



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



RODRIGO JOSE LIBANIO MASABEU

**FABRICAÇÃO DE UMA MATRIZ EXTRUSORA PARA A
PRENSAGEM DE PÓ PARA PRODUÇÃO DE AMOSTRAS
DESTINADAS À SINTERIZAÇÃO**

**OURO PRETO - MG
2024**

RODRIGO JOSE LIBANIO MASABEU
rodrigo.masabeu@aluno.ufop.edu.br

**FABRICAÇÃO DE UMA MATRIZ EXTRUSORA PARA A
PRENSAGEM DE PÓ PARA PRODUÇÃO DE AMOSTRAS
DESTINADAS À SINTERIZAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. DIOGO ANTONIO DE SOUSA

OURO PRETO – MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M394f Masabeu, Rodrigo Jose Libanio.
Fabricação de uma matriz extrusora para a prensagem de pó para
produção de amostras destinadas à sinterização. [manuscrito] / Rodrigo
Jose Libanio Masabeu. - 2024.
48 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antonio de Sousa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Metalurgia do pó. 2. Solos - Compactação. 3. Solos - Compactação
- Matriz de compactação. 4. Metais - Extrusão. I. Sousa, Diogo Antonio de.
II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo Jose Libanio Masabeu

Fabricação de uma matriz extrusora para a prensagem de pó para produção de amostras destinadas à sinterização

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 07 de fevereiro de 2024

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Vinícius Carvalho Teles (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/02/2024, às 09:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0667622** e o código CRC **10990605**.

Aos meus pais dedico mais esta etapa vencida, pois sem eles não poderia me tornar quem sou hoje.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais e meu irmão pelo apoio incondicional que me proporcionam para alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Diogo Antônio de Sousa pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos amigos, em especial ao Carlos, Guilherme, Luiz, Marcos, Matheus, Samuel e Tadeu, pelo companheirismo seja no rock ou na sala de aula.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

A metalurgia do pó é um processo de fabricação amplamente utilizado na indústria devido a sua economia e capacidade de processar materiais de maneira que outros métodos não conseguem. A distribuição de pressões durante a etapa de compactação desse processo influencia fortemente as características da peça produzida. Este trabalho teve o intuito de produzir uma matriz de compactação extrusora para produzir amostras de pó compactado para estudos futuros. O projeto da matriz baseou-se no dimensionamento dos seus elementos a partir da carga aplicada sobre o pó, da redução no volume do material após a compactação e de simulações de deformação em um *software*. A matriz é composta por 6 partes (peças), que são dois punções, duas estruturas guia de punção, um porta amostras e um base, organizadas em duas configurações utilizando 4 peças. A composição de 4 partes em cada configuração permitiu a utilização do elemento denominado porta amostras, o qual foi criado com o propósito de formar as amostras e facilitar sua ejeção. Ainda, um mecanismo foi desenvolvido para separar as partes da matriz após as compactações caso necessário. A fabricação da matriz foi feita em aço 1045 e utilizou o processo de torneamento. As compactações utilizaram uma carga de 100 MPa aplicada durante um minuto, utilizando três métodos diferentes de aplicação de pressão sobre o pó. O primeiro método proporcionará apenas compactação unidirecional ao pó, o segundo apenas compactação em uma parcela e compactação e extrusão nas outras parcelas, e o terceiro proporcionará compactação e extrusão para todo o pó depositado na matriz. No decorrer da utilização da matriz, o mecanismo de separação foi necessário em alguns casos para desacoplar as partes (peças) e este se mostrou eficiente. A matriz foi capaz de produzir amostras bem compactadas e coesas e foram guardadas uma amostra produzida em cada método. As amostras não apresentaram grandes diferenças visuais com exceção da amostra do terceiro método que mostrou uma fratura não homogênea na região entre o corpo e o porta amostras. Após a realização das compactações a matriz apresentou desgastes visíveis, o que indicou que o aço 1045 sem tratamento térmico não possui dureza o suficiente para proporcionar uma vida útil longa para essa matriz.

Palavras-chave: Metalurgia do pó. Compactação. Matriz de compactação. Extrusão.

ABSTRACT

Powder metallurgy is a widely used manufacturing process in the industry due to its cost-effectiveness and ability to process materials in ways that other methods cannot. The pressure distribution during the compaction stage of this process strongly influences the characteristics of the produced part. This study aimed to produce an extrusion compaction die to create compacted powder samples for future studies. The die design was based on the sizing of its elements from the applied load on the powder, the decrease in volume after compaction, and simulations of deformation in software. The die consisted of six parts, including two punches, two bodies, a sample holder, and a base, organized into two configurations using four components. The use of four parts in each configuration allowed for the utilization of the sample holder element, created to form the samples and facilitate their ejection. Additionally, a mechanism was developed to separate the die parts after compactions if necessary. The die was manufactured using 1045 steel and turning processes. Compactions were performed with a 100 MPa load applied for one minute, employing three different pressure application methods on the powder. The first method provided only unidirectional compaction, the second provided compaction in one portion and compaction and extrusion in the other portions, and the third provided compaction and extrusion for the entire powder deposited in the die. During die use, the separation mechanism was needed in some cases to detach the parts, proving to be efficient. The die was able to produce well-compacted and cohesive samples, with one sample saved from each method. The samples did not show significant visual differences, except for the sample from the third method, which exhibited non-uniform fracture in the region between the body and the sample holder. After the compactions, visible wear on the die indicated that untreated 1045 steel lacked sufficient hardness to provide a long lifespan for the die.

Key-words: Powder Metallurgy. Compaction. Compaction Die. Extrusion.

LISTA DE SIMBOLOS

P = Pressão de extrusão

k = Constante de extrusão

Re = Razão de extrusão

a' = Trabalho redundante

b' = Trabalho de deformação

P_{cr} = Carga crítica de flambagem

E = Módulo de elasticidade

I = Momento de inércia

K = Fator de comprimento efeito

L = Comprimento da coluna

F = Força exercida sobre o punção

A = Área

D = Diâmetro

R = Raio maior

r = Raio menor

V_1 = Volume da seção 1

V_2 = Volume da seção 2

V_{3i} = Volume da seção 3 antes da compactação

V_{3f} = Volume da seção 3 depois da compactação

V_i = Volume total inicial

V_f = Volume total final

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Massa específica verde da argila em função da pressão de compactação..	6
Figura 2: Porosidade relativa e densidade relativa de pós compactados em função da pressão de compactação.	7
Figura 3: Processos de compactação classificados segundo o modo de aplicação da pressão e a temperatura na qual se aplica a pressão.	8
Figura 4: Ilustração da extrusão direta (a) e indireta (b).	12
Figura 5: Variação da pressão durante a extrusão de pó de Al – 20% Si – 3,1% Cu – 1,3% Mg – 0,3% Fe.	13
Figura 6: Flambagem.	14
Figura 7: Fluxograma de materiais e métodos.	17
Figura 8: Esboço das peças da matriz.	22
Figura 9: Configuração de extrusão da matriz.	23
Figura 10: Configuração de compactação convencional da matriz.	23
Figura 11: Ejeção da amostra.	24
Figura 12: Câmaras que comportam o pó na configuração de compactação convencional.	26
Figura 13: Câmaras que comportam o pó na configuração com extrusão.	27
Figura 14: Estrutura guia do punção na configuração sem extrusão.	28
Figura 15: Estrutura guia do punção na configuração com extrusão.	29
Figura 16: Porta amostras.	29
Figura 17: Base da matriz.	30
Figura 18: Simulação de deslocamento resultante.	31
Figura 19: Corte lateral com dimensões da matriz.	32
Figura 20: Mecanismo de separação.	33
Figura 21: Componentes da matriz.	34
Figura 22: Montagem da matriz.	34

Figura 23: Mecanismo de separação..	35
Figura 24: Partes da matriz lubrificadas.	35
Figura 25: Montagem da base, porta amostras e corpo da matriz	36
Figura 26: Preenchimento da matriz.	36
Figura 27: Matriz alocada na prensa hidráulica antes da compactação.	37
Figura 28: Amostra do segundo método de compactação.	38
Figura 29: Material remanescente do segundo método de compactação.	39
Figura 30: Estrutura guia com extrusão e seu punção montados no mecanismo de separação..	40
Figura 31: Base, porta amostras e estrutura guia de punção separados.	40
Figura 32: Estrutura guia de punção com extrusão e porta amostras após o terceiro método de compactação..	41
Figura 33: Posição de ejeção de amostra na prensa hidráulica.	41
Figura 34: Aproximação das peças na posição de ejeção de amostra..	42
Figura 35: Amostras compactadas.	43
Figura 36: Desgaste nos punções..	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços ferramentas (AISI/SAE).....	11
Tabela 2: Variáveis e indicadores.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Metalurgia do pó.....	5
2.1.1	Compactação	5
2.1.2	Sinterização	8
2.2	Matriz de compactação	9
2.2.1	Propriedades da matriz	9
2.2.2	Materiais da matriz	10
2.3	Extrusão	11
2.4	Flambagem	14
3	METODOLOGIA.....	15
3.1	Tipos de pesquisa.....	15
3.2	Materiais e métodos.....	17
3.2.1	Projeto da matriz.....	17
3.2.2	Processos de fabricação e equipamentos	19
3.2.3	Realização das Compactações	19
3.3	Variáveis e Indicadores	20
3.4	Instrumento de coleta de dados	21
3.5	Tabulação dos dados.....	21
3.6	Considerações finais do capítulo	21
4	RESULTADOS.....	22
4.1	Projeto da matriz.....	22
4.2	Construção	33
4.3	Testes	35
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	45

5.1	Conclusão	45
5.2	Recomendações	46
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA		47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do problema

Meios de fabricação econômicos e eficientes são importantes para a sustentabilidade das indústrias, e serão cada vez mais com o passar do tempo visto que os recursos disponíveis no planeta são limitados. Neste contexto, a metalurgia do pó é promovida como uma boa opção pois seu processo utiliza operações automatizadas com baixo consumo energético, alto aproveitamento de material e baixo custo capital (GERMAN, 1984).

Segundo Chiaverini (1992, p. 3), a metalurgia do pó é definida como:

um processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, que se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelos característicos:

- utilização de pós metálicos e não-metálicos como matérias-primas;
- ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processo de fabricação;
- produção de peças com suas formas definitivas ou praticamente definitivas, com tolerâncias estreitas, geralmente sem necessidade de processos posteriores ou de acabamento;
- produção de componentes com característicos estruturais e físicos impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;
- obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais.

A metalurgia do pó, de acordo com Upadhyaya (1997), consiste em três etapas básicas que ocorrem nesta ordem: obtenção do pó, compactação do pó e sinterização. A partir do pó, a próxima operação é a compactação, que consiste na compressão da matéria-prima no interior de matrizes. A formação de peças nessas matrizes é de tal forma que o produto se aproxima muito da geometria final desejada, necessitando mínimos ajustes, ou até mesmo nenhum.

O processo de compactação proporciona deformação das partículas do pó e redução dos espaços vazios entre elas, o que aumenta a superfície de contato partícula-partícula do material e favorece a adesão do material (MORAIS, 2022).

Diversas técnicas de compactação são utilizadas na indústria, entre elas estão a compactação uniaxial e a compactação isostática. No processo de compactação uniaxial a carga é aplicada de forma unidirecional por uma prensa, durante determinado tempo para proporcionar a união do pó (CHIAVERINI, 1992).

Segundo German (1984), durante a etapa de compactação, a forma de aplicação de pressão e sua distribuição sobre o pó tem grande influência na distribuição de densidades do

produto formado. O autor explica que uma distribuição de densidades uniforme promove características mecânicas homogêneas ao longo da peça, o que é geralmente desejado na produção de componentes mecânicos.

Considerando que a extrusão, conforme Kiminami (2021), consiste na passagem de material, metálico ou plástico, através de um orifício de modo a reduzir sua seção transversal, a aplicação de seu princípio em uma matriz de compactação de pó possivelmente influenciaria na distribuição de densidades do produto visto que o pó não sofreria somente compressão vertical, no caso da compactação uniaxial, mas também radial ao ser forçado a passar por um redutor de seção transversal cônico.

Para realizar tal processo, a matriz utilizada precisa apresentar um elemento que extrude o pó conforme a compactação ocorre. Para o sucesso da operação de compactação, segundo Chiaverini (1992), a matriz utilizada tem que apresentar geometria adequada, para que ocorra uma boa distribuição de tensões na formação do produto, e resistência o suficiente para realizar o processo sem falhar. Desta maneira, propõem-se:

Como fabricar uma matriz extrusora para a prensagem de pó para produção de amostras destinadas à sinterização?

1.2 Justificativa

A metalurgia do pó é um processo importante para a indústria pelas características que o procedimento proporciona, sendo um método de fabricação econômico para produção de grandes séries de peças iguais, que agrega versatilidade na obtenção da microestrutura desejada e possibilita a produção de materiais que só podem ser obtidos através da metalurgia do pó devido ao fato de não haver a necessidade de fundir os materiais constituintes (CHIAVERINI, 1992).

Na etapa de compactação da metalurgia do pó, o modo de aplicação de pressão e sua distribuição influenciada pela geometria da matriz tem um papel importante para formação de produtos com boas propriedades mecânicas, segundo Morais (2022).

Davenport (1993) defende a inovação de processos, enfatizando que apenas melhorias muitas vezes não são suficientes diante da necessidade das empresas se manterem competitivas em um mercado em constante desenvolvimento.

