mais etapas de controle de qualidade como a inspeção por líquido penetrante fluorescente a fim de detectar descontinuidade superficiais como trincas, fissuras e porosidade, que podem comprometer a integridade da peça.

Além de também, utilizar um equipamento de medição ótica nesse caso utilizou-se um scanner 3D de luz estruturada, para verificação de dimensões e tolerâncias de projeto. A escolha desse equipamento teve como critério sua melhor acuracidade, ideal para peças menores e complexas frente a outros métodos, além de possuir menor tempo de medição (MARTIN et al., 2021). Por fim, ao passar pelo controle de qualidade, o componente vai para o último estágio que é o tratamento térmico de solubilização, com o intuito de melhorar valores de ductilidade e resistência mecânica (GORITO, 2019). A peça então pode ser embalada e armazenada para pronta entrega. Vale ressaltar, que alguns lotes de peças são selecionados para realização de testes para ensaio de fadiga, desgaste e tração de corpos de prova de mesmo material.

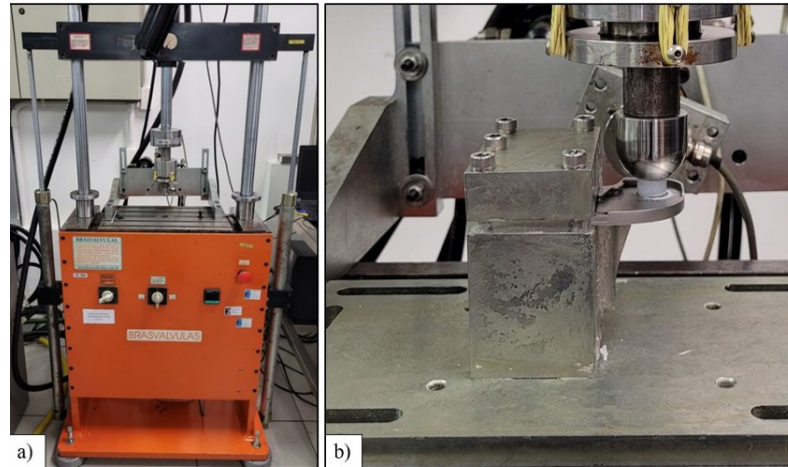


Figura 18 - Configuração de ensaio de fadiga para platô tibial segundo a norma ASTM F1800 (SÁ, 2022).

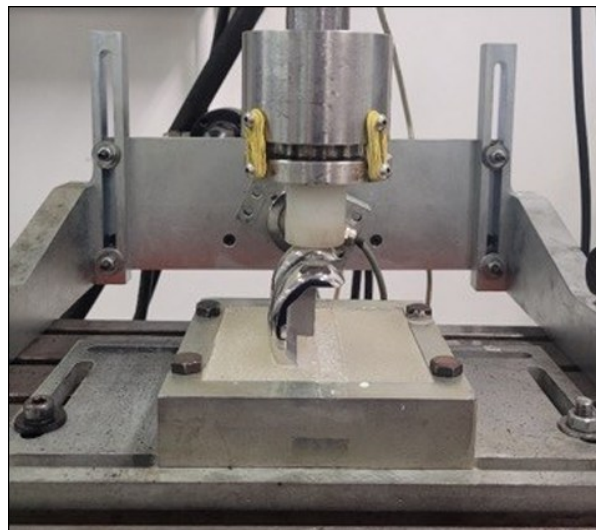


Figura 19 - Configuração de ensaio de fadiga para componente femoral, segundo a norma ASTM F3210 (SÁ, 2022).

3.3. Linha de produção para componente inserto meniscal ou espaçador articulador

A escolha do processo de fabricação do inserto meniscal teve como base o material de fabricação, o polietileno de alta densidade molecular (UHMWE). Que devido ao fato de ser material polimérico e de alta resistência, não é aplicável qualquer tipo de processo como injeção, sopro ou extrusão (KURTZ, 2016). Destarte, os métodos de fabricação para este material são os de moldagem por compressão e suas

variações como compressão por termoprensagem, ou também extrusão por pistão, que dentre os vários produtos são obtidos chapas, blocos e tarugos, ou por outras vias tradicionais utilizar o processo de usinagem.

Para uma pequena indústria de próteses foi proposto utilizar o processo de usinagem, como método de fabricação do componente polimérico espaçador articulador. A escolha desse método foi baseada em alguns fatores, como: o material polimérico, que exige menos do ferramental de usinagem, embora seja necessário um controle rigoroso do processo, com o uso de fluido de corte e baixas velocidades para evitar dilatação térmica. Outro critério importante foi o baixo volume de produção, que se destacou como o principal fator decisivo. Conforme Zhang et al. (2012), para projetos de baixa escala e alta precisão dimensional, os custos envolvidos em processos de moldagem — especialmente na aquisição de maquinário adicional e moldes — não se justificam. Além disso, esse método permite a combinação de desbaste e acabamento em uma única máquina, reduzindo o investimento necessário, outro ponto é que tarugos cilíndricos desse material estão disponíveis comercialmente em vários diâmetros.

Dentre as vantagens do processo, deve-se salientar que esse processo permite fabricar qualquer tipo de padrão de espaçador, como também ser possível um melhor controle de rugosidade da superfície. Anteposto ao custeio fabril, faz-se necessário analisar e mapear as etapas do processo, para que posteriormente possa determinar quais equipamentos que serão essenciais para cada estágio, além de ter uma dimensão de todo processo. Posto disso, foi proposto um fluxograma simplificado para representação do processo de fabricação do componente espaçador.

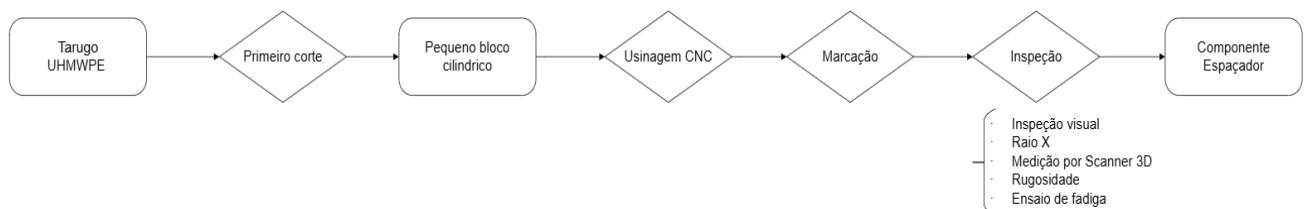


Figura 20 - Fluxograma para fabricação do componente espaçador.

Para fabricação da componente espaçador, inicialmente é necessário conhecer duas dimensões iniciais como máxima largura e espessura da peça. E através dessas especificações iniciais escolher o diâmetro do tarugo a ser adquirido e também a

espessura para primeiro seccionamento em peças menores, para posterior usinagem. Como descrito pelo fluxograma, inicialmente o tarugo passa por um primeiro corte, que pode ser feito de forma manual pelo operador utilizando uma máquina de corte. Em seguida, esse cilindro segue para fixação nos gabaritos.

Com o objetivo de ter uma produção maior, vários cilindros são fixados na mesa de usinagem, considerando o encaixe de 16 cilindros, ou seja, 16 peças prontas para cada setup. O processo de usinagem envolve toda uma análise e um roteiro de fabricação a ser seguido, para o projeto foi escolhido um robô CNC para usinagem. Para efeitos comparativos com uma máquina CNC, vale ressaltar os seguintes fatores: o espaçador é um componente que possui superfícies curvilíneas inclinadas e que, portanto, pelos métodos convencionais, necessitaria de uma CNC de 5 eixos. No entanto, foi escolhido um equipamento amplamente utilizado no mercado atualmente: um robô industrial ou braço robótico CNC.

A seleção desse maquinário, em contraste com uma máquina CNC convencional deveu-se ao critério de custos para investimento, atualmente, um braço robótico para usinagem no mercado pode encontrar em valores mais acessíveis que uma CNC de 5 eixos, e seguramente um braço robótico conseguiria usinar polímeros, que são materiais mais maleáveis que a maioria dos metais, e atingir as tolerâncias exigidas. Vale destacar algumas vantagens desse material, como flexibilidade, o braço robótico consegue usinar múltiplas tarefas e trabalhar com uma gama de variedade de produtos. O fato é que, embora, de forma geral, a comparação entre as melhores máquinas de robótica e os melhores equipamentos CNC revele que as máquinas CNC apresentam, em média, maior precisão e superioridade no acabamento, isso não diminui o mérito da qualidade de acabamento proporcionada pelos braços robóticos.

A tabela abaixo destaca os principais pontos que levam optar a robótica para usinagem, verifica-se que seu uso na usinagem é favorecido por dois aspectos principais produtividade e redução de custos:

Tabela 4 - Principais aplicações de robôs na indústria e as principais razões de sua implementação (HORIKAWA et al., 2002).

