

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PRENSAGEM DE PÓS
PARA A PREVISÃO DE FALHAS EM COMPACTOS VERDES**

Matheus Furlan

São Carlos – SP

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PRENSAGEM DE PÓS
PARA A PREVISÃO DE FALHAS EM COMPACTOS VERDES

Matheus Furlan

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
para à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Rodrigo Bresciani Canto

Coorientador: Dr. Vinicius Fiocco Sciuti

Agência Financiadora: FAPESP – Processos: 2021/14452-7 e 2023/12025-0

São Carlos – SP

2024

VITAE DO CANDIDATO

Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de São Carlos

(2022)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Matheus Furlan, realizada em 30/07/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Rodrigo Bresciani Canto (UFSCar)

Prof. Dr. Marco Aurelio Liuthevicene Cordeiro (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Paccola (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi viabilizado pelo apoio financeiro do processo n° 2021/14452-7, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP¹) e processo n° 2023/12025-0 (FAPESP¹ modalidade BEPE). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

¹As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

RESUMO

Simulação computacional é uma ferramenta importante para reduzir os custos de produção e melhorar o controle dimensional e das propriedades mecânicas de peças produzidas por prensagem de pós. A previsão das propriedades mecânicas em compactos verdes, durante e após a prensagem, é crucial para garantir a integridade da peça em processos subsequentes, como usinagem a verde e sinterização. Entretanto, a previsão de falhas em compactos verdes é um campo pouco explorado na literatura. Ainda, os modelos utilizados para representar o comportamento mecânico do pó demandam diversos experimentos para calibração. Neste contexto, este projeto de pesquisa visa a simulação computacional do processo de prensagem de pós para a previsão de falhas em compactos verdes. Foram realizados experimentos de prensagem uniaxial utilizando uma matriz instrumentada com *strain gauges*, pistões com sensores axiais, célula de carga axial e sensor do tipo LVDT. Esses dados foram utilizados para ajustar os parâmetros do modelo constitutivo de Drucker-Prager/Cap (DPC), partindo-se de parâmetros obtidos da literatura. Dois materiais foram avaliados: pós de alumina e PTFE. Em seguida, ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME) foram planejados via simulações numéricas, visando uma geometria/condição em que ocorresse um pinçamento do molde elastomérico no compacto verde. Experimentalmente, para ambos os materiais, verificou-se a fratura do compacto verde. Após o pós-processamento das simulações e dos experimentos, foi possível estabelecer o uso do modelo de DPC como indicativo das falhas observadas experimentalmente, mesmo esse modelo tendo sido desenvolvido para simular a consolidação de materiais. A concordância foi maior para níveis de pressão e densidade mais elevados, e para o pó de alumina. Concluiu-se que o modelo de DPC pode fornecer informações sobre regiões com possibilidade de falhas, podendo ser aplicado em projetos de moldes elastoméricos para prensagem isotática e multiaxial com elastômero, a fim de evitar as falhas.

Palavras-chave: Previsão de falhas; Ensaios mecânicos; Simulação computacional; Método dos Elementos Finitos; Prensagem de pós; Compacto verde.

ABSTRACT
NUMERICAL SIMULATION OF POWDER PRESSING
TO PREDICT FAILURE IN GREEN COMPACTS

Numerical simulation is a powerful tool for reducing production costs and improving dimensional tolerance and mechanical properties of parts produced by powder pressing. The prediction of mechanical properties in green compacts, during and after compaction, is crucial for ensuring part integrity in subsequent processes, such as green machining and sintering. However, failure prediction in green compacts is a field yet to be explored. Additionally, the constitutive models used to represent the mechanical behavior of the powder calls for various calibration procedures. In this context, this project aims to explore the use of experimental procedures and numerical simulations to predict failures in green compacts. To do so, closed-die pressing tests were conducted using an instrumented die equipped with strain gauges, pistons with axial sensors, an axial load cell, and an LVDT sensor. The experimental signals were compared with their numerical counterparts to adjust the parameters of the Drucker-Prager/Cap (DPC) constitutive model, based on parameters obtained from the literature. Two materials were evaluated: alumina powder and PTFE powder. After these adjustments, rubber multiaxial pressing (RMP) tests were planned via numerical simulations, aiming at a geometry/condition in which pinching of the elastomeric mold occurs on the green compact. Experimentally, fractures were observed for both materials. By post-processing the simulation results of these RMP tests, it was possible to validate the DPC model as an indicator of the failures observed experimentally, despite the model's development for simulating material consolidation. The agreement was higher for greater pressure and density levels, and for alumina powder. Thus, the use of DPC models during pressing simulations may provide valuable information about certain conditions and regions that might experience failure, which can be directly applied to rubber mold projects for isostatic pressing and rubber multiaxial pressing.

Keywords: Failure prediction; Mechanical tests; Numerical simulation; Finite Element Method; Powder pressing; Green compacts.

PUBLICAÇÕES

FURLAN, M.; MELO, CAIUÃ CALDEIRA; SCIUTI, V. F.; CANTO, R. B. . Procedimento experimental de validação de um modelo numérico para prensagem do politetrafluoretileno (PTFE). In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2022, Águas de Lindóia – SP. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2022.

FERNANDES, L. A.; FURLAN, M.; MACEDO, S. M.; SCIUTI, V. F.; CANTO, R. B. . Simulação computacional da prensagem uniaxial do politetrafluoretileno (PTFE) considerando a dependência do tempo no comportamento mecânico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, 2022, Águas de Lindóia – SP. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, 2022.

ZAGO, I. P.; FURLAN, M.; ANGÉLICO, R. A.; CANTO, R.B. . Avaliação da influência das tensões residuais no comportamento termomecânico de compósitos modelo bifásicos fabricados por prensagem de pó. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2022, Águas de Lindóia – SP. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2022.

VARGAS, R.; ZAGO, I. P.; SCIUTI, V. F. ; FURLAN, M.; ANGÉLICO, R.A.; HILD, F.; CANTO, R. B. . Multi-Window Setup for Thermomechanical Experiments Assisted by DIC up to 900°C. Materials Research, v. 27, 2024.

SUMÁRIO

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 ROTAS DE Prensagem	5
2.1.1 Prensagem UNIAXIAL	5
2.1.2 Prensagem ISOSTÁTICA	6
2.1.3 Prensagem MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO	8
2.2 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER/CAP	9
2.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER/CAP	13
2.4 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 MATERIAIS	17
3.1.1 PÓ DE ALUMINA	17
3.1.2 PÓ DE PTFE	18

3.1.3	ELASTÔMERO	19
3.2	MÉTODOS	19
3.2.1	VERIFICAÇÃO E AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS MO- DELOS CONSTITUTIVOS PARA PRENSAGEM DO PÓ . .	20
3.2.2	ENSAIOS DE PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔ- MERO PARA INDUÇÃO E VERIFICAÇÃO DE FALHAS . . .	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO CONSTITUTIVO . . .	31
4.1.1	PÓ DE ALUMINA	32
4.1.2	PÓ DE PTFE	37
4.2	ENSAIOS DE PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO PARA VERIFICAÇÃO DE FALHAS EM COMPACTOS VERDES . .	42
4.2.1	PÓ DE ALUMINA	42
4.2.2	PÓ DE PTFE	50
5	CONCLUSÕES	59
6	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	63
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Parâmetros do modelo de Drucker-Prager/Cap, ver Figura 2.4(a,b).	13
3.1	Parâmetros experimentais da prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada para os pós de alumina e de PTFE.	22
3.2	Parâmetros elásticos das partes metálicas utilizados nas simulações. Tensão de escoamento utilizada para fins de projeto (Ref. [80, 82]).	25
3.3	Parâmetros de malha para prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada.	26
3.4	Parâmetros de malha para prensagem multiaxial com elastômero (PME).	30
4.1	Coeficientes das funções sigmóides (Equação (4.1)) para os parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap e coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) para o pó de alumina em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p).	35
4.2	Coeficientes das funções sigmóides (Equação (4.1)) para os parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap e coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) para o pó de PTFE em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p).	40
4.3	Dimensões experimentais médias e numéricas dos compactos verdes de alumina obtidos via prensagem multiaxial com elastômero (PME).	45
4.4	Dimensões experimentais médias e numéricas do compacto verde de PTFE obtidas via prensagem multiaxial com elastômero (PME).	54

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Representação esquemática da prensagem uniaxial (PU) dividida em cinco etapas: (I) preenchimento do molde, (II-III) prensagem do material pela ação do pistão superior (<i>i.e.</i> , simples ação), (IV) procedimento de extração e (V) compacto verde. Tons de cinza mais escuros representam densidades relativamente maiores. Adaptado de Melo <i>et al.</i> [5].	5
2.2	Principais rotas de prensagem isostática (PI): (a) configuração <i>wet bag</i> e (b) configuração <i>dry bag</i> . Fonte Canto [17], adaptado originalmente de Reed [1].	7
2.3	Representação esquemática do processo de prensagem multiaxial com elastômero (PME) em três etapas: (I) etapa de preenchimento da cavidade, (II) configuração inicial de prensagem e (III) configuração durante a prensagem, destacando o avanço radial não uniforme do molde em diferentes regiões. Em destaque o efeito denominado “pata de elefante”. Etapa de descarregamento não representada. Adaptado de Melo [27].	9
2.4	Modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) implementado no software ABAQUS™: (a) superfícies de escoamento e seus parâmetros no plano dos invariantes q vs. p e (b) curva associada à lei de encruamento em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p) [37].	11
2.5	Funções de potencial plástico no modelo Drucker-Prager/Cap (DPC) implementado no ABAQUS™, apresentadas no plano dos invariantes q vs. p . G_s referente à F_s (reta pontilhada) e G_c referente à F_c . Representação adaptada do manual do software [37, 41].	12

2.6	Modelo Drucker-Prager/Cap (DPC) e alguns procedimentos experimentais para determinar a superfície de plastificação F_s : (1) tração uniaxial, (2) torção simples (cisalhamento puro), (3) compressão diametral, (4) compressão uniaxial. A superfície F_c pode ser determinada por ensaios: (5A) ensaio triaxial, (5B) prensagem em matriz fechada, (5C) carregamento radial, (5D) ensaio isostático, (6) prensagem em matriz instrumentada para obtenção da curva relacionada ao ponto (5B). Adaptada de Shang <i>et al.</i> [42].	14
3.1	Micrografia do material no microscópio Zeiss Stemi 2000-C [39].	18
3.2	PTFE granulado Teflon 807N X [22].	19
3.3	(a) Aparato experimental composto por: matriz de parede fina equipada com quatro <i>strain gauges</i> (SG1 a SG4), <i>dummy gauges</i> posicionados no colar superior, pistões instrumentados com sensores axiais, e célula de carga axial acoplada à matriz. (b) Desenho técnico da matriz com dimensões nominais em milímetros. LVDT não incluído na montagem.	21
3.4	Geometria e condições de contorno do modelo em Elementos Finitos (EF) utilizado como base para simular a prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada para os pós de alumina e PTFE. A célula de carga axial e o pistão inferior têm os deslocamentos verticais restringidos (triângulos amarelos). O pistão superior possui deslocamento imposto da mesma magnitude do deslocamento medido experimentalmente pelo LVDT (triângulos vermelhos). Os deslocamentos horizontais são restritos na linha de centro. As regiões equivalentes aos sensores de pressão nos pistões e aos <i>strain gauges</i> estão destacadas. Como referência dimensional, o diâmetro interno da matriz é de 30 mm e sua altura total é de 120 mm.	24

- 3.5 (a) Contra-molde usinado em alumínio com diâmetro externo de 15 mm na região útil e 30 mm na base. (b) Molde elastomérico tubular confeccionado com a resina RenCast® 4644-1, com 29,80 mm de diâmetro externo, 15 mm de diâmetro interno e 45 mm de altura. (c) Molde impregnado com grafite em pó para diminuir o atrito deste com as partes metálicas. A superfície interna não foi lubrificada. Figuras fora de escala. 27
- 3.6 Geometria e condições de contorno do modelo em Elementos Finitos (EF) utilizado para simular a prensagem multiaxial com elastômero (PME) para o pó de PTFE ou de alumina. A célula de carga axial e o pistão inferior têm os deslocamentos verticais restringidos (triângulos amarelos). Os deslocamentos horizontais são restritos na linha de centro. O pistão superior tem uma condição de carregamento equivalente à condição experimental, podendo ser a aplicação de uma força equivalente à força do atuador da máquina de ensaios ou deslocamento vertical resultando na mesma força nominal. As regiões equivalentes aos sensores de pressão nos pistões e aos *strain gauges* estão destacadas. Como referência dimensional, o diâmetro interno da matriz é de 30 mm e sua altura total é de 120 mm. 29
- 4.1 Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir de simulações utilizando parâmetros de referência [27] e ajustados: (a) atuador da máquina de ensaio, (b) célula de carga axial, (c) sensor do pistão superior e (d) sensor do pistão inferior, para a prensagem uniaxial (PU) da alumina. 33
- 4.2 Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir de simulações utilizando parâmetros de referência [27] e ajustados para os quatro *strain gauges*, para a prensagem uniaxial (PU) da alumina. 34

4.3	Parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) em função da densidade, para a alumina: (a) Módulo de elasticidade, (b) coeficiente de Poisson, (c) coesão e (d) curva de encruamento.	36
4.4	Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir do modelo com parâmetros de referência [46] e ajustados: (a) atuador da máquina de ensaio, (b) célula de carga axial, (c) sensor do pistão superior e (d) sensor do pistão inferior, para a prensagem uniaxial (PU) do PTFE.	38
4.5	Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir do modelo com parâmetros de referência [46] e ajustados para os quatro <i>strain gauges</i> , para a prensagem uniaxial (PU) do PTFE.	39
4.6	Parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) em função de densidade, para o PTFE: (a) Módulo de elasticidade, (b) coeficiente de Poisson, (c) coesão e (d) curva de encruamento.	41
4.7	Comparação entre as curvas de tensão nominal (σ_n) e deslocamento do pistão superior para os casos experimental e simulado para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 15, 20, 30 e 40 MPa. Os níveis de carga são representados por cores que variam do azul ao vermelho.	42
4.8	Campos de densidade no instante de carregamento máximo para os ensaios com tensões nominais máximas ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 10, 20 e 40 MPa para o pó de alumina. O molde elastomérico é representado na cor cinza. Os isovalores de densidade estão na mesma escala de cores, e todas as figuras possuem mesma escala.	43
4.9	Regiões de medição do compacto verde de alumina após prensagem multiaxial com elastômero (PME). Fotografias dos compactos verdes para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de (a) 10 MPa, (b) 15 MPa, (c) 20 MPa, (d) 30 MPa e (e) 40 MPa.	44

- 4.10 Trajeto de carregamento de um elemento na região superior do compacto verde, no plano dos invariantes de tensão q vs p e a superfície de Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior nível de densidade atingido. Círculo em destaque indica quando o trajeto de carga do elemento atinge a superfície de falha F_s 46
- 4.11 Trajeto de carregamento representado no plano dos invariantes de tensão q vs. p e superfície Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior nível de densidade do pó de alumina, para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. Foram analisados os elementos nas seguintes regiões: (a) superior, (b) meia altura e (c) inferior. 47
- 4.12 Elementos que atingiram a superfície F_s – destacados em vermelho – durante o descarregamento na prensagem multiaxial com elastômero (PME) com $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa e com pó de alumina nos valores de carga: (a) 17,2 MPa, (b) 16,8 e (c) 4,6 MPa. O elastômero é representado em cinza e as demais partes foram suprimidas. 49
- 4.13 Campo de densidade: (a) no ponto de carregamento com tensão nominal (σ_n) de 40 MPa, (b) σ_n de 16,8 MPa e (c) descarregamento completo. Regiões em preto (fora da escala de cores) evidenciam uma grande perda de densidade. 50
- 4.14 Comparação entre as curvas de tensão nominal (σ_n) e deslocamento do pistão superior para os casos experimental e simulado para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15, 20, e 40 MPa. Os níveis de carga máxima são representados por cores que variam do azul ao vermelho. 51
- 4.15 Campos de densidade no instante de carregamento máximo para os ensaios com tensões nominais máximas ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 15, 20 e 40 MPa para o pó de PTFE. O molde elastomérico é representado na cor cinza. Os isovalores de densidade estão na mesma escala de cores, e todas as figuras possuem mesma escala. 52
- 4.16 Regiões de medição do compacto verde de PTFE após prensagem multiaxial com elastômero (PME). Fotografias dos compactos verdes para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de (a) 15 MPa, (b) 12 MPa e (c) 40 MPa. 53

4.17 Elementos que atingiram a superfície F_s – destacados em vermelho – durante o descarregamento na prensagem multiaxial com elastômero (PME) para $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa e com pó de PTFE nos valores de carga: (a) 23,8 MPa e (b) 7,6 MPa, respectivamente. O elastômero é representado em cinza e as demais partes foram suprimidas.	55
4.18 Trajeto de carregamento representado no plano dos invariantes de tensão q vs. p e superfície Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior valor de densidade do pó de PTFE para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. Foram analisados os elementos nas seguintes regiões: (a) superior, (b) meia altura e (c) inferior.	56
4.19 Campo de densidade para: (a) $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa, (b) $\sigma_n = 1,1$ MPa durante o descarregamento com início do descolamento do molde e (c) descarregamento completo.	57
4.20 Deformação plástica equivalente (ε_{eq}^{p,F_s}) ocasionada pelo escoamento na superfície F_s após o descarregamento completo para $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa.	58

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CDP: Corpo de prova

CDP: Ensaio de compressão

DP: Drucker-Prager

DPC: Drucker-Prager/Cap

EF: Elementos Finitos

LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*

MEF: Métodos dos Elementos Finitos

PI: Prensagem isostática

PME: Prensagem multiaxial com elastômero

PTFE: Politetrafluoretileno

PU: Prensagem uniaxial

E : Módulo de elasticidade

E_i : Parâmetros da função sigmoide para o módulo de elasticidade

d : Parâmetro de coesão do modelo de Drucker-Prager/Cap

d_i : Parâmetros da função sigmoide para coesão do modelo de Drucker-Prager/Cap

F_s : Superfície de falha (Drucker-Prager) do modelo de Drucker-Prager/Cap

F_t : Superfície de transição do modelo de Drucker-Prager/Cap

F_c : Superfície Cap

p : Tensão normal média compressiva

p_a : Posição inicial da superfície Cap no eixo p

p_b : Posição final da superfície Cap no eixo p

p_{bi} : Parâmetros da curva de encruamento

q : Tensão de von Mises

R : Parâmetro de forma da superfície Cap (F_c)

α : Parâmetro de transição entre as superfícies F_s e F_t

β : Ângulo de atrito interno do modelo de Drucker-Prager/Cap

$\varepsilon_{F_s}^p$: Tensor de deformação plástica na superfície F_s

ε_c : Deformação circunferencial

ε_{eq}^{p,F_s} : Deformação equivalente plástica na superfície F_s

ε_{vol}^p : Deformação volumétrica plástica

ν : Coeficiente de Poisson

ν_i : Parâmetros da função sigmoide para o coeficiente de Poisson

ρ : Densidade do pó

ρ_0 : Densidade inicial do pó

σ_n : Tensão nominal

$\sigma_n^{\text{máx}}$: Tensão nominal máxima

σ_1 : Primeira tensão principal

σ_2 : Segunda tensão principal

σ_3 : Terceira tensão principal

Ψ_i : Parâmetros da função sigmoide

$\varnothing D_i$: Diâmetros dos compactos verdes, experimentais e numéricos

1 INTRODUÇÃO

O procedimento de prensagem seguida de sinterização é comumente utilizado para a obtenção de peças a partir de materiais granulares e pós, podendo ser empregado na obtenção de peças metálicas, cerâmicas e poliméricas. Dentre as vantagens do uso deste, pode-se mencionar: (i) obtenção de geometrias detalhadas e com usinagem mínima de peças metálicas; (ii) peças cerâmicas com baixo nível de porosidade e alto controle dimensional; (iii) peças poliméricas em que o processo convencional de extrusão/injeção é inviável devido à alta viscosidade do polímero no estado fundido, *e.g.*, politetrafluoretileno (PTFE). Existe também a prensagem de material farmacêutico para obtenção de comprimidos, em que a etapa de sinterização não é realizada.

As simulações das etapas dessa rota, sendo elas: prensagem, sinterização, usinagem (a verde ou após sinterização) e etapa em serviço, podem ser úteis para a otimização de processos e a redução de custos na indústria. A simulação satisfatória da etapa de prensagem, seja uma prensagem uniaxial (PU), prensagem isostática (PI) ou prensagem multiaxial com elastômero (PME), é de extrema importância para as etapas seguintes, visto que algumas características do compacto verde, *e.g.*, gradiente de densidade, porosidade, geometria, resistência mecânica, etc., são relevantes para a etapa de sinterização e de serviço, podendo impactar a integridade e o desempenho do produto. Assim, a previsão e o estudo dos níveis de carregamento, da geometria dos moldes, das propriedades finais do compacto verde tais como: campo de densidade e propriedades mecânicas (*i.e.*, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e resistência mecânica) e previsão de falhas (*i.e.*, delaminações e trincas) são subsídios valiosos para a etapa de projeto do processo de prensagem.

Para isso, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é frequentemente utilizado na simulação numérica do processo de prensagem. Nessa abordagem, o material é representado como um meio contínuo e homogêneo em uma escala macroscópica, ou seja, os vazios e partículas do pó são tratados como um único meio homogeneizado, e as contribuições de cada fração refletem nas

propriedades mecânicas globais. Usualmente, o modelo constitutivo de Drucker-Prager/Cap (DPC) é utilizado para representar o comportamento mecânico do material durante a prensagem. Porém, para a simulação numérica ser representativa do processo, determinando com precisão as propriedades finais e geometria do compacto verde, os modelos precisam estar devidamente calibrados e verificados em um domínio de validade. No entanto, a calibração e verificação não são tarefas triviais, sendo muitas vezes necessário o uso de diversos ensaios mecânicos com diferentes níveis de confinamento e trajetos de carga, assim como a utilização de ferramental instrumentado de maneira não-convencional. Diversos trabalhos na literatura se concentram na identificação de parâmetros de modelos para o processo de prensagem. No entanto, o uso do MEF para a previsão de falhas e/ou identificação de regiões suscetíveis a falhas no processo de prensagem é ainda pouco explorado.

Posto isto, este projeto de Mestrado visou a verificação e o ajuste de parâmetros de modelos constitutivos utilizados para a prensagem de pós e, uma vez verificados, analisou a possibilidade de simulações em Elementos Finitos (EF) preverem falhas em compactos verdes durante a prensagem, especialmente durante o descarregamento. A primeira etapa deste trabalho consistiu na realização de experimentos de prensagem em matriz fechada instrumentada para ajustes de parâmetros de modelos constitutivos presentes na literatura para os pós de alumina e PTFE. Esses ajustes foram realizados por tentativa e erro, analisando a concordância entre os dados experimentais e numéricos provenientes do gêmeo digital. Em seguida, ensaios de PME, planejados por simulação numérica para induzir propositalmente situações suscetíveis a falhas nos compactos verdes, foram realizados para analisar quais regiões apresentaram falhas. Simulações em EF da prensagem PME com os modelos calibrados foram capazes de identificar quais regiões do compacto verde apresentaram perda de densidade e tensões principais tratativas durante o descarregamento, sendo essas condições indicativas de potenciais falhas. Experimentalmente, algumas regiões próximas às regiões críticas definidas por simulação apresentaram quebra do compacto verde. Embora o uso do modelo de DPC não permita a simulação de fratura,

como acontece com o uso de outras abordagens, como o uso elementos coesivos e do Método dos Elementos Finitos Generalizados, foi possível utilizá-lo para prever situações críticas e com potencial de falha, servindo como uma abordagem complementar em projetos de moldes de prensagem, em especial prensagem isostática multiaxial com elastômero.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ROTAS DE PRENSAGEM

Nesta Seção, é apresentada uma revisão das rotas de prensagem de pós. São abordadas as principais características de cada rota, avaliando aplicabilidades, produtividade, vantagens, desvantagens, assim como as limitações. Também são apresentadas algumas observações fenomenológicas e experimentais replicadas em simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

2.1.1 PRENSAGEM UNIAxIAL

A prensagem uniaxial (PU) é a rota mais utilizada para a conformação de pós e materiais granulares [1–4]. O processo consiste no preenchimento do pó em um molde rígido, geralmente confeccionado em aço, seguido da prensagem e extração do compacto verde. O procedimento pode ser realizado pelo avanço de um único pistão – simples ação – ou por ambos – dupla ação. Na Figura 2.1 é apresentado, de forma esquemática, o procedimento de PU em matriz rígida de simples ação.