Conforme Lakatos e Marconi (2010), o desenvolvimento de estudos que gerem conteúdo que contribua para estudos posteriores e o desenvolvimento de um assunto são pesquisas agregam valor científico ao meio acadêmico.

Portanto, o aumento da pressão assim como a mudança em sua distribuição ao longo das regiões da peça, causada pela alteração no fluxo de material que a extrusão proporcionaria durante o processo de compactação, teria influência na formação da peça produzida. As amostras produzidas pela matriz proposta poderão ser objetos de estudo para verificar a influência da adição da extrusão no processo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Fabricar uma matriz extrusora para a prensagem de pó para produção de amostras destinadas à sinterização.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre: metalurgia do pó, matrizes de compactação e extrusão;
- Elaborar a metodologia para o desenvolvimento do projeto da matriz, produção e ejeção das amostras;
- Desenvolver o projeto da matriz de compactação por extrusão e pelo método convencional (unidirecional);
- Executar os testes de compactação e ejeção das amostras;
- Analisar, visualmente, a integridade física das matrizes e amostras.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito da metalurgia do pó, matrizes de compactação e extrusão. Nesse capítulo são reunidas informações para ser possível o desenvolvimento do projeto. O terceiro capítulo aborda a metodologia desenvolvida para a realização desse estudo. O quarto capítulo apresenta os

resultados da aplicação da metodologia desenvolvida no capítulo 3. Por fim, o capítulo 5 faz a conclusão de todas as etapas realizadas nesse estudo e dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó para pós metálicos, segundo Morais (2022), apresenta seus primeiros indícios por volta de 3000 a.C., quando os egípcios aplicavam um processo semelhante para a fabricação do “ferro esponja” para fazer ferramentas. Ainda, conforme o autor, a sinterização foi esquecida até o final do século 18, quando vários métodos de produção de pós de platina foram registrados.

A metalurgia do pó é definida, de acordo com German (1984, p. 3), como “o estudo do processamento de pós (metálicos ou não), incluindo fabricação, caracterização e conversão dos pós metálicos para componentes úteis de engenharia.”

Um dos materiais mais comuns e mais antigos utilizados na metalurgia do pó é a argila para a produção de cerâmica, conforme Abadir *et al* (2002). Os autores afirmam que o material é geralmente compactado em pressões que variam de 10 MPa à 60 MPa, e sinterizados em temperaturas entre 750 e 950 graus.

As características desse processo são destacadas por Chiaverini (1992), sendo as principais: produção de peças acabadas ou semiacabadas; tolerâncias dimensionais estreitas; não ser necessário atingir o ponto de fusão do principal constituinte do pó; e características microestruturais impossíveis de se conseguir em outros processos de fabricação.

Para Upadhyaya (1997), a metalurgia do pó pode ser separada em três etapas essenciais: obtenção do pó, que abrange desde a granulação do material até a mistura de pós de diferentes elementos para se atingir a liga com as características mecânicas desejadas; a compactação do pó; e a sinterização.

2.1.1 Compactação

A compactação é uma das etapas básicas da metalurgia do pó, consistindo fundamentalmente na prensagem de um pó granulado compreendido no interior de uma matriz rígida ou molde flexível, de acordo com Chiaverini (1992).

Segundo Upadhyaya (1997), a principal função da compactação de pós é consolidar o material para as dimensões desejadas do produto final, fornecendo os níveis de densidade e rigidez necessários para a peça verde ser sinterizada.

O estudo de Freire *et. al.* (2004) indica que a densidade da argila ao ser compactada tem um aumento de aproximadamente 100% na massa específica a partir da pressão de 60 MPa. O gráfico apresentado pelos autores (Figura 1) sugere que conforme a pressão de compactação aumenta a densidade do produto tende a um mesmo patamar.

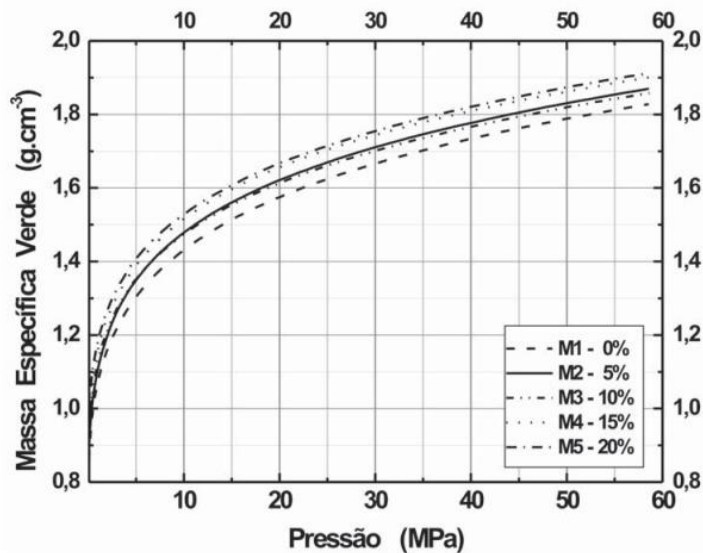


Figura 1: Massa específica verde da argila em função da pressão de compactação. Fonte: Freire *et. al.* (2004).

Conforme Morais (2022), nesse processo, a aplicação de pressão sobre o pó resulta em rearranjo e deformação do material, o que reduz os espaços vazios entre as partículas do material e proporciona maior área de contato entre elas.

Em razão do aumento do contato partícula-partícula, a ligação entre os átomos é favorecida e, por esse motivo, a difusão é promovida, o que aumenta a taxa de densificação na etapa de sinterização (GERMAN, 1984).

A densidade é um fator que deve ser controlado na etapa de compactação, de acordo com Sethi *et al.* (2008). Os autores afirmam que a uniformidade da distribuição de densidade pelas regiões da peça compactada é um fator determinante no desempenho desta, visto que gradientes de densidade causam distorções, gradientes de porosidade, ou os dois no produto sinterizado, podendo proporcionar trincas, empenamento e propriedades mecânicas não homogêneas dentro da peça.

O aumento da densidade possibilita atingir os valores de resistência desejados trabalhando em temperaturas menores durante a etapa de sinterização e, além disso, maiores valores de densidade contribuem na diminuição da porosidade e para um menor gradiente de densidade ao decorrer da peça (SINKA, 2007).

Na Figura 2 é ilustrada a relação entre a porosidade e a densidade relativa de pós compactados, com a pressão aplicada.

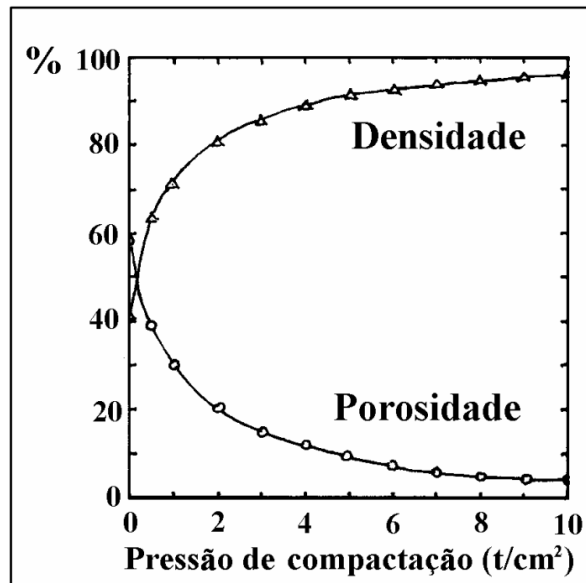


Figura 2: Porosidade relativa e densidade relativa de pós compactados em função da pressão de compactação.
Fonte: Fogagnolo (2000).

Segundo Chiaverini (1992), os processos de compactação podem ser classificados pela forma de aplicação de pressão e pela temperatura na qual se aplica a pressão. Na Figura 3 são ilustrados os tipos de compactação mais comuns. São eles:

- i. Compactação uniaxial a frio e a quente: ocorre aplicando pressão sobre o pó dentro de uma matriz através do punção de maneira uniaxial. A distribuição de densidades neste método é heterogênea devido ao atrito entre partículas e entre as partículas e a parede da matriz, sendo possível mitigar esse efeito com geometrias favoráveis e lubrificação (CHIAVERINI, 1992).
- ii. Compactação isostática a frio e a quente: consiste em aplicar pressão sobre o pó, contido em uma membrana flexível, através de um fluido dentro de uma câmara pressurizada, promovendo pressão igual em todas as direções. A desvantagem desse tipo de compactação é a menor precisão geométrica devido ao molde ser flexível (FOGAGNOLO, 2000).

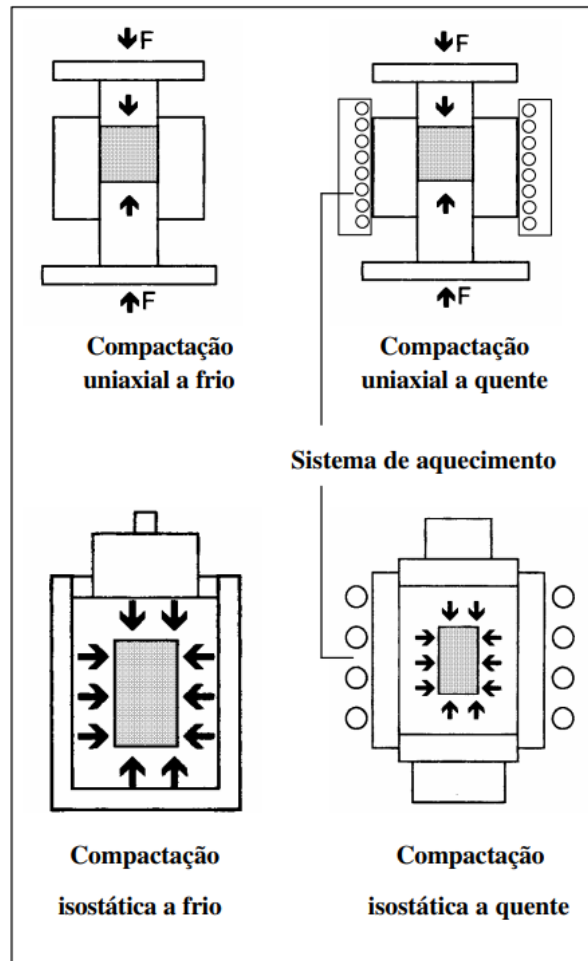


Figura 3: Processos de compactação classificados segundo o modo de aplicação da pressão e a temperatura na qual se aplica a pressão. Fonte: Fogagnolo (2000).

2.1.2 Sinterização

Loberto, Genova e Silva (2009) definem sinterização como um processo físico que transforma um conjunto de pós metálicos, compactados ou não, em corpos sólidos. Segundo os autores, o processo é termicamente ativado, sendo realizado geralmente em temperaturas entre $2/3$ e $3/4$ da temperatura de fusão do principal constituinte da liga utilizada, e ocorre através da difusão atômica do material.

Os fatores que mais influenciam durante o processo são temperatura, tempo e atmosfera do forno, de acordo com Moraes (2022). Conforme Upadhyaya (1997), a temperatura é a variável de processo que tem maior significância no resultado, visto que o tempo de sinterização tem seu efeito diminuído à medida que ele se prolonga, e que a atmosfera do forno afeta majoritariamente a superfície da peça, por processos de oxidação.

A força motriz da sinterização é a diminuição da energia superficial livre do conjunto de partículas, como afirma Kang (2005). Segundo o autor, a energia superficial livre do sistema apresenta tendência a ser diminuída, quando exposto a determinados níveis de temperatura, através da densificação do conjunto, que ocorre pela ocupação dos espaços vazios no pó devido ao transporte de material e do aumento de tamanho dos grãos, resultando em diminuição da área de superfície dos grãos.

Conforme Santos (2018), a sinterização normalmente é dividida em três etapas, sendo a primeira o pré-aquecimento do material; a segunda a aplicação da técnica de sinterização em si, quando ocorre a difusão do material; e a terceira consiste no resfriamento das peças sinterizadas.

2.2 Matriz de compactação

Segundo Chiaverini (1992), na etapa de compactação são utilizados recipientes destinados a transmitir a carga de compactação para o pó reservado em seu interior, podendo ser do tipo matriz rígida, para processos como compactação unidirecional, ou molde flexível, para compactação isostática.

De acordo com Moraes (2022), as matrizes que serão utilizadas no processo de compactação da metalurgia do pó devem apresentar características mecânicas que permitam realizar a compactação sem perda de integridade física e que resulte em peças dentro de um padrão de qualidade.

2.2.1 Propriedades da matriz

Dentre as propriedades mecânicas presentes em uma matriz, Upadhyaya (1997) evidencia a resistência a compressão, dureza e rigidez como as determinantes para o sucesso do procedimento, sendo necessário estudar os parâmetros do processo para ser possível determinar os níveis de dureza e rigidez ideais. Essas propriedades contribuem para evitar deformações devido a carga aplicada sobre a matriz.

Segundo Sinka (2007), os pós metálicos durante a compressão geralmente funcionam como agentes abrasivos sobre as paredes da matriz, logo a resistência a abrasão do seu material

constituente tem um papel importante para evitar o desgaste acelerado devido a recorrência da operação dentro de linhas de produção.

