

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

CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER/*CAP*
PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE
PRENSAGEM A FRIO DE PÓS METÁLICOS

Filipe Oliveira Rocco

São Carlos
2015

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

CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER/*CAP*
PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE
PRENSAGEM A FRIO DE PÓS METÁLICOS

Filipe Oliveira Rocco

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

Orientador: Dr. Oscar Balancin

Co-orientador: Dr. Rodrigo Bresciani Canto

Agência Financiadora: CAPES

São Carlos

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R671c Rocco, Filipe Oliveira
Calibração do modelo de Drucker-Prager/CAP para
simulação numérica do processo de prensagem a frio de
pós metálicos / Filipe Oliveira Rocco. -- São Carlos
: UFSCar, 2015.
113 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de
São Carlos, 2015.

1. Simulação computacional. 2. Comportamento
mecânico dos materiais. 3. Metalurgia do pó. 4.
Prensagem a frio. I. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este Mestrado aos meus pais José Carlos e Deusa Maria, pelo incentivo e apoio.

VITAE DO CANDIDATO

Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (2011).

**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

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Filipe Oliveira Rocco, realizada em 27/03/2015:



Prof. Dr. Oscar Balancin
UFSCar



Prof. Dr. Vitor Luiz Sordi
UFSCar



Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Paccola
USP

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Oscar Balancin e ao co-orientador Prof. Dr. Rodrigo Bresciani Canto pelas instruções precisas, pelo suporte e por indicarem os caminhos a seguir durante toda a elaboração deste trabalho. Agradeço aos colegas de laboratório Antonio Lourenço Batista de Souza, Otávio Contart Gamboni, Vinicius Fiocco Sciuti, Caiuã Caldeira Melo, Fernanda Silveira Montilha, Rafael Gonçalves de Moraes Saracura, Bruno Luchini, Rafael Vargas e Mariana Beatriz dos Reis Silva pelo auxílio na condução do trabalho e pelos bons momentos de convivência diária. Agradeço aos técnicos e funcionários do departamento de engenharia de materiais da UFSCar, sempre competentes e prestativos.

Agradeço à BS Ind. Com. Produtos Metalúrgicos LTDA pelo suporte técnico e pelo material fornecido durante o projeto de pesquisa.

Agradeço especialmente à minha família: José Carlos, Deusa Maria e Lucas; pelo suporte, paciência e amor. Pelo companheirismo, carinho, amor e cumplicidade, agradeço à Talita Marques Mendes.

RESUMO

A metalurgia do pó consiste basicamente em três etapas: preparação do pó (mistura), prensagem e sinterização. Durante a etapa de prensagem, o atrito entre as partículas do pó e as paredes da cavidade da matriz pode induzir a formação de heterogeneidades no compactado verde que afetam negativamente a etapa de sinterização. A simulação computacional pelo método dos elementos finitos é uma ferramenta eficaz no estudo do processo de prensagem, sendo o modelo de material um ponto chave na aplicação do método. O modelo de Drucker-Prager/*Cap* implementado no software comercial de elementos finitos AbaqusTM v6.14 é adequado para simular o adensamento mecânicos de pós metálicos. Os principais parâmetros deste modelo foram calibrados experimentalmente para o pó ferroso BSM 1018. Para isso foram realizados ensaios mecânicos contando com o auxílio da técnica de correlação de imagens digitais – a metodologia de calibração proposta consiste em identificar os parâmetros do modelo utilizando apenas ensaios mecânicos simples combinados com dados obtidos na literatura. Por fim, validou-se a calibração do modelo via comparação entre os resultados obtidos em um ensaio cíclico de prensagem uniaxial em matriz rígida real e os resultados obtidos em uma simulação computacional deste ensaio.

DRUCKER-PRAGER/*CAP* MODEL CALIBRATION FOR DIE COMPACTION SIMULATION OF METAL POWDER

ABSTRACT

An experimental procedure for the calibration of Drucker-Prager/*Cap* model, using the digital image correlation technique, is presented. The elastic properties were characterized by fitting stress vs. strain curves recorded during loading and unloading cycles in a uniaxial compression test. The plastic material parameters, for yield surface, have been obtained by uniaxial and diametral compression tests. The calibration procedure was performed for three green density values. The digital image correlation technique proved to be of great value in the analysis of this results, considerably increasing the amount and quality of data obtained from mechanical tests, allowing a more complete and accurate analysis, as well as a greater understanding of the yielding mechanisms. The calibrated material model was implemented into AbaqusTM v6.14 for a finite element analysis of cold uniaxial compaction. An experimental procedure was used to validate the overall method by comparing the finite elements results to the experimental observations. The numerical results are in good agreement with the experimental observations.