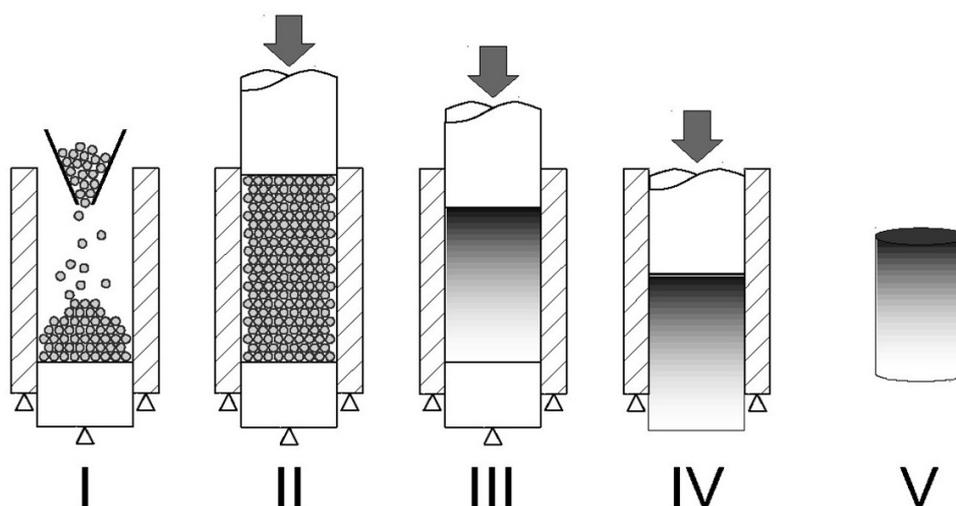


Figura 2.1: Representação esquemática da prensagem uniaxial (PU) dividida em cinco etapas: (I) preenchimento do molde, (II-III) prensagem do material pela ação do pistão superior (*i.e.*, simples ação), (IV) procedimento de extração e (V) compacto verde. Tons de cinza mais escuros representam densidades relativamente maiores. Adaptado de Melo *et al.* [5].

Por utilizar um procedimento relativamente simples em termos de processo e ferramental, essa rota possui alta produtividade, fácil escalabilidade e automação em processos industriais. Porém, apresenta algumas limitações inerentes, como a perda da carga ao longo da parede interna da matriz devido ao atrito entre pó e parte rígidas, resultando em um gradiente de densidade no compacto verde [6–11]. Esse gradiente de densidade, quando não controlado ou excessivo, pode resultar em falhas, como trincas no compacto verde [12], redução da qualidade do compacto verde, limitação da relação entre altura e dimensões laterais [13] e distorções de forma após a sinterização [14] devido à retração diferencial em diferentes regiões.

Özkan e Briscoe (1997) [15] observaram experimentalmente a alteração do campo de densidade em um compacto verde de alumina após PU de simples ação, com e sem a lubrificação da parede interna com estearato de zinco. Peças obtidas em PU sem lubrificação apresentam um gradiente maior que as obtidas com lubrificação, porém, os pontos de máxima e mínima densidade apresentam uma distribuição semelhante. A densidade máxima está localizada na região superior e externa do compacto verde, enquanto a densidade mínima está localizada na região inferior externa. Na região central ocorre o oposto, a região inferior apresenta densidade maior que a região superior. Uma distribuição de densidade semelhante também foi observada por Melo *et al.* (2018) [5], com o uso de simulações em Elementos Finitos (EF) do processo de PU de alumina.

2.1.2 PRENSAGEM ISOSTÁTICA

A prensagem isostática (PI) utiliza a pressurização de um fluido para comprimir um molde flexível que, por sua vez, transmite para o pó a pressão do líquido, exercendo o trabalho de prensagem [16]. Na Figura 2.2 são apresentadas figuras esquemáticas do processo de PI nas configurações *wet bag* e *dry bag*.

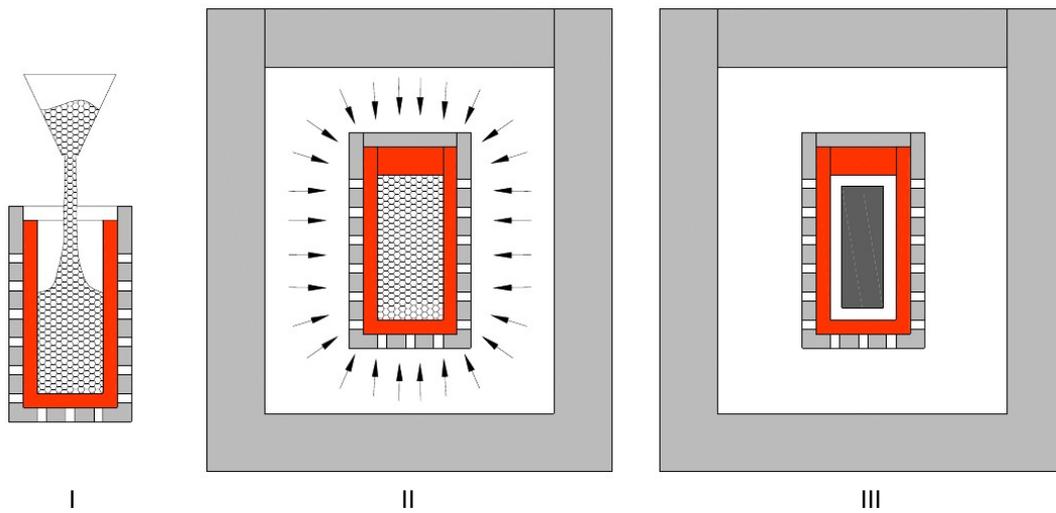
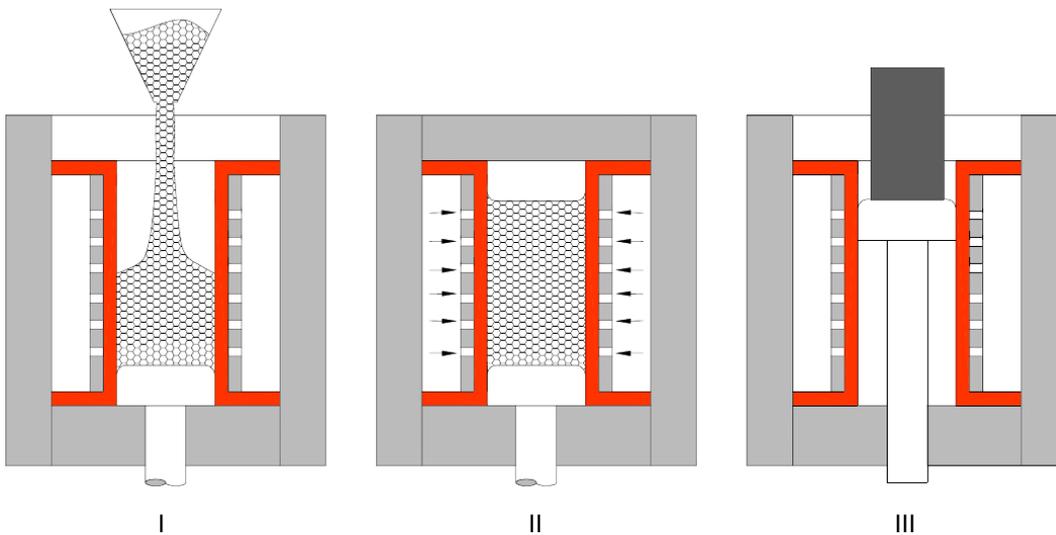
(a) configuração *wet bag*(b) configuração *dry bag*

Figura 2.2: Principais rotas de prensagem isostática (PI): (a) configuração *wet bag* e (b) configuração *dry bag*. Fonte Canto [17], adaptado originalmente de Reed [1].

O processo *wet bag* consiste no preenchimento do molde, fechamento e pressurização por completo do conjunto em um vaso de pressão, sendo um processo que apresenta baixo grau de automatização. A etapa de fechamento, posicionamento do molde no vaso e extração são realizados de maneira independente, *i.e.*, o preenchimento do molde ocorre fora da cavidade da prensa isostática. Já o processo *dry bag* apresenta um nível de complexidade maior em relação ao projeto e construção do molde e ferramental. Porém, essa complexidade adicio-

nal é justificada pela automatização do processo de preenchimento, prensagem e extração, como apresentado na Figura 2.2(b), nas quais as etapas acontecem na cavidade da prensa isostática.

Em relação à PU, a PI apresenta algumas vantagens, como a obtenção de peças mais homogêneas e a possibilidade de obtenção de geometrias específicas mediante otimização do molde elastomérico [17–20] via MEF. Porém, apresenta um custo mais elevado relacionado ao ferramental (*e.g.*, prensa isostática e moldes elastoméricos), taxa de produção inferior e complexidade no projeto do molde elastomérico.

Kim *et al.* (2000) [21] identificaram experimentalmente que a espessura do molde pode alterar a geometria do compacto verde, gerando distorções localizadas em regiões do molde elastomérico que formam vincos e “bicos”, resultando em um fenômeno denominado “pata de elefante”. Outro problema que pode ocorrer na PI é o aprisionamento de ar dentro do compacto verde. Gamboni *et al.* (2016) [22] observaram que o ar aprisionado durante a prensagem isostática de PTFE pode gerar trincas no compacto verde e estas não são eliminadas durante o processo de sinterização.

2.1.3 PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO

A prensagem multiaxial com elastômero (PME) visa aliar algumas vantagens da PU – alta produtividade, maquinário para execução relativamente simples e automatização – e da PI – homogeneidade das propriedades [23–26]. O trabalho de prensagem ocorre de maneira uniaxial em uma matriz rígida em que um molde elastomérico e o pó são confinados. O movimento do pistão tende a reduzir a cavidade inicial, comprimindo o pó e o molde. Contudo, pelo fato dos elastômeros terem baixa compressibilidade, *i.e.*, apresentam módulo volúmico elevado, o movimento unidirecional do pistão é transferido de maneira multiaxial para o pó por meio do elastômero. É possível planejar a geometria dos ferramentais para que essa transferência aproxime o carregamento a um estado de tensão próximo ao isostático. Na Figura 2.3 é apresentada uma representação de um exemplo de PME.

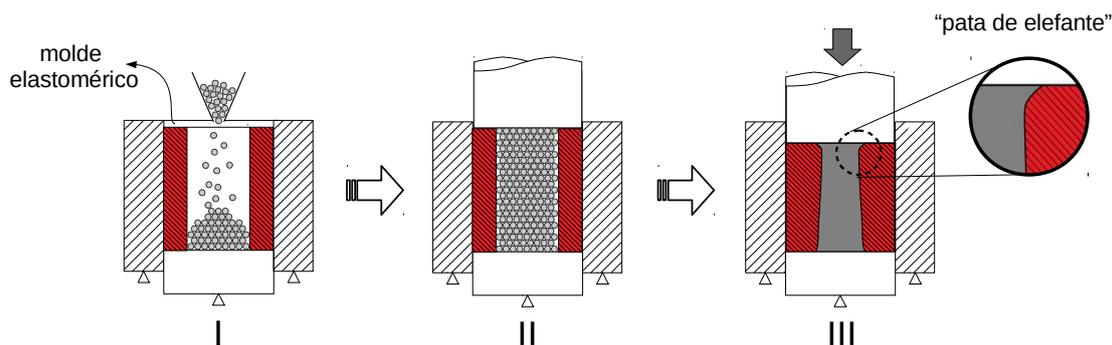


Figura 2.3: Representação esquemática do processo de prensagem multiaxial com elastômero (PME) em três etapas: (I) etapa de preenchimento da cavidade, (II) configuração inicial de prensagem e (III) configuração durante a prensagem, destacando o avanço radial não uniforme do molde em diferentes regiões. Em destaque o efeito denominado “pata de elefante”. Etapa de descarregamento não representada. Adaptado de Melo [27].

O projeto do molde, assim como na PI, é um ponto crucial para a correta execução desse processo e obtenção de um compacto verde íntegro e com as propriedades desejadas. A interação entre elastômero, pó e partes metálicas rígidas é um processo complexo por depender de diversos fatores, sendo esses: fenômenos tribológicos (adesão e atrito de Coulomb), grandes deformações plásticas do pó (considerado um meio contínuo) e grandes deformações elásticas (geralmente não-lineares) do elastômero. Um efeito comum nesse tipo de prensagem é denominado “pata de elefante”. Esse efeito acontece em regiões de borda, assim como o descrito na PI. Porém, na PME, isso ocorre quando o movimento do elastômero em uma determinada região é reduzido pelas condições de atrito entre as partes rígidas. Na Figura 2.3(c), por exemplo, o atrito entre os pistões e o elastômero reduz o movimento radial desse. Porém, uma caracterização dessas interações possibilita utilizar de iterações do tipo tentativa e erro ou de ferramentas numéricas, como simulações em EF, para otimizar o processo [27, 28].

2.2 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER/CAP

Nesta Seção, é apresentado o modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) [29] implementado no software comercial de EF ABAQUS™. É importante ressaltar que o comportamento mecânico do pó, durante as simulações numéricas utilizando

o MEF, é pela resposta de um meio contínuo e homogêneo. Características do pó, como tamanho médio de partícula, distribuição de tamanho de partículas e formato, assim como os fenômenos relacionados ao processo de prensagem, como o rearranjo entre partículas e a própria deformação localizada delas, são representadas por equações constitutivas de domínio macroscópico. O termo deformação plástica aqui utilizado refere-se a qualquer deformação permanente do meio contínuo. Neste trabalho, não foram considerados efeitos viscoelásticos e viscoplásticos. Este efeito foi observado durante a prensagem uniaxial de PTFE [30]. Essa aproximação faz com que estes efeitos fossem incluídos à medida de deformação plástica.

O modelo de DPC é reconhecidamente utilizado para simular a compactação de materiais granulares e pós [5, 20, 21, 27, 31–36]. Esse modelo de plasticidade apresenta múltiplas superfícies de escoamento que podem ser representadas no espaço tridimensional das tensões principais, *i.e.*, σ_1 , σ_2 e σ_3 . Para facilitar a visualização, essas superfícies são comumente representadas como linhas no plano dos invariantes de tensão p – tensão normal média compressiva – e q – tensão de von Mises. Seguem as equações que relacionam esses invariantes com as tensões principais:

$$p = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.2)$$

Na Figura 2.4(a) são apresentadas as superfícies do modelo de DPC e na Figura 2.4(b) uma curva representativa de uma lei de encruamento, típica de pós e materiais granulares, relacionando p_b e a deformação volumétrica plástica.

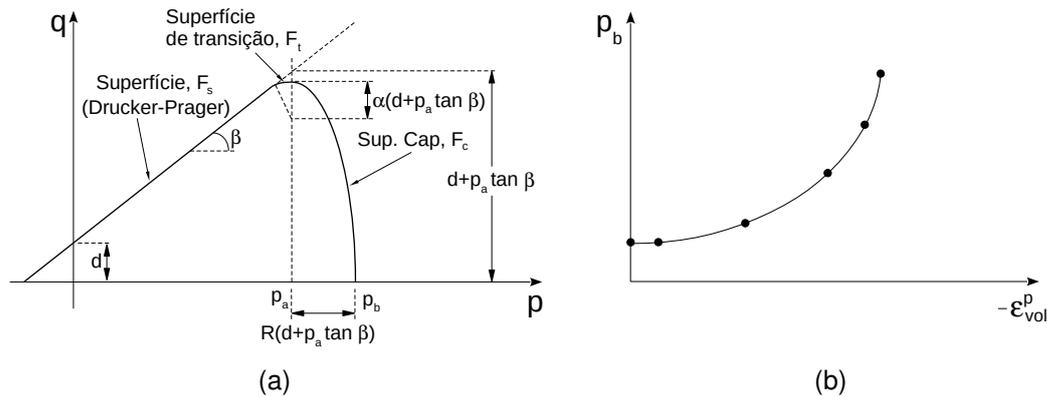


Figura 2.4: Modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) implementado no software ABAQUS™: (a) superfícies de escoamento e seus parâmetros no plano dos invariantes q vs. p e (b) curva associada à lei de encruamento em função da deformação volumétrica plástica (ϵ_{vol}^p) [37].

A superfície de Drucker-Prager, F_s , é definida conforme a Equação 2.3.

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (2.3)$$

em que d é a coesão e β é o ângulo de atrito interno do material. O mecanismo de fluxo plástico na superfície F_s é do tipo não-associativo (ver Figura 2.5, superfície G_s) e é definido pela Equação 2.4

$$G_s = \sqrt{[(p_a - p) \tan \beta]^2 + \frac{q}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos \beta}}} \quad (2.4)$$

Fenomenologicamente, a deformação plástica do material ao atingir esta superfície é dependente do ângulo de atrito interno (β) e resulta no fenômeno de dilatância [38] e, conseqüentemente, na redução da densidade. Montilha *et al.* (2018) [39] identificaram esse fenômeno em compactos verdes de alumina quando submetidos a ensaios de compressão simples (CS) e assistidos com a técnica de Correlação de Imagens Digitais. Além da dilatância, também foi observado o fenômeno de encruamento durante ensaios de CS em compactos verdes para o mesmo material [27, 36].

Em carregamentos com predominância de valores de p no estado de tensão, o material é densificado. A superfície Cap, F_c , descreve a sensibilidade do ma-

material nessas condições e possui um fluxo plástico associativo (ver Figura 2.5, superfície $G_c = F_c$), definido por

$$F_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{Rq}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos \beta}} \right]^2} - R[d + p_a \tan \beta] = 0 \quad (2.5)$$

sendo p_a o parâmetro de evolução da posição da superfície F_c e expresso por

$$p_a = \frac{p_b - Rd}{1 + R \tan \beta} \quad (2.6)$$

em que R é o parâmetro que controla a forma do Cap, α é uma constante que garante a transição suave entre as superfícies F_s (linear) e F_c (elíptica), evitando instabilidades numéricas. Essa transição é feita com o auxílio da superfície de transição F_t , que conecta F_s e F_c . Como α não tem significado físico, recomenda-se usar valores pequenos para este parâmetro (ou zero, sempre que possível) [40, 41].

Na Figura 2.5 são apresentadas as diferentes funções de potenciais plásticos para o modelo de DPC, sendo G_s referente à F_s e G_c referente à F_c . O vetor de deformação plástica é normal à superfície G_c e F_c – fluxo plástico associativo. Já para F_s , o vetor de fluxo plástico é normal à G_s e não obrigatoriamente à F_s – fluxo plástico não-associativo.

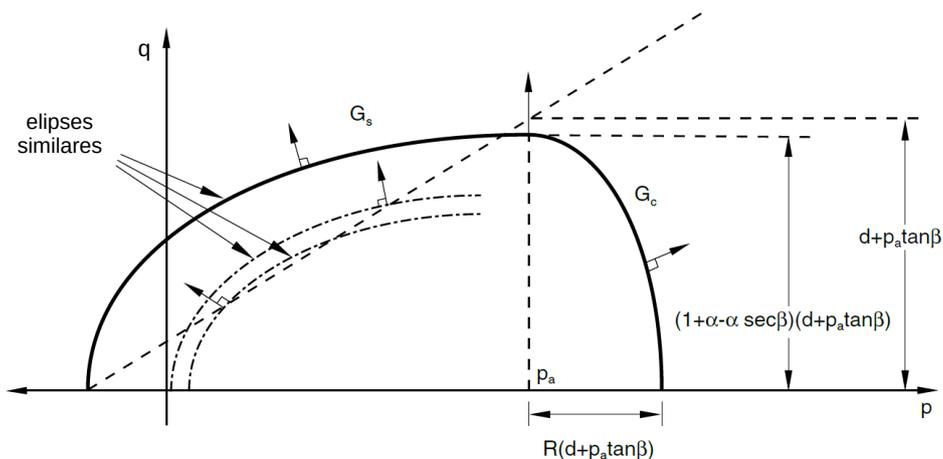


Figura 2.5: Funções de potencial plástico no modelo Drucker-Prager/Cap (DPC) implementado no ABAQUS™, apresentadas no plano dos invariantes q vs. p . G_s referente à F_s (reta pontilhada) e G_c referente à F_c . Representação adaptada do manual do software [37, 41].

Quando o material sofre escoamento na superfície F_c , o vetor de deformação plástica na Figura 2.5 apresenta componente horizontal positiva, resultando no aumento da densidade. Ao atingir F_s , o vetor de deformação plástica apresenta componente horizontal negativa, ocasionando o aumento do volume, *i.e.*, perda de densidade. Como a curva de encruamento (Figura 2.4(a)) do material é definida em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p), a depender em qual superfície o material plastifica, pode ocorrer o encruamento ou amolecimento.

Para auxiliar na leitura nas próximas Seções, os parâmetros do modelo de DPC apresentados nesta Seção são compilados na tabela a seguir.

Tabela 2.1: Parâmetros do modelo de Drucker-Prager/Cap, ver Figura 2.4(a,b).

Parâmetros do modelo de Drucker-Prager/Cap	
Parâmetros	Descrição
d	Resistência ao cisalhamento puro – coesão
β	Ângulo de atrito interno
R	Fator de forma da superfície Cap (F_c)
α	Parâmetro de transição entre F_s e F_c
p_a	Posição inicial da superfície Cap (F_c)
p_b	Posição final da superfície Cap (F_c)

2.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER/CAP

Para a calibração dos parâmetros do modelo constitutivo de Drucker-Prager/Cap (DPC), são necessários diversos experimentos com diferentes trajetos de carregamento. Esses trajetos de carregamento podem ser representados no plano dos invariantes de tensão q vs. p (Figura 2.6).

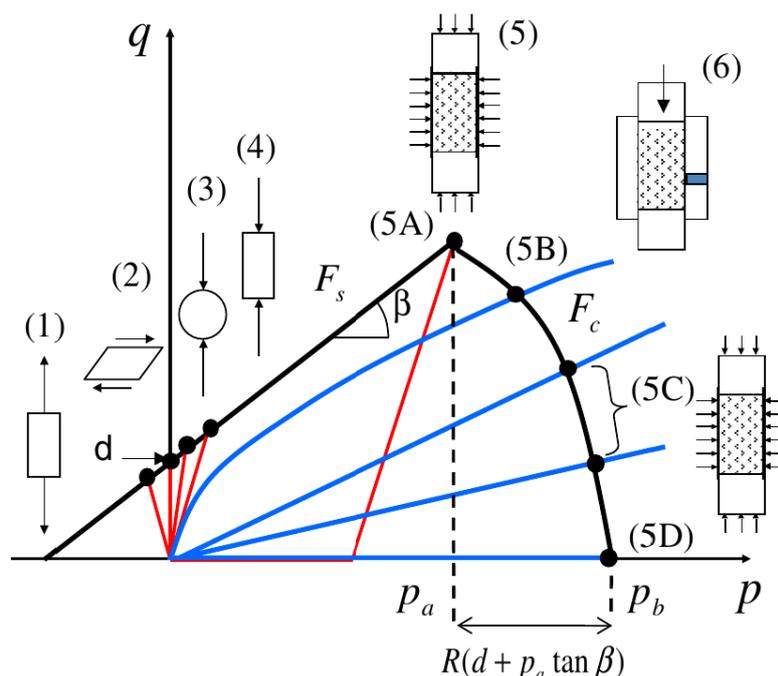


Figura 2.6: Modelo Drucker-Prager/Cap (DPC) e alguns procedimentos experimentais para determinar a superfície de plastificação F_s : (1) tração uniaxial, (2) torção simples (cisalhamento puro), (3) compressão diametral, (4) compressão uniaxial. A superfície F_c pode ser determinada por ensaios: (5A) ensaio triaxial, (5B) prensagem em matriz fechada, (5C) carregamento radial, (5D) ensaio isostático, (6) prensagem em matriz instrumentada para obtenção da curva relacionada ao ponto (5B). Adaptada de Shang *et al.* [42].