German (1989) explica que as características de aderência, condutividade térmica e expansão térmica são propriedades da matriz que possuem influência sobre a compactação. Baixos níveis de aderência contribui para facilitar a remoção do produto da matriz, enquanto baixa condutividade térmica minimiza a perda de calor útil no processo de compactação a frio, e a baixa expansão térmica contribui para reduzir a deformação da peça durante o resfriamento.

2.2.2 Materiais da matriz

Segundo Vieira Filho *et al.* (2013), os aços comumente utilizados na fabricação de matrizes para a metalurgia do pó fazem parte da família de materiais denominada aços-ferramenta. A norma NBR 6189 define os aços ferramenta como aços-carbono e ligados que podem adquirir por meio de tratamento térmico uma ou mais das seguintes propriedades:

- i) Alta dureza;
- ii) Alta resistência ao desgaste;
- iii) Alta resistência ao impacto;
- iv) Alta resistência ao choque térmico;
- v) Alta resistência à perda de dureza no trabalho a quente;
- vi) Alta indeformabilidade.

De acordo com as normas (AISI/ SAE) os aços usados para a confecção de ferramentas são classificados de acordo com a Tabela 1. Nessa tabela é apresentado cada tipo de aço ferramenta assim como sua designação e tipo de aplicação.

Tabela 1: Classificação dos aços ferramentas (AISI/ SAE).

TIPO	DESIGNAÇÃO	APLICAÇÕES
O	Aços ferramentas para trabalho a frio-temperável em óleo	Trabalho a frio
A	Aços ferramentas para trabalho a frio-temperável ao ar	Trabalho a frio
D	Aços ferramentas para trabalho a frio	Trabalho a frio
H	Aços ferramentas para trabalho a quente	Trabalho a quente
E	Temperáveis em água	Trabalho a frio
M	Aços rápidos com alto teor de molibdênio	Usinagem
T	Aços rápidos com alto teor de tungstênio	Usinagem
P	Aços para moldes	Molde para injeção de plásticos
S	Resistentes ao choque	Trabalho a frio ou a quente

Fonte: Gobbi (2009).

2.3 Extrusão

Segundo Kiminami (2021), extrusão é um “processo de conformação por compressão no qual o metal frio ou aquecido é forçado a fluir através de uma matriz com forma desejada para produzir um produto com seção reduzida “.

A extrusão apresenta diversos benefícios, de acordo com Groover (2000) eles são: a possibilidade de uma variedade de seções transversais, especialmente por meio do processo à quente; melhora na estrutura dos grãos e conseqüentemente nas propriedades de resistência para os processos a frio e a morno; tolerâncias pequenas, principalmente na extrusão a frio; e pouco ou nenhum desperdício de material em operações a frio.

Conforme Fogagnolo (2000), a extrusão pode ser classificada em dois tipos principais: extrusão direta e extrusão indireta. Kiminami (2021) explica que “na extrusão direta um tarugo cilíndrico é colocado numa câmara e forçado através de uma abertura de matriz por um pistão”, já “na extrusão indireta, um tarugo cilíndrico é colocado numa câmara e a matriz se desloca na direção do tarugo”. Na figura 4 são ilustradas as extrusões direta e indireta.

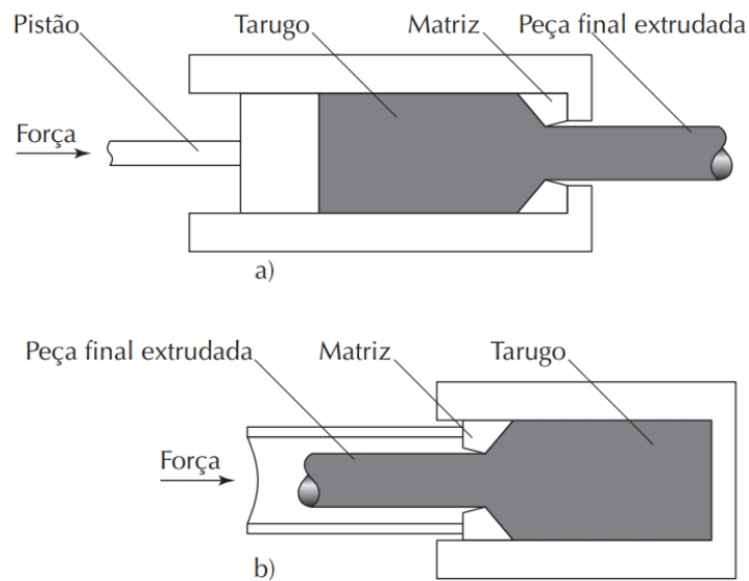


Figura 4: Ilustração da extrusão direta (a) e indireta (b).
Fonte: Kiminami (2021).

Uma das grandes desvantagens da extrusão direta é o atrito que ocorre entre o material e as paredes da câmara devido ao seu movimento relativo, segundo Groover (2000). Ainda, o autor afirma que o atrito gerado na extrusão direta provoca um aumento substancial na força necessária para realizar o processo.

Em contrapartida, em razão de não haver movimento relativo entre material e as paredes da câmara na extrusão indireta, o processo se beneficia por necessitar menores cargas para ser realizado (FOGAGNOLO, 2000).

Para Kiminami (2021), as variáveis que possuem maior influência na força necessária para fazer a extrusão são: tipo de extrusão; razão de extrusão; fator de transformação; temperatura de trabalho; velocidade de extrusão; e condições de atrito. O autor explica que razão de extrusão se refere à razão da área inicial da seção transversal do tarugo com a área final da seção transversal depois da extrusão, e fator de transformação compreende a razão entre a área da seção transversal do recipiente e a área da seção transversal do perfil multiplicado pelo número de furos.

Segundo Fogagnolo (2000), a pressão de extrusão P para materiais metálicos pode ser expressada pela seguinte expressão:

$$P = K \ln R \quad (1)$$

Onde, K é uma constante para o determinado material e R é a razão de extrusão.

As características da extrusão de pós são diferentes de materiais monolíticos. De acordo com Fogagnolo (2000), a alta porosidade e também a presença de partículas que não estão ligadas umas às outras, o que faz com que os mecanismos de deformação na extrusão sejam significativamente distintos.

A seguinte equação é proposta por Roberts e Ferguson (1991) para expressar a relação entre a pressão a pressão de extrusão e a razão de extrusão de pós:

$$P = a' + b' * \ln R \quad (2)$$

Onde, a' é o trabalho redundante e b' é o trabalho de deformação.

Segundo os autores, são incluídos no trabalho redundante os fenômenos de soldagem entre partículas, fratura e re-soldagem, enquanto a partícula se deforma. Ainda, eles afirmam que como esses fenômenos são beneficiados conforme a área superficial do pó aumenta, quanto mais finas são suas partículas, maior é a pressão de extrusão necessária para extrudar o material. Na figura 5 pode ser observada a variação da pressão de extrusão em relação ao deslocamento do punção.

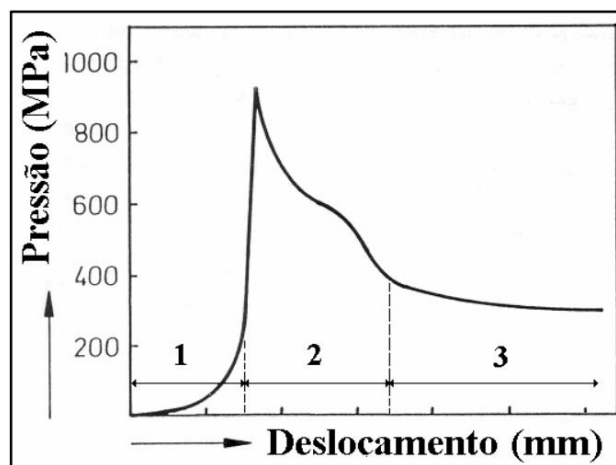


Figura 5: Variação da pressão durante a extrusão de pó de Al – 20% Si – 3,1% Cu – 1,3% Mg – 0,3% Fe.

Fonte: Fogagnolo (2021).

Como é possível observar, a pressão aumenta linearmente até atingir um valor máximo, no qual o material começa a extrudar, e após a pressão diminui conforme o punção avança, o que pode ser explicado pela diminuição da área de contato entre o material e a parede da câmara.

2.4 Flambagem

O fenômeno de flambagem se caracteriza pela deflexão lateral de um elemento estrutural comprido e esbelto causada por uma força de compressão axial, o que pode causar a perda de estabilidade em cargas abaixo da tensão de escoamento (HIBBELER, 2016).



Figura 6: Flambagem.
Fonte: Hibbeler (2016).

Segundo Hibbeler (2016), um elemento estrutural com essas características apresenta um valor máximo de força de compressão axial, denominado carga crítica (P_{cr}), que este pode suportar sem que ocorra flambagem. Ainda, o autor apresenta a seguinte equação para o cálculo da carga crítica:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \quad (3)$$

Onde, P_{cr} é a carga crítica, E é o módulo de elasticidade para o material, I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal da coluna, K é o fator de comprimento efetivo e L é o comprimento da coluna.

O valor de K varia conforme as condições de contorno: quando ambas as extremidades do elemento estrutural estão engastadas K é 0,5; quando estão engastadas e presas por pinos, é 0,7; quando estão presas por pinos, é 1; e quando uma extremidade está engastada e outra livre, é 2 (HIBBELER, 2016).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

Segundo o Dicio, Dicionário Online de Português (2023), pesquisa é definido como uma reunião de operações ou atividades que visa descobrir novos conhecimentos em vários domínios, principalmente no âmbito científico. Conforme Lakatos e Marconi (2010), pesquisas podem ser classificadas por diversos critérios, entre eles estão os descritos a seguir.

Quanto à forma de abordagem:

- Pesquisa quantitativa: se baseia na quantificação de dados, de acordo com Gil (2017). Essa pesquisa é estruturada e objetiva, com o objetivo de mensurar, medir ou contar os fenômenos estudados, por meio da coleta de dados através de questionários, testes, escalas, dentre outros instrumentos. A análise dos dados é feita por meio de técnicas estatísticas, modelos matemáticos ou uso de fórmulas, visando a generalização dos resultados obtidos para uma população maior (GIL, 2017);
- Pesquisa qualitativa: compreende e interpreta o fenômeno estudado em profundidade, considerando sua complexidade e especificidade, sem se preocupar com a representatividade numérica, conforme Vergara (2019). Essa pesquisa se baseia em técnicas de coleta de dados como entrevistas, observações, análise de documentos e registros, dentre outras, sendo a análise dos dados é feita de forma não numérica e não estatística, por meio da interpretação dos significados e das experiências dos participantes (VERGARA, 2019).

Quanto aos objetivos gerais:

- Pesquisa exploratória: tem como objetivo proporcionar uma visão geral e aproximada de um determinado fenômeno, com o objetivo de identificar ideias, hipóteses ou conceitos que possam ser desenvolvidos em estudos posteriores mais aprofundados (LAKATOS e MARCONI, 2010);
- Pesquisa descritiva: tem como objetivo descrever características de determinada população amostral, de fenômenos ou de um experimento, segundo Gil (2017). Esse tipo de pesquisa envolve a coleta de dados e a análise desses dados é realizada por meio de técnicas estatísticas descritivas, com o objetivo de apresentar as informações coletadas de forma clara e objetiva (GIL, 2017).

- Pesquisa explicativa: tem como objetivo investigar as relações de causa e efeito entre as variáveis de um determinado fenômeno ou problema de pesquisa, conforme Vergara (2019). Esse tipo de pesquisa busca explicar as razões que levam a determinado fenômeno, ou seja, busca identificar as causas do fenômeno (VERGARA, 2019).

Quanto aos procedimentos técnicos:

- Pesquisa bibliográfica: consiste na busca, seleção, análise e interpretação de informações contidas em fontes bibliográficas, tais como livros, artigos científicos, teses, dissertações, entre outros materiais publicados, como diz Lakatos e Marconi (2010). Esse tipo de pesquisa tem como objetivo reunir informações teóricas e conceituais sobre determinado tema ou problema de pesquisa, a fim de embasar a elaboração de hipóteses, a definição de variáveis e a fundamentação teórica do trabalho (LAKATOS e MARCONI, 2010).
- Pesquisa experimental: consiste na seleção de um objeto de estudo, determinação das variáveis que são capazes de influenciá-lo, definição das formas de controle e de observação dos efeitos que a variável tem sobre o objeto, de acordo com Gil (2017). É um tipo de pesquisa que busca verificar hipóteses causais por meio da manipulação das variáveis independentes em condições controladas. (GIL, 2017).

Em relação à forma de abordagem dessa pesquisa, é possível classificá-la como qualitativa, posto que na realização deste trabalho não houve coleta de dados numéricos.

Com relação aos objetivos gerais, esta pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois tem como finalidade desenvolver um equipamento capaz de realizar uma técnica de compactação dinâmica pouco explorada, proporcionando dados para possíveis estudos posteriores.

Quanto aos procedimentos técnicos, é possível classificar esta pesquisa como pesquisa bibliográfica, devido ao levantamento de dados para embasamento teórico, e experimental, porque propõem o estudo do desempenho da matriz produzida em suportar a carga aplicada e em formar a peça, apresentando variáveis que influenciam no processo controladas.

3.2 Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho foi desenvolvida uma metodologia cujos tópicos podem ser observados no fluxograma da Figura 7.