Aplicação	Exemplos	Habilidades do robô que justifica o seu uso			Benefícios primários da utilização de robôs			
		Transporte	Manipulação	Sensoriamento	Melhora da qualidade do produto	Aumento de produtividade	Redução de custos	Eliminação de trabalhos perigosos ou desagradáveis
Manipulação de materiais	Manipulação de componentes / Paletização / Transporte / Tratamento térmico.	X					X	X
Carregamento de máquinas	Máquinas de fundição em molde / Prensas Automáticas / Máquinas de usinagem / Tornos.	X	X			X	X	
Pulverizador	Pintura por pulverização / Aplicação de resinas.		X		X		X	X
Soldagem	Soldagem a ponto / Soldagem a arco.		X			X	X	X
Usinagem	Furação / Desbaste / Retífica / Remoção de cavaco / Conformação.		X	X		X	X	
Montagem	Encaixe / Fixação.		X	X		X	X	
Inspeção	Controle de posição / Tolerância.			X	X			

A segunda etapa consiste no processo de usinagem CNC através de um braço robótico CNC, para entendimento do planejamento proposto para fabricação da peça polimérica será utilizado como base de estudo o fluxograma utilizado pelo (ALONSO, 2012). Em seu trabalho fez um estudo sobre usinagem de robótica industrial, de forma geral ele evidencia o fluxo do desenho desenvolvido por uma ferramenta gráfica de CAD até a fabricação do componente, utilizando-se ferramentas CAM para auxílio e tradução de comandos e tarefas programados.

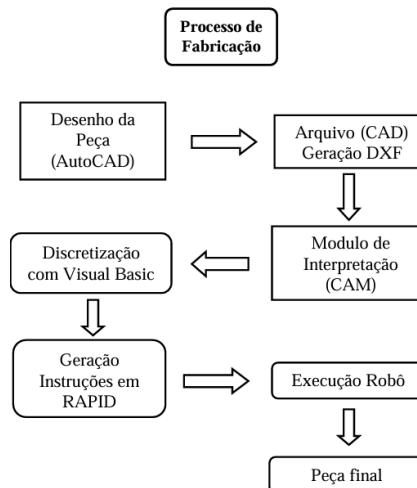


Figura 21 - Fluxograma de etapas para usinagem com braço robótico (ALONSO, 2012).

Inicialmente conhecendo as dimensões da peça, que normalmente são padronizados de acordo com o design de peça que se deseja produzir. O projetista então desenvolve o desenho CAD utilizando algum software como Solidworks ou Autodesk Inventor. Em seguida esse mesmo arquivo CAD é transferido para um formato de arquivo para DXF ou DWG, os mais populares, para entendimento trata-se de arquivos que apresentam sua estrutura de forma binária e compacta, esse arquivo servirá como entrada para o módulo de interpretação CAM.

No módulo de interpretação CAM, este arquivo é traduzido em comandos que serão discretizados para que possam ser compreendidos pelo braço robótico. Os pontos discretizados serão a trajetória do movimento executado pela máquina. Em seguida, a partir desses dados, a ferramenta de Virtual Basic (VB) de programação interpreta o arquivo gerado e prepara-os transformando em coordenadas para que o robô possa interpretar em código RAPID.

O código RAPID gerado pela VB, em resumo é uma linguagem específica para braços robóticos, nas instruções contidas nesse código encontra-se a trajetória definida pelo movimento do braço robótico, além de parâmetros como ferramenta de usinagem, velocidade e parâmetros de corte. Em seguida, o robô executa as instruções determinadas para realizar fresamento ou outros processos de usinagem, para remoção de material e acabamento até a obtenção da peça final. Após essa etapa, utiliza-se uma máquina de gravação a laser para realizar identificação do lote de peças e controle de qualidade.

Em seguida, essa peça pronta passa para etapa final de análise geométrica e estrutural da peça, como inspeção por raio x para defeitos ou falhas internas, medição por Scanner 3D para verificação de suas dimensões, rugosidade através de um rugosímetro óptico. Convém destacar que os testes destrutivos podem ser realizados em amostras selecionadas para garantir a validação do lote de peças. Além disso, a fim de validar o material, são realizados ensaios de fadiga, como ocorre nos componentes femoral e tibial. Também é muito importante realizar o ensaio de desgaste, considerando que esse componente estará o tempo todo em atrito metal-polímero durante o movimento da articulação protética. Para isso, pode-se utilizar o ensaio pino sobre disco, conduzindo milhares de ciclos para avaliar a integridade do material.

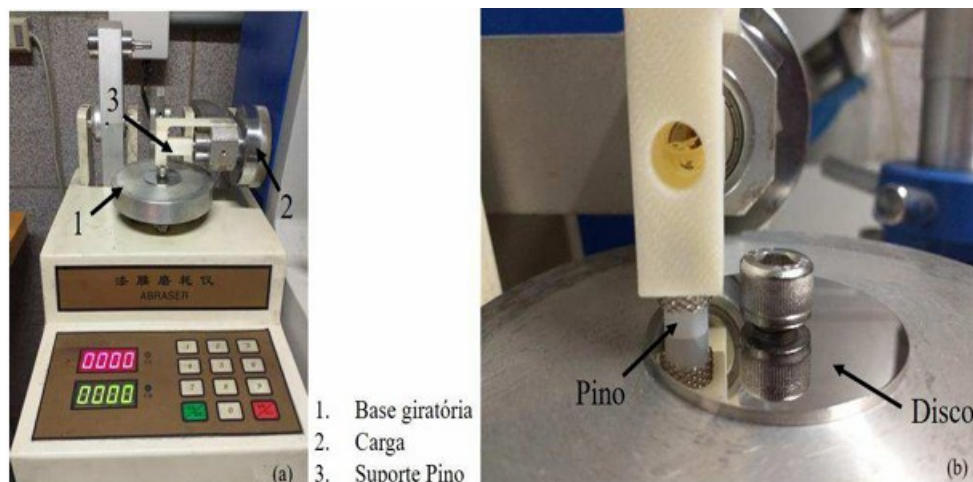


Figura 22 - Equipamento para medição de desgaste conhecido como pino sobre disco, na figura observa-se o disco que seria o par tribológico de material Co-Cr-Mo, a qual em condições de uso estaria em atrito constante (SILVA, 2019).

Por fim, após validação das peças, o componente pode ser vendido comercialmente para as clínicas ortopédicas. Em seguida, para o próximo tópico será discutido a análise de custos de fabricação para o componente completo de artroplastia total do joelho, incluindo matéria prima, investimento em maquinário, mão de obra, marketing, custos de operação, etc.

4. SHOULD COST E DISCUSSÕES

Para dar continuidade à metodologia *Should Cost*, é essencial retornar ao objetivo inicial do projeto. Este estudo tem como propósito principal estimar os custos envolvidos na criação de uma fábrica de pequeno a médio porte voltada à produção de próteses destinadas à artroplastia total do joelho. Nesse contexto, a análise de custos será fundamentada na busca pela melhor relação entre eficiência econômica e qualidade, assegurando a viabilidade da produção aliada ao rigor necessário na qualidade do produto.

Para os próximos tópicos, o *Should Cost* seguirá um roteiro de estudo e estimativas de valores, abrangendo os principais gastos industriais para a implementação de uma fábrica de próteses, alinhado às características iniciais do projeto. Retomando, no tópico de metodologia foi descrito o fluxo de todo o processo de fabricação. Agora, neste tópico, serão analisados os custos envolvidos. Vale destacar, que todos os valores foram cotados em dólares americanos pois é a moeda mais utilizada comercialmente. Antes de tudo, será essencial determinar a capacidade produtiva, pois essa definição será tomada como base para os próximos estágios de estimativa de valores referentes aos custos diretos e indiretos.

4.1. Dimensionamento de capacidade produtiva

A capacidade produtiva é o ponto de partida para determinamos as próximas etapas, defini-la significa dimensionar parâmetros fabris de máquina e mão de obra a fim de chegar nas projeções de quantidade produzida almejada. Para isso, como o desejado é ter uma planta fabril de médio porte, os parâmetros serão ajustados tendo se essa ideia imposta inicialmente.

Nesse cenário, foi realizado o estudo do tempo de fabricação de cada etapa a fim de sabermos quantas peças será capaz de produzir diariamente, tendo como critério a fábrica operar diariamente 2 turnos de 8 horas cada. E, assim, se necessário mudar algum parâmetro como quantidade de máquinas ou funcionários. Como dado inicial, o desejável para uma indústria de pequeno porte seria a produção média de 200 próteses por dia.

A tabela a seguir apresenta uma estimativa do tempo de processamento para cada etapa da fabricação dos componentes femoral e tibial, considerando que ambos

seguem a mesma metodologia de produção. A análise foi realizada com base em vídeos do YouTube e no estudo sobre os métodos de fabricação. Vale ressaltar que, a menos que seja especificada a quantidade de equipamentos ou maquinário, a operação em cada etapa é realizada com uma máquina por vez.

Tabela 5 - Estimativa de tempo de cada etapa e quantas peças podem ser produzidas por ciclo para componente Femoral e Tibial.

Estimativa de tempo de fabricação				
Etapa		Processo	Tempo	Quantidade por ciclo
1º	Etapas gerais	Injeção do molde de cera	00:00:30	1 peça por período
2º		Resfriamento do molde de cera	00:01:00	1 peça por período
3º		Montagem da árvore	00:40:00	32 peças por período
4º		Imersão em pré-mistura	00:00:20	32 peças por período
5º		Imersão em Lama Cerâmica	00:01:00	32 peças por período
6º		Estucagem	00:01:00	32 peças por período
7º		Secagem	03:00:00	4800 peças por período
8º		Desceragem	00:15:00	160 peças por período
9º		Pré-queima e sinterização	02:00:00	160 peças por período
10º		Fusão e vazamento	00:30:00	160 peças por período
11º		Qubra do molde	00:20:00	32 peças por período
12º	Acabamento	1º Corte	00:01:00	16 peças por período
13º		Jateamento de prato	00:10:00	16 peças por período
14º		2º Corte	00:00:40	1 peça por período
15º		Rebarbagem	00:01:00	1 peça por período
16º		Marcação a laser	00:01:00	1 peça por período
17º		Jateamento manual	00:01:00	1 peça por período
18º		Polimento	00:01:30	1 peça por período
19º	Inspeção	Raio X	00:10:00	32 peças por período
20º		Inspeção po líquido penetrante	00:20:00	16 peças por período
21º		Medição por Scanner 3D	00:15:00	1 peça por período. Considera 3 Scanners, e portanto 3 peças por período
22º		Rugosidade	00:15:00	1 peça por período. Considera 3 rugosímetros, e portanto 3 peças por período
23º	Tratamento Térmico		04:00:00	160 peças por período

A tabela traz todas as etapas necessárias para produção do componente femoral ou tibial, já que são caracterizados pelo mesmo método de fabricação. A coluna esquerda da coluna de tempo, são as etapas de cada processo, o tempo é dado em horas, minutos e segundos respectivamente. O ciclo é uma tarefa que tem início e fim para cada etapa e a quantidade expressada por período refere-se ao

número de peças que podem ser trabalhadas por vez em cada ciclo no determinado estágio.