Usualmente, para definição da superfície F_s , são utilizados ensaios brasileiros (compressão diametral) – trajeto de carregamento com inclinação 5,41:1 – e ensaios de compressão simples – trajeto de carregamento com inclinação 3:1 [20, 36, 43, 44]. Ensaios de tração em compactos verdes não são comuns devido à fragilidade do corpo de prova. Com isso, a Equação (2.3) é definida a partir de dois tipos de ensaios, fornecendo duas regiões distintas no plano q vs. p para um ajuste linear.

Para a definição da superfície F_c , há a necessidade de ensaios mais elaborados e com maior grau de confinamento. Ensaios isostáticos são utilizados para a identificação da curva de encruamento (Figura 2.4(b)) [5, 45, 46] e, conseqüentemente, para identificar o ponto p_b no eixo hidrostático. Já para os demais trajetos de carga que possam atingir a superfície F_c , são usualmente utilizados os chamados ensaios triaxiais e os ensaios triaxiais verdadeiros. Os ensaios triaxiais consistem na prensagem uniaxial do pó em matriz fechada tubular e fle-

xível, sendo esta pressurizada lateralmente [21, 47–50]. Desta forma, duas das três tensões principais são iguais (as laterais). Já os ensaios triaxiais verdadeiros consistem no controle independente das tensões aplicadas nas três direções, ou seja, é possível obter $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$, podendo gerar infinitas possibilidades de trajetos de carga [45, 51, 52].

Apesar de serem extremamente versáteis, os ensaios triaxiais geralmente são custosos e difíceis de serem realizados. Para contornar isso, o uso da prensagem uniaxial (PU) em matrizes instrumentadas com vários sensores pode fornecer informações importantes sobre o trajeto de carga durante a prensagem, mas sem o controlar ativamente. Os sensores podem ser posicionados internamente na direção radial [42, 53–55], permitindo a medição pontual da tensão radial – desde que estejam devidamente calibrados – durante a prensagem. Outra estratégia é utilizar uma instrumentação mais simples, como o uso de *strain gauges* colados na região externa da matriz para medir a deformação circunferencial e/ou longitudinal. Com essas medidas indiretas e o uso de soluções analíticas de tubos de parede grossa, é possível estimar a pressão média de contato entre o pó e a superfície metálica [56–58]. O uso de sensores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) também pode ser útil. Ao medir o deslocamento radial de um tubo de parede fina usado como matriz e comparar com resultados de simulações em Elementos Finitos (EF), é possível estimar a transferência de carga lateral durante a prensagem [59].

Henderson *et al.* (2000) [18] utilizaram uma matriz instrumentada com *strain gauges* externos na posição circunferencial e longitudinal e compararam as respostas com o gêmeo digital construído em EF no software ABAQUS™. Comparando os resultados experimentais e numéricos, foi possível ajustar o fator de forma da superfície F_c , *i.e.*, parâmetro R , e o coeficiente de atrito entre o pó e partes metálicas.

Outra estratégia é o uso da análise diferencial de Janssen [60, 61]. Essa abordagem e suas variações são geralmente utilizadas para prever a distribuição interna de tensões em silos [62], mas já foi utilizada para materiais para prensagem de pós [63].

2.4 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A simulação dos processos de prensagem, via Método dos Elementos Finitos, vem sendo bastante utilizada, ganhando atenção mais considerável a partir do ano 2000, e vem sendo útil para a definição de parâmetros de processos, otimização, redução de custos e na previsão da geometria do compacto verde. Entretanto, a previsão de falhas em compactos verdes, via simulação numérica, é um tema que carece de aprofundamento. Usualmente, a identificação da resistência mecânica do compacto verde é investigada em ensaios brasileiros [64–67]. Nesses ensaios, muitas vezes é avaliada a tensão principal máxima na ruptura (*i.e.*, critério de Rankine) e não são considerados critérios de resistência mais amplos, como Drucker-Prager (DP), Drucker-Prager/Cap (DPC) e Cam-Clay [38] que consideram também a tensão normal média, assim, estes estudos avaliam a fratura do compacto verde em situações não confinadas, não abordando trajetos de carga com maior grau de confinamento, que ocorrem durante a etapa de prensagem.

A motivação para o estudo sobre a previsão de falhas em compactos verdes reside principalmente no problema do retorno elástico durante o descarregamento. Na PU, o carregamento durante a prensagem armazena energia elástica no ferramental e sua liberação, quando excessiva, pode gerar trincas e delaminações no compacto verde [1, 68]. Esse retorno elástico também acontece na PI. Reiterer *et al.* (2004) [69] identificaram, via simulações em EF, a presença de tensões residuais compressivas superiores ao limite do material após a prensagem isostática de SiC. Gu *et al.* (2006) [70] constataram, via simulação em EF, que o processo de descolamento do molde elastomérico com o compacto verde na PI, no final do descarregamento, pode gerar tensões principais máximas trativas no compacto verde, devido às condições tribológicas e cinemáticas, como pinçamento. Esse efeito também pode ocorrer na PME, em que o retorno elástico do elastômero pode danificar o compacto verde. Conhecendo esse fenômeno, este projeto o utilizará para realizar ensaios de PME com falhas induzidas, a fim de estudar sua previsão a partir de simulações numéricas de prensagem para o pó de alumina e PTFE.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

A alumina (Al_2O_3) e o politetrafluoretileno (PTFE) são utilizados como materiais para estudos de casos. Ambos já foram estudados pelo grupo de pesquisa (alumina [5, 27, 36, 39, 71] e PTFE [30, 45, 72–77]). O uso desses materiais permite a experimentação e a aplicação de metodologias em condições distintas. O pó de PTFE apresenta as seguintes características de interesse neste trabalho: certo grau de ductilidade dos grãos e do compacto verde, carregamento de prensagem relativamente baixo, alta transferência de carga lateral para a matriz devido ao alto coeficiente de Poisson, baixo coeficiente de atrito com o ferramental e grandes deformações volumétricas plásticas durante a prensagem – tanto do pó considerado um meio contínuo, como também dos próprios grânulos que o compõe. Por outro lado, o pó de alumina apresenta algumas características bastante distintas quando comparado com o de PTFE: maior fragilidade do compacto verde, carregamento de prensagem maior, baixa transferência de carga lateral para a matriz devido ao baixo coeficiente de Poisson, maior coeficiente de atrito com o ferramental e deformações volumétricas moderadas durante a prensagem. Ambos os materiais apresentam grande interesse tecnológico.

Utilizando esses pós, é possível estudar diferentes cenários, tanto numéricos quanto experimentais, como, por exemplo: transferência de cargas distintas (diferentes níveis de confinamento), diferentes níveis de deformação e a influência do coeficiente de atrito (diferentes níveis de gradiente de densidade e propriedades mecânicas).

3.1.1 PÓ DE ALUMINA

A alumina (Al_2O_3) utilizada é comercializado pela Ceraltec Cerâmica Técnica Ltda. (Ibaté, Brasil), apresenta um grau de pureza de 90%, tamanho médio de grânulos de 75 μm e perda ao fogo de 2,7% a 500°C por duas horas. Na Figura 3.1 [39] é apresentada uma micrografia do material.

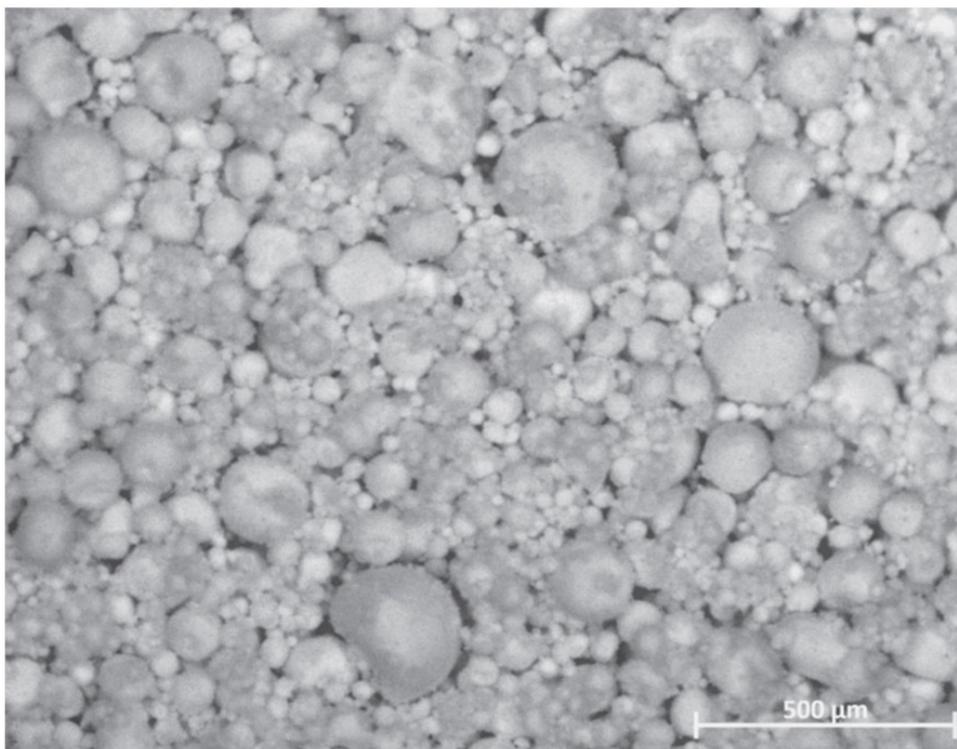


Figura 3.1: Micrografia do material no microscópio Zeiss Stemi 2000-C [39].

3.1.2 PÓ DE PTFE

O PTFE utilizado é um *grade* comercial, Teflon 807-N, que foi fornecido pela DuPont. Este *grade* é atualmente comercializado pela Chemours com o código 807N X. Esta resina passa por um processo após a polimerização que forma *pellets* arredondados, chamados de grânulos, resultando em uma boa fluidez durante o preenchimento de moldes. Estes grânulos possuem tamanho médio de 600 μm , grau de cristalinidade de aproximadamente 90% e porosidade inicial de 60% [78] (considerando os vazios presentes no interior e entre os grânulos). Na Figura 3.2 é apresentada uma micrografia do material.

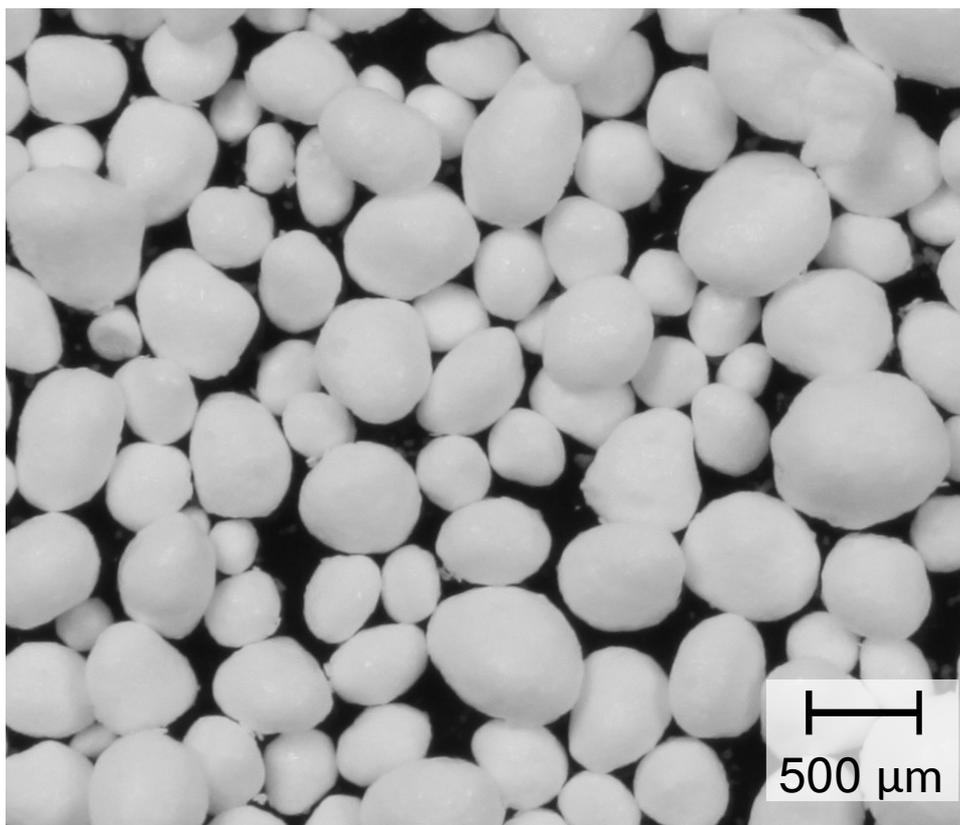


Figura 3.2: PTFE granulado Teflon 807N X [22].

3.1.3 ELASTÔMERO

O elastômero utilizado na manufatura do molde elastomérico na prensagem multiaxial com elastômero (PME) é do tipo bicomponente – resina e agente catalisador – sendo comercializado sob o nome RenCast® 4644-1 pela empresa MAXEPOXI – Industrial e Comercial Ltda (São Paulo, Brasil) [79]. Este material apresenta algumas características de interesse para o uso em moldes elastoméricos, sendo: cura em temperatura ambiente, retração menor que 0,1% e boas propriedades mecânicas. Já foi utilizado em ambientes confinados para prensagem de pós para confecção de uma rótula femoral em alumina [27] e durante a prensagem isostática (PI) de meio hemisfério oco do material piezoelétrico titanato zirconato de chumbo para confecção de sensores [20].

3.2 MÉTODOS

Foram abordados dois procedimentos experimentais. O primeiro consiste no ajuste dos parâmetros do modelo constitutivo para simular a prensagem dos pós

de alumina e PTFE, por meio da comparação entre os sinais experimentais e suas contrapartes digitais. O segundo procedimento envolve a análise e previsão de falhas durante a prensagem dos pós estudados, quando submetidos à prensagem multiaxial com elastômero (PME) usando uma geometria simples, a qual permite induzir intencionalmente situações suscetíveis a quebras.

3.2.1 VERIFICAÇÃO E AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS MODELOS CONSTITUTIVOS PARA PRENSAGEM DO PÓ

Nesta Seção são descritos os ensaios realizados para ajustar os parâmetros dos modelos constitutivos na prensagem de pós de alumina e PTFE. Os dados experimentais foram comparados com os resultados numéricos, permitindo o ajuste de alguns parâmetros dos modelos.

3.2.1.1 EXPERIMENTAL – PRENSAGEM UNIAXIAL

Foram executados ensaios de prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada para ambos os pós. Para a alumina, foi utilizada uma máquina de ensaios modelo Instron® 5500R, com capacidade máxima de 250 kN. Para o PTFE, foi utilizada uma máquina de ensaio modelo MTS Exceed E44.304, com capacidade máxima de 30 kN. O aparato experimental instrumentado utilizado em ambos os casos é apresentado na Figura 3.3, composto por:

- Matriz de parede fina confeccionada em aço ferramenta AISI D6 [80], com dimensões apresentadas na Figura 3.3(b), instrumentada com quatro *strain gauges* (modelo C4A-06-125SL-350-23P da Micro-Measurements, Raleigh, EUA) colados circunferencialmente a 32, 42, 52 e 62 mm de altura em relação à base da matriz, para medir a deformação circunferencial¹;
- Dois pistões de 30 mm de diâmetro, instrumentados com sensores de pressão axial na região central da face em contato com o pó com diâmetro de 14 mm, para medir a pressão de contato;
- Célula de carga axial acoplada à matriz para medir a força vertical de reação;
- Sensor LVDT (modelo DCC050A da RDP Eletronics Ltd. e comercializado

pela Metrolog Controles de Medição Ltda., São Carlos) para medição do deslocamento entre as placas de compressão, evitando contabilizar o deslocamento causado pela flexibilidade da máquina de ensaios.

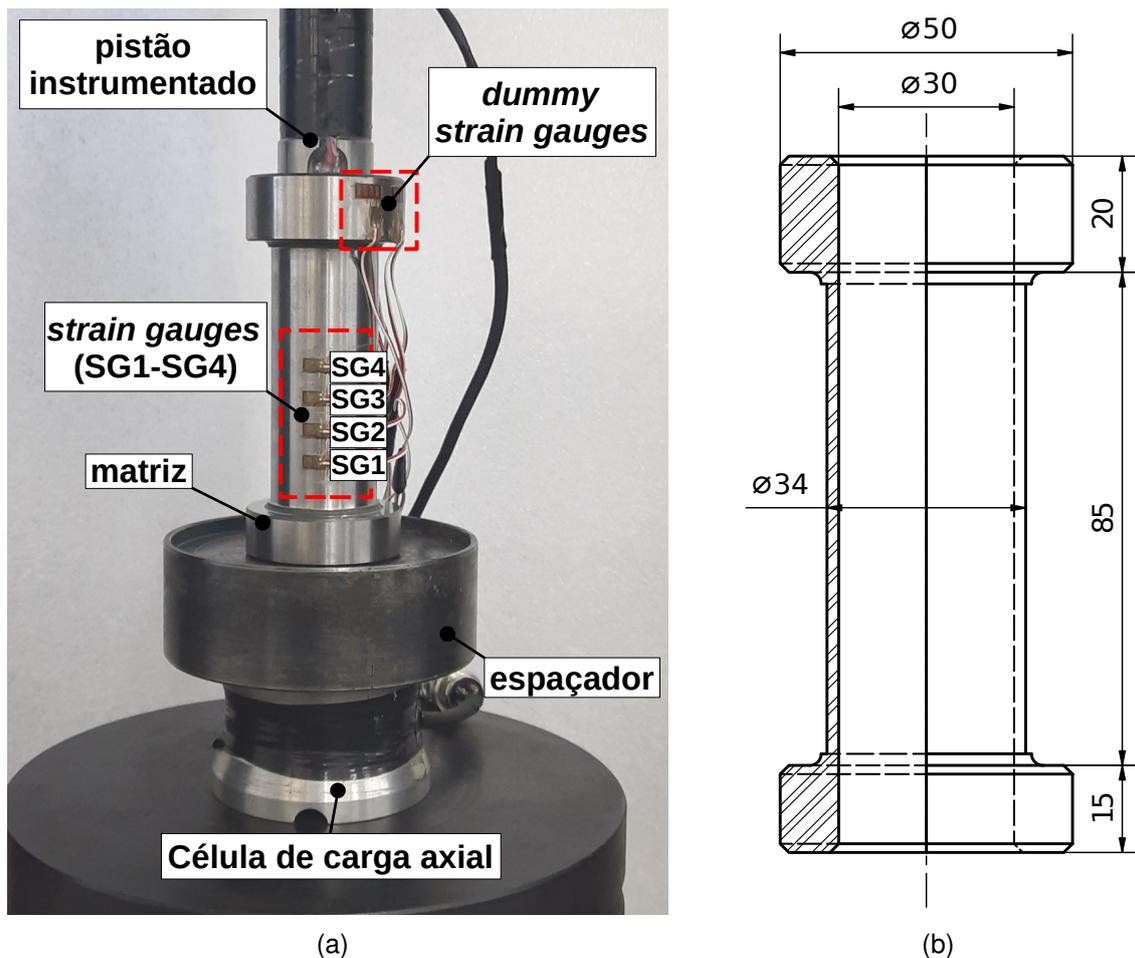


Figura 3.3: (a) Aparato experimental composto por: matriz de parede fina equipada com quatro *strain gauges* (SG1 a SG4), *dummy gauges* posicionados no colar superior, pistões instrumentados com sensores axiais, e célula de carga axial acoplada à matriz. (b) Desenho técnico da matriz com dimensões nominais em milímetros. LVDT não incluído na montagem.

Os *strain gauges* utilizados na matriz estão configurados em meia-ponte, com *strain gauges* ativos colados na parte externa da matriz na direção circunferencial

¹Um trabalho está em elaboração sobre o uso da instrumentação circunferencial com quatro *strain gauges* na matriz de parede fina para medir o perfil de pressão de contato entre pó a matriz durante a prensagem [81].

e *dummy gauges* (Figura 3.3(a)) para compensação de temperatura, posicionados no colar superior na direção longitudinal, região e orientação onde os níveis de deformações são desprezíveis. Um conversor analógico-digital modelo Lynx ADS1500 16 bits foi utilizado para gravação dos dados dos *strain gauges*, dos sensores de pressão nos pistões, da célula de carga axial e do LVDT.

Os ensaios de PU em matriz fechada foram executados para ambos os materiais, com velocidade de travessão de $1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ no carregamento e $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ no descarregamento. Essa diferença entre taxas foi utilizada para aumentar a quantidade de medições durante o retorno do pistão no descarregamento que é menor que avanço no carregamento, mantendo assim frequências de aquisição de dados similares. Os demais parâmetros de cada ensaio estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros experimentais da prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada para os pós de alumina e de PTFE.

Material	Massa [g]	Altura [mm]	Densidade inicial [g.cm ⁻³]	Carga máxima [kN] (MPa)
Pó de alumina	70	77,46	1,28	70,7 (≈ 100)
Pó de PTFE	40	60,20	0,94	28,3 (≈ 40)

3.2.1.2 GÊMEO DIGITAL – PRENSAGEM UNIAXIAL

Foi criado, no software de Elementos Finitos (EF) ABAQUS™, o gêmeo digital do aparato experimental apresentado anteriormente. Na Figura 3.4, é apresentado o modelo axissimétrico utilizado como base para a PU em matriz fechada para os pós de alumina e PTFE. Em relação à geometria das partes representadas, apenas a altura inicial do pó foi alterada para simular a prensagem de cada material, ver Tabela 3.1. Todas as partes que compõem a montagem foram simuladas como deformáveis e com modelos de materiais isotrópicos. Elementos do tipo CAX4 – elemento axissimétrico de quatro nós com dois graus de liberdade por nó, deslocamentos horizontais e verticais – foram utilizados. O modelo de Drucker-Prager/Cap utilizado para representar o pó apresenta algumas de suas propriedades em função do nível de compactação. Uma sub-rotina em FORTRAN, do tipo USDFLD (*user-defined field*) foi utilizada para a implementação

dos parâmetros em função do nível de densidade. Os deslocamentos verticais na base do pistão inferior e da célula de carga axial foram restringidos (triângulos amarelos). No pistão superior, foi utilizado deslocamento imposto da mesma magnitude do medido experimentalmente com o LVDT (triângulos vermelhos). Na linha de centro, apenas os deslocamentos horizontais foram restringidos.