PUBLICAÇÕES

ROCCO, F. O.; MELO, C. C.; BALANCIN, O.; CANTO, R. B. Identificação de parâmetros para a simulação computacional da prensagem de pós ferrosos In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá. Anais do 21º CBECiMat. p.5400-5407, 2014.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

FOLHA DE APROVAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Revisão da literatura	3
2.2 Metalurgia do pó	5
2.3 Simulação computacional do processo de prensagem de pós	8
2.4 Compactação do pó metálico	9
2.5 Sinterização	12
2.6 Comportamento elasto-plástico de materiais particulados	14
2.6.1 Elasticidade	14
2.6.1.1 Elasticidade Linear	14
2.6.1.2 Elasticidade não linear	14
2.6.2 Plasticidade: breve introdução	15
2.6.2.1 Definição das tensões, deformações e seus invariantes	15

2.6.2.2 Critério de escoamento	19
2.6.2.3 Condição de consistência	22
2.6.2.4 Postulado de Drucker	24
2.6.2.5 Lei de fluxo	26
2.6.2.6 Lei de encruamento	27
2.6.3 Modelo de Drucker-Prager/ <i>Cap</i> (Abaqus TM v6.14)	28
2.7 Correlação de imagens digitais (CID)	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais	39
3.2 Métodos	39
3.2.1 Preparação dos CDPs	41
3.2.2 Lei de encruamento (p_b vs. ε_{vol}^p)	43
3.2.3 Ensaio Mecânicos com auxílio da técnica de CID	43
3.2.4 Superfície de Drucker-Prager (d e β)	44
3.2.5 Critério para identificação do limite elástico	47
3.2.6 Parâmetros elásticos	49
3.2.7 Simulação computacional via MEF	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Caracterização dos CDPs	55
4.2 Lei de encruamento (p_b vs. ε_{vol}^p)	55
4.3 Ensaio de compressão simples	58
4.3.1 Ensaio cíclicos	60
4.3.1.1 Corpo de prova compactado sob 100 MPa ($\rho_{rel} = 0,82$)	60
4.3.1.2 Corpo de prova compactado sob 200 MPa ($\rho_{rel} = 0,91$)	64
4.3.1.3 Corpo de prova compactado sob 300 MPa ($\rho_{rel} = 0,96$)	66
4.3.2 Ensaio monotônicos	68
4.4 Ensaio de compressão diametral	68
4.4.1 Ensaio cíclicos	70
4.4.2 Ensaio monotônicos	72
4.5 Avaliação do regime elástico e determinação da tensão de escoamento.	73