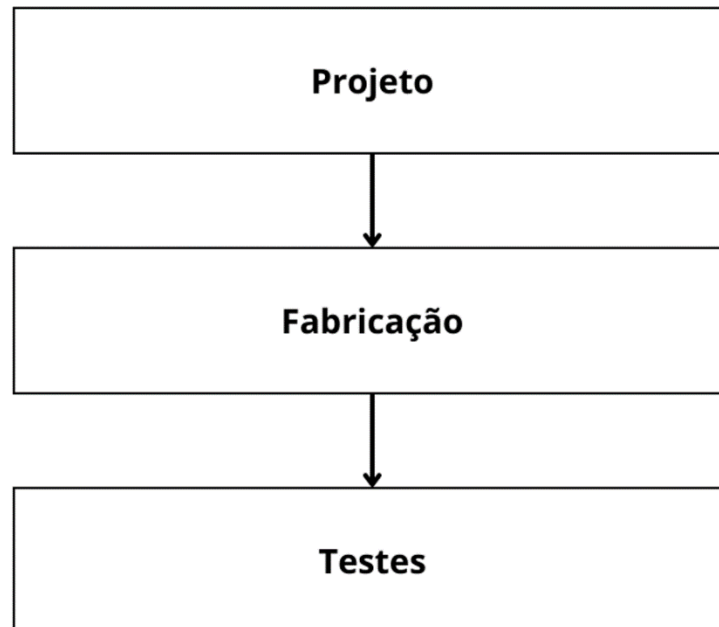


Figura 7: Fluxograma de materiais e métodos.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.2.1 Projeto da matriz

Para o projeto da matriz foram definidos alguns objetivos: produzir amostras de argila compactada coesas; possuir componentes modulares para realização de compactação pelo processo de extrusão e prensagem cilíndrica padrão (método convencional); apresentar elementos para facilitar a ejeção de amostras; e possuir um mecanismo para separar as partes (componentes) da matriz após a compactação.

Então, definiu-se que a matriz será composta por 4 partes (componentes), porém, como executará dois processos distintos de compactação, serão construídos 6 componentes, sendo eles: dois punções, duas estruturas as quais serão guias para os punções, um porta amostras e uma base. É importante frisar que a matriz produzirá amostras por meio de extrusão e pelo processo convencional (compactação unidirecional), logo, a matriz possuirá dois conjuntos de punção e duas estruturas guia de punção, os quais compartilharão o mesmo porta amostras e base.

O porta amostras ficará entre a base e a estrutura guia dos punções, componente no qual a amostra será conformada (compactada). O punção de menor diâmetro terá seção transversal nas mesmas dimensões do porta amostras, portanto, este punção também será utilizado para ejeção das amostras produzidas. As amostras terão uma altura de 12 mm e o mesmo diâmetro definido para a cavidade da estrutura guia do punção da configuração de compactação convencional

Abadir *et. al* (2002) utilizou em seu trabalho uma faixa de pressão de compactação da argila entre 10 MPa e 60 MPa, porém, no presente trabalho adotou-se uma pressão de compactação de 100 MPa, pois no processo extrusão a força aplicada no punção é maior para superar a resistência por atrito e redução de área, então, admitiu-se uma pressão maior, consequentemente, uma força maior, a fim de garantir o preenchimento completo do porta amostras e avaliação estrutural da matriz fabricada.

Considerando que a pressão aplicada sobre o pó é a relação entre a força aplicada pela prensa hidráulica e a área transversal do punção da matriz, foi possível determinar o diâmetro máximo que os punções da matriz poderiam possuir utilizando a carga máxima da prensa hidráulica utilizada e dessa forma, definir o diâmetro dos punções da matriz e das cavidades da matriz.

Para determinar o comprimento dos punções e das cavidades da matriz foi definido que a matriz terá que reduzir pelo menos 50% do volume do pó após a compactação. A escolha dessa redução foi baseada nos resultados de Freire *et. al.* (2004), seus resultados sugerem um patamar de aumento de 100% na massa específica verde ao compactar argila, ou seja, suas amostras tenderam a sofrer aproximadamente 50% de redução no seu volume conforme a pressão de compactação foi aumentada.

Afim de verificar a resistência mecânica dos punções, foi realizado um estudo de carga crítica de flambagem e, consequentemente, tensões envolvidas por meio de cálculos analíticos e simulações no *software SolidWorks* utilizando as cargas máximas definidas para cada punção para determinar a deformação elástica que os punções estarão submetidos.

Considerando a resistência em separar as partes da matriz pós processo de compactação, devido à adesão entre as interfaces, foi desenvolvido um mecanismo de separação. Este consiste em barras metálicas em formato de “U” no qual a matriz será fixada e através da ação do aperto de uma porca as peças serão separadas.

3.2.2 Processos de fabricação e equipamentos

A fabricação da matriz foi feita com no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto. Para a construção da matriz foi utilizado o aço 1045, que possui um limite de escoamento de 485 MPa e um módulo de elasticidade de 210 GPa (MATWEB, 2024). Apesar desse aço não possuir alta dureza, foi escolhido a fim de testar o conceito da matriz pois estava disponível para uso. O processo utilizado foi o torneamento.

A construção do mecanismo de separação das partes da matriz foi realizada na oficina do Baja da Escola de Minas alocada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto. Utilizou-se três barras de aço as quais foram cortadas, soldadas e furadas conforme o projeto desenvolvido em CAD.

Os testes de compactação utilizando a matriz desenvolvida foram realizados no Laboratório de Sinterização da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Utilizou-se uma prensa hidráulica de capacidade de 150kN do laboratório para realização os ensaios, assim como recipientes e uma espátula para manuseio do pó.

3.2.3 Realização das Compactações

O material utilizado para compactação foi a argila plástica em pó com granulação fina, doado pelo laboratório de sinterização.

A matriz irá realizar compactações com e sem extrusão, operando com as duas configurações projetadas. Três amostras serão produzidas, uma utilizando um método padrão de preenchimento da matriz na configuração “compactação convencional” e duas utilizando métodos diferentes de preenchimento para configuração de extrusão.

Para a execução dos testes de compactação os componentes da matriz, após serem limpos de resíduos, foram lubrificados com carvão ativado. A lubrificação foi feita a fim de reduzir a resistência mecânica por atrito, assim, o punção desliza com menor resistência dentro da cavidade da matriz. Este procedimento tem o objetivo de impedir a adesão do material particulado com as paredes da matriz, facilitar a ejeção da amostra e extração do punção.

Então, após as partes terem sido devidamente lubrificadas, foram acopladas a base, o porta amostras e a estrutura guia do punção para fazer o preenchimento com o material que será compactado. O preenchimento foi realizado depositando o material particulado na cavidade da

matriz e realizando uma pré-compactação manual utilizando o punção até que houvesse o suficiente para produção de uma amostra. Não houve medição do material depositado na matriz devido ao porta amostras gerar amostras com a mesma dimensão contando que haja material o suficiente depositado.

Em seguida, o punção é posicionado na matriz e o conjunto alocado na prensa hidráulica para realizar a compactação. Devido à diferença no diâmetro dos punções, foram aplicadas, durante 1 minuto, cargas diferentes em cada configuração de modo a resultar em uma aplicação de 100 MPa sobre o pó em todos os ensaios.

Para realizar as compactações foi utilizada a prensa hidráulica Nowak 15 Ton, com capacidade de 150 kN, motor de 2 HP e velocidade de acionamento de 9 mm/seg.

Após retiradas as peças da prensa hidráulica, elas foram separadas utilizando o mecanismo de separação desenvolvido.

A ejeção das amostras do porta amostras ocorreu utilizando o punção de menor diâmetro e a prensa hidráulica.

3.3 Variáveis e Indicadores

Variável é um conceito abstrato que se refere a uma característica, propriedade, atributo, dimensão ou aspecto de um objeto de estudo que pode assumir diferentes valores. As variáveis são elementos fundamentais em uma pesquisa, pois são elas que permitem ao pesquisador identificar, mensurar e analisar as relações entre os fenômenos investigados (LAKATOS e MARCONI, 2010).

Segundo Gil (2017), indicador é uma medida empírica que permite a operacionalização de uma variável. Os indicadores são utilizados para expressar as diferentes dimensões ou aspectos de uma variável, tornando-a mensurável e possibilitando a coleta de dados.

Tabela 2: Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Projeto	Esboço
	Dimensões
	Volume de compactação
	Carga limite de flambagem
	Deformação elástica (simulação)
	Material amostra
Fabricação	Material matriz
	Equipamento
	Mão de obra
Testes	Pressão de compactação
	Ejeção das amostras
	Integridade das amostras

Fonte: Pesquisa direta, (2023).

3.4 Instrumento de coleta de dados

As análises de deformação foram realizadas no *software SolidWorks*, a partir de simulações de regime estático.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados apresentados por este trabalho foram tabulados nos *softwares Microsoft Word*, onde serão construídos os textos, e *Microsoft Excel*, onde foram construídas tabelas.

3.6 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foram abordados a metodologia e as ferramentas que foram utilizadas para a realização deste trabalho.

No capítulo a seguir, são apresentados a aplicação da metodologia e seus resultados para o projeto, fabricação e realização das compactações.

4 RESULTADOS

4.1 Projeto da matriz

A matriz foi idealizada para ter 6 componentes, que podem ser vistos na figura 8. Para realizar compactações pelo processo de extrusão e pelo método de compactação convencional foi definido que a matriz seria operada com 4 componentes, sendo elas: um punção, que aplicará a carga sobre o pó; uma estrutura guia de punção, que servirá de guia para seu determinado punção e abrigará parte do pó que será compactado; um porta amostras, que formará a amostra; e uma base.

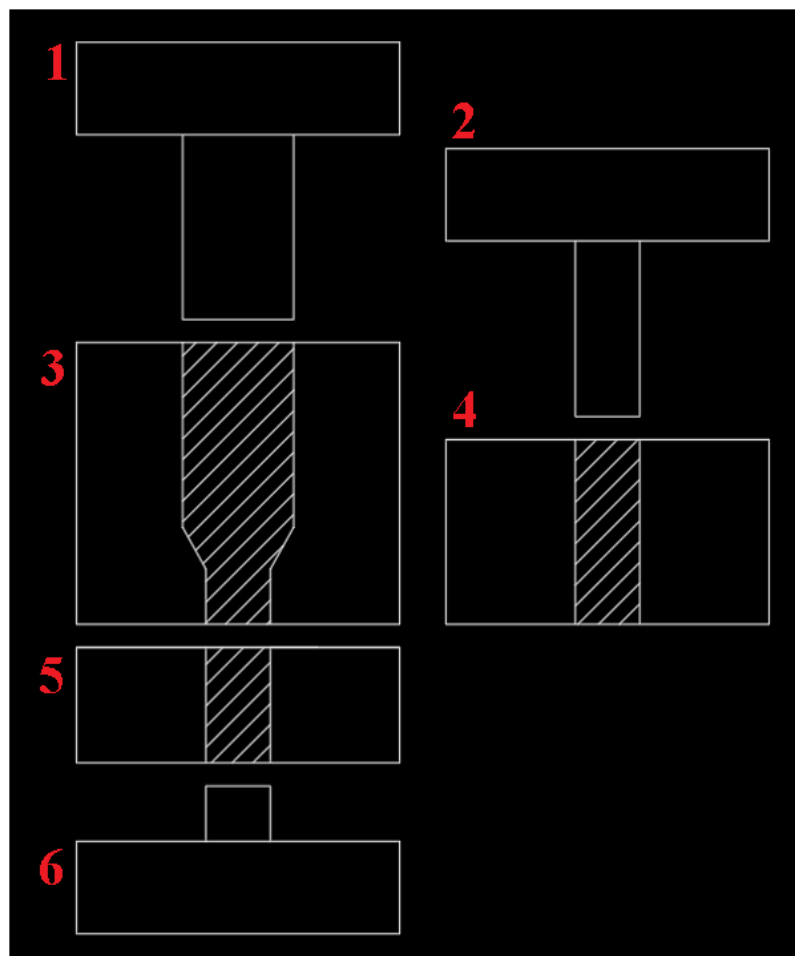


Figura 8: Esboço das peças da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Conforme observado na Figura 8, a matriz pode ter duas configurações para a realização de compactação com extrusão e convencional (unidirecional). A primeira configuração utiliza o punção de maior diâmetro (1), a estrutura guia para extrusão (3), o porta amostras (5) e a base (6). A estrutura guia do punção nessa configuração produz uma redução de área da seção transversal da amostra, conforme observado na Figura 9 (a direita).