É importante destacar alguns detalhes em relação ao tempo de cada ciclo, com base em pesquisas e trabalhos de diferentes autores. Segundo Machado (2005), o tempo necessário para a secagem de cada camada é de aproximadamente 3 horas. Rocha (2014) menciona que o tempo de sinterização da camada cerâmica é de 2 horas em forno. Já em relação ao tratamento térmico, Gorito (2019) sugere que 4 horas é um tempo adequado para a solubilização do Co-Cr-Mo. Outro ponto, é que as etapas de 5º a 6º são executadas 8 vezes por árvore molde, haja vista que são dados 8 retoques de lama cerâmica para garantir resistência mecânica suficiente a carapaça. Sobre a quantidade de peças da 7º Etapa, é devido a capacidade de armazenamento em um depósito com ar circulante.

A partir desses dados poderá se prever a capacidade produtiva da fábrica, um método simples seria calcular em qual etapa seria o gargalo produtivo. O termo “gargalo” diz respeito a fase produtiva a qual limita a produção, isto é, o estágio que opera em menor ritmo e conseqüentemente não consegue produzir mais que aquilo sem que otimize ou melhore essa etapa em questão. Frente a esse cenário, foi feito um dimensionamento de quantas peças poderiam ser fabricadas por dia em cada etapa para período de 16 horas, ou seja, a fábrica operando em 2 turnos de 8 horas cada.

Para identificar o estágio com menor ritmo, faz-se necessário analisar a quantidade máxima de peças que seria possível processar em cada fase do processo, considerando-as de forma independente do restante do fluxo de fabricação. Sabendo que 16 horas diárias equivalem a 960 minutos, calcula-se a capacidade máxima de peças que conseguem passar por essa etapa específica. Como exemplo, tem-se a operação de Injeção do Molde de Cera e o processo de Desceragem, considerando as de forma isolada:

1º Etapa – Injeção do molde de cera:

- Tempo por ciclo: 30 segundos = 0,5 min/peça
- Produção por dia:

$$Peças = \frac{960}{0,5} * 1 = 1920 \text{ peças/dia}$$

8º Etapa – Desceragem:

- Tempo por peça: 15 min/160 peças
- Produção por dia:

$$Peças = \frac{960}{15} * 160 = 10240 \text{ peças/dia}$$

Em resumo, tendo em vista que o cálculo segue a mesmo princípio para todas as etapas tem-se:

Tabela 6 - Estimativa de produção diária para cada etapa para produção do componente Femoral e Tibial.

Etapa	Processo		Tempo por ciclo	Produção por dia
1º	Etapas gerais	Injeção do molde de cera	0,5 min/peça	1920 peças/dia
2º		Resfriamento do molde de cera	1 min/peça	960 peças/dia
3º		Montagem da árvore	40 min/32 peças	768 peças/dia
4º		Imersão em pré-mistura	0,5 min/ 32 peças	61440 peças/dia
5º		Imersão em Lama Cerâmica	1 min/32 peças	3840 peças/dia
6º		Estucagem	1 min/32 peças	3840 peças/dia
7º		Secagem	180 min/4800 peças	4800 peças/dia *
8º		Desceragem	15 min/160 peças	10240 peças/dia
9º		Pré-queima e sinterização	120 min/160 peças	1280 peças/dia
10º		Fusão e vazamento	30 min/160 peças	5120 peças/dia
11º		Qubra do molde	20 min/32 peças	1536 peças/dia
12º	Acabamento	1º Corte	1 min/16 peças	960 peças/dia
13º		Jateamento de prato	10 min/16 peças	1536 peças/dia
14º		2º Corte	40 seg/peça	1440 peças/dia
15º		Rebarbagem	1 min/peça	960 peças/dia
16º		Marcação a laser	1,5 min/peça	640 peças/dia
17º		Jateamento manual	1 min/peça	960 peças/dia
18º		Polimento	1,5 min/peça	640 peças/dia
19º	Controle de Qualidade	Raio X	10 min/32 peças	3072 peças/dia
20º		Inspeção po líquido penetrante	20 min/16 peças	768 peças/dia
21º		Medição por Scanner 3D	15 min/3 peças	192 peças/dia
22º		Rugosidade	15 min/3 peças	192 peças/dia
23º	Tratamento Térmico		4 h/160 peças	640 peças/dia

Portanto, verifica-se que o limitador da produção está na etapa de Controle de Qualidade, especificamente na etapa de medição de Rugosidade e Medição por Scanner 3D. Vale ressaltar, que mesmo colocando 3 scanners operando simultaneamente, essa fase continua sendo o “gargalo”, entretanto 192 peças/dia é o suficiente para uma empresa de pequeno-médio porte, e, portanto, atende ao objetivo inicial deste trabalho. A etapa de Controle de Qualidade, sendo a mais demorada, é plausível, pois para o tipo de aplicação exige-se alta precisão e que todas as peças estejam avaliadas em termos de qualidade.

É interessante notar que o processo das camadas cerâmicas (etapa 5º a 7º), sendo executadas oito vezes, não é possível produzi-la em um único dia, entretanto devido ao fato de conseguir armazenar até 4800 peças no depósito, e sabendo que manter uma produção diária de 192 peças por dia, para um mês em regime de trabalho 5x2, equivaleria uma produção média de 3840 peças/mês. Isto é, a produção de 1 dia e meio de moldes abasteceria todo o mês, evidenciando que esta etapa não representa um gargalo no processo produtivo.

Como observado, a produção diária do componente femoral e tibial estabeleceu-se em 192 peças/dia. Agora, será realizado o mesmo estudo para a componente espaçador.

Tabela 7 - Estimativa de tempo de cada etapa e quantas peças podem ser produzidas por ciclo para o componente Espaçador.

Estimativa de tempo de fabricação para componente espaçador				
Etapa	Processo		Tempo	Quantidade por ciclo
1º	Etapas gerais	Corte do tarugo UHMWE	00:01:00	1 peça por período
2º		Usinagem com robô	00:20:00	1 peça por período. Consideram-se 3 braços robóticos independentes e, portanto, 3 peças por período.
3º		Marcação a laser	00:01:30	1 peça por período
4º	Controle de Qualidade	Raio X	00:10:00	32 peças por período
5º		Medição por Scanner 3D	00:15:00	1 peça por período. Consideram-se 3 Scanners e, portanto, 3 peças por período.
6º		Rugosidade	00:15:00	1 peça por período. Consideram-se 3 rugosímetros e, portanto, 3 peças por período.

Com esses dados é possível prever a quantidade máxima prevista que poderia passar em cada etapa, e assim analisar o gargalo produtivo do componente espaçador. Em resumo, tem-se a tabela abaixo:

Tabela 8 - Estimativa de produção diária para cada etapa para produção do componente Espaçador.

Etapa	Processo		Tempo por ciclo	Produção por dia
1º	Etapas gerais	Corte do tarugo UHMWE	1 min/peça	960 peças/dia
2º		Usinagem com robô	20 min/3 peças	144 peças/dia
3º		Marcação a laser	1,5 min/peça	640 peças/dia
4º	Controle de Qualidade	Raio X	10 min/32 peças	3072 peças/dia
5º		Medição por Scanner 3D	15 min/3 peças	192 peças/dia
6º		Rugosidade	15 min/3 peças	192 peças/dia

Dado disso, percebe-se que o gargalo do componente espaçador está justamente em seu principal processo de fabricação: a usinagem. A vantagem é que, com apenas essa etapa de desbaste do material, obtém-se a peça pronta e com alta qualidade. Contudo, como verifica-se é um processo lento, foi demandado 3 braços robóticos para garantir uma produção desejável de 144 peças por dia.

Assim, o principal limitante na produção de próteses para artroplastia total do joelho é o componente espaçador na etapa de usinagem, com uma capacidade de produção de 144 peças por dia, o que equivale a 2.880 peças por mês e cerca de 34.000 peças por ano. Esse volume é suficiente para atingir a meta de produção de uma indústria de porte médio. No entanto, inicialmente para aumentar a produção, seria necessário centralizar os esforços em otimizar ou expandir a produção, por meio de novos investimentos e pela implementação de novas tecnologias tanto na etapa de usinagem quanto na área de Controle de Qualidade.

4.2. Análise de Custos Diretos

Conforme descrito anteriormente, os custos diretos são aqueles relacionados diretamente à fabricação da peça. Entre esses custos, serão analisados o volume de matéria-prima necessário, a mão de obra diretamente envolvida na linha de produção, o cálculo de depreciação do maquinário e os gastos com energia elétrica. Além disso, serão determinados quais custos são variáveis e fixos.