4.5.1 Regime elástico	75
4.5.2 Determinação da tensão de escoamento	78
4.6 Identificação dos parâmetros do modelo de Drucker-Prager	81
4.7 Identificação dos parâmetros elásticos	83
4.8 Simulação computacional do processo de prensagem uniaxial em matriz rígida	86
5 CONCLUSÕES	93
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A	103
APÊNDICE B	105
APÊNDICE C	107
APÊNDICE D	109
ANEXO A	111
ANEXO B	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Parâmetros para calibração do modelo de Drucker-Prager/ <i>Cap.</i>	32
Tabela 3.1	Composição do pó metálico BSM-1018 fornecida pela <i>Höganäs</i> (Anexo A).	39
Tabela 3.2	Propriedades típicas do pó ferroso ASC 100,29 que compõe a mistura do material em estudo (BSM-1018) [66].	40
Tabela 4.1	Caracterização experimental dos CDPs fabricados para realização dos ensaios de compressão simples.	55
Tabela 4.2	Caracterização experimental dos CDPs fabricados para realização dos ensaios de compressão diametral.	56
Tabela 4.3	Valores médios de densidade, densidade relativa e de deformação plástica volumétrica calculados para CDPs compactados em diferentes níveis de pressão. * Valores fornecidos pelo fabricante. ** Considerou-se que a 600 MPa o pó atinge densificação máxima.	56
Tabela 4.4	Valores identificados para o ajuste dos pontos experimentais da curva de encruamento	57
Tabela 4.5	Valores identificados graficamente para o escoamento do material compactado em todas as condições estudadas.	78
Tabela 4.6	Resumo dos parâmetros identificados experimentalmente para o modelo de Drucker-Prager/ <i>Cap.</i>	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fluxograma geral do processamento via metalurgia do pó.	6
Figura 2.2 Estágios dominantes durante a prensagem de pós metálicos [48] (adaptado).	10
Figura 2.3 Representação esquemática das interações que dão coesão ao compactado verde.	12
Figura 2.4 Critério de von Mises no plano meridional (p vs. q).	20
Figura 2.5 Critério de Drucker-Prager no plano meridional (p vs. q).	21
Figura 2.6 Introdução da superfície cap no modelo de Drucker-Prager, limitando o critério no eixo da tensão normal média.	22
Figura 2.7 Condição de consistência.	23
Figura 2.8 Normalidade do vetor $d\varepsilon_{ij}^p$	25
Figura 2.9 Convexidade da superfície de escoamento.	26
Figura 2.10 Modelos Elementares de Encruamento: (a) encruamento isotrópico e (b) encruamento cinemático.	27
Figura 2.11 Modelo de Drucker-Prager/ Cap no espaço das tensões principais [3, 54] (adaptado).	28
Figura 2.12 Modelo de Drucker-Prager/ Cap : superfícies de plastificação no plano meridional [3, 54] (adaptado).	29
Figura 2.13 Curva típica de encruamento da superfície cap [3,54] (adaptado).	30
Figura 2.14 Superfície de potencial de fluxo do modelo de Drucker-Prager/ Cap no plano q vs. p [54].	31
Figura 2.15 Aparato experimental utilizado nos ensaios mecânicos para capturar imagens digitais.	34
Figura 2.16 Representação esquemática de um ensaio de compressão simples, com CDP preparado para o uso da técnica de CID, detalhe para o mosqueado.	34

Figura 2.17 Representação esquemática dos eixos adotados para análise de CID de um ensaio mecânico e representação das partes essenciais para compreensão da técnica: pixels, nós e elementos [65] (adaptado).	36
Figura 2.18 Representação esquemática de um elemento utilizado na análise de CID (imagem de referência e estado deformado) [65] (adaptado).	37
Figura 3.1 Granulometria do pó ferroso ASC 100,29 que compõe a mistura do material em estudo (BSM-1018) [66].	40
Figura 3.2 Preparação de CDPs para ensaios mecânicos de compressão simples.	41
Figura 3.3 Preparação de CDPs para ensaios mecânicos de compressão diametral.	42
Figura 3.4 Modelo de Drucker-Prager/ <i>Cap</i> : procedimentos experimentais para determinação dos parâmetros. Superfície F_s : (1) Ensaio de tração; (2) Ensaio de torção; (3) Ensaio de Compressão diametral; (4) Ensaio de compressão uniaxial. Exemplos de ensaios triaxiais que permitem a identificação da Superfície F_c : (5A) (5B) (5C) (5D) [44].	44
Figura 3.5 Trajetos do incremento de tensão para os ensaios mecânicos de compressão simples (cs) e compressão diametral (br). . . .	45
Figura 3.6 Campo de tensões no plano de carregamento durante o ensaio brasileiro: solução analítica.	46
Figura 3.7 Evolução dos parâmetros do modelo de material com o aumento da densidade relativa do material compactado.	48
Figura 3.8 Representação esquemática do fenômeno da dilatância, em que há desempacotamento das partículas do pó associada a uma tensão cisalhante crítica.	48
Figura 3.9 Representação esquemática da metodologia adotada para determinação do módulo elástico do material.	50