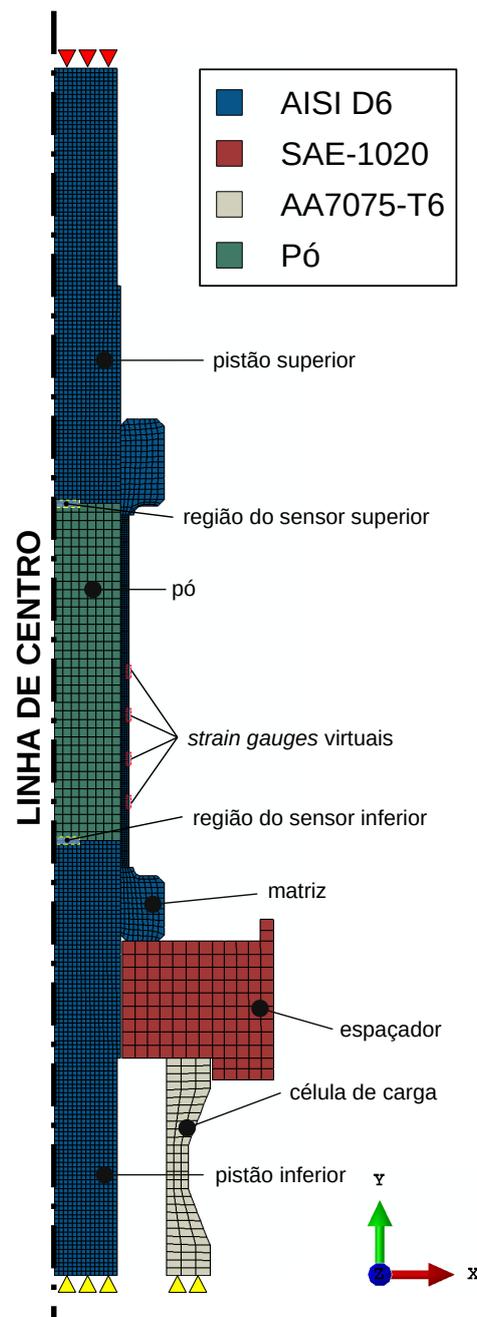


Figura 3.4: Geometria e condições de contorno do modelo em Elementos Finitos (EF) utilizado como base para simular a prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada para os pós de alumina e PTFE. A célula de carga axial e o pistão inferior têm os deslocamentos verticais restringidos (triângulos amarelos). O pistão superior possui deslocamento imposto da mesma magnitude do deslocamento medido experimentalmente pelo LVDT (triângulos vermelhos). Os deslocamentos horizontais são restritos na linha de centro. As regiões equivalentes aos sensores de pressão nos pistões e aos *strain gauges* estão destacadas. Como referência dimensional, o diâmetro interno da matriz é de 30 mm e sua altura total é de 120 mm.

Para fins de comparação com os dados experimentais provenientes dos en-

saio de PU, as forças de reação equivalentes no pistão superior e na célula de carga foram confrontadas com a força da máquina de ensaio e com a força de reação medida na célula de carga axial. As tensões nos sensores de pressão nos pistões foram comparadas com a pressão de contato média – variável CPRESS no software ABAQUS™ – em uma região central de 14 mm de diâmetro, equivalente à região do sensor de pressão (região sensível destacada na Figura 3.4). Para a comparação das deformações nos *strain gauges*, as deformações nas suas contrapartes digitais foram calculadas como a média das deformações circunferenciais extrapoladas para os nós externos da matriz, *i.e.*, *strain gauges* virtuais (Figura 3.4).

As partes metálicas foram simuladas com um modelo linear elástico e seus respectivos parâmetros elásticos estão apresentados na Tabela 3.2. Cada pó foi simulado com o modelo constitutivo Drucker-Prager/Cap. A parcela elástica do modelo foi definida como linear e também apresenta evolução com a densificação. A condição normal de atrito entre as partes foi modelada seguindo o modelo *hard contact* utilizando a formulação *finite sliding* no software ABAQUS™. Já a condição tangencial de atrito foi modelada como atrito de Coulomb. Os coeficientes de atrito entre as partes metálicas, assim como do pó com as partes metálicas, foram definidos inicialmente a partir de dados da literatura e ajustados a partir da comparação entre os dados experimentais e simulados.

Tabela 3.2: Parâmetros elásticos das partes metálicas utilizados nas simulações. Tensão de escoamento utilizada para fins de projeto (Ref. [80, 82]).

Material	Módulo de elasticidade	Coef. de Poisson	Tensão de escoamento
SAE-1020	207 GPa	0,30	≈ 350 MPa
AISI D6	194 GPa	0,30	≈ 1300 MPa ^a
AA7075-T6	73 GPa	0,33	≈ 500 MPa

^a Tensão máxima de resistência mecânica sob compressão.

Análises de convergência de malha foram realizadas e o tamanho médio do elemento, número de elementos e graus de liberdade são apresentados na Tabela 3.3 para cada parte da montagem. Ajustes na altura inicial do pó solto alteram a quantidade de elementos e graus de liberdades para cada material (mais detalhes na Tabela 3.1).

Tabela 3.3: Parâmetros de malha para prensagem uniaxial (PU) em matriz fechada.

Parte	Tamanho médio [mm]	N.º de elementos	Graus de liberdade
Pistões	≈ 1 mm	1450	1566×2
Matriz	≈ 1,2 mm	914	1124×2
Espaçador	≈ 3 mm	120	146×2
Célula de carga	≈ 2 mm	81	112×2
Pó de alumina	≈ 2 mm	312	360×2
Pó de PTFE	≈ 2 mm	240	279×2

3.2.2 ENSAIOS DE PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO PARA INDUÇÃO E VERIFICAÇÃO DE FALHAS

A partir de simulações iniciais em Elementos Finitos (EF), não apresentadas neste texto, os ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME) foram planejados. Procurou-se definir um processo que utilizasse o mesmo ferramental metálico já existente, ou seja, a matriz instrumentada apresentada na Figura 3.3 (pág. 21) e um molde elastomérico de fácil fabricação. Nessas simulações, o uso de um molde de borracha com forma tubular reta, com uma altura cerca de três vezes maior que o diâmetro interno, conduziu a situações em que possíveis danos fossem causados no compacto verde devido ao seu pinçamento pelo elastômero na etapa de descarregamento, fenômeno este conhecido em processos industriais de prensagem isostática, quando o projeto de fabricação é inadequado.

3.2.2.1 EXPERIMENTAL – PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO

Foi utilizado o mesmo aparato experimental presente na Figura 3.3 para os ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME). O molde elastomérico em forma tubular foi confeccionado em RenCast® 4644-1 (Seção 3.1.3, pág. 19) com auxílio de um contra-molde usinado em alumínio para moldar a cavidade do tubo. Na Figura 3.5 é apresentado o contra-molde e a peça final tubular com 29,80 mm de diâmetro externo (houve uma pequena retração no diâmetro), 15 mm de diâmetro interno e 45 mm de altura. O molde foi lubrificado externamente com grafite em pó, resultando em coeficiente de atrito de cerca de 0,05 [17, 27, 83]. A superfície interna não foi lubrificada para evitar contaminação dos pós estudados pelo pó de grafite.

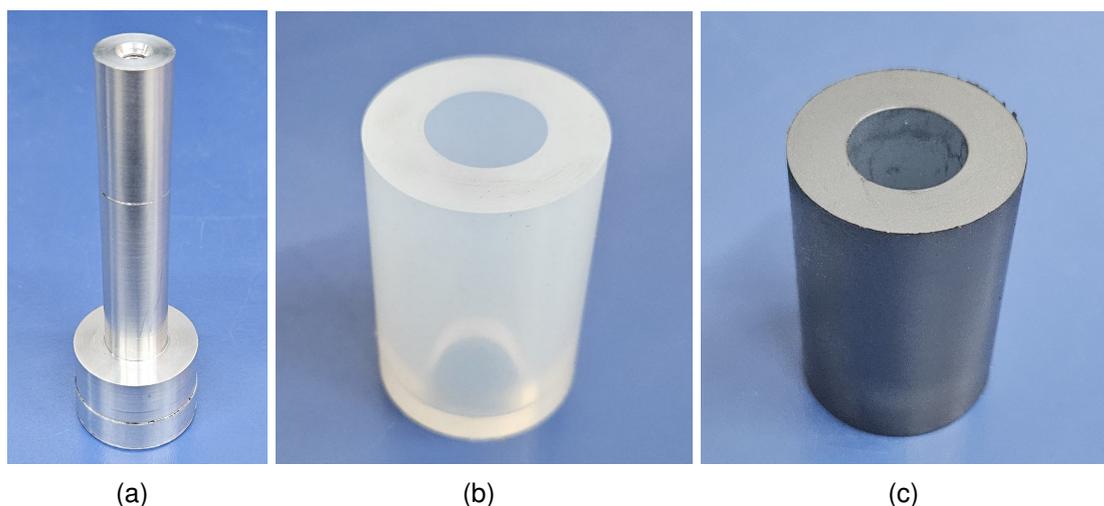


Figura 3.5: (a) Contra-molde usinado em alumínio com diâmetro externo de 15 mm na região útil e 30 mm na base. (b) Molde elastomérico tubular confeccionado com a resina RenCast® 4644-1, com 29,80 mm de diâmetro externo, 15 mm de diâmetro interno e 45 mm de altura. (c) Molde impregnado com grafite em pó para diminuir o atrito deste com as partes metálicas. A superfície interna não foi lubrificada. Figuras fora de escala.

O molde foi posicionado dentro da matriz, e a cavidade interna foi preenchida com pó a ser estudado. Foram utilizados 7,2 g de pó de PTFE ou 10,2 g de pó de alumina, resultando em uma densidade inicial de aproximadamente $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,28 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente.

Os ensaios de PME foram executados para ambos os materiais com velocidade do atuador da máquina de ensaios de 1 mm.min^{-1} , tanto para carregamento quanto descarregamento. A tensão nominal (σ_n) foi variada até o valor de tensão nominal máxima ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 2, 5, 10, 15, 20, 30 e 40 MPa para a alumina e 5, 10, 15, 20 e 40 MPa para o PTFE.

3.2.2.2 GÊMEO DIGITAL – PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO

Foi criado, no ABAQUS™, o gêmeo digital do aparato experimental utilizado para a PME. Na Figura 3.6 é apresentado o modelo geométrico axissimétrico utilizado para a PME do pó de PTFE e alumina, tendo as mesmas características do modelo apresentado anteriormente na Seção 3.2.1.2 (pág. 22). Foi utilizada a formulação híbrida – aumento de um grau de liberdade para cálculo da tensão normal média – nos elementos referentes ao elastômero – elemento do tipo CAX4H – devido ao alto grau de confinamento. O pistão superior tem uma

condição de carregamento equivalente à condição experimental, podendo ser a aplicação de uma força equivalente à força do atuador da máquina de ensaios ou deslocamento vertical resultando na mesma magnitude de força nominal. A escolha entre a aplicação de força ou deslocamento equivalente baseou-se na convergência e não-convergência das simulações. Em geral, a convergência da simulação foi atingida mais facilmente com a imposição de deslocamento.

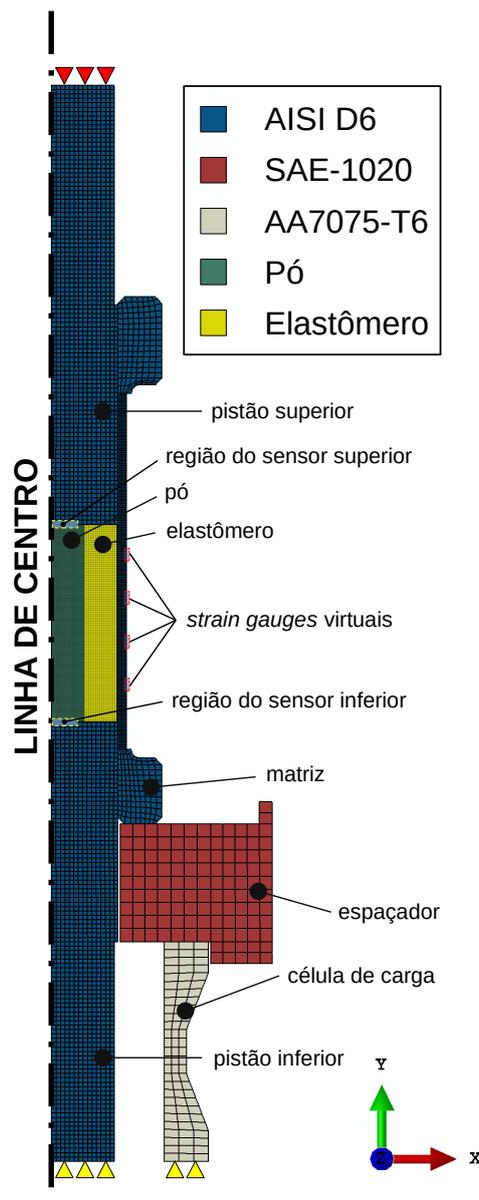


Figura 3.6: Geometria e condições de contorno do modelo em Elementos Finitos (EF) utilizado para simular a prensagem multiaxial com elastômero (PME) para o pó de PTFE ou de alumina. A célula de carga axial e o pistão inferior têm os deslocamentos verticais restringidos (triângulos amarelos). Os deslocamentos horizontais são restritos na linha de centro. O pistão superior tem uma condição de carregamento equivalente à condição experimental, podendo ser a aplicação de uma força equivalente à força do atuador da máquina de ensaios ou deslocamento vertical resultando na mesma força nominal. As regiões equivalentes aos sensores de pressão nos pistões e aos *strain gauges* estão destacadas. Como referência dimensional, o diâmetro interno da matriz é de 30 mm e sua altura total é de 120 mm.

As propriedades elásticas das partes metálicas utilizadas são as mesmas apresentadas na Tabela 3.2 (pág. 25). Cada pó foi simulado com o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager/Cap, com elasticidade linear. Para o

elastômero, foi utilizado o modelo hiperelástico de Yeoh com parâmetros obtidos em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa [27]. Os modelos de contato foram os mesmos apresentados anteriormente na Seção 3.2.1.2 (pág. 22). Os parâmetros de malha são os mesmos utilizados anteriormente para os pistões, matriz, espaçador e célula de carga axial. A convergência de malha foi realizada e os novos parâmetros de malha para o pó e elastômero são apresentados na Tabela 3.4. Na modelagem da PME para os dois materiais, a mesma malha foi utilizada tanto para o pó de PTFE quanto para o pó de alumina, já que neste caso a altura inicial de cada pó foi a mesma.

Tabela 3.4: Parâmetros de malha para prensagem multiaxial com elastômero (PME).

Parte	Tamanho médio [mm]	N.º de elementos	Graus de liberdade
Elastômero	≈ 0,5 mm	1350	1456×2
Pó ^a	≈ 0,25 mm	5400	5611×2

^a A mesma malha foi utilizada para simular os pós de alumina e PTFE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo contém duas partes. Primeiro, são apresentados os resultados dos procedimentos utilizados para o ajuste e verificação dos modelos constitutivos de prensagem dos pós (Seção 4.1). Em seguida, são apresentados os resultados dos procedimentos utilizados para obtenção de compactos verdes com falhas induzidas (Seção 4.2, pág. 42) e os critérios estabelecidos para prever essas falhas nas simulações numéricas do processo de prensagem.

4.1 AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO CONSTITUTIVO

Os ajustes de alguns dos parâmetros do modelo constitutivo de DPC, assim como os parâmetros elásticos, tanto para o pó de alumina quanto para o pó de PTFE, foram realizados a partir de valores extraídos da literatura, chamados aqui de parâmetros de referência. Nesses ajustes, os parâmetros foram definidos em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p) com o uso de uma função sigmoide:

$$\Psi(\varepsilon_{vol}^p) = \Psi_1 + \frac{\Psi_2}{1 + \exp[\Psi_3(\varepsilon_{vol}^p - \Psi_4)]} \quad (4.1)$$

em que $\Psi(\varepsilon_{vol}^p)$ representa determinado parâmetro do modelo constitutivo dos materiais estudados ($\Psi = E, \nu, d$) e Ψ_i , com $i = \{1, 2, 3, 4\}$, são os coeficientes de ajuste da função sigmoide. Tal escolha baseia-se em uma característica relacionada ao comportamento mecânico do pó durante a prensagem. Inicialmente, o pó solto apresenta propriedades mecânicas macroscópicas muito baixas devido à grande quantidade de vazios. À medida que a prensagem avança e a magnitude da ε_{vol}^p (ou a densidade) aumenta, essas propriedades (e.g., módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) aumentam até um determinado patamar. Logo, o uso de uma função deste tipo permite ajustar a evolução dessas propriedades entre dois patamares em função da ε_{vol}^p de maneira contínua e suave. Os coeficientes das funções sigmoides utilizados nos dois materiais são apresentados nas seções a seguir.

A curva de encruamento do material, que relaciona a tensão hidrostática p_b com a ε_{vol}^p (Figura 2.4(b)) – que também pode ser referida como curva de den-

sificação ou consolidação – foi ajustada com dados experimentais da literatura, utilizando a seguinte função:

$$p_b(\varepsilon_{vol}^p) = p_{b1} \left[\ln \left(\frac{p_{b2} - p_{b3}}{\varepsilon_{vol}^p - p_{b3}} \right) \right]^{p_{b4}} \quad (4.2)$$

Este tipo de função já foi utilizado para descrever a curva de encruamento do PTFE [46]. Um significado físico que pode ser atribuído para o parâmetro p_{b3} é o nível de deformação volumétrica plástica necessário, em relação ao estado inicial (*e.g.*, pó solto), para eliminar todos os vazios macroscópicos.

A descrição destes parâmetros em função do nível de deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p) ou em termos de densidade (ρ) é equivalente e se correlaciona da seguinte forma:

$$\varepsilon_{vol}^p(\rho) = \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) \quad \rho(\varepsilon_{vol}^p) = \rho_0 \exp(-\varepsilon_{vol}^p) \quad (4.3)$$

sendo ρ a densidade do pó e ρ_0 a densidade inicial aparente do pó solto, ou seja, a altura da massa de pó assim que despejado na matriz. Essa Equação 4.3 parte da definição de deformações logarítmicas, considerando a conservação de massa durante a prensagem.

4.1.1 PÓ DE ALUMINA

Os parâmetros de referência elásticos e do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) para o pó de alumina foram extraídos da literatura [27]. O ângulo de atrito interno, β , e o fator de forma, R , foram fixados em $63,3^\circ$ e $0,75$, respectivamente. O parâmetro α foi mantido em zero. Os coeficientes de atrito de Coulomb entre pó de alumina/metal e metal/metal foram ajustados para $0,34$ e $0,05$, respectivamente.

Os resultados experimentais e numéricos foram confrontados e ajustes dos coeficientes Ψ_i para módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coesão foram realizados – por tentativa e erro – a fim de diminuir a diferença entre os sinais experimentais e resultados das simulações. Na Figura 4.1 é apresentada a comparação entre os sinais para a força no atuador da máquina de ensaio,

célula de carga axial e sensores de pressão nos pistões, provenientes das simulações realizadas com os parâmetros de referência (curvas em vermelho), com os parâmetros ajustados (curvas em azul) e o resultado experimental (linha preta tracejada). Procedimento análogo foi realizado para a comparação entre os sinais dos quatro *strain gauges*, conforme é apresentado na Figura 4.2.

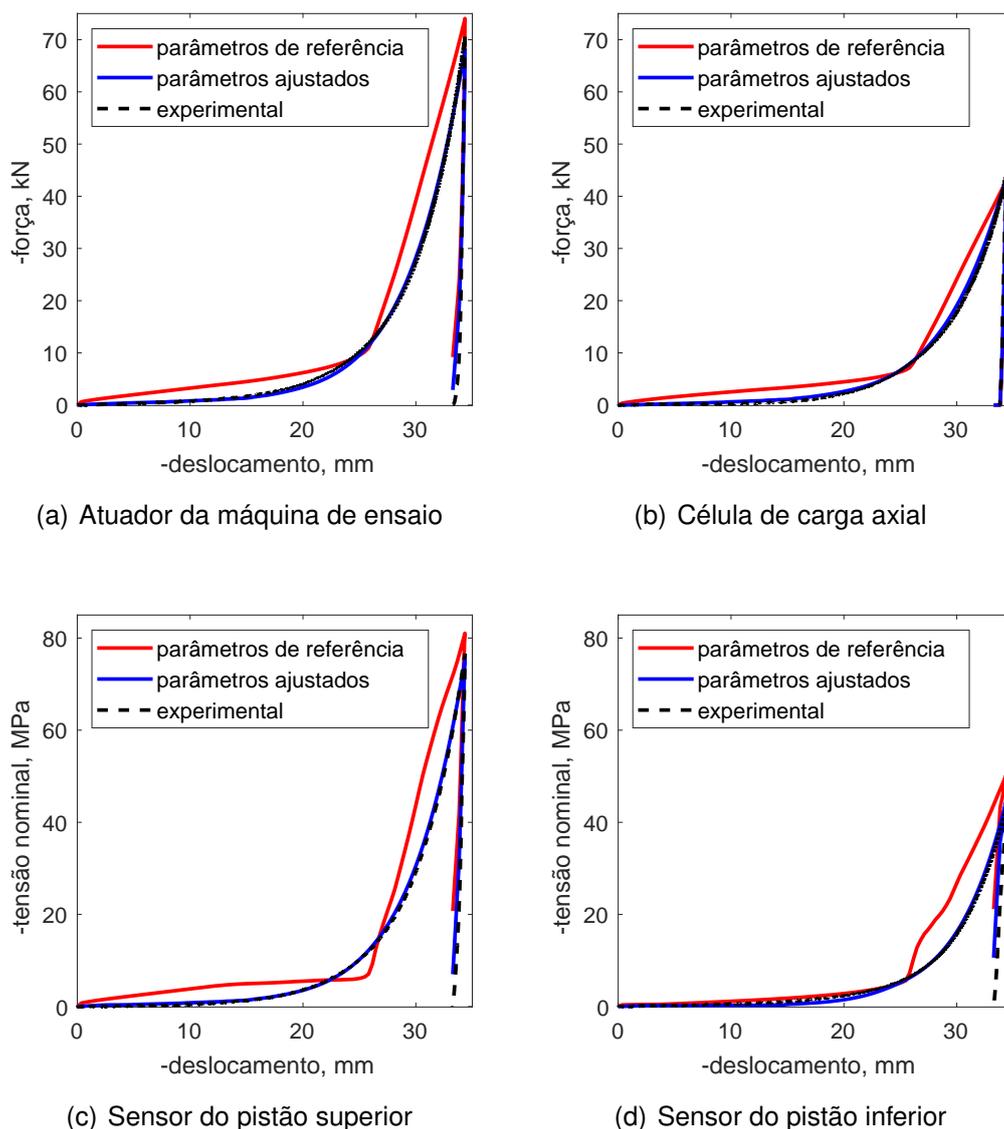


Figura 4.1: Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir de simulações utilizando parâmetros de referência [27] e ajustados: (a) atuador da máquina de ensaio, (b) célula de carga axial, (c) sensor do pistão superior e (d) sensor do pistão inferior, para a prensagem uniaxial (PU) da alumina.