O primeiro custo a ser analisado é o de mão de obra direta. Esse custo engloba todos os trabalhadores diretamente envolvidos na produção, incluindo aqueles responsáveis por operar o maquinário e toda a força de trabalho necessária para concluir o produto ao final do processo. Para determinar a quantidade necessária de operadores, os trabalhadores foram distribuídos em equipes conforme suas áreas de atuação. Nesse contexto, foram criados três tipos de equipes na linha de produção: Etapas Gerais, Acabamento e Controle de Qualidade.

Alguns pontos devem ser levados em consideração: o trabalhador pode realizar suas funções por, no máximo, 8 horas por dia, não podendo exceder esse limite, exceto em casos excepcionais com o devido pagamento pelas horas extras. A sobra de mão de obra ou a ociosidade de um trabalhador pode ser utilizada estrategicamente em situações de ausência, seja por afastamento médico ou férias. Outro ponto, algumas funções ligadas a tempo de espera como Resfriamento do Molde, Secagem e Tratamento Térmico, também foram consideradas como tempo gasto, apesar de conhecimento geral de que esse tempo é ocioso pelo operador. Contudo, essas horas também são entendidas como sobra de mão de obra para situações estratégicas.

Tabela 9 - Tabela com informações de divisão de operadores na fabricação de componente Tibial e Femoral para cada área.

Etapas	Processo		Tempo por ciclo	Tempo para fabrica 72 peças (1 turno) em horas	Área de atuação
1º	Etapas gerais	Injeção do molde de cera	0,5 min/peça	0,6	Equipe EG
2º		Resfriamento do molde de cera	1 min/peça	1,2	Equipe EG
3º		Montagem da árvore	40 min/32 peças	1,5	Equipe EG
4º		Imersão em pré-mistura	0,5 min/ 32 peças	0,01875	Equipe EG
5º		Imersão em Lama Cerâmica	1 min/32 peças	0,0375	Equipe EG
6º		Estucagem	1 min/32 peças	0,0375	Equipe EG
7º		Secagem	180 min/4800 peças	0,045	Equipe EG
8º		Desceragem	15 min/160 peças	0,1125	Equipe EG
9º		Pré-queima e sinterização	120 min/160 peças	0,9	Equipe EG
10º		Fusão e vazamento	30 min/160 peças	0,225	Equipe EG
11º		Qubra do molde	20 min/32 peças	0,75	Equipe EG
12º	Acabamento	1º Corte	1 min/16 peças	0,075	Equipe ACA
13º		Jateamento de prato	10 min/16 peças	0,75	Equipe ACA
14º		2º Corte	40 seg/peça	0,9	Equipe ACA
15º		Rebarbagem	1 min/peça	1,2	Equipe ACA
16º		Marcação a laser	1,5 min/peça	1,8	Equipe EG
17º		Jateamento manual	1 min/peça	1,2	Equipe ACA
18º		Polimento	1,5 min/peça	1,8	Equipe ACA
19º	Controle de qualidade	Raio X	10 min/32 peças	0,375	Equipe CQ
20º		Inspeção po líquido penetrante	20 min/16 peças	1,5	Equipe CQ
21º		Medição por Scanner 3D *	15 min/3 peças	6	Equipe CQ
22º		Rugosidade *	15 min/3 peças	6	Equipe CQ
23º	Tratamento Térmico		4 h/160 peças	1,8	Equipe ACA

Para entendimento, como exemplo, cada atividade foi dividida por equipe, e essa por sua vez foi dimensionada a quantidade de funcionários necessários para executar todas as tarefas. Outro detalhe, a tabela acima foi descrita para um único componente tibial ou femoral, tendo em vista que são processos iguais, o total de horas por área será calculada como o dobro. Além disso, o cálculo foi levado em conta 72 peças por turno, que representa a metade do objetivo de 144 peças diárias, entretanto existe etapas que são necessárias realizar apenas em um turno como Desceragem, Fusão e Vazamento e Tratamento Térmico, haja vista que é possível obter muitas peças em um único ciclo.

Tabela 10 - Tabela com informações de divisão de operadores na fabricação de componente espaçador para cada função.

Etapa	Processo		Tempo por ciclo	Tempo para fabrica 72 peças (1 turno) em horas	Área de atuação
1º	Etapas gerais	Corte do tarugo UHMWE	1 min/peça	1,2	Equipe EG
2º		Usinagem com robô	20 min/3 peças	8	Equipe EG
3º		Marcação a laser	1,5 min/peça	1,8	Equipe EG
4º	Controle de qualidade	Raio X	10 min/32 peças	0,375	Equipe CQ
5º		Medição por Scanner 3D *	15 min/3 peças	6	Equipe CQ
6º		Rugosidade *	15 min/3 peças	6	Equipe CQ

É importante destacar que as etapas que utilizam Scanner 3D e Rugosímetro, necessitam de 3 operadores para cada componente, com tempo programado de 6 horas diárias, afim de atingir as 72 peças por turno. Em resumo, a tabela abaixo mostra a quantidade de horas estimadas que cada grupo de operários realizará ao trabalhar em um turno. Vale ressaltar que esses são os operários que trabalham diretamente na confecção do produto.

Tabela 11 - Quantidade de operários de linha e total em horas que cada grupo realizará para um turno.

Equipe	Operadores	Total em horas
Etapas gerais (EG)	5	25,4525
Equipe Acabamento (ACA)	3	15,45
Equipe Controle de Qualidade (CQ)	19	112,125
Total	27	-

Por conseguinte, segue o quadro de funcionários que trabalham diretamente na linha de produção em dois turnos, incluindo os Team Leaders, que têm a função de ordenar e organizar para que tudo funcione bem durante a operação.

Tabela 12 - Quadro de gastos com mão de obra direta para dois turnos.

Áreas	Qtd	Salário Base	Total
Operários			
Etapas gerais (EG)	10	\$ 500,00	\$ 5.000,00
Equipe Acabamento (ACA)	6	\$ 670,00	\$ 4.020,00
Equipe Controle de Qualidade (CQ)	38	\$ 670,00	\$ 25.460,00
Team Leaders			
Etapas gerais	4	\$ 840,00	\$ 3.360,00
Acabamento (ACA)	2	\$ 840,00	\$ 1.680,00
Controle de Qualidade	4	\$ 840,00	\$ 3.360,00
Total do custo fixo com Mão de Obra Direta (mensal)			\$ 39.520,00

Conforme observado na tabela acima, a etapa de controle de qualidade representa uma parcela significativa dos custos totais. Isso ocorre devido à necessidade de inspecionar cada peça individualmente, somado ao fato de que os processos são predominantemente manuais. Além disso, o cumprimento das normas de qualidade é essencial, considerando que a prótese exerce impacto direto na qualidade de vida das pessoas. Erros de geometria ou nas características do material são inaceitáveis, já que sua correção é impraticável e comprometeria completamente a funcionalidade e a confiabilidade da peça.

Portanto, verifica-se que o valor mensal de salário base pago aos 64 empregados envolvidos diretamente na produção é de \$39.520,00. Porém, esse total não inclui os encargos trabalhistas, como férias, 13º salário, FGTS, encargos de políticas públicas, entre outros. Detalhes estes cruciais que devem ser levados em conta ao contratar um trabalhador, segundo o site da Treasy a soma de todos tributos envolvidos podem chegar a ser cerca de 68,18% do seu salário. Assim sendo, o valor mensal a ser considerado para análise será de \$66.464,74.

O segundo tipo de custo a ser analisado está relacionado à matéria-prima das próteses, demandando um detalhamento dos componentes individuais: as partes femoral, tibial e meniscal. Essa análise considera o volume de cada componente, a densidade do material empregado e o custo associado. A parte femoral apresenta um volume de 34,56 cm³ e peso aproximado de 290,3 g. Já a parte tibial possui um volume de 28,14 cm³ e peso de aproximadamente 236,38 g. O componente meniscal, com

volume de 31,73 cm³ e peso de 29,35 g que também desempenha um papel relevante no custo total.

Os custos unitários dos componentes femoral e tibial foram determinados com base nos pesos dos componentes em relação ao preço do material utilizado (Co-Cr-Mo), fixado em \$50 por kg. Enquanto o cálculo do custo unitário do componente espaçador, foi determinado através do valor do tarugo e de quantas peças podem ser produzidas a partir dele. Por conseguinte, o custo unitário da parte femoral obtido foi de \$14,52, o da parte tibial em \$11,92 e o componente meniscal em \$4,04.

Assim sendo, o custo total da prótese resultante, no que diz respeito a matéria prima, é dada pela soma dos valores de todas as partes, totalizando \$30,48. Para projetar o custo futuro dessas próteses, foi considerada uma taxa de inflação anual de 3%. Com essa taxa, os custos unitários das partes foram estimados para períodos de 5 e 10 anos. Após 5 anos, o custo total estimado da prótese seria de aproximadamente \$35,31, enquanto, após 10 anos, esse valor aumentaria para cerca de \$40,89 USD.

Tabela 13 - Tabela de dados com volume, peso e custo total unitário com matéria prima para cada componente.