Figura 3.10 Representação esquemática da metodologia adotada para determinação do coeficiente de Poisson no regime elástico do material.	51
Figura 3.11 Figura esquemática do modelo axissimétrico para a simulação da prensagem uniaxial em matriz rígida.	52
Figura 3.12 Malha construída no <i>software</i> Abaqus TM v6.14 para a simulação da prensagem uniaxial em matriz rígida.	53
Figura 4.1 Evolução da densidade do pó em função do aumento da pressão hidrostática de compressão aplicada. As barras de erro são simétricas e representam uma unidade de desvio padrão. . . .	57
Figura 4.2 Curva para obtenção da lei de encruamento da superfície F_s obtida a partir da prensagem isostática em diferentes níveis de pressão.	58
Figura 4.3 Representação esquemática dos campos de deslocamentos nas direções 1 (U_{11}) e 2 (U_{22}) e do campo de deformações na direção 1 (ε_{11}) calculados pela CID em um ensaio de compressão simples (CDP <i>cs82</i> – 01 - imagem 44). Os deslocamentos de corpo rígido foram subtraídos	59
Figura 4.4 Ensaio de compressão simples cíclico (CDP <i>cs-82-01</i>): (a) deslocamento do atuador vs. tempo; (b) deformações vs. tempo; (c) tensão vs. deformações.	61
Figura 4.5 Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP <i>cs82</i> – 01 - imagens referentes aos picos dos 6 ciclos do ensaio).	63
Figura 4.6 Ensaio de compressão simples cíclico (CDP <i>cs91-02</i>): (a) deslocamento do atuador vs. tempo; (b) deformações vs. tempo; (c) tensão vs. deformações.	65
Figura 4.7 Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP <i>cs91</i> – 02 - imagens referentes aos 3 picos dos ciclos do ensaio).	66

Figura 4.8	Ensaio de compressão simples cíclico (CDP cs96-03): (a) deslocamento do atuador versus tempo; (b) deformações versus tempo; (c) tensão vs. deformações.	67
Figura 4.9	Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP cs96 – 03 - imagens referentes aos picos dos 3 ciclos do ensaio).	68
Figura 4.10	Representação esquemática dos campos de deslocamentos nas direções 1 (U_{11}) e 2 (U_{22}) e do campo de deformações na direção 1 (ε_{11}) calculados pela CID em um ensaio de compressão diametral (CDP br96 – 01 - imagem 10).	69
Figura 4.11	Tensão de von Mises em função das deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{vol} e ε_{dev} . (a) br91 – 02; (b) br96 – 02.	71
Figura 4.12	Ensaio de compressão diametral realizado no CDP br96-01.	72
Figura 4.13	Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP br96 – 01 - imagens referentes aos picos dos ciclos do ensaio).	73
Figura 4.14	Curva q vs. ε_{vol} para: (a) ensaio cíclico de compressão simples (cs82-01); (b) ensaio cíclico de compressão diametral (br96-02).	74
Figura 4.15	Detalhe da curva ε_{dev} vs. ε_{vol} para os ensaios de compressão simples.	76
Figura 4.16	Detalhe da curva ε_{dev} vs. ε_{vol} para os ensaios de compressão diametral.	77
Figura 4.17	Curvas q vs. ε_{dev} para os ensaios de compressão simples. .	79
Figura 4.18	Curvas q vs. ε_{dev} para os ensaios de compressão diametral.	80
Figura 4.19	Evolução da superfície de Drucker-Prager com o aumento da densidade relativa (plano q vs. p).	81
Figura 4.20	Evolução da coesão (d) com o aumento da densidade relativa.	82
Figura 4.21	Evolução do atrito interno entre as partículas do pó (β) com o aumento da densidade relativa.	82
Figura 4.22	Evolução de E com p identificada a partir do ensaio cíclico de compressão simples realizado no CDP cs96 – 03.	83

Figura 4.23 Evolução de ν com p identificada a partir do ensaio cíclico de compressão simples realizado no CDP <i>cs96 – 03</i>	84
Figura 4.24 Evolução de E com p identificada a partir dos ensaios cíclicos de compressão simples.	85
Figura 4.25 Evolução de ν com p identificada a partir dos ensaios cíclicos de compressão simples.	86
Figura 4.26 Parâmetros do modelo linear elástico utilizado na simulação computacional.	87
Figura 4.27 Parâmetros do modelo de material utilizado na simulação computacional.	89
Figura 4.28 Lei de encruamento da superfície <i>cap</i> do modelo de material utilizado na simulação computacional.	89
Figura 4.29 Comparação de resultados experimentais e teóricos: curvas de carga vs. deslocamento para o caso da compressão uniaxial em matriz rígida.	90
Figura 4.30 Isovalores de densidade da peça compactada.	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MP - Metalurgia do Pó