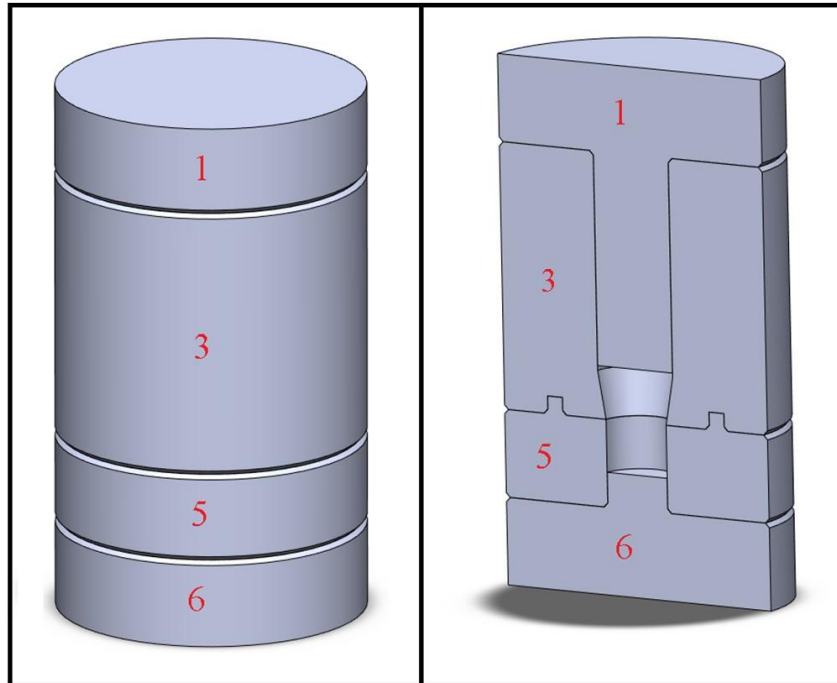


Figura 9: Configuração de extrusão da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A segunda configuração (Figura 10) utiliza o punção de menor diâmetro (2), a estrutura guia para esse punção (4), o porta amostras e a base. Nessa configuração, a cavidade da matriz possui diâmetro constante em todo seu comprimento e realizará compactação unidirecional.

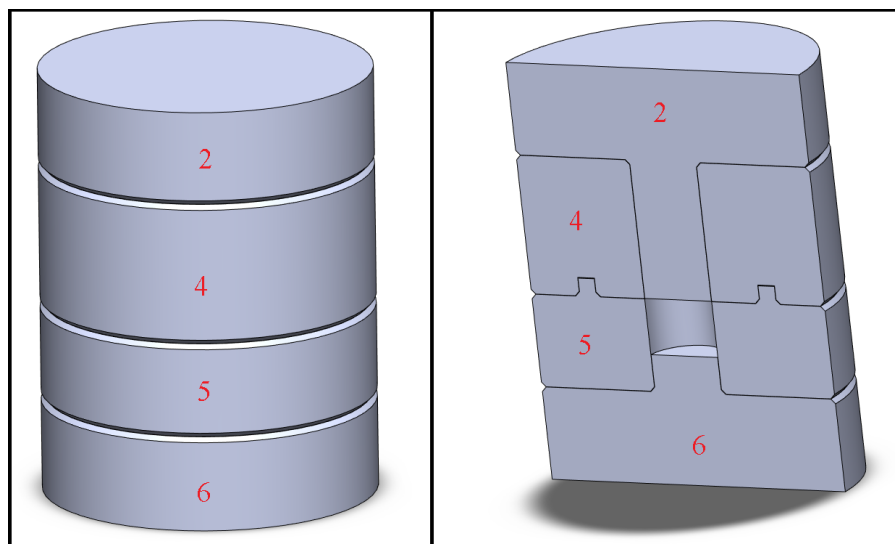


Figura 10: Configuração de compactação convencional da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O porta amostras foi projetado para facilitar a ejeção das amostras e funcionará de modo a produzir amostras de mesma geometria e dimensão em todas as compactações. No procedimento de ejeção o punção da configuração de compactação convencional será acoplado no porta amostras e o conjunto será posicionado na prensa em cima de duas placas com um vão entre elas, através da ação da prensa o punção irá ejetar a amostra, conforme demonstrado na

Figura 11. A altura determinada para as amostras foi 12 mm e para o punção da base, 8mm, logo, a altura do porta amostras foi estabelecido como 20 mm.

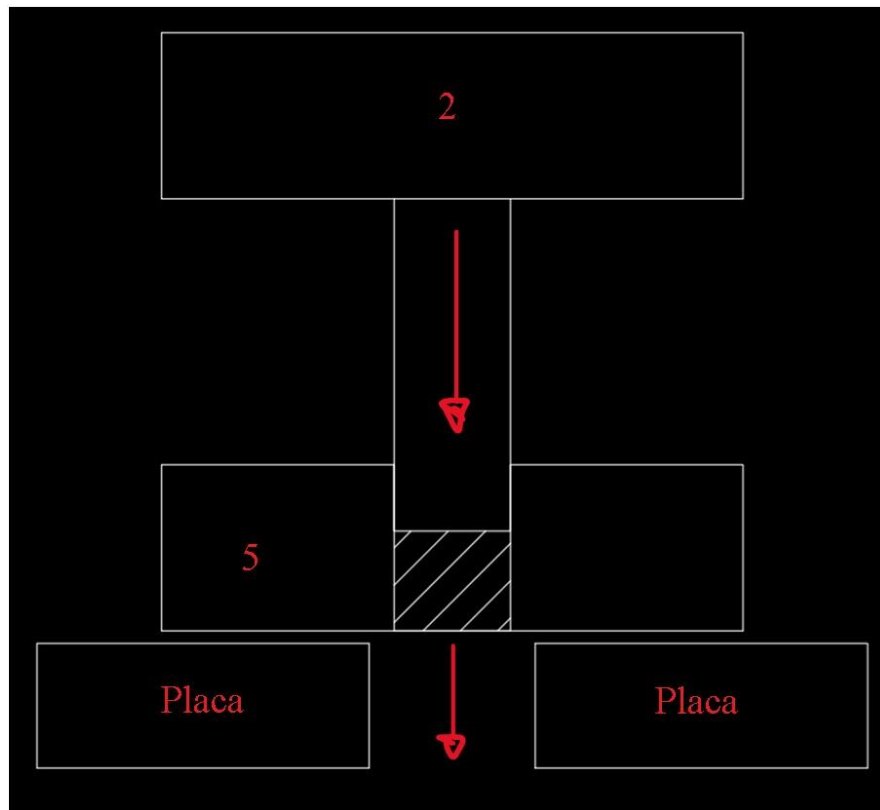


Figura 11: Ejeção da amostra.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Os punções foram dimensionados visando aplicar 100 MPa sobre o pó. Como a carga máxima da prensa hidráulica que realizará a compactação é de 150 kN, os punções devem ter um diâmetro tal que promova uma pressão de 100MPa sobre o pó. A fim de obter o diâmetro necessário para a compactação sob uma pressão de 100 MPa, o seguinte cálculo foi realizado:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde, P é a pressão exercida pelo punção, em Megapascal (MPa), F é a força exercida pela prensa sobre o punção, em Newtons (N), e A é a área da seção transversal do punção, em milímetros quadrados (mm²).

Rearranjando:

$$A = \frac{F}{P} \quad (5)$$

Aplicando a carga máxima da prensa (150.000 N) e a pressão desejada (100 MPa):

$$A = \frac{150000}{100} = 1500 \text{ mm}^2$$

Como a área é circular, foi calculado:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (6)$$

Onde, D é o diâmetro do punção em milímetros (mm).

Para achar o diâmetro:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (7)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1500}{\pi}} \approx 43,7 \text{ mm}$$

Logo, o diâmetro máximo admitido para os punções é 43,7 mm.

A fim de evitar a utilização da prensa hidráulica em carga máxima, os punções devem apresentar diâmetro menor que o valor máximo admitido. Então, mantendo a pressão de 100 MPa, calculou-se a força exercida pela prensa utilizando valores de diâmetro menores que 43,7 mm aplicando a Equação 8:

$$F = P * A \quad (8)$$

Dessa maneira, definiu-se para a configuração com extrusão, 20 mm de diâmetro para a cavidade da estrutura guia do punção e 19,9 mm para o punção, adotando 0,5% de folga entre a cavidade da matriz e o punção. Com um punção de 19,9 mm de diâmetro foi calculado que a força aplicada pela prensa deve ser 31,100 kN para se atingir 100 MPa. Devido ao medidor de carga da prensa não ter a precisão necessária, será utilizado uma carga de 30 kN nos ensaios.

Já para a configuração sem extrusão foi definido 16 mm para a cavidade da estrutura guia do punção e 15,9 mm para o punção, mantendo 0,1 mm de diferença entre os diâmetros. Com um punção de 15,9 mm de diâmetro, é necessária uma carga de aproximadamente 19,855 kN para atingir 100 MPa aplicados sobre o pó. Uma carga de 20 kN será utilizada nos ensaios.

Segundo Freire *et. Al* (2004), ao compactar argila, sua massa específica verde chega em um patamar conforme o aumento da pressão que é aplicada, apresentando um aumento de aproximadamente 100%. Logo, uma compactação com capacidade de diminuir 50% do volume do material é suficiente para se atingir esse patamar de massa específica verde.

A fim de verificar a capacidade de diminuir o volume do material compactado de cada configuração, foi realizado um estudo dos volumes das cavidades da matriz antes e depois da compactação.

Para a configuração de compactação convencional a razão entre o volume inicial (A) e o final (B) é igual à razão entre a altura até a qual o pó foi preenchido e a altura do material após a compactação. Considerando a altura máxima de preenchimento de pó como 32 mm e a altura final da amostra 12 mm, como representado na Figura 12, o volume final corresponde à 37,5% do volume inicial, ou seja, a matriz é capaz de realizar uma compactação de até 62,5%.

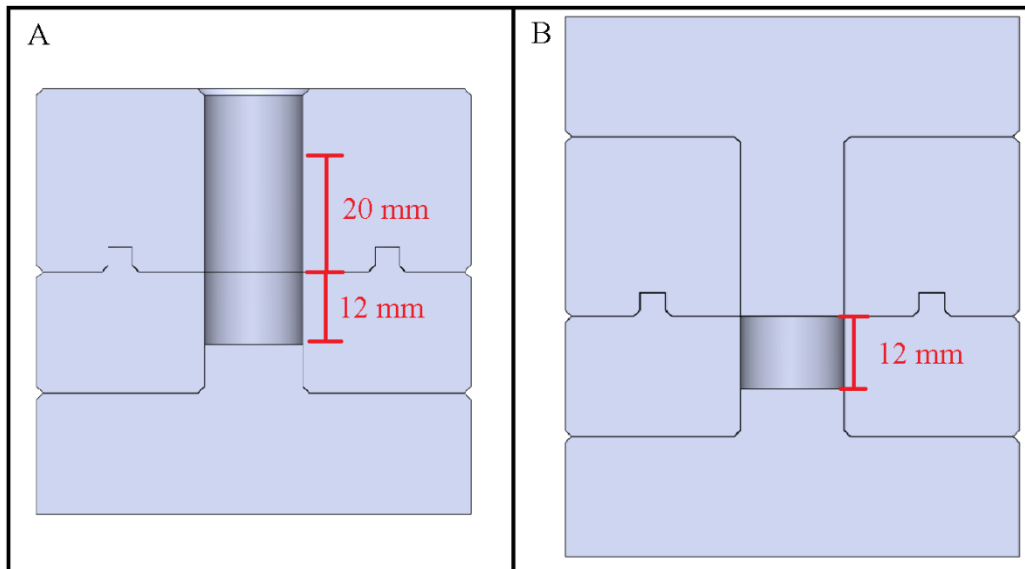


Figura 12: Câmaras que comportam o pó na configuração de compactação convencional.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para a configuração com extrusão, os seguintes cálculos foram realizados para verificar a capacidade de redução do volume do pó:

A redução no volume do pó na matriz pode ser obtida através da razão entre o volume final (V_f) e o volume inicial (V_i). Para calcular os volumes a cavidade da matriz na configuração com extrusão foi dividido em três seções, apresentadas na Figura 13.

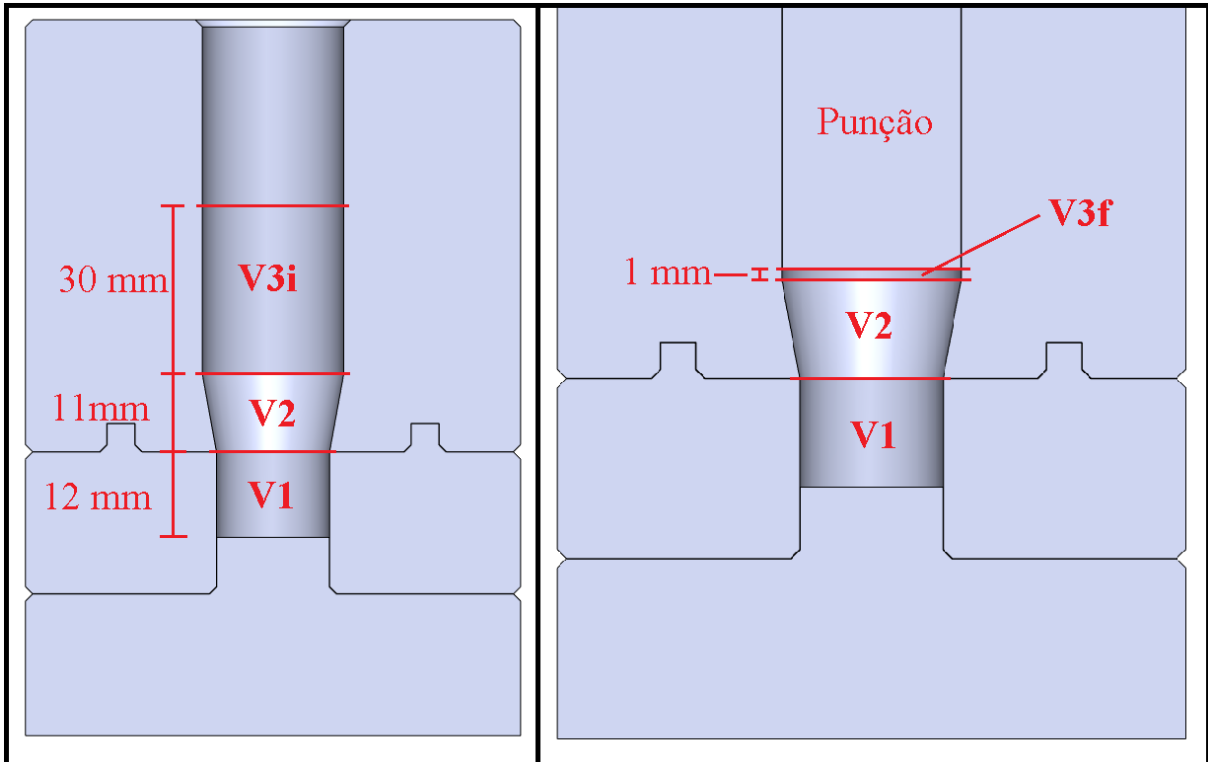


Figura 13: Câmaras que comportam o pó na configuração com extrusão.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Calculando as parcelas do volume foi obtido:

V1:

$$V1 = h * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (9)$$

Onde, h é a altura em milímetros e D é o diâmetro da cavidade.

$$V1 = 12 * \frac{\pi * 16^2}{4} \approx 2412,74 \text{ mm}^3$$

V2:

$$V2 = \frac{\pi * h}{3} * (R^2 + R * r + r^2) \quad (10)$$

Onde, R é o maior raio do cone cortado, r é o menor raio cone cortado, e h é a altura do cone cortado.