Componente	Volume(cm ³)	Peso (g)	Custo Atual	Custo anual	Custo em 5 anos	Custo em 10 anos
Femoral	34,56	290,3	\$ 14,52	\$ 14,96	\$ 16,68	\$ 19,49
Tibial	28,14	236,38	\$ 11,92	\$ 12,28	\$ 13,81	\$ 15,98
Meniscal	31,73	0,00	\$ 4,04	\$ 4,16	\$ 4,68	\$ 5,42
Total	94,43	526,68	\$ 30,48	\$ 31,39	\$ 35,31	\$ 40,89

No que diz respeito ao investimento no maquinário para produção. Evidentemente, o valor investido deve ser agregado ao valor do produto, já que todo o maquinário tem sua vida útil estipulada, e, portanto, após um certo período estimado deverá ser renovado, salvo devido algum imprevisto de quebra do equipamento. Dentre as vantagens de renovar toda ferramentaria ao invés de restaurar, é principalmente manter a qualidade do produto, evitar manutenção não programada que ocasiona perdas produtivas, e também manter se atualizado tecnologicamente a fim de garantir melhor qualidade e otimizações da cadeia produtiva.

Nesse âmbito, foi realizado o orçamento dos custos de cada máquina e equipamento diretamente relacionado a fabricação de cada componente. Os valores encontrados representam valores razoáveis, obtidos de sites de e-commerce estrangeiro, assim não entra no cálculo os valores de impostos e frete. De acordo com

Normativa Receita Federal do Brasil nº 1.700/2017 e seu Anexo III, as taxas de depreciação de máquinas e equipamentos é de 10% e a vida útil é estipulada para 10 anos.

O método linear é um dos métodos mais simples e utilizados para cálculo da depreciação de máquinas. Ele consiste em dividir o valor do investimento pelo período de vida útil do equipamento, desse modo o valor será distribuído igualmente ao longo do período, de forma que essa despesa seja incluída na gestão de custo como uma perda gradual de seu ativo. A cálculo de depreciação anual é feito utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{Depreciação anual} = (\text{Valor do ativo} - \text{Valor residual}) / \text{Vida útil}$$

Da equação acima, é interessante notar uma variável que não foi comentada, o valor residual, é basicamente o valor do maquinário vendido como sucata ou como produto para uma empresa especializada em restauração. O valor residual foi estimado como 10% do valor de um equipamento novo. Vale ressaltar, que as taxas de depreciação são para fins de análise de custos de forma geral, mas que não necessariamente 10 anos seja a vida útil do equipamento, isso depende de uma série de fatores.

Tabela 14 - Tabela de custos de maquinário e depreciação.

Investimento inicial em maquinário para fabricação da prótese							
	Máquina	Qtd	Valor Unit.	Valor Total	Vida útil (anos)	Valor residual	Depreciação anual
1	Injetora	1	\$ 23.000,00	\$ 23.000,00	10	\$ 2.300,00	\$ 2.070,00
2	Solda para cera perdida	2	\$ 80,00	\$ 160,00	1	0	\$ 160,00
3	Reservatório para pré-mistura	1	\$ 700,00	\$ 700,00	10	\$ 70,00	\$ 63,00
4	Reservatório da Lama Cerâmica	1	\$ 700,00	\$ 700,00	10	\$ 70,00	\$ 63,00
5	Fluidizador	1	\$ 7.400,00	\$ 7.400,00	10	\$ 740,00	\$ 666,00
6	Forno para desceragem	1	\$ 22.580,00	\$ 22.580,00	10	\$ 2.258,00	\$ 2.032,20
7	Forno para tratamento térmico	1	\$ 29.687,50	\$ 29.687,50	10	\$ 2.968,75	\$ 2.671,88
8	Forno para fusão	1	\$ 36.000,00	\$ 36.000,00	10	\$ 3.600,00	\$ 3.240,00
9	Martelo pneumático	1	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00	10	\$ 600,00	\$ 540,00
10	Serra de fita	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	10	\$ 500,00	\$ 450,00
11	Jateamento de mesa	1	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00	10	\$ 600,00	\$ 540,00
12	Serra de esquadria	1	\$ 70,12	\$ 70,12	10	\$ 7,01	\$ 6,31
13	Marcação à laser	1	\$ 2.500,00	\$ 2.500,00	10	\$ 250,00	\$ 225,00
14	Jateamento manual	1	\$ 1.300,00	\$ 1.300,00	10	\$ 130,00	\$ 117,00
15	Motoesmeril de bancada	1	\$ 110,00	\$ 110,00	10	\$ 11,00	\$ 9,90
16	Polidora manual	3	\$ 20,00	\$ 60,00	5	\$ -	\$ 12,00
17	Máquina de Raio X	1	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00	5	\$ 2.500,00	\$ 4.500,00
18	Medidor Scanner 3D	9	\$ 6.129,00	\$ 55.161,00	5	\$ 5.516,10	\$ 9.928,98
19	Rusosímetro	9	\$ 7.600,00	\$ 68.400,00	5	\$ 6.840,00	\$ 12.312,00
20	Braço robótico CNC	3	\$ 45.000,00	\$ 135.000,00	10	\$ 13.500,00	\$ 12.150,00
21	Materiais de suporte à produção	1	\$ 35.000,00	\$ 35.000,00	1	\$ -	\$ 35.000,00
Maquinas para testes destrutivos							
21	Máquina de teste Universal	1	\$ 12.000,00	\$ 12.000,00	5	\$ 1.200,00	\$ 2.160,00
22	Máquina de teste desgaste	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	5	\$ 500,00	\$ 900,00
			Total	\$476.828,62	Depreciação (anual)		\$ 89.817,27
					Depreciação (em 10 anos)		\$ 898.172,66

Portanto, verifica-se que a depreciação anual é de \$89.817,27, cabe mencionar que os equipamentos cotados são de fornecedores internacionais. Em 10 anos a depreciação seria de \$898.172,66, é interessante notar na tabela que a vida útil dos equipamentos de testes é menor que a equipamentos ligados a fabricação, dado o fato de que o produto necessita de alto controle de qualidade, e consequentemente foi ajustado um tempo menor para renovação dos equipamentos de medição. Ao realizar essa prática, a fábrica ganha com tecnologia e qualidade nas suas certificações.

Vale enfatizar, que na tabela há uma alta despesa que a indústria deverá arcar anualmente, trata-se do gasto com materiais de suporte a produção. Ele envolve gastos como ferramental para magazine de ferramentas para usinagem, ferramentas de trabalho secundários, lama sílica e solução para pré-mistura, serra de fita, discos

para o moto esmeril, etc. Isto é, todo material extra para máquinas e funcionários para que a fábrica funcione, além disso o valor residual é zero por ser recursos consumíveis e não ter custo para seu valor de revenda como produto.

Continuando o processo de analisar os custos envolvidos, agora será calculado os gastos com energia elétrica que são custos diretos variáveis, ou seja, ligados diretamente a produção e variável com aumento e decréscimo da quantidade fabricada. Para cálculo de energia foi considerado R\$ 1,00 o kWh, e transformado em dólar USA. Em resumo, a tabela abaixo descreve os valores gastos com seu devido tempo de uso diário na fábrica.

Tabela 15 - Custos de energia elétrica para fabricação.

	Maquina	Qtd	Potência unitária (kW)	Potência total (kW)	Tempo de uso em um dia (horas)	kWh	Valor gasto em um dia	Total em 1 mês	Total em 1 ano	Total em 10 anos
1	Injetora	1	11,1	11,1	4	44,4	\$ 7,40	\$ 148,00	\$ 1.776,00	\$ 17.760,00
2	Solda para cera perdida	2	0,03	0,06	4	0,24	\$ 0,04	\$ 0,80	\$ 9,60	\$ 96,00
3	Reservatório para pré mistura	1	0,75	0,75	16	12	\$ 2,00	\$ 40,00	\$ 480,00	\$ 4.800,00
4	Reservatório da Lama Cerâmica	1	0,75	0,75	16	12	\$ 2,00	\$ 40,00	\$ 480,00	\$ 4.800,00
5	Fluidizador	1	5,5	5,5	0,4	2,2	\$ 0,37	\$ 7,33	\$ 88,00	\$ 880,00
6	Forno para desceragem	1	123	123	0,5	61,5	\$ 10,25	\$ 205,00	\$ 2.460,00	\$ 24.600,00
7	Forno para tratamento térmico	1	80	80	12	960	\$ 160,00	\$ 3.200,00	\$ 38.400,00	\$ 384.000,00
8	Forno para fusão	1	45	45	1	45	\$ 7,50	\$ 150,00	\$ 1.800,00	\$ 18.000,00
9	Martelo pneumático	1	3,6	3,6	3	10,8	\$ 1,80	\$ 36,00	\$ 432,00	\$ 4.320,00
10	Serra de fita	1	1,5	1,5	5,4	8,1	\$ 1,35	\$ 27,00	\$ 324,00	\$ 3.240,00
11	Jateamento de mesa	1	39,2	39,2	3	117,6	\$ 19,60	\$ 392,00	\$ 4.704,00	\$ 47.040,00
12	Serra de esquadria	1	1,6	1,6	4	6,4	\$ 1,07	\$ 21,33	\$ 256,00	\$ 2.560,00
13	Marcação à laser	1	0,1	0,1	10	1	\$ 0,17	\$ 3,33	\$ 40,00	\$ 400,00
14	Jateamento manual	1	1,7	1,7	5	8,5	\$ 1,42	\$ 28,33	\$ 340,00	\$ 3.400,00
15	Motoesmeril de bancada	1	1,5	1,5	7,4	11,1	\$ 1,85	\$ 37,00	\$ 444,00	\$ 4.440,00
16	Polidora manual	1	0,2	0,2	6	1,2	\$ 0,20	\$ 4,00	\$ 48,00	\$ 480,00
17	Máquina de Raio X	1	50	50	0,4	20	\$ 3,33	\$ 66,67	\$ 800,00	\$ 8.000,00
18	Medidor Scanner 3D	9	0,1	0,9	12	10,8	\$ 1,80	\$ 36,00	\$ 432,00	\$ 4.320,00
19	Rusosímetro	9	0,05	0,45	12	5,4	\$ 0,90	\$ 18,00	\$ 216,00	\$ 2.160,00
20	Braço robótico CNC	3	15	45	16	720	\$ 120,00	\$ 2.400,00	\$ 28.800,00	\$ 288.000,00
21	Máquina de teste Universal	1	2	2	2	4	\$ 0,67	\$ 13,33	\$ 160,00	\$ 1.600,00
22	Máquina de teste desgaste	1	2	2	2	4	\$ 0,67	\$ 13,33	\$ 160,00	\$ 1.600,00
23	Iluminação	180	0,04	7,2	12	86,4	\$ 14,40	\$ 288,00	\$ 3.456,00	\$ 34.560,00
						Total	\$ 358,77	\$ 7.175,47	\$ 86.105,60	\$ 861.056,00