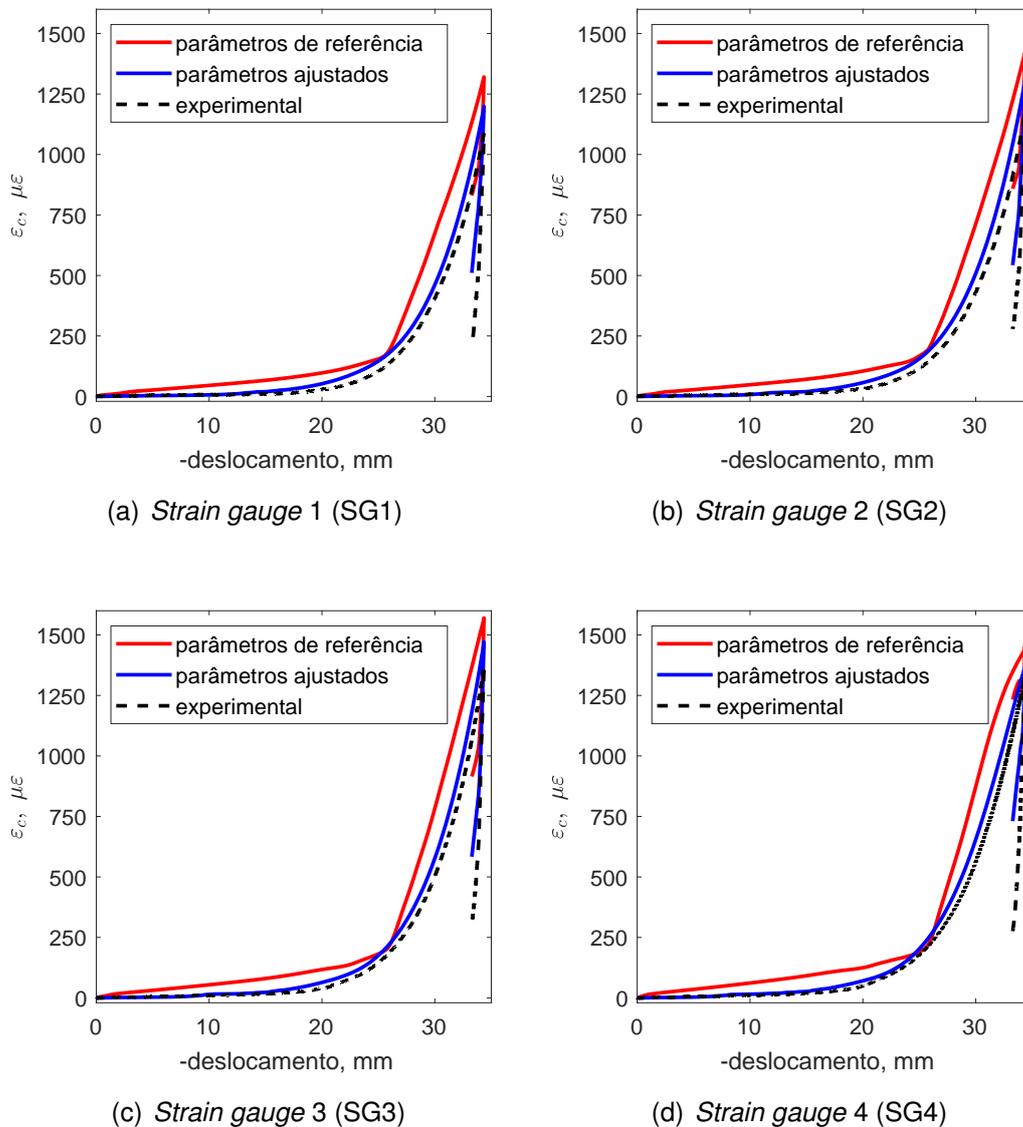


Figura 4.2: Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir de simulações utilizando parâmetros de referência [27] e ajustados para os quatro *strain gauges*, para a prensagem uniaxial (PU) da alumina.

Os coeficientes das funções sigmóides (Equação (4.1)) para o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (d) e os coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) estão compilados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Coeficientes das funções sigmóides (Equação (4.1)) para os parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap e coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) para o pó de alumina em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p).

i	Parâmetros elásticos		Parâmetros plásticos, Drucker-Prager/Cap	
	E_i	ν_i	d_i	p_{bi}
1	5 MPa	10^{-2}	5×10^{-3} MPa	0,244 MPa
2	1830 MPa	0,24	2,7 MPa	2,445 MPa
3	18,8	15,4	53	-1,125
4	0,33	0,33	0,33	11,95

Apesar de os coeficientes terem sido ajustados em função da deformação volumétrica plástica (ε_{vol}^p), tais funções podem ser apresentadas em função da densidade (Equação (4.3)), conforme apresentado na Figura 4.3.

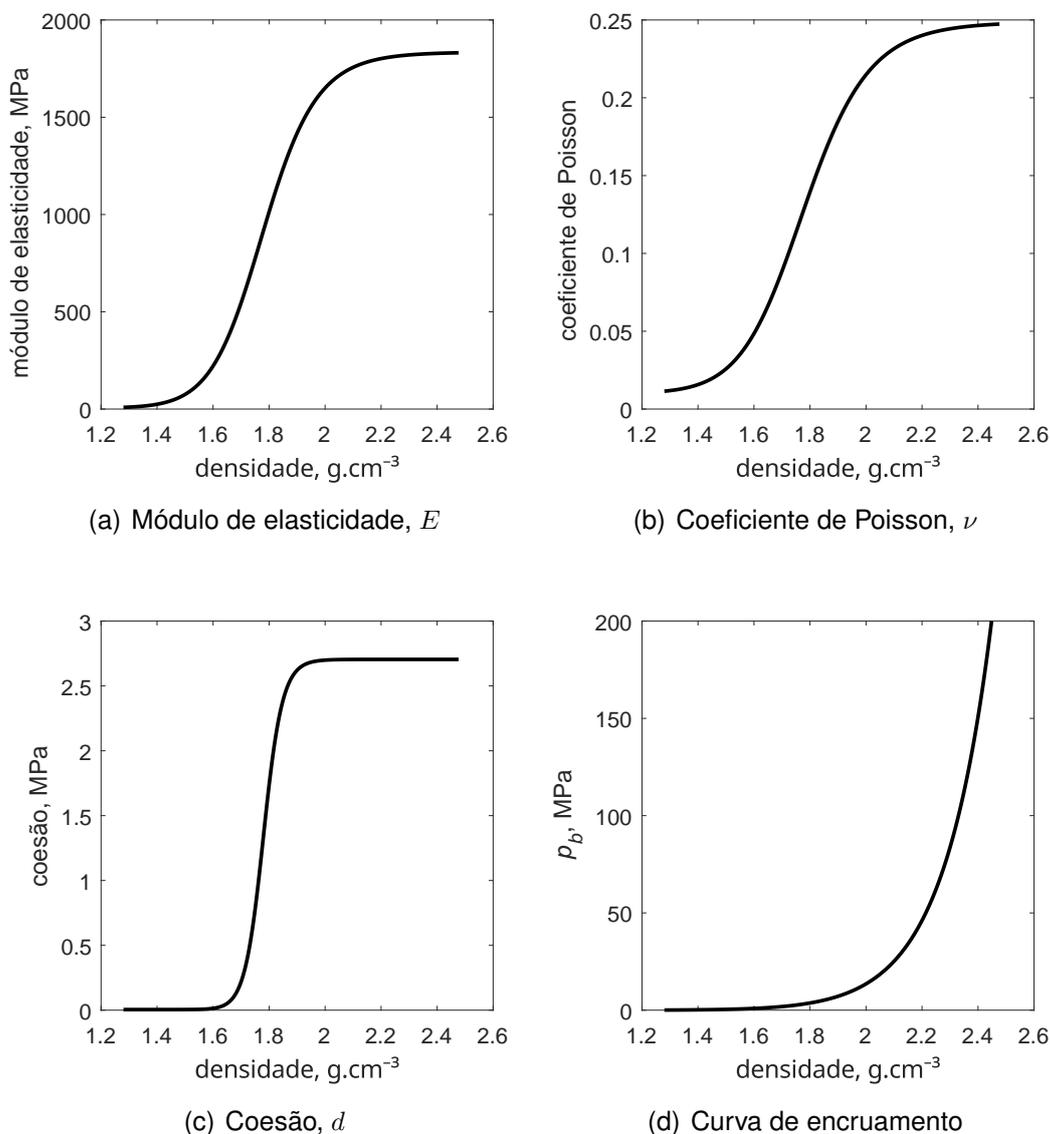


Figura 4.3: Parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) em função da densidade, para a alumina: (a) Módulo de elasticidade, (b) coeficiente de Poisson, (c) coesão e (d) curva de encruamento.

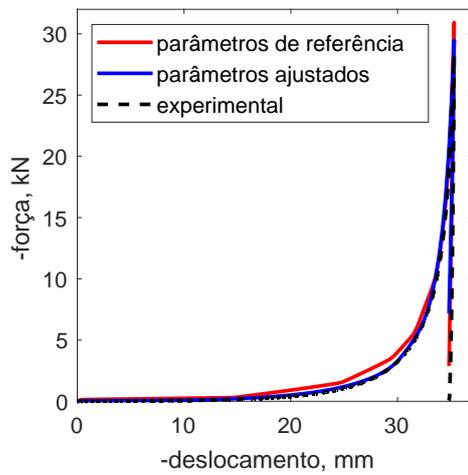
O uso de uma função do tipo sigmoide permitiu a interpolação suave entre os parâmetros elásticos e plásticos do modelo e, com algumas iterações, melhorar a correspondência entre dados experimentais obtidos de vários sensores com os respectivos dados da simulação numérica. Para fins de comparação com parâmetros da literatura, no trabalho de Melo *et al.* (2018) [5], os valores dos parâmetros elastoplásticos para o pó de alumina são: $E = 1700$ GPa, $\nu = 0,17$, $R = 0,75$, $d = 3,25$ MPa e $\beta = 55^\circ$. Esses parâmetros são constantes, *i.e.*, não

dependem do nível de densidade.

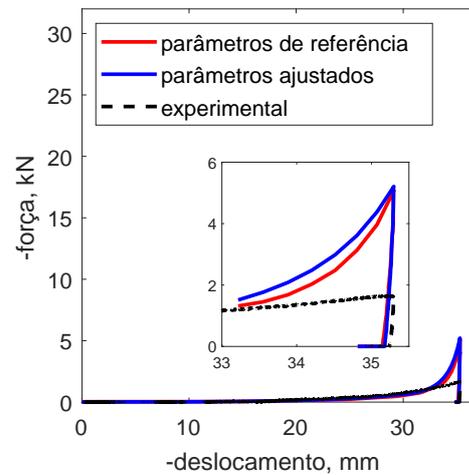
4.1.2 PÓ DE PTFE

Foi aplicada a mesma estratégia para o pó de PTFE. Os parâmetros iniciais foram baseados nos parâmetros identificados por Canto [45] e Frédy [46]. O ângulo de atrito interno, β , e o fator de forma, R , foram fixados em 6° e 0,13, respectivamente. O parâmetro α foi mantido em zero. Os coeficientes de atrito de Coulomb entre pó de PTFE/metal e metal/metal foram ajustados para 0,06 e 0,05, respectivamente.

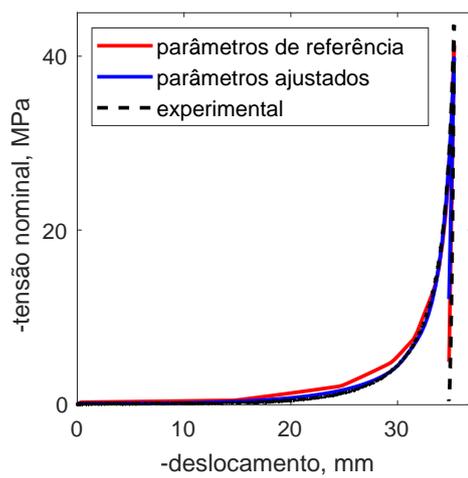
Uma comparação análoga entre sinais experimentais e de resultados das simulações é apresentada na Figura 4.4 e 4.5 para o pó de PTFE.



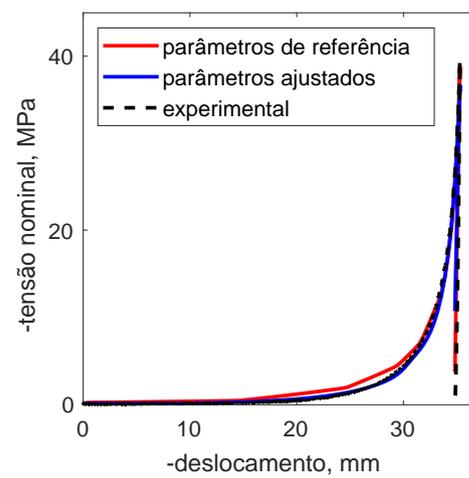
(a) Atuador da máquina de ensaio



(b) Célula de carga axial



(c) Sensor do pistão superior



(d) Sensor do pistão inferior

Figura 4.4: Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir do modelo com parâmetros de referência [46] e ajustados: (a) atuador da máquina de ensaio, (b) célula de carga axial, (c) sensor do pistão superior e (d) sensor do pistão inferior, para a prensagem uniaxial (PU) do PTFE.

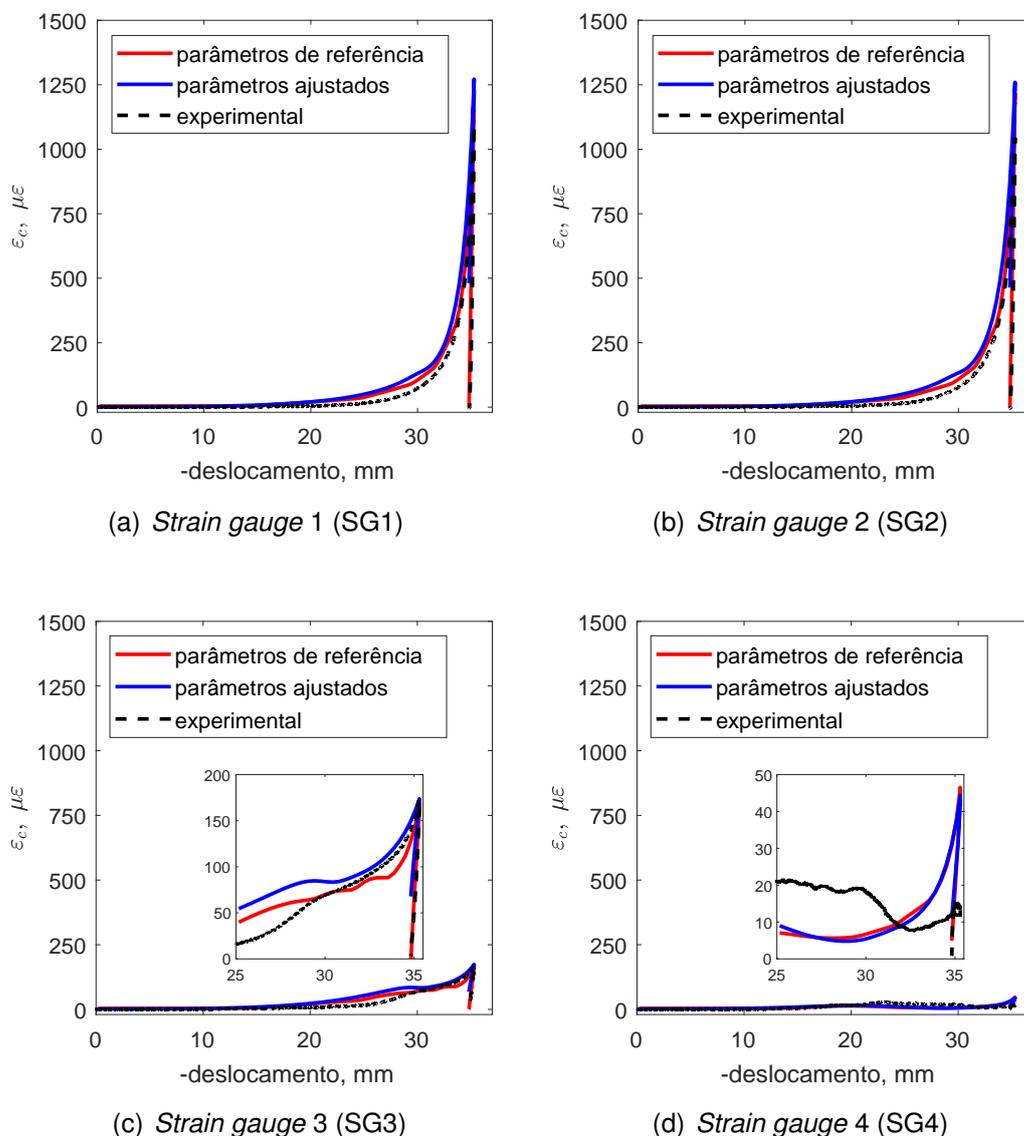


Figura 4.5: Comparação da resposta entre dados experimentais e os obtidos a partir do modelo com parâmetros de referência [46] e ajustados para os quatro *strain gauges*, para a prensagem uniaxial (PU) do PTFE.

Os coeficientes dos parâmetros ajustados das funções sigmoides (Equação (4.1)) para o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (d) e os coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) estão compilados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Coeficientes das funções sigmóides (Equação (4.1)) para os parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap e coeficientes da curva de encruamento (Equação 4.2) para o pó de PTFE em função da deformação volumétrica plástica (ϵ_{vol}^p).

i	Parâmetros elásticos		Parâmetros plásticos, Drucker-Prager/Cap	
	E_i	ν_i	d_i	p_{bi}
1	4 MPa	10^{-2}	10^{-2} MPa	1,45 MPa ^a
2	500 MPa	0,45	1,5	1 MPa ^a
3	9,4	31	75,1	-0,9118 ^b
4	0,1	0,80	0,72	2,25 ^a

^a Parâmetros identificados por Frédy (2015) [46].

^b Valor máximo de deformação volumétrica plástica observado por Gamboni *et al.*(2016) [22].

As funções sigmóides e a curva de encruamento são apresentadas em função da densidade na Figura 4.6.

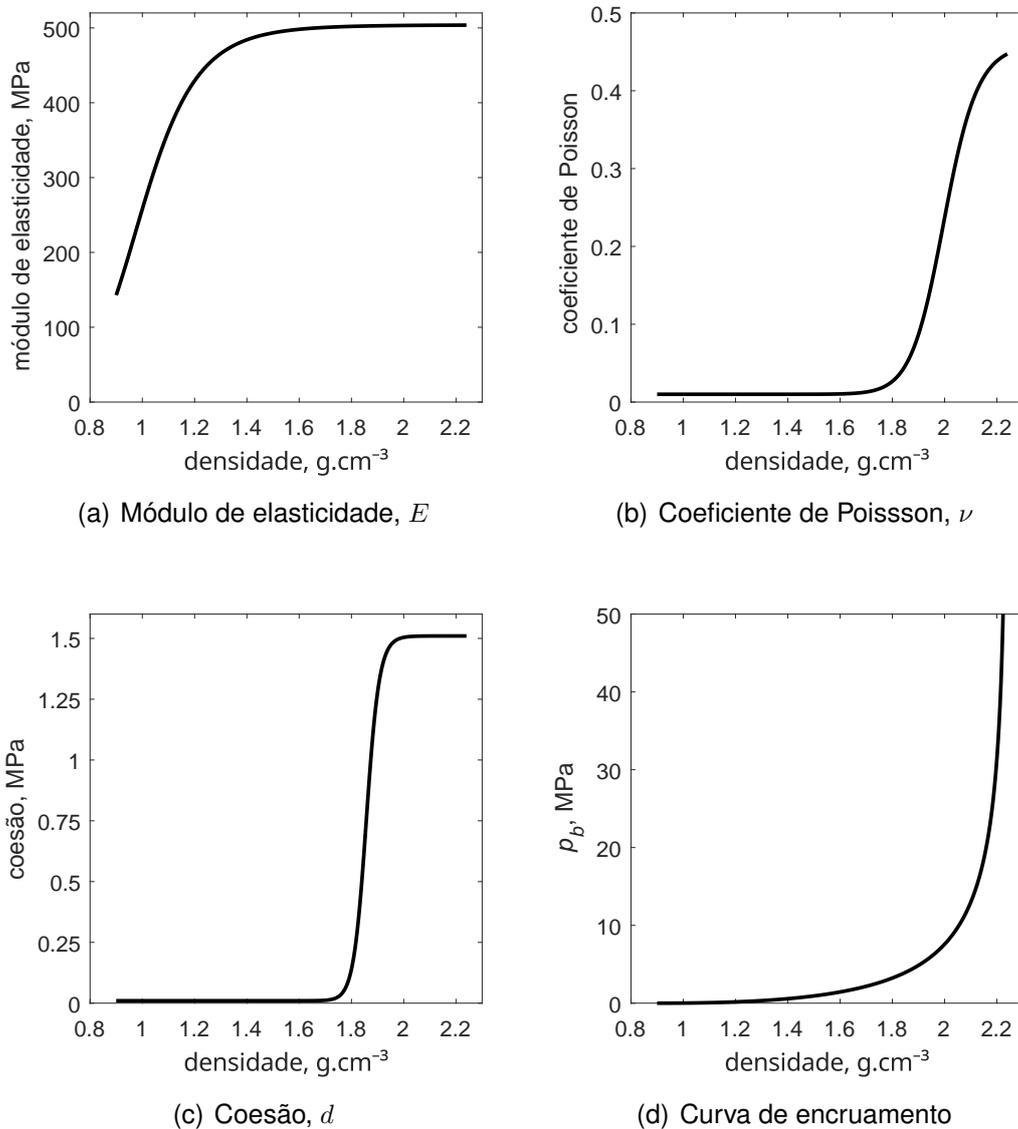


Figura 4.6: Parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) em função de densidade, para o PTFE: (a) Módulo de elasticidade, (b) coeficiente de Poisson, (c) coesão e (d) curva de encruamento.

Para fins de comparação com parâmetros da literatura, Canto (2002) [17] identificou os valores de $E = 450$ GPa, $\nu = 0,485$, $R = 0,6$, $d = 0,1$ MPa e $\beta = 30^\circ$ para o mesmo pó de PTFE. Esses parâmetros são constantes, *i.e.*, não dependem do nível de densidade.

4.2 ENSAIOS DE PRENSAGEM MULTIAXIAL COM ELASTÔMERO PARA VERIFICAÇÃO DE FALHAS EM COMPACTOS VERDES

4.2.1 PÓ DE ALUMINA

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas de carregamento em função do deslocamento do pistão superior para os ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME), aplicando-se $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 15, 20, 30 e 40 MPa. Apesar de mais ensaios terem sido conduzidos, por motivos de concisão, é apresentada somente uma curva de carregamento representativa para cada $\sigma_n^{\text{máx}}$ diferente. Também foram executados níveis mais baixos de carregamento – $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 2 e 5 MPa – para alumina, porém, a coesão mecânica não foi suficiente para a manipulação do compacto verde durante e após a desmoldagem. Esses dados experimentais não são apresentados. Com o ajuste dos parâmetros elásticos e plásticos do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) para a alumina (Seção 4.1.2, pág. 37), o procedimento de PME foi simulado. Assim, os resultados das simulações numéricas também são traçados, e uma boa concordância é observada. Durante o descarregamento, observa-se uma mudança na inclinação da curva experimental, o que pode indicar uma possível fratura no compacto verde.