Valores de R e r foram baseados nos diâmetros das cavidades, definidos anteriormente, e h foi definido como 11 milímetros:

$$V2 = \frac{\pi * 11}{3} * (10^2 + 10 * 8 + 8^2) \approx 2810,68 \text{ mm}^3$$

E o valor de $V3i$ e $V3f$, considerando um preenchimento de 30mm a partir do cone:

$$V3i = 30 * \frac{\pi * 20^2}{4} \approx 9424,78 \text{ mm}^3$$

$$V3f = 1 * \frac{\pi * 20^2}{4} \approx 314,16 \text{ mm}^3$$

Logo, a razão entre os volumes é:

$$\frac{Vf}{Vi} = \frac{Vz+Vc+Vcil f}{Vz+Vc+Vcil i} \quad (11)$$

$$\frac{Vf}{Vi} = \frac{5.536,98}{14.757,60} = 0,375$$

Logo, o volume final corresponde a 37,5% do volume inicial, ou seja, ocorreu uma redução de 62,5% no volume nessa configuração.

Dessa maneira, foi possível determinar as dimensões de cada componente da matriz.

Todos os componentes apresentam formatos cilíndricos, com um diâmetro de 70 mm.

Como a estrutura guia da configuração de compactação convencional deve comportar um preenchimento de 20 mm de sua altura, foi admitido 30 mm de altura para esse componente, deixando 10 mm da cavidade vazia para que o punção seja inserido. Desse modo, a peça contém simplesmente um furo passante cilíndrico de 16 mm de diâmetro e um sulco de 4 por 4 milímetros na parte inferior para realizar o encaixe com o porta amostras. A modelagem da estrutura guia do punção na configuração “sem extrusão” pode ser observado na Figura 14.

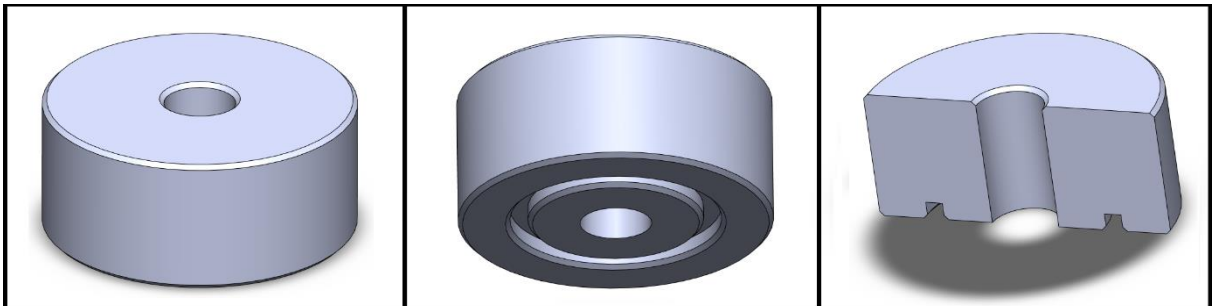


Figura 14: Estrutura guia do punção na configuração sem extrusão.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Considerando que a estrutura guia do punção na configuração de extrusão precisa comportar uma altura de pelo menos 30 mm de pó a partir do cone extrusor de 11 mm de altura, admitiu-se 61 mm de altura para esse componente. Assim, a cavidade da peça apresenta um furo de 20mm de diâmetro de 50 mm de profundidade e, a partir desse ponto o furo passa a ter formato de cone e nos restantes 11 mm de altura seu diâmetro é diminuído até 16 mm uniformemente. O diâmetro final de 16 mm foi definido de modo a se igualar ao diâmetro do furo da estrutura guia do punção sem extrusão e porta amostras e resultou em um semi-ângulo de aproximadamente 10 graus. A modelagem dessa peça pode ser observada na Figura 15.

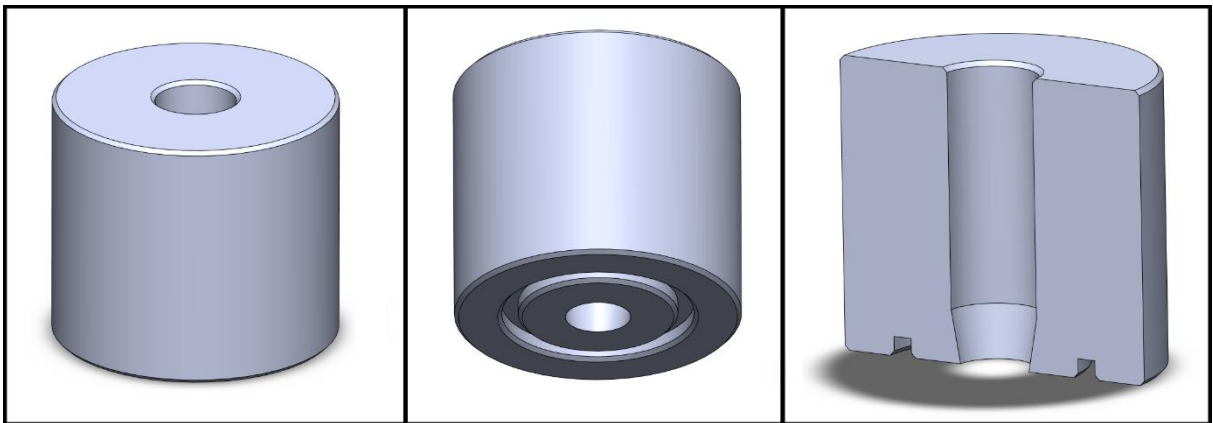


Figura 15: Estrutura guia do punção na configuração com extrusão.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Ainda, a estrutura guia com extrusão apresenta a mesma geometria para encaixe do porta amostras que a apresentada pela estrutura guia sem extrusão.

Como o porta amostras deve apresentar um preenchimento de 12 mm de altura de pó, a altura da cavidade de 16 mm de diâmetro foi definida como 20 mm, sendo os 8mm restantes preenchidos pelo punção da base. Esse componente possui uma geometria complementar aos sulcos presentes nas estruturas guias de punção que fará o acoplamento dessas partes. A modelagem do porta amostras pode ser observado na Figura 16.

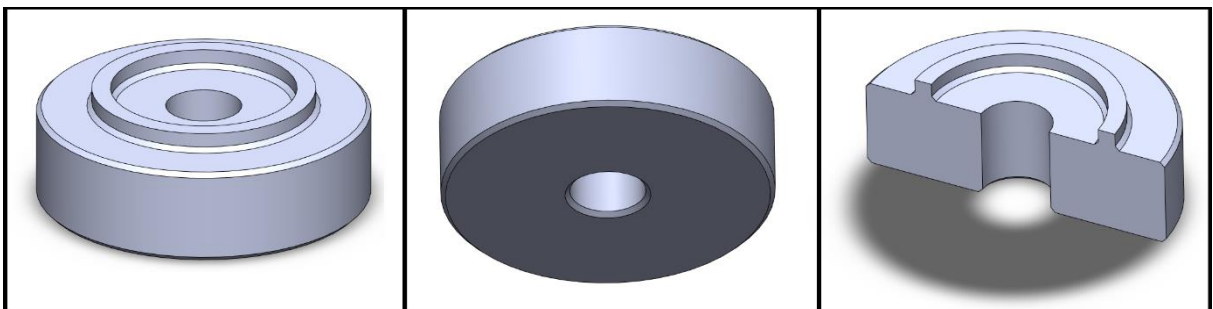


Figura 16: Porta amostras.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A base fará o encaixe com o porta amostras através do punção presente nessa peça, que apresenta 8 mm de altura e 15,9 mm de diâmetro. Na Figura 17 é mostrado o desenho da base da matriz.

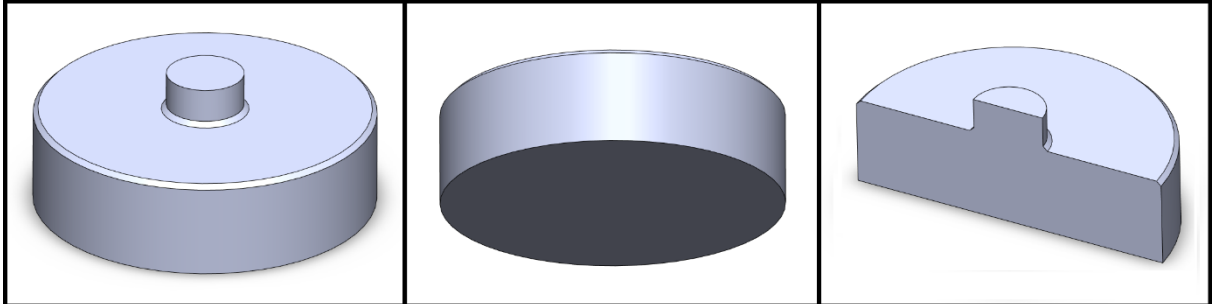


Figura 17: Base da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Após determinar as dimensões da matriz, foi realizado um estudo da carga crítica de flambagem. Os cálculos utilizaram a seguinte equação:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \quad (12)$$

Onde, E é o módulo de elasticidade do aço ABNT 1045; I é o momento de inércia da seção transversal do punção; k é o fator de comprimento efetivo; e L o comprimento da barra.

Como a seção transversal dos punções é circular, o momento de inércia calcula-se:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (13)$$

Para a altura L foi utilizado 20mm para o punção da configuração sem extrusão e 20 mm para o da configuração extrusora. Logo, estes serão os deslocamentos máximos dos punções na compactação, o que está de acordo com os cálculos realizados posteriormente.

Utilizando $k = 2$, $r = 0,00795$ m, $E = 210 \times 10^9$ Pa, encontra-se para a matriz cilíndrica:

$$P_{cr} = \pi^2 * 210 * 10^9 * (\pi * 0,00795^4) / 4 * 2^2 = 154.820,40 \text{ N}$$

Realizando o mesmo para a matriz com extrusão com $r = 0,00995$ m, encontra-se:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^9 * (\pi * 0,00995^4) / 4}{(2 * 0,03)^2} = 4.431.597,59 \text{ N}$$

Os cálculos sugerem que para ambos os punções, a carga limite de flambagem está acima da carga máxima que a prensa pode exercer (150.000 N). Logo, não ocorrerá flambagem.

As matrizes foram fabricadas em aço ABNT 1045, possuindo uma resistência mecânica de 485 MPa. Como a resistência mecânica desse material está acima da pressão que a matriz irá ser submetida, as deformações ocorridas estarão no regime elástico.

O estudo de deformação elástica foi realizado somente nos punções da matriz, pois são componentes que caso o barrilamento, ou seja, deslocamento gerado pela aplicação de carga pela prensa, seja o suficiente para faze-los interferir nas cavidades (paredes) da matriz. Portanto, o deslocamento lateral total admitido para o punção deve ser menor que a folga entre punção e cavidade, que é 0,1 mm.

Afim de determinar a deformação elástica, foi utilizado o *software SolidWorks* para simulação. Uma simulação para cada punção foi feita, utilizando 30 kN de carga para o punção de maior diâmetro e 20 kN para o punção de menor diâmetro. Estes resultados de força foram obtidos nos cálculos de definição dos diâmetros dos punções. Na Figura 18 observa-se os resultados de deformação obtidos nas simulações.