Portanto, como observa-se um gasto diário com energia de \$358,77, mensal de \$7.175,47, anual de \$86.105,60 e em uma década de \$861.056,00. Verifica-se também, que os maiores gastos com energia se concentram na usinagem com braço robótico, e no forno para tratamento térmico da componente tibial e femoral. Portanto, são processos que demandam otimizações a fim de evitar maiores gastos.

Outro tipo de custo recorrente para o setor industrial são os custos com manutenção. Entre as alternativas, a indústria pode optar por compor uma equipe interna de manutenção para o maquinário da fábrica ou contratar um serviço terceirizado. Sob esse viés, será mais produtivo adotar uma abordagem mista, composta por uma equipe interna e por um serviço terceirizado especializado. Este último deve ser direcionado, principalmente, para a manutenção de braços robóticos, já que esse tipo de serviço exige alta especialização e capacitação.

Além disso, no que diz respeito aos tipos de manutenção, é mais viável que a empresa invista seu capital em manutenção preditiva, visando evitar paradas inesperadas por meio do monitoramento constante de seus equipamentos. Em relação a valores, uma forma de quantificar e analisar a qualidade da manutenção é utilizar o percentual CPMV, que representa o valor da manutenção anual para um equipamento específico em relação ao seu valor bruto de aquisição. O CPMV é definido como o Custo Total de Manutenção como Porcentagem do Valor de Reposição do Ativo, apesar de também ser também popularmente conhecido como RAV (Replacement Asset Value) em inglês. Sua formula é dada por:

$$CPMV = \frac{\text{Custo Total de Manutenção [\$]}}{\text{Valor de Reposição do Ativo [\$]}} * 100 \quad [\%]$$

O Custo Total de Manutenção pode ser entendido como o somatório de gastos com o pagamento do serviço de operadores, materiais utilizados, empreiteiros, serviços prestados e até recursos indiretos necessários. Além disso, é acrescentado o valor de perda produtiva devido as paradas. Já o Valor de Reposição do Ativo, inclui todo o custo total para substituição do ativo levando em conta as condições do mercado atual. Isso inclui o valor o custo de aquisição, impostos relacionados, serviço de instalação e comissionamento, frete, como também modificação no local de aplicação quando necessário.

Para um CPMV de até 6%, representa valores aceitáveis, acima disso trata-se uma manutenção deficiente necessário uma manutenção urgente. Assim sendo, considerando um cenário com um CPMV de 6%, será calculado os custos com manutenção, através do valor de investimento inicial do maquinário \$476.828,62, e considerando a inflação de 3% ao ano sobre esse valor, resulta em valor acumulado em manutenção para cada intervalo de operação de:

Tabela 16 - Tabela de custo com manutenção acumulado.

Custo de manutenção considerando CPMV 6%	
Tempo de operação	Custo acumulado de manutenção
1 ano	\$ 28.609,72
2 anos	\$ 58.077,73
3 anos	\$ 88.404,03
4 anos	\$ 119.588,62
5 anos	\$ 151.631,50
6 anos	\$ 184.532,68
7 anos	\$ 218.292,14
8 anos	\$ 252.909,90
9 anos	\$ 288.385,95
10 anos	\$ 324.720,29

Diante da tabela acima verifica-se que o custo acumulado de manutenção para um intervalo de 1 ano é de \$28.609,72, e para um intervalo de 5 anos é de \$151.631,50 e para 10 anos de uso do equipamento é de \$324.720,29. Conforme Fractal (2025), um CPMV de 6% é considerado uma manutenção de baixa qualidade, como evidenciado pelo valor acumulado ao longo de uma década de uso. No entanto, para fins contábeis, adotaremos esse valor para estimar os custos de manutenção, garantindo uma margem de segurança e maior realismo nas projeções.

4.3. Análise de Custos Indiretos

A segunda etapa consiste em realizar a análise de custos indiretos que são custos que não podem ser diretamente atribuídos ao produto, entretanto que são necessários para que seja contínua a operação industrial e que prospere economicamente. Segue agora a tabela de custos com funcionários indiretos, mas que são imprescindíveis para que o negócio funcione:

Tabela 17 - Mão de obra indireta para indústria de prótese.

Cargo	Quantidade	Salário Mensal	Valor total
Gerente	1	\$ 2.666,67	\$ 2.666,67
Supervisor de produção	2	\$ 682,33	\$ 1.364,67
Engenheiro (Mecânico ou Mecatrônico)	1	\$ 2.150,50	\$ 2.150,50
Analista de Engenharia	4	\$ 833,33	\$ 3.333,33
Equipe de Manutenção	6	\$ 559,48	\$ 3.356,88
Comercial	5	\$ 833,33	\$ 4.166,67
Marketing	5	\$ 666,67	\$ 3.333,33
Segurança do trabalho	4	\$ 665,49	\$ 2.661,97
Financeiro	3	\$ 666,67	\$ 2.000,00
Recursos Humanos	3	\$ 666,67	\$ 2.000,00
Total	34	Total mensal	\$ 27.034,02

A tabela acima detalha a quantidade de pessoas por cargo, o salário base do colaborador para aquele posto, o valor total levando em conta a quantidade de funcionários para cada função. Em resumo, o custo total calculado da folha salarial mensal de mão de obra indireta foi de \$27.034,02, é importante frisar que esses salários foram extraídos com base no piso salarial e também por meio do site Glassdoor, uma plataforma que reúne informações sobre remuneração e avaliação de empresas atribuídas pelos colaboradores. Novamente, considerando 68,18% de encargos trabalhistas, o valor considerado de gastos mensais para mão de obra indireta é de \$45.465,81.

Outro dispêndio que também faz parte dos custos indiretos é o valor do aluguel, mas antes de chegar a esse valor é necessário conhecer qual a dimensão que a fábrica necessita. O dimensionamento do terreno deve estar alinhado ao objetivo inicial, que leva em conta a instalação de toda área de produção, armazenamento e logística e espaços auxiliares, como também deve refletir os anseios futuros do empreendimento. A distribuição de espaço foi realizada com foco em garantir eficiência operacional, segurança e áreas para o suporte administrativo e logístico. O cálculo inclui áreas específicas para produção, armazenamento e logística e infraestrutura auxiliar. Com base na análise, o espaço total necessário para o galpão foi estimado em 2.000 m², com um custo aproximado de R\$ 40,00 por metro quadrado, o que corresponde a cerca de \$6,67 por metro quadrado, totalizando \$13.340,00.

Com base na taxa média de crescimento anual do Índice Geral de Preços - Mercado (IGP-M). O valor inicial do aluguel do galpão é de \$13.340,00 por mês, resultando em um custo anual inicial de R\$ 672.000,00. Considerando um reajuste

anual de 6,54% pelo IGP-M, aplicamos esse percentual no valor do aluguel ao longo dos anos.

Tabela 18 - Projeção de custos com aluguel para um período de 10 anos.

Tempo	Aluguel mensal	Valor total pago em aluguel
1º Ano	\$ 13.340,00	\$ 160.080,00
2º Ano	\$ 14.212,44	\$ 170.549,23
3º Ano	\$ 15.141,93	\$ 181.703,15
4º Ano	\$ 16.132,21	\$ 193.586,54
5º Ano	\$ 17.187,26	\$ 206.247,10
6º Ano	\$ 18.311,30	\$ 219.735,66
7º Ano	\$ 19.508,86	\$ 234.106,37
8º Ano	\$ 20.784,74	\$ 249.416,93
9º Ano	\$ 22.144,07	\$ 265.728,79
10º Ano	\$ 23.592,29	\$ 283.107,46
Total		\$ 2.164.261,22

Portanto, como observado na tabela com uma taxa de IGP-M de 6,54%, que é uma taxa razoável dentro das projeções esperadas anualmente, o valor do aluguel praticamente dobrou em 10 anos, chegando ao valor de \$23.592,29. Em síntese, o montante integral do aluguel para uma operação de 10 anos alcança a quantia de \$2.164.261,22. Outro ponto a ser abordado, que também se faz necessário descrever é a questão dos EPIs, toda indústria tem por lei obrigação fornecer todos itens de segurança ao operário que está em alguma situação de possível risco.

O valor gasto com EPIs e inclusive uniformes devem ser levados em conta na análise de custos por se tornar itens essenciais em qualquer meio de produção. Assim, foi estimado o valor anual gasto com EPIs, esse valor seria gasto anualmente para renovação desses itens e garantir a segurança dos profissionais. Segue a tabela com as quantidades de funcionários e custos envolvidos.