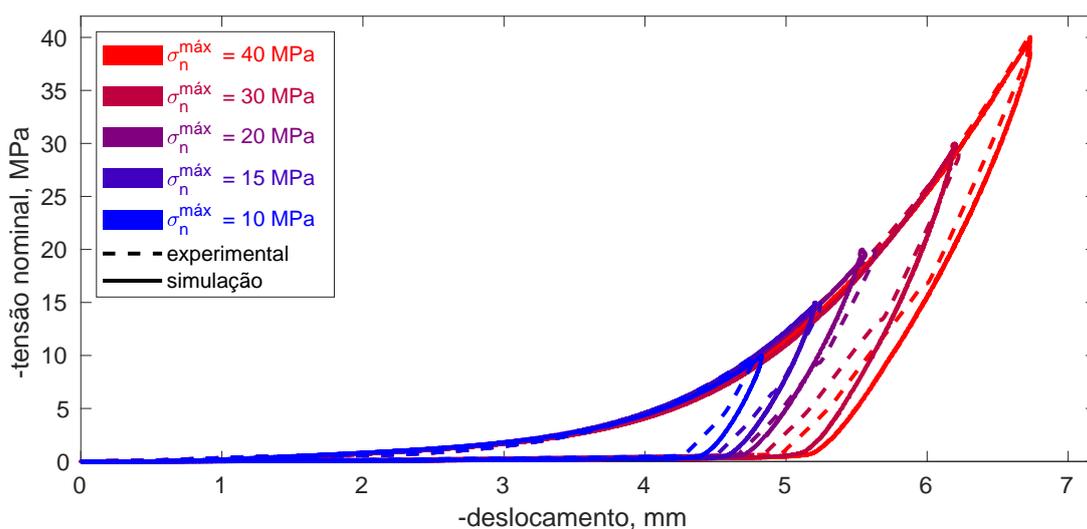


Figura 4.7: Comparação entre as curvas de tensão nominal (σ_n) e deslocamento do pistão superior para os casos experimental e simulado para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 15, 20, 30 e 40 MPa. Os níveis de carga são representados por cores que variam do azul ao vermelho.

Os campos de densidade do compacto verde obtidos via simulações em Elementos Finitos (EF) no ponto de carregamento máximo são apresentados na Figura 4.8 para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. O molde elastomérico também é apresentado. O uso de três casas decimais após a vírgula foi escolhido visando diferenciar os campos e evidenciar o gradiente de densidade em cada nível de prensagem utilizando a mesma escala de cores.

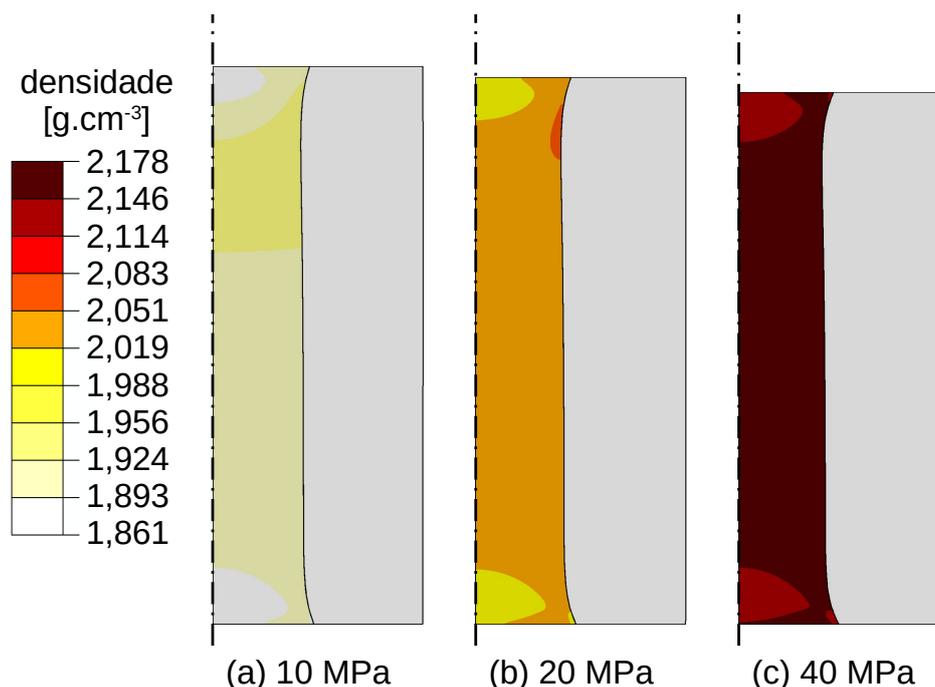


Figura 4.8: Campos de densidade no instante de carregamento máximo para os ensaios com tensões nominais máximas ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 10, 20 e 40 MPa para o pó de alumina. O molde elastomérico é representado na cor cinza. Os isovalores de densidade estão na mesma escala de cores, e todas as figuras possuem mesma escala.

Em todas as situações, os compactos verdes apresentam campos de densidade muito homogêneos. Apenas um pequeno gradiente de densidade próximo às regiões superior e inferior, especialmente em regiões de contato com os pistões, é observado. É possível notar que um pequeno avanço do pistão superior (não representado na Figura 4.8) resulta em uma grande diminuição da cavidade interna do molde.

As dimensões experimentais do compacto verde foram comparadas com as dimensões obtidas via Método dos Elementos Finitos (MEF) e na Figura 4.9 são apresentadas as posições das regiões onde foram realizadas cinco medições

de dimensões nos compactos verdes e fotografias dos mesmos após desmoldagem. Foi realizada uma prensagem com $\sigma_n^{\text{máx}} = 10$ MPa, três prensagens com $\sigma_n^{\text{máx}} = 15$ MPa, cinco com $\sigma_n^{\text{máx}} = 20$ MPa, duas com $\sigma_n^{\text{máx}} = 30$ MPa e duas com $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa.

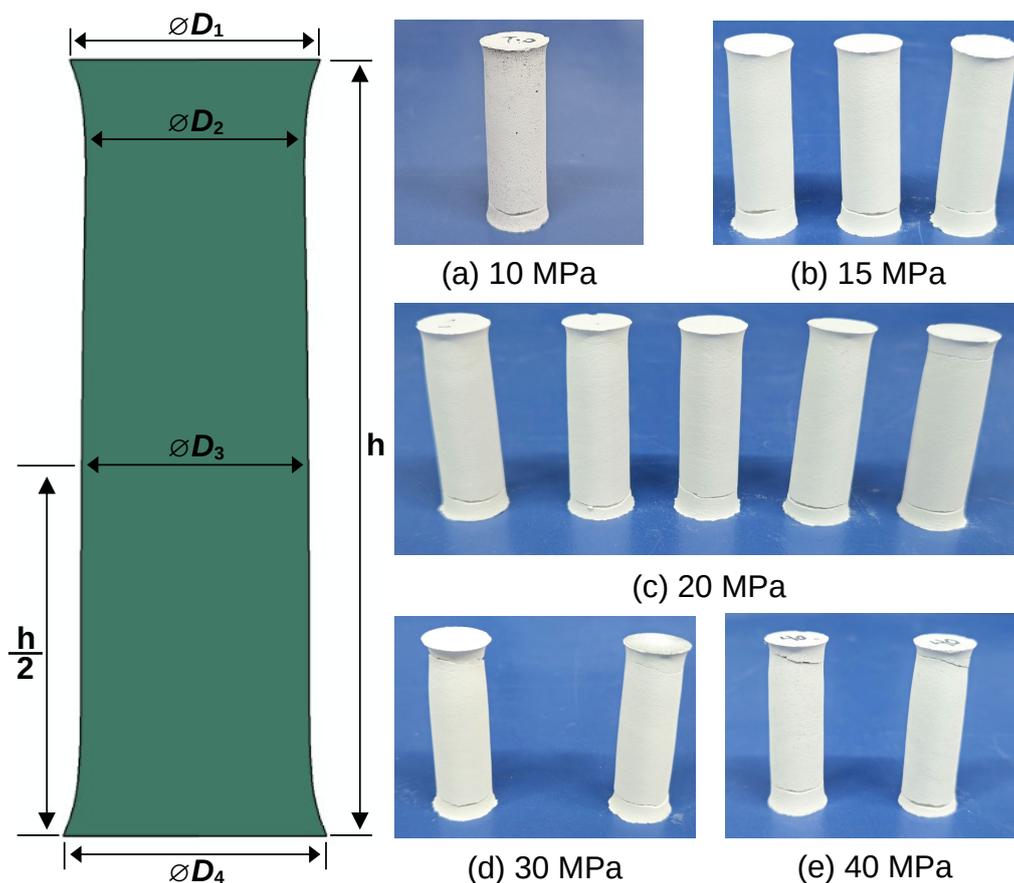


Figura 4.9: Regiões de medição do compacto verde de alumina após prensagem multiaxial com elastômero (PME). Fotografias dos compactos verdes para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de (a) 10 MPa, (b) 15 MPa, (c) 20 MPa, (d) 30 MPa e (e) 40 MPa.

Experimentalmente, todos os compactos verdes apresentaram uma fratura na região inferior, próxima à região de medição do diâmetro inferior ($\varnothing D_4$), inclusive nas prensagens com $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 2 e 5 MPa. No entanto, com $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 30 e 40 MPa foram observadas fraturas completas também na região superior, próxima ao $\varnothing D_2$. Para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 20 MPa, três das cinco amostras apresentaram uma fratura completa na região superior, enquanto as outras duas não apresentaram danos aparentes a olho nu. O dano nesta região ficou bastante evidenciado durante uma solicitação mecânica manual, em que facilmente foi possível abrir a

trinca. Na Tabela 4.3 são apresentadas as dimensões experimentais e numéricas. A incerteza de medição para os compactos verdes foi considerada em $\pm 0,2$ mm. Observou-se uma boa concordância entre as medições experimentais e os resultados via simulações.

Tabela 4.3: Dimensões experimentais médias e numéricas dos compactos verdes de alumina obtidos via prensagem multiaxial com elastômero (PME).

$\sigma_n^{\text{máx}}$ [MPa]	$\varnothing D_1 ; \varnothing D_1^*$ [mm]	$\varnothing D_2 ; \varnothing D_2^*$ [mm]	$\varnothing D_3 ; \varnothing D_3^*$ [mm]	$\varnothing D_4 ; \varnothing D_4^*$ [mm]	$h ; h^*$ [mm]
15	13,6 ; 13,54	12,4 ; 12,31	12,7 ; 12,66	13,9 ; 13,91	40,6 ; 40,29
20	13,4 ; 13,50	12,0 ; 13,19	12,7 ; 12,55	13,7 ; 13,95	40,5 ; 39,96
30	13,6 ; 13,45	11,6 ; 12,15	12,5 ; 12,40	13,9 ; 13,84	40,3 ; 39,47
40	13,3 ; 13,52	11,6 ; 12,04	12,3 ; 12,33	13,4 ; 13,42	39,7 ; 39,06

*Dimensões obtidas via simulação em Elementos Finitos.

Após análises de pós-processamento das simulações numéricas, e comparações com os dados experimentais medidos e observados (regiões das falhas), foi possível definir o uso do modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) como indicativo das falhas observadas experimentalmente. Assim, uma possibilidade proposta para o pó de alumina é a seguinte: o primeiro elemento no trajeto de carga no plano q vs. p a atingir a superfície F_s – superfície definida por uma reta, Equação (2.3) e detalhes na Figura 2.4(b) – identifica uma região suscetível à falha, que precisa ser investigada com maior profundidade. Em casos nos quais mais de um elemento da região ao redor do primeiro elemento atinge tal superfície, o elemento com o maior valor de tensão principal máxima é definido como ponto suscetível à falha. Porém, uma limitação da simulação ocorre a partir do início da plastificação na superfície F_s . Para ilustrar esta limitação, na Figura 4.10 é apresentado o trajeto de carregamento traçado no plano dos invariantes de tensão q vs p , de um elemento da região superior do compacto verde. A superfície de DPC para o maior nível de densidade também é traçada. O círculo em destaque indica quando o trajeto de carga do elemento escolhido atinge a superfície F_s .

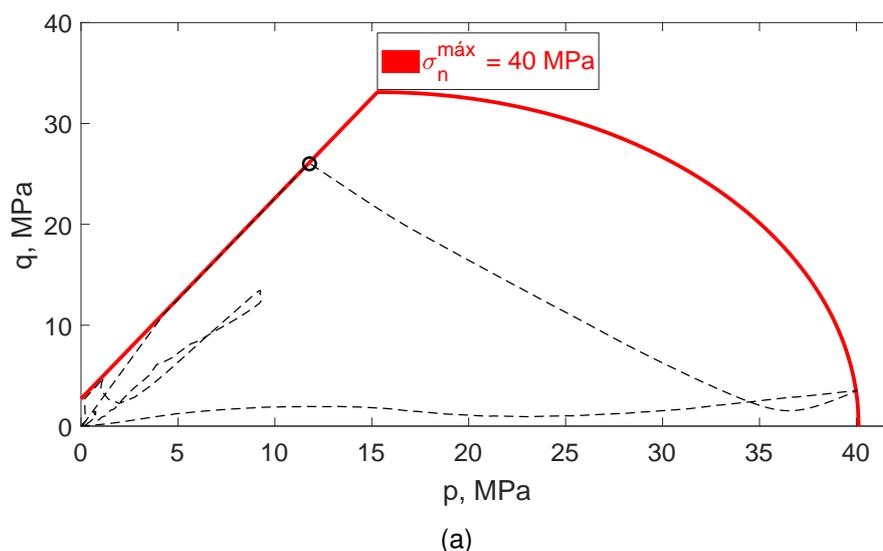


Figura 4.10: Trajeto de carregamento de um elemento na região superior do compacto verde, no plano dos invariantes de tensão q vs p e a superfície de Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior nível de densidade atingido. Círculo em destaque indica quando o trajeto de carga do elemento atinge a superfície de falha F_s .

Após o trajeto de carga atingir a superfície de falha F_s no modelo de DPC, este pode não ser mais representativo. Isto porque, para a alumina, já foi identificado que experimentalmente ocorre encruamento da superfície F_s [36] em ensaios de compressão simples, mas o modelo de DPC, na forma que está implementado no ABAQUS™, não possibilita modelar o encruamento desta, apenas o seu amolecimento. Para simular de maneira mais adequada a fratura da região, seria necessário utilizar outras abordagens que permitam representar descontinuidades, como o uso de elementos coesivos ou o Método dos Elementos Finitos Generalizados. Portanto, o trajeto de carregamento apresentado a partir do ponto onde a superfície F_s é atingida, não pode ser mais considerado necessariamente representativo do comportamento mecânico do material nesta região. Na Figura 4.11 são apresentados os trajetos de carregamento de três elementos – superior, meia altura e inferior – em três níveis de $\sigma_n^{\text{máx}}$ – 10, 20 e 40 MPa, seguindo o critério de escolha previamente apresentado.

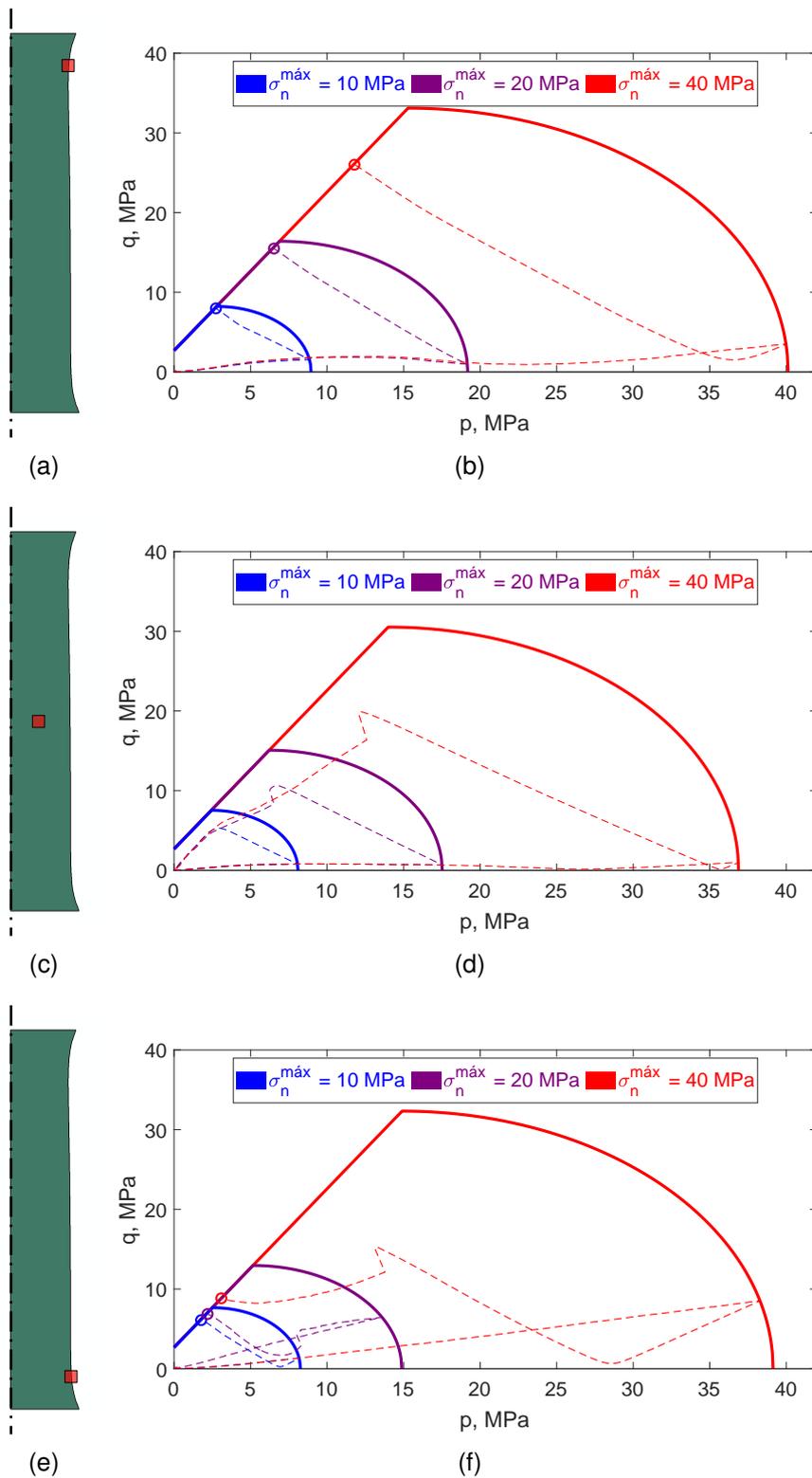


Figura 4.11: Trajeto de carregamento representado no plano dos invariantes de tensão q vs. p e superfície Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior nível de densidade do pó de alumina, para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. Foram analisados os elementos nas seguintes regiões: (a) superior, (b) meia altura e (c) inferior.

Nos três níveis de carregamento $\sigma_n^{\text{máx}}$ apresentados na Figura 4.11, elementos da região superior atingiram a superfície F_s . Experimentalmente, a trinca foi observada na região superior apenas a 20, 30 e 40 MPa. A 10 MPa, apenas alguns elementos da região superior atingiram a superfície F_s ao final do descarregamento, sendo um fenômeno localizado, o que pode explicar a ausência de trinca/fratura detectável experimentalmente. Para o ponto da meia altura, em nenhuma situação foi atingida a superfície F_s . Na região inferior, onde foi observada a fratura em todas as situações, a superfície F_s é atingida mais ao final do descarregamento, diferentemente do ponto superior, mas um ponto importante deve ser analisado: a ordem dos eventos. Inicialmente, o ponto superior falha e, posteriormente, o ponto inferior (mais detalhes na Figura 4.12). Como mencionado anteriormente, o modelo de DPC não é ideal para simular esses cenários, e o trajeto desses pontos está sendo influenciado pela plastificação na superfície F_s , com a limitação de não haver encruamento, dos demais elementos, prejudicando a análise da região inferior, que ocorre depois.

Na Figura 4.12 são apresentadas, de maneira cronológica, as regiões onde os elementos atingem a superfície F_s – região destacada em vermelho – para a PME com $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa. Um comportamento semelhante também foi observado para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15, 20 e 30 MPa. Foram analisados os instantes de descarregamento com tensão nominal (σ_n) restante de (a) 17,2, (b) 16,8 MPa e (c) 4,6 MPa. O elastômero é representado em cinza, e as demais partes foram suprimidas. A 16,8 MPa, uma fileira de elementos que atingiram a superfície F_s é apresentada, iniciando-se na região de contato entre o pé e o elastômero, conforme mostrado anteriormente a 17,2 MPa, na Figura 4.12(a).

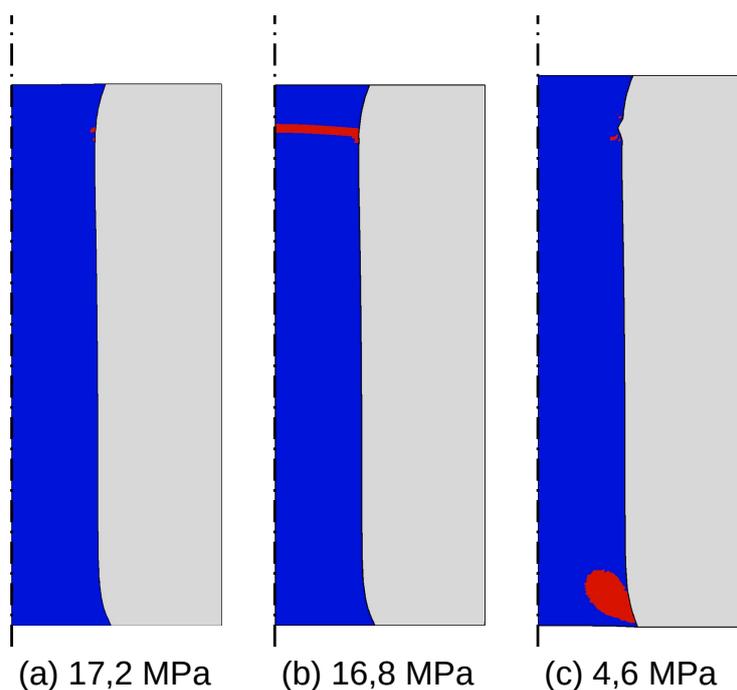


Figura 4.12: Elementos que atingiram a superfície F_s – destacados em vermelho – durante o descarregamento na prensagem multiaxial com elastômero (PME) com $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa e com pó de alumina nos valores de carga: (a) 17,2 MPa, (b) 16,8 e (c) 4,6 MPa. O elastômero é representado em cinza e as demais partes foram suprimidas.

Quando o primeiro elemento dessa região atinge a superfície F_s , o incremento de fluxo plástico (ver Figura 2.5, pág. 12) apresenta uma grande parcela volumétrica devido ao valor de ângulo de atrito interno (ver Tabela 2.1) deste material ser relativamente elevado, $\beta = 63,3^\circ$. Com a dilatância, *i.e.*, perda de densidade, a rigidez do material diminui, reduzindo o valor de p_b no eixo p (ver Figura 2.4). Além disso, a perda de rigidez é acentuada devido à redução de outras propriedades elastoplásticas do material – módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coesão – pois estas são descritas em função do nível de densidade com a utilização da sub-rotina em FORTRAN (Figura 4.3). Dessa forma, há uma concentração de tensão no elemento imediatamente vizinho ao que amoleceu. Esse evento de amolecimento se repete até que a fileira de elementos atinja a linha de centro, formando uma “linha” de elementos com baixa densidade.

Na Figura 4.13(a) é apresentado o campo de densidade para a tensão nominal (σ_n) de 40 MPa, desta vez com os limites de escala ajustados para maior detalhamento. É possível observar a formação de uma “linha” de elementos

com baixa densidade representados em preto a σ_n de 16,8 MPa (Figura 4.13(b)). Após o descarregamento completo (Figura 4.13(c)), essa fileira de elementos é estirada e uma região na parte inferior também apresenta perda de densidade.