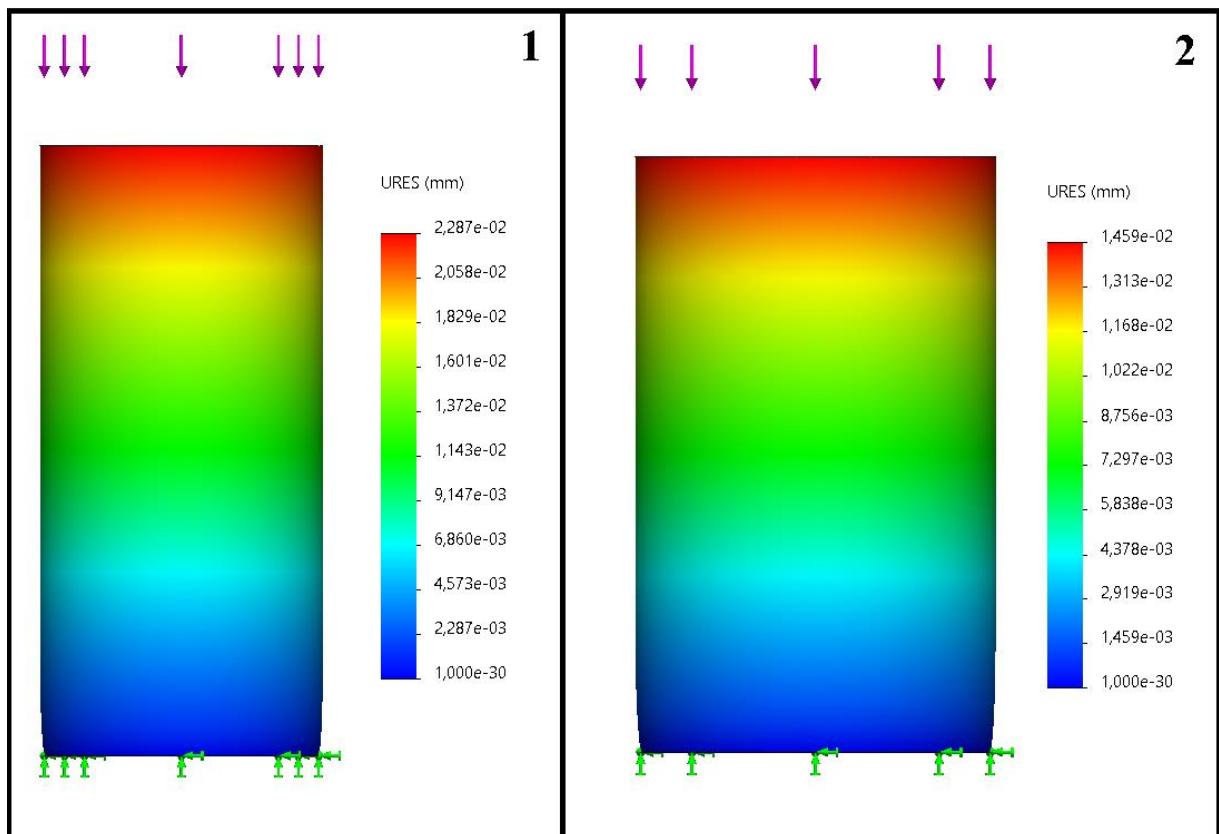


Figura 18: Simulação de deslocamento resultante.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Os resultados da simulação indicam que o punção de maior diâmetro (1) sofreu deslocamento máximo de 0,02287 mm, e na simulação do punção de menor diâmetro (2), o deslocamento máximo foi de 0,01459 mm. Como ambos os deslocamentos são menores que a

folga de 0,1 mm entre cavidade do componente e o punção, não haverá interferência entre o punção e a estrutura guia.

Considerando todos os requisitos de projeto e variáveis envolvidas, os componentes da matriz assumiram as dimensões apontadas na Figura 19.

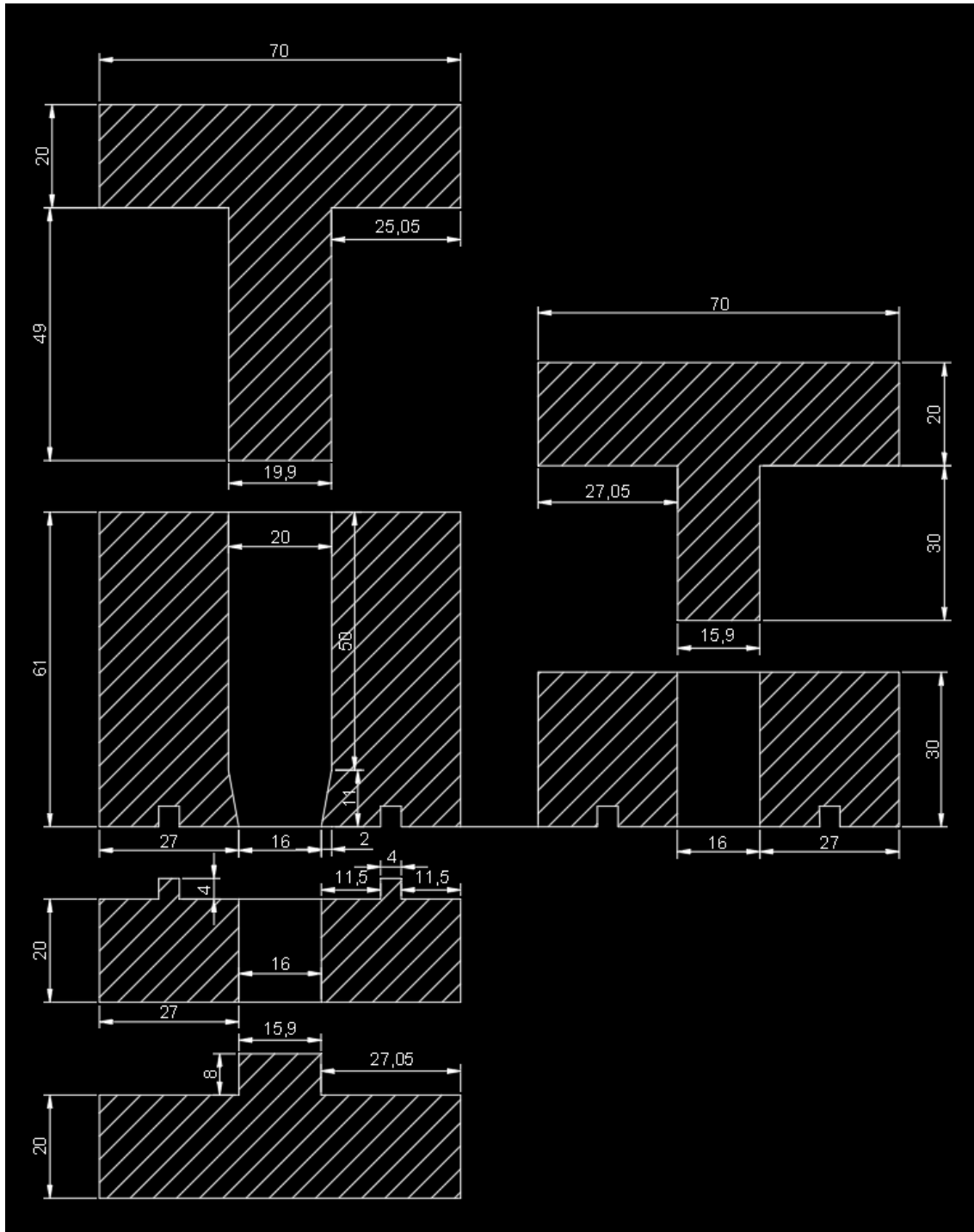


Figura 19: Corte lateral com dimensões da matriz.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

O sistema desenvolvido para desacoplar os componentes da matriz utiliza um parafuso e porca para realizar força e separa-los. A modelagem mecanismo pode ser observada na Figura 20.

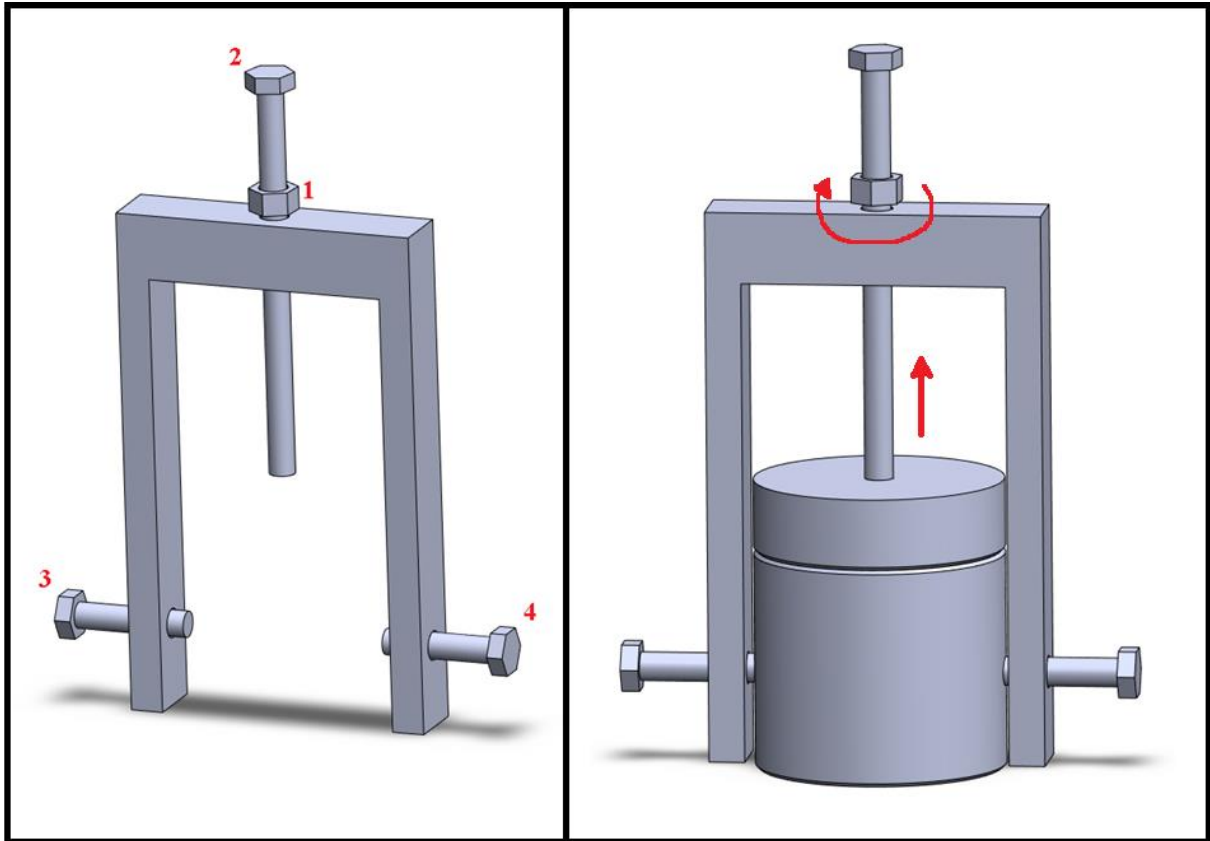


Figura 20: Mecanismo de separação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O mecanismo vai separar um punção de sua estrutura guia, no primeiro caso, ou o porta amostras da base, no segundo caso. A união entre estrutura guia e porta amostras não possui elementos que possam ficar presos, portando não é necessário utilizar o mecanismo para separa-los. No primeiro caso, os parafusos 3 e 4 fazem a fixação lateral da estrutura guia, enquanto o punção é fixado pelo parafuso 2. No segundo caso, o porta amostras é fixado como a estrutura guia e a base é fixada como o punção. Ao apertar a porca (1) contra a estrutura do mecanismo o componente acoplado é puxado para cima, separando as duas peças.

4.2 Construção

Na Figura 21 podem ser observados: o punção da configuração de compactação convencional (A); o punção da configuração com extrusão (B); a estrutura guia de punção

convencional (C); a estrutura guia de punção com extrusão (D); a base (E); e o porta amostras (F).



Figura 21: Componentes da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na Figura 22 observa-se a montagem da matriz nas duas configurações.



Figura 22: Montagem da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O mecanismo de separação produzido pode ser observado na Figura 23. Foram utilizadas barras de aço soldadas em formato “U” e furadas para passar os parafusos.



Figura 23: Mecanismo de separação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

4.3 Testes

Para fazer a lubrificação das paredes da matriz e dos punções foi utilizado carvão ativado. O material foi esfregado manualmente nas superfícies até ser formado uma camada fina sobre elas. As peças lubrificadas podem ser observadas na Figura 24.



Figura 24: Partes da matriz lubrificadas.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para efetuar o preenchimento com o pó de argila que será compactado realizou-se a montagem da base, porta amostras e estrutura guia do punção da matriz. Os procedimentos podem ser vistos nas Figuras 25 e 26.



Figura 25: Montagem da base, porta amostras e corpo da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).



Figura 26: Preenchimento da matriz.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A montagem da matriz cilíndrica completa e o posicionamento na prensa hidráulico podem ser observados na Figura 27.



Figura 27: Matriz alocada na prensa hidráulica antes da compactação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Três métodos de compactação foram definidos e testados:

- Primeiro método: utilizou a matriz na configuração sem extrusão, ou seja, foram utilizados a base, porta amostras, estrutura guia de punção (sem extrusão) e punção de menor diâmetro. A cavidade da matriz foi preenchida ao máximo, deixando aproximadamente 10 mm desta cavidade vazia para o encaixe do punção. Nesse método o pó sofrerá somente compactação unidirecional;
- Segundo método: utilizou a matriz na configuração de extrusão, ou seja, foram utilizadas a base, o porta amostras, a estrutura guia do punção (com extrusão) e o punção de maior diâmetro. A cavidade da matriz foi preenchida por completo, sobrando 20 mm vazios para acoplamento do punção. Nesse método a parcela de material localizado na parte inferior da amostra sofre somente compactação convencional, enquanto o material acima sofre compactação e extrusão, como ilustrado na Figura 28;



Figura 28: Amostra do segundo método de compactação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

- Terceiro método: utilizou a matriz na configuração de extrusão. Neste método, o material preso na estrutura guia de punção remanescente do segundo método não foi retirado, como pode ser visto na Figura 29. Ao preencher a matriz o pó foi depositado por cima do material já compactado, deixando o porta amostras vazio, o que significa que todo material que formará a amostra passará pelo cone de extrusão.