Tabela 19 - Custos indiretos com EPIs.

EPI	Quantidade de funcionários				
	Etapa Geral	Acabamento	Controle de Qualidade	Custo unitário	Custo total
Máscara descartável(PFF2/N95)	14	8	42	\$ 0,50	\$ 32,00
Máscara facial/viseira	14	8	42	\$ 5,00	\$ 320,00
Luvas de nitrilo	14	-	42	\$ 3,50	\$ 196,00
Jaleco/Avental de proteção	14	-	42	\$ 8,33	\$ 466,67
Calçado de segurança	14	8	42	\$ 20,00	\$ 1.280,00
Óculos de segurança	14	8	-	\$ 5,00	\$ 110,00
Luvas de couro/tecido	-	8	-	\$ 8,33	\$ 66,67
kit 3 Uniformes completo	14	8	42	\$ 58,33	\$ 3.733,33
Capacete de proteção individual	14	-	-	\$ 13,33	\$ 186,67
				Total	\$ 6.391,33

Dessa forma, conforme detalhado na tabela, o custo anual com EPIs seria de \$ 6.391,33, considerando principalmente os trabalhadores da mão de obra direta. Verifica-se que o gasto com equipamentos de proteção individual é relativamente baixo, o que não representará uma parcela significativa do custo total. Contudo, esse dado também permite uma análise mais minuciosa sobre o caso em estudo, sendo esses custos de importância para a visão do gestor.

4.4. Avaliação de custos

Adiante, com toda a análise de custos calculada individualmente, será feita uma tabela com o resumo do acumulado de gastos para o período de operação de 1 ano, 5 anos e 10 anos. Vale frisar que foi considerada uma fabricação anual de 34.000 unidades de prótese para artroplastia total do joelho, com uma produção diária de 144 peças. A tabela abaixo reflete todo o valor gasto, levando em conta os custos atribuídos neste *Should Cost*.

Tabela 20 - Resumo dos Custos Diretos e Indiretos para o Período de Operação

Gastos		Período de operação		
Custos diretos		1 ano	5 anos	10 anos
Custo variáveis	Matéria prima	\$ 1.067.409,60	\$ 6.002.700,00	\$ 13.902.600,00
	Energia Elétrica	\$ 86.105,60	\$ 430.528,00	\$ 861.056,00
	Manutenção	\$ 28.609,72	\$ 151.631,50	\$ 324.720,29
Fixos	Depreciação de maquinário	\$ 89.817,27	\$ 449.086,33	\$ 898.172,66
	Mão de obra direta	\$ 797.576,83	\$ 3.987.884,16	\$ 7.975.768,32
Custos indiretos				
Fixos	Mão de obra indireta	\$ 545.589,78	\$ 2.727.948,89	\$ 5.455.897,78
	Aluguel	\$ 160.080,00	\$ 206.247,10	\$ 283.107,46
	EPIs	\$ 6.391,33	\$ 31.956,67	\$ 63.913,33
Total		\$ 2.781.580,13	\$ 13.987.982,64	\$ 29.765.235,84

Em vista ao exposto, verifica-se que para 1 ano de operação da fábrica tem-se o gasto total de \$2.781.580,13, em 5 anos um total acumulado de \$13.987.982,64, e para funcionamento à longo prazo, considerando 10 anos de operação, resulta em um total de \$29.765.235,84. Considerando esses custos finais, será feito o cálculo do custo unitário para fabricação para cada período de operação. O cálculo é simples, utiliza-se o valor do gasto total para o período em questão e a sua respectiva quantidade produzida, como descrito abaixo:

$$\begin{aligned}
 \text{Custo unitário}(1 \text{ ano}) &= \frac{2.781.580,13}{34.000} \frac{[\$]}{[\text{unidades produzidas}]} = \$81,81 \\
 \text{Custo unitário}(5 \text{ anos}) &= \frac{13.987.982,64}{170.000} \frac{[\$]}{[\text{unidades produzidas}]} = \$82,28 \\
 \text{Custo unitário}(10 \text{ anos}) &= \frac{29.765.235,84}{340.000} \frac{[\$]}{[\text{unidades produzidas}]} = \$87,54
 \end{aligned}$$

Em vista dos resultados, verifica-se que para o período de um ano o valor unitário da prótese para artroplastia total do joelho é de \$81,81, em cinco anos de operação esse valor tem um acréscimo discreto chegando a um valor de \$82,28, e para 10 anos em operação foi verificado um custo de fabricação de \$87,54. Perante a esses resultados, vê-se que o valor unitário aumentou levemente durante os anos, o

fato de ter pouca amplitude é que a produção diária se manteve constante e os custos foram distribuídos uniformemente para as unidades produzidas. O aumento em questão é devido aos valores terem sido ajustados ao longo dos anos, considerando sempre um cenário de aumento de inflação, e, portanto, o gasto de produzir hoje será menor do que o de se produzir nos anos seguintes.

5. CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade econômica da produção de próteses para artroplastia total do joelho fabricadas a partir da liga CoCrMo, utilizando a ferramenta prática *Should Cost*. Inicialmente, buscou-se compreender as vantagens desse material em relação ao Titânio. Além disso, o estudo propôs o desenvolvimento de uma linha de produção com métodos de fabricação mais eficientes, a análise da capacidade produtiva e o levantamento dos principais custos diretos e indiretos para a produção em série.

A análise financeira foi realizada por meio do método *Should Cost*, considerando os custos diretos e indiretos ao longo de diferentes períodos operacionais (1, 5 e 10 anos). Os resultados obtidos para o custo de produção da prótese de artroplastia total do joelho foram de \$81,81 no primeiro ano, \$82,28 para um período de 5 anos e \$87,54 para 10 anos de operação. Diante dos resultados apresentados, conclui-se que o processo é financeiramente viável para uma indústria de médio porte com produção diária de 144 próteses.

A análise financeira evidenciou um aumento no custo unitário da prótese, passando de \$81,81 no primeiro ano para \$87,54 no décimo ano, impacto decorrente da inflação e dos reajustes anuais nos custos de produção. Segundo TÚLIO (2019), o valor de só a prótese de joelho custa a partir de 10 mil reais ou em dólares aproximadamente \$2000,00. É importante destacar que, em produtos tecnológicos como as próteses de joelho, grande parte do valor pago está relacionada à tecnologia empregada e ao investimento em pesquisa e desenvolvimento. Além disso, a diferença de preços também se explica pelo fato de que este trabalho não teve como foco a análise de custos indiretos, como logística, tributos, serviços terceirizados e outras áreas da empresa que influenciam o processo produtivo.

Como dito anteriormente, foi realizado um estudo da capacidade produtiva, determinando a quantidade de peças que poderiam ser fabricadas em dois turnos de oito horas cada. Identificou-se que o principal gargalo da produção estava na usinagem do componente espaçador, e em segundo estava no processo de inspeção. Para mitigar essa limitação, seria necessário investir em novas tecnologias, otimizar processos e aprimorar o controle de qualidade.

Outro aspecto relevante do *Should Cost* foi a estimativa dos custos de maquinário e equipamentos utilizados na fabricação dos componentes. Durante esse

levantamento, houve limitações na obtenção de preços, principalmente devido à indisponibilidade de informações diretas nos sites de fornecedores, o que exigiu contato por e-mail, muitas vezes sem respostas completas ou ágeis. Além disso, este trabalho apresentou os principais custos relacionados ao investimento em maquinário e à operação do negócio.

No campo metodológico, um dos desafios foi a escolha do modelo para cálculo da depreciação dos equipamentos. O método linear mostrou-se o mais adequado por sua simplicidade e aplicabilidade ao contexto industrial. Além disso, a manutenção anual dos equipamentos foi identificada como um fator importante de custo recorrente, impactando diretamente na viabilidade do empreendimento.

Este trabalho possibilitou uma visualização sobre o empreendimento industrial, permitiu que os autores utilizassem conhecimento teórico e analítico para definição das fases do projeto. Para trabalhos futuros, recomenda-se que estudos aprofundem na análise optando por outras matérias. Como também, pesquisar novas tecnologias para fabricação e controle de qualidade com o objetivo de melhorar o gargalo produtivo. Diante da busca constante por melhoria na qualidade de vida, espera-se que as próteses ortopédicas se tornem mais acessíveis, consolidando esse mercado como uma oportunidade promissora a ser explorada.

Dessa forma, o objetivo do estudo foi alcançado, proporcionando uma visão detalhada dos principais custos envolvidos na implementação de uma fábrica de próteses para artroplastia total do joelho. A análise abrangeu desde os custos variáveis, como matéria-prima, energia elétrica e manutenção, até os custos fixos, incluindo a quantidade de funcionários diretamente envolvidos e os equipamentos necessários para a segurança na linha de produção, além dos custos indiretos, ao longo de um horizonte de 10 anos.

Tendo em vista o exposto, a principal contribuição deste trabalho foi proporcionar uma visão detalhada dos custos envolvidos na fabricação de próteses de joelho, fornecendo dados essenciais para a tomada de decisões na indústria. Espera-se que este trabalho impacte positivamente o campo da engenharia, promovendo estudos futuros sobre materiais alternativos e métodos de produção mais eficientes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 22523: Dispositivos externos de prótese e órtese – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ALIBABA. Alibaba.com - Global trade starts here. Disponível em: <https://www.alibaba.com>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ALONSO, Alberto Fernández. **Sistema CAD/CAM para usinagem com recursos de robótica industrial.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/60635>>. Acesso em: 24 nov. 2024.