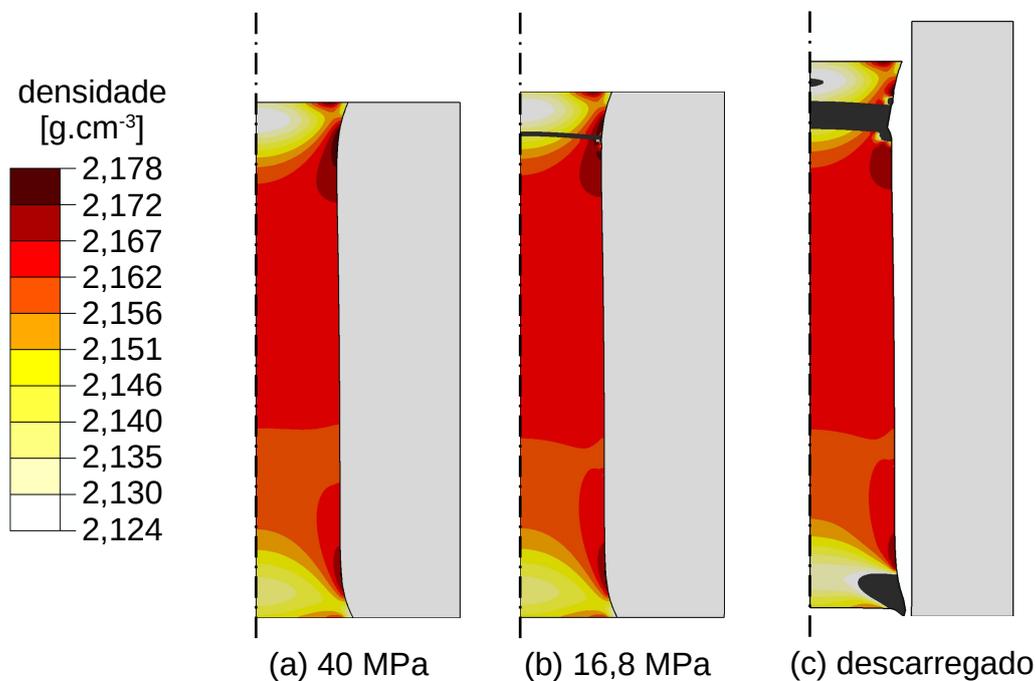


Figura 4.13: Campo de densidade: (a) no ponto de carregamento com tensão nominal (σ_n) de 40 MPa, (b) σ_n de 16,8 MPa e (c) descarregamento completo. Regiões em preto (fora da escala de cores) evidenciam uma grande perda de densidade.

4.2.2 PÓ DE PTFE

Uma análise análoga a que foi realizada na PME para o pó de alumina foi realizada na PME para o pó de PTFE. Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas de carregamento em função do deslocamento do pistão superior para os ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME), aplicando-se $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15, 20 e 40 MPa

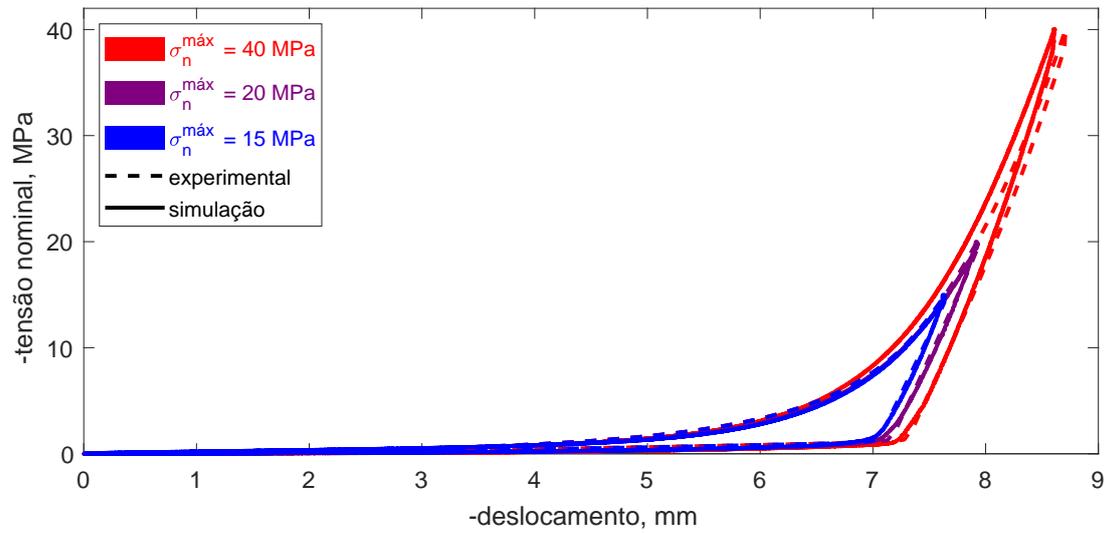


Figura 4.14: Comparação entre as curvas de tensão nominal (σ_n) e deslocamento do pistão superior para os casos experimental e simulado para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15, 20, e 40 MPa. Os níveis de carga máxima são representados por cores que variam do azul ao vermelho.

Os campos de densidade do compacto verde obtidos via simulações em EF no ponto de carregamento máximo são apresentados na Figura 4.15 para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. O uso de três casas decimais foi justificado na Seção 4.2.1 anterior.

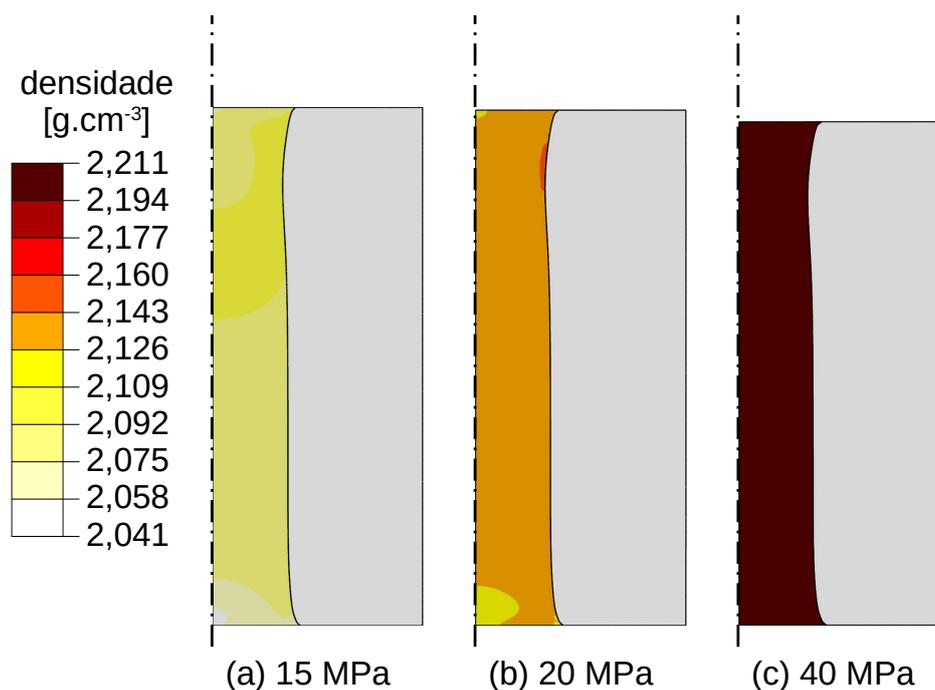


Figura 4.15: Campos de densidade no instante de carregamento máximo para os ensaios com tensões nominais máximas ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 15, 20 e 40 MPa para o pó de PTFE. O molde elastomérico é representado na cor cinza. Os isovalores de densidade estão na mesma escala de cores, e todas as figuras possuem mesma escala.

Os campos de densidade para o PTFE são mais homogêneos que os obtidos para a alumina (Figura 4.8) devido ao baixo coeficiente de atrito utilizado nas simulações. Importante ressaltar que o baixo coeficiente de atrito entre PTFE e partes metálicas é notoriamente baixo [84], porém entre PTFE e elastômero não foram encontrados dados na literatura. Simulações em EF para diferentes coeficientes de atrito entre PTFE e elastômero foram executadas (não apresentadas). Observou-se que essas simulações resultaram em diferenças na geometria final do compacto verde e no campo de densidade. No entanto, uma melhor concordância entre as dimensões experimentais dos compactos verdes e os resultados numéricos (Tabela 4.4) foi obtida para coeficientes de atrito relativamente baixos e típicos do PTFE, valores entre 0,06 e 0,10.

Na Figura 4.16 são apresentadas as regiões onde foram realizadas cinco medições de dimensões nos compactos verdes e fotografias dos mesmos após desmoldagem. Foram realizadas três prensagens com $\sigma_n^{\text{máx}} = 15$ MPa, três com $\sigma_n^{\text{máx}} = 20$ MPa e duas com $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa.

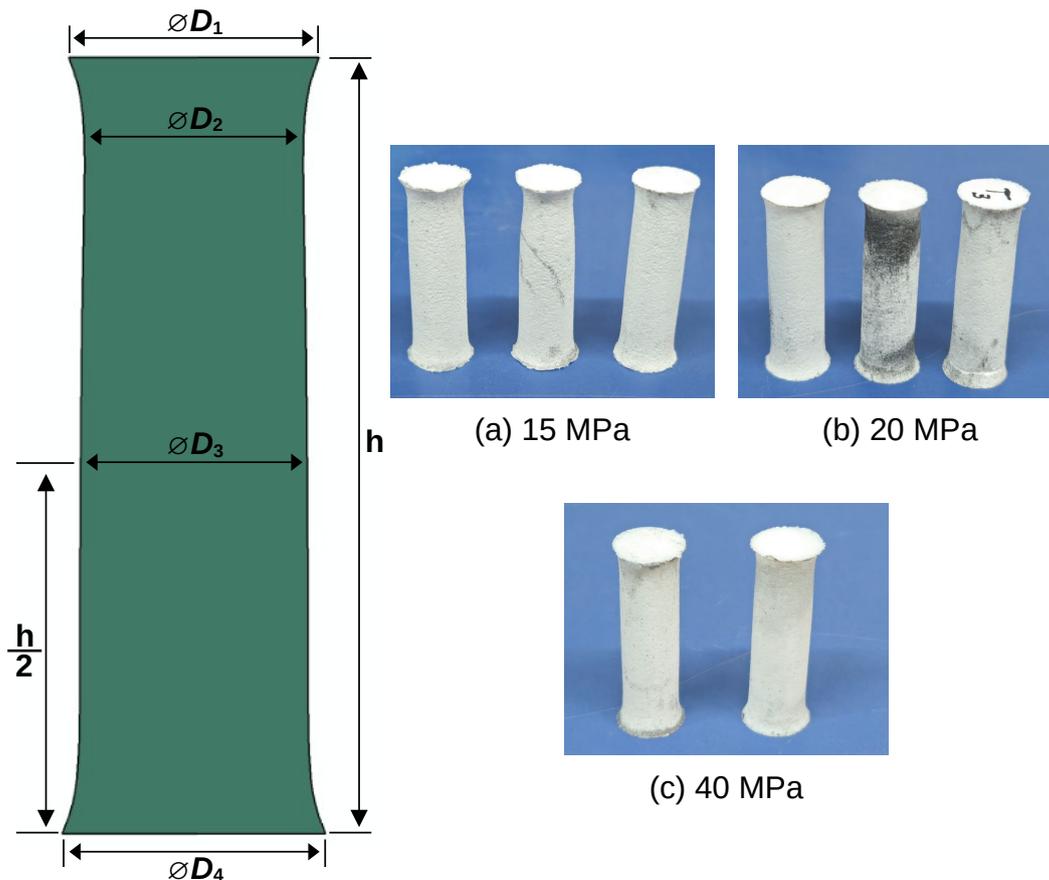


Figura 4.16: Regiões de medição do compacto verde de PTFE após prensagem multiaxial com elastômero (PME). Fotografias dos compactos verdes para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de (a) 15 MPa, (b) 12 MPa e (c) 40 MPa.

Os compactos verdes prensados com $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15 MPa não apresentaram fratura visível em nenhuma região. Foram executados ensaios com $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 5 e 10 MPa (não apresentados) e também não foram observadas fraturas ou trincas a olho nu. Com $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 20 MPa, foi observada uma fratura completa em uma das três réplicas. As restantes apresentaram uma trinca superficial e visível a olho nu, porém não houve descolamento completo. Com $\sigma_n^{\text{máx}}$ 40 MPa foram observadas fraturas completas somente na região inferior. Nenhum compacto verde de PTFE apresentou fratura na região superior.

É possível notar uma contaminação com o grafite em pó – elemento central na Figura 4.16(b) – utilizado para lubrificar a parte externa do molde elastomérico. Na Tabela 4.4 são apresentadas as dimensões experimentais e numéricas. A incerteza de medição para os compactos verdes foi considerada em $\pm 0,2$ mm.

Uma boa concordância foi observada entre as medições experimentais e resultados via simulações em EF.

Tabela 4.4: Dimensões experimentais médias e numéricas do compacto verde de PTFE obtidas via prensagem multiaxial com elastômero (PME).

$\sigma_n^{\text{máx}}$ [MPa]	$\varnothing D_1 ; \varnothing D_1^*$ [mm]	$\varnothing D_2 ; \varnothing D_2^*$ [mm]	$\varnothing D_3 ; \varnothing D_3^*$ [mm]	$\varnothing D_4 ; \varnothing D_4^*$ [mm]	$h ; h^*$ [mm]
15	12,2 ; 12,93	10,1 ; 10,02	10,8 ; 10,84	12,7 ; 12,40	38,0 ; 37,97
20	12,4 ; 11,89	10,4 ; 9,84	10,6 ; 10,75	12,5 ; 12,35	38,0 ; 37,70
40	12,1 ; 11,89	10,2 ; 9,52	10,5 ; 10,64	12,3 ; 12,33	37,5 ; 37,55

*Dimensões obtidas via simulação em Elementos Finitos.

Diferentemente da PME com pó de alumina, ao atingir a superfície F_s durante o descarregamento, não há a formação de uma “linha” de elementos danificados, e sim a formação de uma região mais extensa, como apresentado na Figura 4.17. Isso ocorre devido ao ângulo de atrito do PTFE ($\beta = 6^\circ$) ser mais baixo que o da alumina ($\beta = 63,3^\circ$). Desta maneira, diferentemente do caso anterior, o vetor de incremento de deformação plástica apresenta uma pequena parcela paralela ao eixo p , resultando em uma deformação volumétrica plástica pequena quando ocorre plastificação na superfície F_s . Dessa forma, há uma pequena redução na densidade e, conseqüentemente, na rigidez.

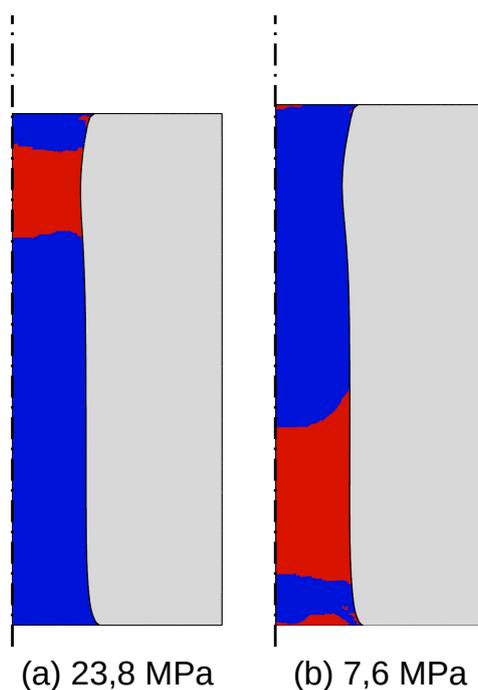


Figura 4.17: Elementos que atingiram a superfície F_s – destacados em vermelho – durante o descarregamento na prensagem multiaxial com elastômero (PME) para $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa e com pó de PTFE nos valores de carga: (a) 23,8 MPa e (b) 7,6 MPa, respectivamente. O elastômero é representado em cinza e as demais partes foram suprimidas.

Importante ressaltar que a escolha dos elementos para representar o trajeto de carregamento no plano dos invariantes de tensão q vs. p não é tão evidente como para a alumina. Elementos nas regiões em que a superfície F_s foi atingida, tanto a superior quanto a inferior, apresentam trajetos de carregamento e níveis de densidades muito próximos. O mesmo acontece para região da meia altura. Dito isso, a escolha de qualquer elemento nesta região altera muito pouco os resultados apresentados e, para fins de concisão, na Figura 4.18 são apresentados os trajetos de carregamento de três elementos das regiões – superior, meia altura e inferior – em três níveis de prensagem ($\sigma_n^{\text{máx}}$) – 15, 20 e 40 MPa.

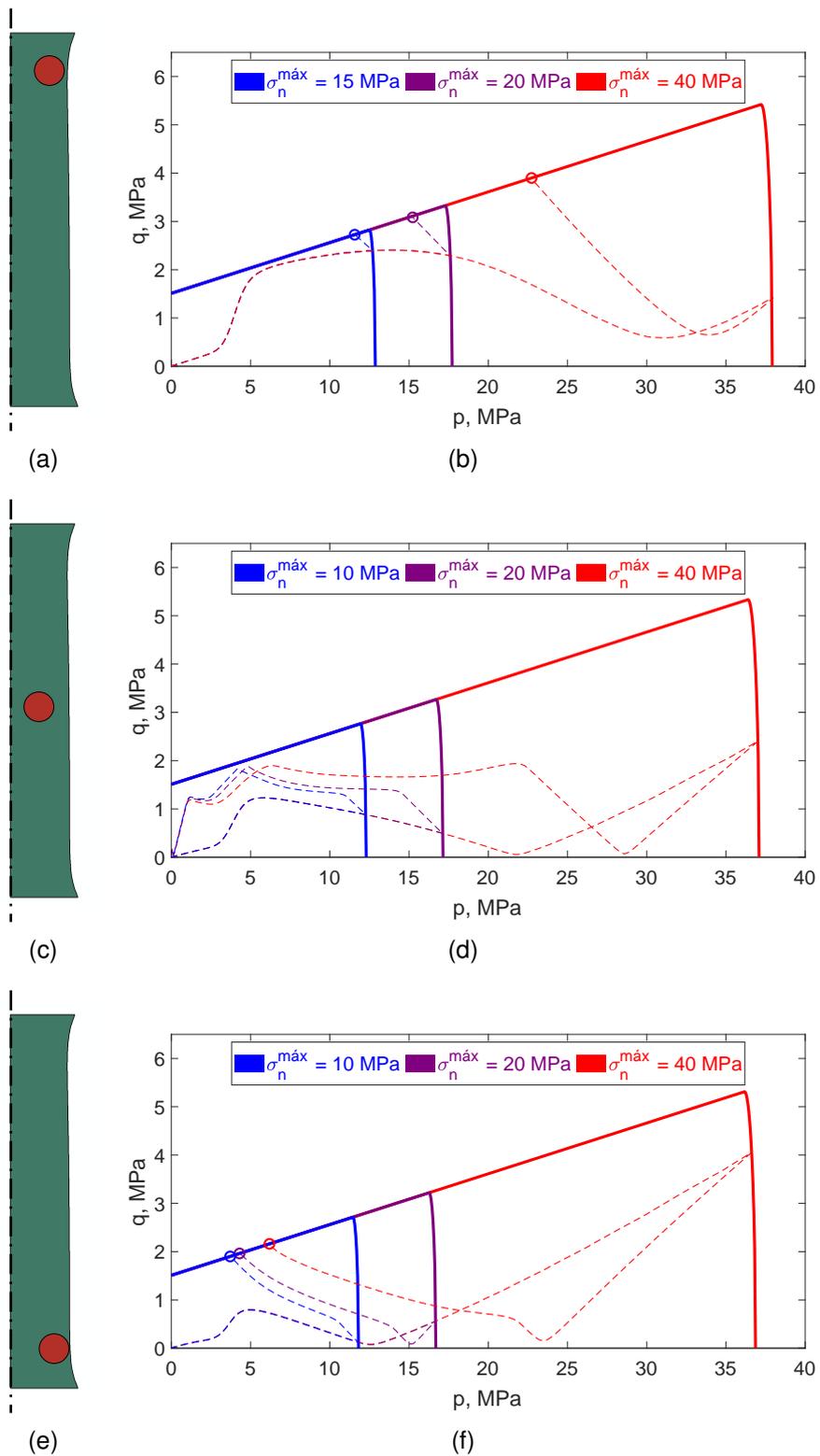


Figura 4.18: Trajeto de carregamento representado no plano dos invariantes de tensão q vs. p e superfície Drucker-Prager/Cap (DPC) para o maior valor de densidade do pó de PTFE para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10, 20 e 40 MPa. Foram analisados os elementos nas seguintes regiões: (a) superior, (b) meia altura e (c) inferior.

Na Figura 4.19 é apresentado o campo de densidade para (a) $\sigma_n^{max} = 40$ MPa, (b) $\sigma_n = 1,1$ MPa durante o descarregamento com início do descolamento do molde e (c) descarregamento completo. Os limites da escala de cores foi ajustado para maior detalhamento.

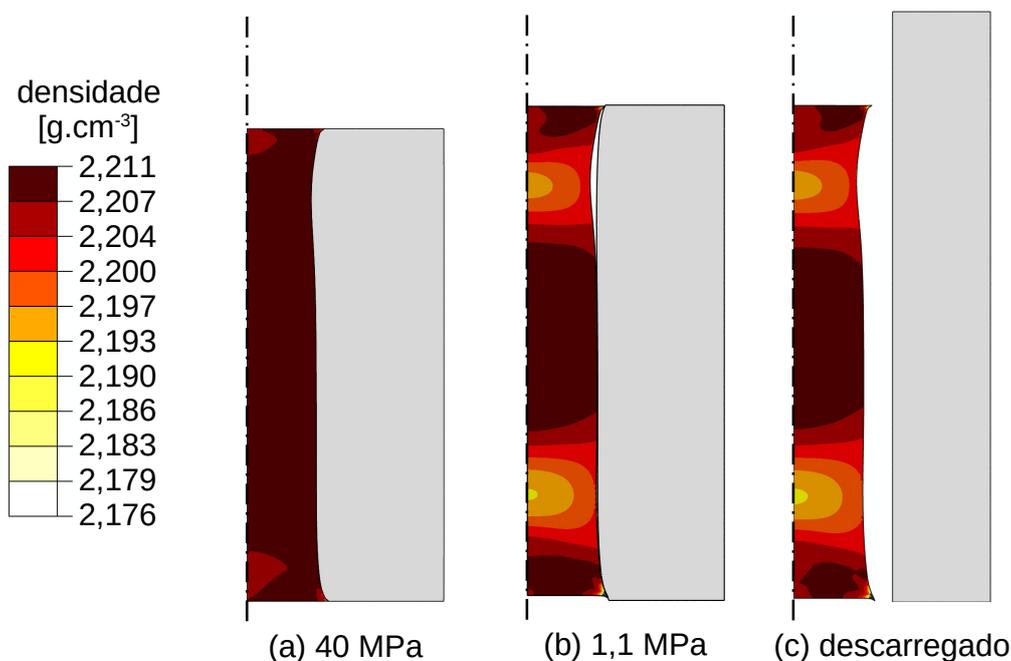


Figura 4.19: Campo de densidade para: (a) $\sigma_n^{m\acute{a}x} = 40$ MPa, (b) $\sigma_n = 1,1$ MPa durante o descarregamento com início do descolamento do molde e (c) descarregamento completo.

As diferenças entre os campos de densidades para as três situações apresentadas são muito pequenas. Regiões em que no ponto de carregamento máximo ($\sigma_n^{m\acute{a}x} = 40$ MPa) apresentavam uma densidade de $2,211$ g.cm⁻³, após o descarregamento possuem densidades em torno de $2,183$ a $2,197$ g.cm⁻³, uma redução de 1,2% a 0,6%. Também é possível notar que a altura do corpo de prova e os diâmetros superiores, $\varnothing D_1$ e $\varnothing D_2$ (ver Figura 4.16), apresentaram uma mudança significativa devido à deformação plástica. Na Figura 4.20 é apresentado o campo da deformação equivalente plástica gerado pelo escoamento na superfície F_s , definida como $\varepsilon_{eq}^{p,F_s} = \left(\frac{2}{3}\varepsilon_{F_s}^p : \varepsilon_{F_s}^p\right)^{\frac{1}{2}}$, após o descarregamento completo para $\sigma_n^{m\acute{a}x} = 40$ MPa.