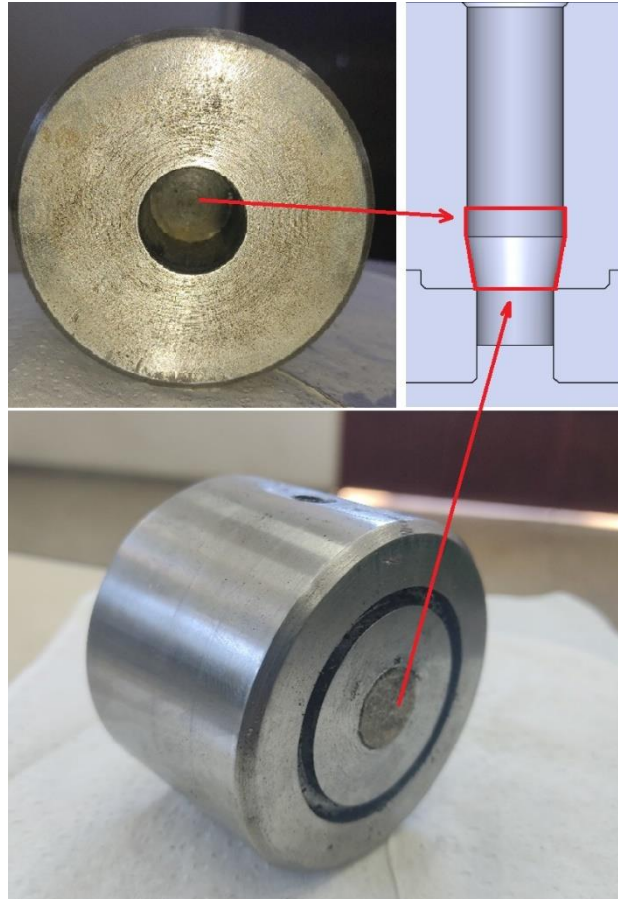


Figura 29: Material remanescente do segundo método de compactação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Foi necessário realizar pré-compactações em todos os métodos de modo que a quantidade de material introduzida na matriz seja suficiente, para haver a máxima compactação sem que o punção chegue em seu final de curso. Este passo foi essencial para formação de amostras com densidade maior possível com a carga que foi aplicada, pois sem realizar esse passo o punção alcança o final de curso sem que o material seja deformado ao máximo.

Após todas as compactações, a base e o porta amostras assim como as estruturas guia e seus punções tenderam a ficarem fortemente ligadas, sendo necessária a utilização do mecanismo desenvolvido para separá-las. Na Figura 30 pode ser visto a montagem da matriz nesse mecanismo.



Figura 30: Estrutura guia com extrusão e seu punção montados no mecanismo de separação.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A separação entre o porta amostras e as estruturas guia de punção não ofereceu dificuldades em todos os experimentos, sendo a amostra rompida no local onde a extremidade de cada parte se encontra. O rompimento entre as parcelas de material compactado nas estruturas guia de punção e na zona de calibração aconteceu de forma uniforme, com uma fratura reta, no primeiro e segundo método de compactação. Na Figura 31 pode ser observado a porção de material separado entre o porta amostras e um corpo da matriz.



Figura 31: Base, porta amostras e estrutura guia de punção separados.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Já para o terceiro método de compactação, o rompimento ocorreu de forma não uniforme apresentando picos e vales na seção separada, como é mostrado na Figura 32.



Figura 32: Estrutura guia de punção com extrusão e porta amostras após o terceiro método de compactação.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para ejeção das amostras, o mesmo procedimento foi tomado para todas as formas de compactação, isto é, o punção de 15,9mm foi introduzido na parte inferior do porta amostras e posicionado na prensa hidráulica de modo que a amostra é ejetada por baixo, como mostrado nas Figuras 33 e 34.



Figura 33: Posição de ejeção de amostra na prensa hidráulica.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

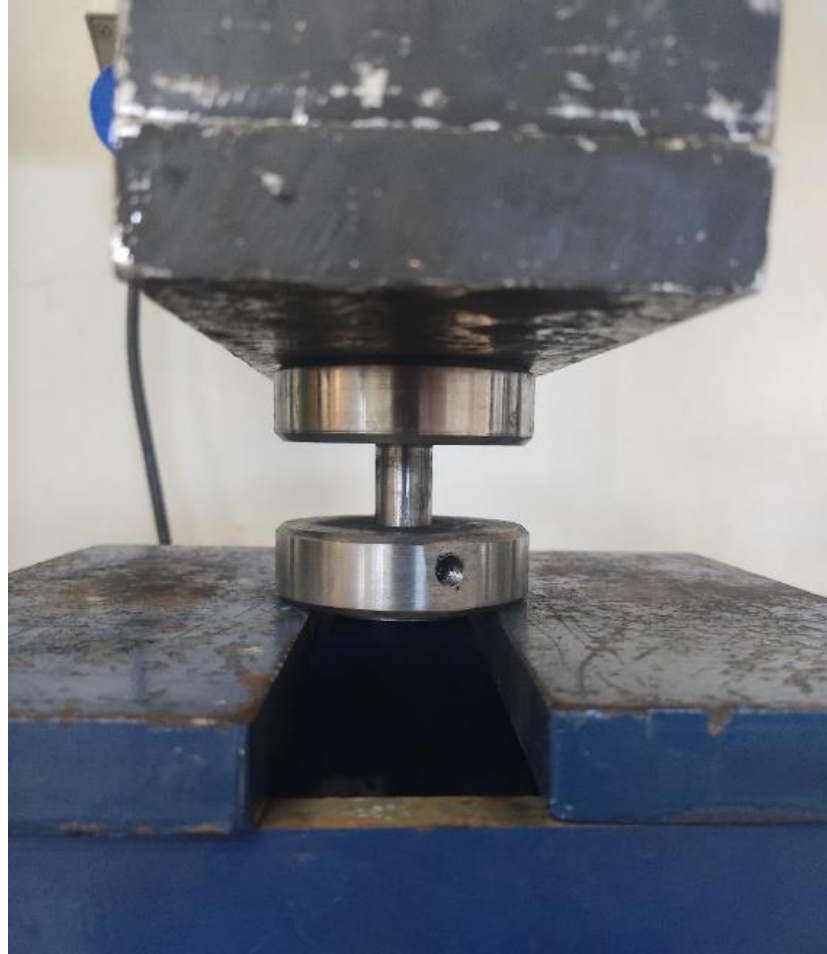


Figura 34: Aproximação das peças na posição de ejeção de amostra.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

As amostras produzidas, que podem ser observadas na Figura 35, apresentaram resistência ao manuseio sem ocorrer esfarelamento. A amostra A foi formada a partir do primeiro método de compactação, a B do segundo e a C do terceiro. Nenhuma diferença visual foi observada com exceção da superfície de rompimento da amostra C que se mostrou menos homogênea.



Figura 35: Amostras compactadas.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Os punções sofreram desgastes em suas laterais, registrados na Figura 36 após o término das compactações. Considerando que os desgastes ocorreram apenas nas laterais dos punções, é possível que uma infiltração de material entre o punção e as paredes da cavidade durante as compactações tenha sido o agente causador. É possível que o atrito causado por esse material durante a entrada e saída do punção causou essas deformações. Além disso, foi necessária a aplicação de muita força ao utilizar o mecanismo de separação, significando que o punção estava fortemente preso, o que pode ser também um indício dessa infiltração de material.



Figura 36: Desgaste nos punções.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Os desgastes no punção indicam, além da possibilidade de que a folga de 0,1 mm entre cavidade da matriz e punção não ser suficiente, que o material escolhido para construir a matriz não é duro o suficiente para resistir à desgastes do processo, o que pode resultar em baixa vida útil da matriz.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Para fabricar uma matriz extrusora para a prensagem de pó para produção de amostras destinadas à sinterização este trabalho efetuou as seguintes etapas: realização de um estudo teórico sobre metalurgia do pó, matriz de compactação e extrusão; elaboração de uma metodologia para projeto, produção e teste da matriz; aplicação da metodologia e apresentação dos resultados.

A revisão bibliográfica baseada em metalurgia do pó, matriz de compactação e extrusão apresentou os conteúdos necessários para o entendimento do trabalho, assim como seu desenvolvimento e discussão.

A metodologia elaborada para desenvolvimento do projeto, produção e teste da matriz foi eficaz para a realização dessas etapas do trabalho, permitindo dimensionar os componentes da matriz e operá-la.

O projeto da matriz ocorreu de acordo com a metodologia desenvolvida. A matriz produzida possui 6 componentes, sendo eles organizados em duas configurações para realizar compactação convencional (unidirecional) e com extrusão. Os elementos para facilitar a ejeção das amostras (porta amostras) e separar os componentes da matriz após compactações (mecanismo de separação) foram desenvolvidos e se mostraram eficazes.

Os testes de compactação apresentaram problemas com o travamento dos punções com seus respectivos corpos, todavia esse problema foi contornado pelo uso do dispositivo de separação desenvolvido. Já os testes de ejeção de amostras foram bem sucedidos, resultando em ejeções de amostras inteiriças e nas dimensões projetadas.

Após os testes as matrizes apresentaram desgaste visível, com algumas deformações no punção. A folga de 0,1 mm entre paredes da estrutura guia e punção pode não ser suficiente e estar gerando infiltrações de material, o que pode estar proporcionando esse desgaste. O aço 1045 mostrou-se não resistente ao desgaste do processo o suficiente para proporcionar uma vida útil longa do equipamento. A aplicação de um tratamento térmico de têmpera ou a utilização de um material mais duro e resistente, como um aço ferramenta, atenuaria esse efeito, possivelmente proporcionando uma vida útil maior.

As matrizes produziram amostras bem compactadas e coesas, capazes de passarem por sinterização para futuros estudos. As amostras de compactação do primeiro e segundo método

não apresentaram diferenças visuais significativas, enquanto a amostra de compactação com extrusão mostrou um rompimento não uniforme entre o porta amostras e a estrutura guia de punção, o que sugere que o método de compactação teve influência na formação da amostra.

5.2 Recomendações

A partir dos resultados obtidos nesse estudo, sugere-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Estudo da influência da compactação com elementos de extrusão de pó de argila nas características mecânicas de amostras sinterizadas.
- Estudo da influência da compactação dinâmica no processo de formação de amostras de pó compactado para sinterização.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABADIR, M. F.; SALLAM, E. H.; BAKR I. M. **Preparation of porcelain tiles from Egyptian raw materials**. *Ceramics International* 28.3 (2002): 303-310.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: Técnicas e produtos**. 3.ed. São Paulo: Édite Serviços Gráficos e Editora Ltda., 1992.

DAVENPORT, Thomas H. **Process innovation: reengineering work through information technology**. Harvard Business Press, 1993.

DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2023. Disponível em: [[Pesquisa - Dicio, Dicionário Online de Português](#)]. Acesso em: 28/05/2023.

FOGAGNOLO, João Batista et al. **Estudo do processo de fabricação de materiais compósitos de matriz de alumínio por metalurgia do pó, via moagem de alta energia e extrusão**. Campinas, SP: [sn], 2000.

FREIRE, M. N., et al. "Comportamento de compactação de mix argila/resíduo de pó de pedras." *Cerâmica* 50 (2004): 50-57.

GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science**. 2.ed., 1984.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. Grupo Gen-LTC, 2000.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson, 2016.

KANG, S. J. L. **Sintering: densification, grain growth and microstructure**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

KIMINAMI, C. S.; DE CASTRO, W. B.; DE OLIVEIRA, M. F.. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. Editora Blucher, 2021.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LOBERTO, A.; GENOVA, L. A.; SILVA, M. C. "Sinterização." (2009).

MATWEB, Material Propertie Data. **AISI 1045 Steel, as cold drawn, 50-75 mm (2-3 in) round**, c2024. Disponível em: <https://canaltech.com.br/educacao/como-citar-e-referenciar-um-site-normas-abnt/>. Acesso em: 08/02/2024.

MORAIS, Gilberto Augusto de. **Desenvolvimento da metalurgia do pó**. Natal: EDUFRN, 2022.

ROBERTS, P. R., FERGUSON, B. L., 1991 - “**Extrusion of Metal Powder**”, International Materials Reviews, Vol. 36, ° 2, p. 62 - 79.

SANTOS, Marcus Aurélio dos. **A metalurgia do pó para produção de peças de alumínio na indústria metalúrgica**. 2018.

SETHI, G.; MYERS, N. S.; GERMAN, R. M. **An overview of dynamic compaction in powder metallurgy**. International Materials Reviews 53.4 (2008): 219-234.

SINKA, Csaba. **Modelling powder compaction**. KONA Powder and Particle Journal, v. 25, p. 4-22, 2007.

UPADHYAYA, G. S. **Powder metallurgy technology**. Cambridge Int Science Publishing, 1997.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

VIEIRA FILHO, T. A. B.; VARELA, J. P. I.; JUNIOR, W. F. A. **"Desenvolvimento de uma matriz de compactação para produção de billets por metalurgia do pó**. 2013.