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, INC. **Handbook of the Investment Casting Process.** 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F1800-12: Standard Practice for Cyclic Fatigue Testing of Metal Tibial Tray Components of Total Knee Joint Replacements.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F3210-17: Standard Guide for Characterization and Testing of Metal Powders Used in Additive Manufacturing Processes.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ARTROPLASTIA total de joelho (Total Knee Replacement) - OrthoInfo - AAOS. Disponível em: <<https://orthoinfo.aaos.org/>>. Acesso em 20 de novembro de 2024.

AZEVEDO, AMÉRICO L. **Fundamentos do CNC para Usinagem/Américo Luiz de Azevedo (autor/ilustrador)** – São José dos Campos/SP, JAC Gráfica e Editora, 2017.

BAHRAMI NASAB, Marjan; HASSAN, Mohd Roshdi; SAHARI, B. **"Metallic biomaterials of knee and hip - A review."** Trends in Biomaterials & Artificial Organs 24:69-82, 2010.

BORGES, VANESSA. **Contabilidade de custos.** Rio de Janeiro: SESES, 2015.

CUNHA, ADRIANO S. **Análise de custos: livro didático.** 3. ed. Livro didático. Palhoça: UnisulVirtual, 2011.

DA SILVA, Danielle Simone; DO NASCIMENTO, João Maria Araújo. **AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL.** UFRN - Redes para Automação Industrial – DCA2401/ Maio de 2003.

DO VALE, Alan Rafael Menezes. **Tratamento térmico**. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), 2011.

FERRARESI, VALTAIR A. **TRATAMENTOS TÉRMICOS DE METAIS DE BASE E JUNTAS SOLDADAS**. Slide de apresentação. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2022.

FRACTTAL. **O que é o CPMV? Manutenpedia**. Disponível em: <<https://www.fractal.com/pt-br/manutenpedia/o-que-e-o-cpmv>>. Acesso em 27 janeiro 2025.

FUOCO, Ricardo. **Defeitos de Fundição - Porosidades de gas**. Metso Brasil Indústria e Comércio Ltda. 2014.

FUNDIÇÃO por Cera Perdida. Disponível em: <<https://omnidexmining.com/pt-br/fundicao-por-cera-perdida/>>. Acesso em 29 de Outubro de 2024.

GENEROSO, DANIEL J. **Usinagem Avançado(Torneamento)**. Apostila para o curso Técnico em Eletromecânica. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia – Campus Araranguá, 2011.

GLASSDOOR. **Plataforma de avaliação de empresas e salários**. Disponível em: <https://www.glassdoor.com.br>. Acesso em: 28 janeiro 2025.

GORITO, GONÇALO M. **Estudo do tratamento térmico de uma liga CoCrMo (ASTM F-75) para implantes ortopédicos**. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade do Porto, Porto, 2019.

HORIKAWA, Oswaldo et al. **Seleção de robôs: alguns aspectos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. Tradução: Anna Carla Araujo. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

KIMINAMI, Claudio Shyinti e CASTRO, Walman Benício de e OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013. Acesso em: 21 abr. 2024.

LEITE, João Miguel Castro. **Desenvolvimento da metodologia de projeto e fabrico de próteses articulares**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

KURTZ, S. M. **“Vitamin E-Blended UHMWPE Biomaterials”, UHMWPE Biomaterials Handbook, 3 ed.** Oxford: Elsevier, 2016. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35401-1.00017-X>>

MACHADO, A.R et BACCI, M.S. **Usinagem dos Metais, Uberlândia, 8ª ed, 2004.**

MACHADO, CATARINA. **Processo de fundição por cera perdida de próteses médicas em ligas CoCrMo vazadas em forno rotativo rollover.** Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2018.

MACHADO, IONÁ M.L. **Avaliação microestrutural de cascas cerâmicas utilizadas na produção de moldes para o processo de fundição por cera perdida.** Tese (Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MANINE, Sérgio; MARINHO, José A; OLIVEIRA, Bruna G.P.; ZANON, Enrico M.; PEREIRA, Bruno M. **Estudo radiográfico em pacientes submetidos à artroplastia total de joelho não cimentada: Segmento mínimo de 2 anos.** Rev Bras Ortop 2021;56(5):628–633. Abril, 2020.

MARTIN, ANDRÉ; CORREIA, GLAUCIO; CENTOAMORE, PLINIO; PINTO, LUIZ F.R. **INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ANÁLISE DE PEÇAS: APLICAÇÃO DE SCANNER 3D EM MEDIÇÃO DIMENSIONAL DE MOTORES.** Simpósio Internacional de Gestão, Projetos, Inovação e Sustentabilidade. 9ª Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge). Outubro, 2021.

MARTINS, ELISEU. **Contabilidade de custo.** Da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. - 9. ed. - São Paulo : Atlas, 2003.

MARTINS, VINICIUS. **Apostila básica de CNC.** Instituto Federal Sul-rio-grandense, Sapucaia do Sul, 2020. Disponível em: <<http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/vmartins/Arquivo/Disciplina%20usinagem%20III/Aula%20para%20dar/Apostila%20%20b%C3%A1sico%20de%20CNC.pdf>>. Acesso em 16 de Junho de 2024.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Artrose acomete 15 milhões de brasileiros.** 2023. Disponível em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/dino/noticia/2023/08/25/artrose-doenca-acomete-cerca-de-15-milhoes-de-brasileiros.ghml>>. Acesso em 27 abr. 2025.

MIRANDA, H. C. **Processos de Fabricação.** Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará. Ano 2012. Disponível em: <<https://kaiohdutra.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/10/apostilatecii.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

NETTER, Frank H. **Atlas de Anatomia Humana.** 7ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

O GLOBO. **Artrose afetará quase 1 bilhão de pessoas até 2050, projeta estudo.** Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/saude/noticia/2023/08/28/artrose->

afetara-quase-1-bilhao-de-pessoas-ate-2050-projeta-estudo.ghtml>. Acesso em: 04 Abril 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **WHO standards for prosthetics and orthotics**. 2017. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241512480>>. Acesso em: 11 de Abril de 2024.

QUANTO custa para produzir o seu produto ou serviço? Entenda tudo sobre custos diretos, indiretos, fixos e variáveis. Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/custos-diretos-indiretos-fixos-e-variaveis/>>. Acesso em 03 de Julho de 2024.

ROCHA, FILIPA A.M. **Melhoria do processo de fundição por cera perdida de próteses de joelho em ligas CoCr**. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Porto, 2014.

ROMANO, Vitor Ferreira (Org.). **Robótica Industrial: Aplicação na indústria de manufatura e de processos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2002.

TÚLIO, Marco. **Prótese de joelho: como é feita a cirurgia?** 2019. Disponível em: <<https://joelhobh.com.br/protese-de-joelho-cirurgia-2/>>. Acesso em: 28 abril de 2025.

SÁ, AMAURY S. **Comparação numérica e experimental do comportamento mecânico de diferentes projetos de componentes metálicos tibial e femoral de próteses de joelho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SILVA, Loise Silveira da. **Desenvolvimento de material composto de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) e ibuprofeno para uso em próteses de joelho**. 2019. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214871>>. Acesso em: 24 nov. 2024.

SILVA, P.M.G.P.H. **Prótese total do joelho – a história da arte: revisão bibliográfica**. Tese Mestrado - Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade Covilhã. Covilhã, 2010.

TAKATSU, F. **Artroplastia total de joelho (ATJ) ou prótese de joelho. Veja em quais casos é indicada e benefícios**. 2024. Disponível em: <<https://drfellipetakatsu.com/protese-de-joelho/>>. Acesso em 15 de novembro de 2024.

TECNOLOGIA mecânica / Vincente Chiaverini – 2. ed. – São Paulo : McGraw-Hill, 1986.

TRATAMENTO TÉRMICO: CONFIRA O QUE É, FINALIDADE E OS TIPOS EXISTENTES. Disponível em: <<https://brasil.pochteca.net/tratamento-termico/>>. Acesso em 19 de junho 2024.

TRATAMENTO térmico. Universidade Estadual de São Paulo. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf>. Acesso em 18 de Junho de 2024.

TREASY. Quanto custa um funcionário e todos os encargos trabalhistas envolvidos? Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/encargos-trabalhistas/>>. Acesso em 04 de fevereiro de 2025.

ULSON, Oliver. **Como surgiram as próteses de joelho e como foram modernizadas?** 2024. Disponível em: <<https://ortopedistaemsaopaulo.com.br/protese-de-joelho-como-e-feita-a-cirurgia-qual-a-melhor>>. Acesso em 12 de novembro de 2024.

UM GUIA para fundição de investimento: processo, benefícios e aplicações. Disponível em: <<https://www.rapiddirect.com/pt/blog/what-is-investment-casting/>>. Acesso em 29 de outubro de 2024.

VALE, Valentina C. **Controle de Posição de um Robô Cartesiano por meio de Técnicas Adaptativas.** 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5311/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 18 de Novembro, 2024.

WHAT is Should Cost Analysis?. Disponível em: <<https://galorath.com/should-cost-analysis/>>. Acesso em 01 de Julho de 2024.

ZHANG, B.; HUANG, W.; WANG, X. **“Biomimetic surface design for ultrahigh molecular weight polyethylene to improve the tribological properties”.** Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., Vol. 226, No. 8, pp. 705-713, 2012. <https://doi.org/10.1177/1350650112437829>.