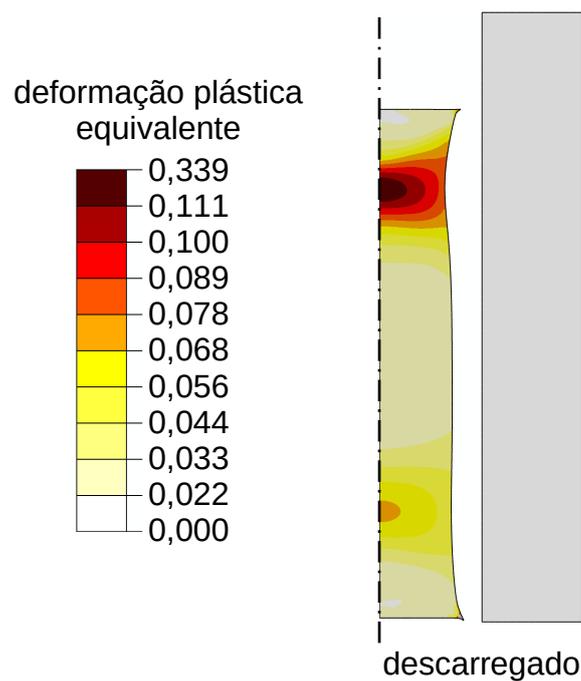


Figura 4.20: Deformação plástica equivalente ($\varepsilon_{eq}^{p, F_s}$) ocasionada pelo escoamento na superfície F_s após o descarregamento completo para $\sigma_n^{\text{máx}} = 40$ MPa.

Importante ressaltar que, apesar da perda de densidade ser mínima ao atingir a superfície F_s , como apresentado na Figura 4.19, isso não implica diretamente em pequenas deformações plásticas no compacto verde. Valores alto de deformação plástica foram obtidos nas regiões superiores e inferiores.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi utilizar simulações em Elementos Finitos (EF) para modelar o processo de prensagem de pó, com o propósito de prever situações suscetíveis a falhas durante a prensagem, especialmente durante o descarregamento.

Para isso, foi utilizado um ferramental instrumentado para ajustar alguns parâmetros do modelo elastoplástico de Drucker-Prager/Cap (DPC) encontrados na literatura para os pós de alumina e PTFE. Foram realizadas iterações do tipo tentativa e erro para melhorar a concordância entre os sinais experimentais – força do atuador da máquina de ensaios, pressão nos sensores de pressão de ambos os pistões, força de reação na célula de carga axial acoplada à matriz e deformação nos *strain gauges* posicionados circunferencialmente em uma matriz de parede fina – e seus equivalentes numéricos.

Após os ajustes, ensaios de prensagem multiaxial com elastômero (PME) foram executados em uma condição previamente planejada por simulações em EF, suscetível a falhas. Foram observadas fraturas nos compactos verdes para ambos os materiais. Os mesmos ensaios de PME foram conduzidos no seu gêmeo virtual e, após o pós-processamento dos resultados, foi possível identificar que algumas das regiões que atingiram a superfície F_s do modelo de DPC apresentaram fraturas na etapa experimental.

As PME para o pó de alumina resultaram em compactos verdes com fratura na região inferior para todos os níveis de tensão nominal máxima ($\sigma_n^{\text{máx}}$) de 10, 15, 20, 30 e 40 MPa. Na região superior, a fratura somente foi visível para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 30 e 40 MPa e foi possível observar a formação de trincas superficiais na mesma região para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 20 MPa. A $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10 e 15 MPa, somente fraturas na região inferior foram observadas. As simulações da PME com os modelos ajustados para os mesmos níveis de $\sigma_n^{\text{máx}}$ indicaram que, para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 15, 20, 30 e 40 MPa, uma região na porção superior do compacto verde – uma fileira de elementos – teve trajetos de carregamento que atingiram F_s . A $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10 MPa, poucos elementos na região superior atingem F_s , sendo um fenômeno muito localizado,

o que pode justificar a ausência de falha experimental nesta região.

Já as PME para o pó de PTFE resultaram em compactos verdes claramente fraturados somente para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 40 MPa na região inferior. Para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 20 MPa, somente um dos três compactos verdes apresentou uma fratura completa. Para $\sigma_n^{\text{máx}}$ de 10 MPa, o compacto ficou sem trincas/fraturas visíveis a olho nu. Diferentemente da alumina, esses compactos verdes não apresentaram fratura na região superior para nenhum valor de $\sigma_n^{\text{máx}}$ utilizado. O pós-processamento das simulações da PME para os mesmos níveis de $\sigma_n^{\text{máx}}$ experimentais indicou a formação de uma região difusa que atingiu F_s , tanto na porção superior quanto na inferior. Numericamente, essas regiões apresentaram pouquíssima perda de densidade devido ao baixo ângulo de atrito interno utilizado no modelo de DPC. Porém, a deformação plástica equivalente ao atingir F_s dessas regiões apresentou valores elevados, ou seja, o material apresentou plasticidade semelhante ao comportamento elastoplástico perfeito.

As simulações do processo de PME, com os modelos de DPC ajustados para ambos os materiais, indicaram que determinadas regiões do compacto verde atingiram a superfície F_s . Como implementado no software ABAQUS™, ao atingir essa condição, o material perde densidade e, dependendo dos parâmetros do modelo, pode também perder rigidez de forma acentuada e localizada, como ocorreu para a alumina, ou de forma leve e difusa, como no caso do PTFE. Essa perda de densidade e, conseqüentemente, rigidez, pode ser interpretada como uma região suscetível à fratura. Esse tipo de análise aqui apresentado pode ser utilizado como um complemento em projetos de moldes para prensagem de pós, indicando quais condições devem ser evitadas, como o pinçamento do molde elastomérico em prensagem isostática e/ou prensagem multiaxial com elastômero.

É importante ressaltar que a validade desta abordagem é limitada até o momento em que uma região do compacto verde simulado atinja a superfície F_s . Como apresentado nos resultados, para o pó de alumina estudado, foi observado o encruamento do material em ensaios de compressão uniaxial ao atingir o critério de Drucker-Prager [27]. Tal situação não foi contemplada devido a limi-

tações do modelo DPC disponível no software ABAQUS™, que permite apenas representar o amolecimento do material. Para o PTFE, devido ao seu ângulo de atrito interno muito baixo, a perda de densidade foi relativamente menor em comparação com a alumina, resultando em incrementos de deformação plástica similares aos de um material elastoplástico ideal, onde o volume se mantém, porém, uma grande mudança de forma foi observada, podendo também não ser fidedigna do fenômeno.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A utilização de procedimentos automatizados para o ajuste dos parâmetros do modelo constitutivo de Drucker-Prager/Cap, como a utilização da técnica *Finite Element Model Updating* (FEMU), é uma abordagem mais versátil e robusta que o ajuste por tentativa e erro. O ajuste dos modelos pode ser aplicado para diferentes condições experimentais e de carregamento. O uso de um molde elástico para a prensagem multiaxial com elastômero (PME), quando planejado previamente, pode resultar em trajetórias de carregamento distintas e interessantes para o processo de identificação de parâmetros, como o parâmetro α de transição entre as superfícies F_s e F_c .

Além disso, o uso de outras abordagens numéricas, como elementos coesivos ou o Método dos Elementos Finitos Generalizados, pode ser interessante para descrever e estudar o processo de fratura observado experimentalmente. Essas abordagens podem também apresentar seus respectivos parâmetros em função do nível de compactação do material.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Reed, J.S.. Principles of ceramics processing. Wiley New York; 1995.
- [2] Heimann, R.B.. Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications. John Wiley & Sons; 2010.
- [3] Riedel, R., Chen, I.W.. Ceramics science and technology, volume 3: synthesis and processing; vol. 3. John Wiley & Sons; 2011.
- [4] Rahaman, M.N.. Ceramic processing and sintering. CRC press; 2017.
- [5] Melo, C.C., Moraes, A.L.I., Rocco, F.O., Montilha, F.S., Canto, R.B.. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. *Journal of the European Ceramic Society* 2018;38:2928–2936.
- [6] Briscoe, B.J., Sinha, S.K.. Density distributions characteristics of green ceramic compacts using scratch hardness. *Tribology international* 1997;30(7):475–482.
- [7] Briscoe, B., Rough, S.. The effects of wall friction in powder compaction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 1998;137(1):103–116.
- [8] Sinka, I.C., Cunningham, J.C., Zavaliangos, A.. The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the drucker-prager cap model. *Powder Technology* 2003;133:33–43.
- [9] Michrafy, A., Dodds, J.A., Kadiri, M.S.. Wall friction in the compaction of pharmaceutical powders: measurement and effect on the density distribution. *Powder technology* 2004;148(1):53–55.
- [10] Gethin, D.T., Solimanjad, N., Doremus, P., Korachkin, D.. Friction and its measurement in powder-compaction processes. In: Brewin, P.R., Coube, O., Doremus, P., Tweed, J.H., editors. *Modelling of Powder Die Compaction*. London: Springer London; 2008, p. 105–129.
- [11] Lee, S.C., Kim, K.T.. A densification model for powder materials under cold isostatic pressing—effect of adhesion and friction of rubber molds. *Materials Science and Engineering: A* 2008;498(1-

- 2):359 – 368. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TXD-4T8HHG4-2/2/5f4115ce3a6b00bd20043ffe21c20e0f>. doi:DOI:10.1016/j.msea.2008.08.020; international Conference on Recent Advances in Composite Materials (ICRACM 2007).
- [12] Glass, S.J., Ewsuk, K.G.. Ceramic powder compaction. *MRS Bulletin* 1997;22(12):24–28. doi:10.1557/S0883769400034709.
- [13] Briscoe, B., Rough, S.. The effects of wall friction on the ejection of pressed ceramic parts. *Powder technology* 1998;99(3):228–233.
- [14] Özkan, N., Briscoe, B.J.. Prediction of overall shape of sintered alumina compacts. *Journal of the European Ceramic Society* 1994;14(2):143–151.
- [15] Özkan, N., Briscoe, B.J.. Characterization of die-pressed green compacts. *Journal of the European Ceramic Society* 1997;17(5):697–711.
- [16] Morris, K.. Cold isostatic pressing. In: BROOK, R., editor. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*. Oxford: Pergamon. ISBN 978-0-08-034720-2; 1991, p. 84–88.
- [17] Canto, R.B.. Projeto de fabricação de moldes para prensagem isostática utilizando tecnologia CAD/CAE e prototipagem rápida. Master's thesis; Universidade de São Paulo; 2002.
- [18] Henderson, R.J., Chandler, H.W., Akisanya, A.R., Barber, H., Moriarty, B.. Finite element modelling of cold isostatic pressing. *Journal of the European Ceramic Society* 2000;20(8):1121–1128.
- [19] Henderson, R.J., Chandler, H.W., Akisanya, A.R., Moriarty, B.. Bag design in isostatic pressing. *Materials & Design* 2000;21(4):259–262.
- [20] Morais, M.M., Melo, C.C., Canto, R.B., Fortulan, C.A.. Calibration of powder constitutive model using digital image correlation validated for hollow hemisphere of lead zirconate titanate. *Powder Technology* 2021;392:212–223.
- [21] Kim, K., Choi, S., Park, H.. Densification behavior of ceramic powder under cold compaction. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2000;122(2):238–244. doi:10.1115/1.482793.

- [22] Gamboni, O.C., Riul, C., Billardon, R., Bose Filho, W.W., Schmitt, N., Canto, R.B.. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder. *Polymer* 2016;82:75–86. doi:10.1016/j.polymer.2015.11.014.
- [23] Sagawa, M., Nagata, H.. Novel processing technology for permanent magnets. *IEEE transactions on magnetics* 1993;29(6):2747–2751.
- [24] Sagawa, M., Nagata, H., Watanabe, T., Itatani, O.. Rubber isostatic pressing (RIP) of powders for magnets and other materials. *Materials & Design* 2000;21(4):243–249.
- [25] Yang, H.C., Kim, J.K., Kim, K.T.. Rubber isostatic pressing and cold isostatic pressing of metal powder. *Materials Science and Engineering A* 2004;382:41–49.
- [26] Sciuti, V.F., Melo, C.C., Montilha, F.S., Rocco, F.O., Canto, R.B.. Numerical simulation procedure for design optimization of the mold used in rubber isostatic pressing of metal powders. In: Tenth International Latin American Conference on Powder Technology (PTECH). 2015,.
- [27] Melo, C.C.. Computational modeling of rubber multiaxial pressing applied to ceramic materials. Ph.D. thesis; Universidade Federal de São Carlos; 2021.
- [28] Shima, S., Sakamoto, Y., Kotera, H.. Simulation of rubber isostatic pressing and shape optimization of rubber mold. *International journal of mechanical sciences* 2002;44(8):1603–1623. doi:doi:10.1016/S0020-7403(02)00064-4.
- [29] Drucker, D., Prager, W.. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly Journal of Applied Mathematics* 1952;10(2):157–165.
- [30] Silva, L.A.F., Furlan, M., Macêdo, S.C.M., Sciuti, V.F., Canto, R.B.. Simulação computacional da prensagem uniaxial do politetrafluoretileno (PTFE) considerando a dependência do tempo no comportamento mecânico. 2022,.
- [31] Zipse, H.. Finite-element simulation of the die pressing and sintering of a ceramic component. *Journal of the European Ceramic Society* 1997;17(14):1707–1713.

- [32] Zeuch, D.H., Grazier, J.M., Argüello, J.G., Ewsuk, K.G.. Mechanical properties and shear failure surfaces for two alumina powders in triaxial compression. *Journal of Materials Science* 2001;36(12):2911–2924.
- [33] Han, L., Elliott, J., Bentham, A., Mills, A., Amidon, G., Hancock, B.. A modified drucker-prager cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders. *International Journal of Solids and Structures* 2008;45(10):3088–3106.
- [34] Zhang, B., Jain, M., Zhao, C., Bruhis, M., Lawcock, R., Ly, K.. Experimental calibration of density-dependent modified drucker-prager/cap model using an instrumented cubic die for powder compact. *Powder Technology* 2010;204(1):27–41.
- [35] Almanstötter, J.. A modified drucker–prager cap model for finite element simulation of doped tungsten powder compaction. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2015;50:290–297.
- [36] Melo, C.C., Furlan, M., Hild, F., Schmitt, N., Canto, R.B.. Uniaxial compression test on ceramic green compact with bending consideration using digital image correlation. *Powder Technology* 2020;376:136 – 148.
- [37] Hibbitt, , Karlsson, . Sorensen, Inc. ABAQUS Theory Manual. 2000.
- [38] Roscoe, K., Burland, J.. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plasticity* 1968;33:535–609.
- [39] Montilha, F.S., Rocco, F.O., Melo, C.C., Sciuti, V.F., Canto, R.B.. Identification of dilatancy in green compacted ceramic powder via digital image correlation. *Powder Technology* 2018;330:471–476.
- [40] Shin, H., Kim, J.B.. Physical interpretations for cap parameters of the modified drucker-prager cap model in relation to the deviator stress curve of a particulate compact in conventional triaxial testing. *Powder Technology* 2015;280(Supplement C):94 – 102.
- [41] Abaqus 6.14 Documentation. Dassault Systèmes Simulia Corp.; Providence, RI, USA.; 2014.
- [42] Shang, C., Sinka, I., Pan, J.. Constitutive model calibration for pow-

- der compaction using instrumented die testing. *Experimental Mechanics* 2012;52(7):903–916.
- [43] Coube, O., Riedel, H.. Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking. *Powder Metallurgy* 2000;43(2):123–131.
- [44] Shin, H., Kim, J.B.. A numerical investigation on determining the failure strength of a powder compact in unconfined compression testing by considering the compressible character of the specimen. *Powder Technology* 2015;277:156–162.
- [45] Canto, R.B.. Estudo teórico e experimental dos processos de compactação e sinterização do politetrafluoretileno (PTFE). Ph.D. thesis; Universidade de São Paulo - Brasil/École Normale Supérieure de Cachan - França; 2007.
- [46] Frédy, C.. Modeling of the mechanical behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) compounds during their compaction at room temperature. Ph.D. thesis; Université Pierre et Marie Curie - Paris VI; 2015.
- [47] Tripodi, M., Puri, V., Manbeck, H., Messing, G.L.. Triaxial testing of dry, cohesive powder and its application to a modified cam-clay constitutive model. *Powder technology* 1994;80(1):35–43.
- [48] Dorémus, P., Geindreau, C., Martin, A., Debove, L., Lecot, R., Dao, M.. High pressure triaxial cell for metal powder. *Powder Metallurgy* 1995;38(4):284–287.
- [49] Sinka, I., Cocks, A., Tweed, J.. Constitutive data for powder compaction modeling. *J Eng Mater Technol* 2001;123(2):176–183.
- [50] Park, H., Kim, K.. Consolidation behavior of sic powder under cold compaction. *Materials Science and Engineering: A* 2001;299(1):116–124.
- [51] Shima, S., Mimura, K.. Densification behaviour of ceramic powder volume 28, issue 1, , 1986, pages 53-59. *International Journal of Mechanical Sciences* 1986;28(1):53–59.
- [52] Kamath, S., Puri, V.. Measurement of powder flow constitutive model parameters using a cubical triaxial tester. *Powder technology* 1997;90(1):59–70.

- [53] Duwez, P., Zwell, L.. Pressure distribution in compacting metal powders. *JOM* 1949;1:137–144.
- [54] Crawford, R.J., Paul, D.W.. Radial and axial die pressures during solid phase compaction of polymeric powders. *European Polymer Journal* 1980;17:1023–1028.
- [55] Guyoncourt, D., Tweed, J., Gough, A., Dawson, J., Pater, L.. Constitutive data and friction measurements of powders using instrumented die. *Powder metallurgy* 2001;44(1):25–33.
- [56] Song, J.H., Chandler, H.W.. Determination of some compaction properties of ceramic powders using a simple cylindrical apparatus. *British ceramic Transactions and journal* 1990;89(2):49–52.
- [57] Burlion, N., Pijaudier-Cabot, G., Dahan, N.. Experimental analysis of compaction of concrete and mortar. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 2001;25(15):1467–1486.
- [58] Brinckmann, S., Gao, G., Siegmund, T.. A combined experimental–numerical study of the compaction behavior of nacl. *Powder technology* 2009;194(3):197–206.
- [59] Nielsen, M.S., Bay, N., Eriksen, M., Bech, J.I., Hancock, M.. An alternative to the conventional triaxial compression test. *Powder technology* 2006;161(3):220–226.
- [60] Nedderman, R.M.. *Statics and kinematics of granular materials*. (No Title) 1992;.
- [61] Dyck, G., Rogers, A., Paliwal, J.. A review of analytical methods for calculating static pressures in bulk solids storage structures. *KONA Powder and Particle Journal* 2024;41:108–122.
- [62] Lei, Y., Ma, Q., Shi, Q.. Side-wall pressure distribution of cylindrical granular containers with flat bottom. *Powder technology* 2019;353:57–63.
- [63] Millet, O., Rahmoun, J., de Saxcé, G.. Analytic calculation of the stresses in an ensiled granular medium. *Comptes Rendus Mécanique* 2006;334(2):137–142.

- [64] Baklouti, S., Chartier, T., Baumard, J.F.. Mechanical properties of dry-pressed ceramic green products: the effect of the binder. *Journal of the American Ceramic Society* 1997;80(8):1992–1996.
- [65] Carneim, T.J., Green, D.J.. Mechanical properties of dry-pressed alumina green bodies. *Journal of the American Ceramic Society* 2001;84(7):1405–1410.
- [66] Jonsén, P., Häggblad, H.A., Sommer, K.. Tensile strength and fracture energy of pressed metal powder by diametral compression test. *Powder Technology* 2007;176(2-3):148 – 155.
- [67] Jonsén, P., Häggblad, H.Å., Gustafsson, G.. Modelling the non-linear elastic behaviour and fracture of metal powder compacts. *Powder Technology* 2015;284:496–503.
- [68] Niesz, D.E.. A review of ceramic powder compaction. *KONA Powder and Particle Journal* 1996;14:44–51.
- [69] Reiterer, M., Kraft, T., Janosovits, U., Riedel, H.. Finite element simulation of cold isostatic pressing and sintering of SiC components. *Ceramics International* 2004;30:177–183.
- [70] Gu, Y., Henderson, R.J., Chandler, H.W.. Visualizing isostatic pressing of ceramic powders using finite element analysis. *Journal of the European Ceramic Society* 2006;26(12):2265–2272. doi:{10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.256}.
- [71] Zago, I.P., Furlan, M., Angélico, R.A., Canto, R.B.. Avaliação da influência das tensões residuais no comportamento termomecânico de compósitos modelo bifásicos fabricados por prensagem de pó. 2022,.
- [72] Canto, R.B., Schmitt, N., Carvalho, J., Billardon, R.. Simulação do processo de prensagem uniaxial do PTFE. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - 4º COBEF. 2007,.
- [73] Strabelli, P.G., Sciuti, V.F., Montilha, F.S., Canto, L.B., Canto, R.B.. Influência de variáveis de sinterização na microestrutura de peças de PTFE moldadas por prensagem isostática. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*

- 2014;24(5):612–619. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1660>.
- [74] Sciuti, V.F., Melo, C.C., Canto, L.B., Canto, R.B.. Influence of surface crystalline structures on DSC analysis of PTFE. *Materials Research* 2017;20(5):1350–1359.
- [75] Montilha, F.S., Sciuti, V.F., Riul, C., Bose-Filho, W.W., Schmitt, N., Canto, R.B.. Análise da aplicação do método da normalização linear da carga para identificação de curvas J-R e da tenacidade à fratura do politetrafluoretileno (PTFE). In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 21° CBECiMat. Cuiabá; 2014, p. 7141–7148.
- [76] Macêdo, S.C.M., Furlan, M., Garcia, M.F., Canto, R.B.. Identificação do limite de escoamento e propriedades elásticas sob compressão do PTFE em temperatura ambiente utilizando correlação de imagens digitais. 2019, p. 570–574.
- [77] Furlan, M., Melo, C.C., Sciuti, V.F., Canto, R.B.. Procedimento experimental de validação de um modelo numérico para prensagem do politetrafluoretileno (PTFE). 2022,.
- [78] Canto, R.B., Schmitt, N., Carvalho, J., Billardon, R.. Experimental identification of the deformation mechanisms during sintering of cold compacted polytetrafluoroethylene powders. *Polymer Engineering and Science* 2011;51(11):2220–2235. doi:10.1002/pen.21994.
- [79] Hunstman Corp., . Rencast® 4464-1. 2024. URL: https://www.maxepoxi.com.br/pdf/rencast_4644_1_silicon_hu.pdf; Acessado: 2024.
- [80] ASTM Steel, . Aisi d6 tool steel. 2024. URL: <https://www.astmsteel.com/product/aisi-d6-tool-steel/>; Acessado: 2024.
- [81] Furlan, M., Vargas, R., Sciuti, F.V., Mathieu, F., Hild, F., Canto, R.B.. On estimating internal contact pressure distribution in closed-die pressing; 2024. Trabalho em elaboração.
- [82] Callister, W.D., Rethwisch, D.G.. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 8 ed.; 2009.
- [83] Kim, K., Lee, H.. Effect of friction between powder and a mandrel on den-

sification of iron powder during cold isostatic pressing. *International journal of mechanical sciences* 1998;40(6):507–519.

- [84] Ebnesajjad, S.. *Fluoroplastics Volume 1: Non-Melt Processible Fluoroplastics*; vol. 1. 1 ed.; Norwich, NY: William Andrew Publishing; 2000.