MEF - Método dos Elementos Finitos

CID - Correlação de Imagens Digitais

CDP - Corpo de Prova

LED - Light Emitting Diode

LMT-Cachan - Laboratoire de Méchanique et Technologie - Cachan

MPC - Multi-Point Constraint

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Altura do CDP

d - Coesão do material

D - Diâmetro do CDP

f - Superfície de escoamento

F_{br} - Força aplicada no CDP do ensaio de compressão diametral

F_c - Superfície Cap

F_{cs} - Módulo da força aplicada no ensaio de compressão simples

F_s - Superfície de Drucker-Prager

F_t - Superfície de transição

E - Módulo elástico

g - Potencial plástico

G_c - Superfície de potencial de fluxo do Cap

G_s - Superfície de potencial de fluxo do Drucker-Prager

I_1, I_2, I_3 - Invariantes do tensor de tensões

J_1, J_2, J_3 - Invariantes do tensor desviador

K - Flow stress ratio

l, m, n - Cossenos diretores

l - Comprimento final do elemento de CID

l_0 - Comprimento inicial do elemento de CID

p - Tensão normal média

p_a - Parâmetro de evolução do encruamento

p_b - Tensão isostática aplicada

q - Tensão de von Mises

q^{esc} - Valor crítico de tensão de von Mises para o escoamento

R - Parâmetro de forma da superfície Cap

t - Espessura do CDP

t_c - Tempo de carregamento para pré-forma nos discos dos ensaios

U_{11} - Campo de deslocamento na direção longitudinal obtido pela técnica de CID

U_{22} - Campo de deslocamento na direção transversal obtido pela técnica de CID

W - Trabalho realizado

Y - Valor crítico para o escoamento do material

α - Parâmetro da superfície de transição

β - Ângulo de atrito interno

δ - Distorção do elemento de CID

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ - Deformações normais nas direções 1, 2 e 3

ε_{dev} - Deformação desviadora

ε_{dev}^{cs} - Deformação desviadora no ensaio de compressão simples

ε_{vol} - Deformação volumétrica

ε_{vol}^{cs} - Deformação volumétrica no ensaio de compressão simples

ε_{vol}^p - Deformação plástica volumétrica

ε_{ij}^d - Tensor desviador das deformações

ε_{ij}^e - Componente do tensor de deformação elástica

ε_{ij}^p - Componente do tensor de deformação plástica

θ_{br} - Ângulo do trajeto de carregamento do ensaio de compressão diametral no plano p vs. q

θ_{cs} - Ângulo do trajeto de carregamento do ensaio de compressão simples no plano p vs. q

$d\lambda$ - Multiplicador plástico

ν - Coeficiente de Poisson

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ - Componentes do tensor de tensões

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - Tensões principais

σ_{br} - Tensão calculada no ensaio de compressão diametral

σ_c - Tensão calculada no ensaio de compressão simples

ρ_n - Densidade aparente do pó

ρ_o - Densidade aparente do pó solto

ρ_{rel} - Densidade relativa

1 INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó (MP) é a rota de processamento metalúrgico que mais cresceu na última década, ganhando posição de destaque nos cenários nacional e internacional; principalmente por ser mais econômica e por agredir menos o meio ambiente quando comparada a outras rotas de processamento metalúrgico. A MP consiste basicamente em três etapas: mistura, prensagem e sinterização. O foco do presente trabalho é a etapa de prensagem que no contexto industrial envolve matrizes rígidas e a atuação de um ou mais punções. O atrito entre as partículas do pó e as paredes da cavidade da matriz pode introduzir heterogeneidades no compactado que, por sua vez, afetam negativamente a etapa subsequente (sinterização), podendo comprometer a integridade estrutural e dimensional das peças finais. O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta que vem sendo largamente utilizada no estudo do processamento de materiais. O modelo de material é um ponto chave na aplicação do MEF, portanto modelos de material parcialmente identificados e adoção de simplificações errôneas podem resultar em aproximações grosseiras nos resultados finais e em simulações computacionais que não representam a realidade.

Neste sentido, o presente trabalho propôs o estudo, via MEF, do processo de prensagem a frio do pó ferroso BSM 1018 (fornecido pela BS Indústria e Comércio de Produtos Metalúrgicos). Para isso, os parâmetros do modelo de material de Drucker-Prager/*Cap* (implementado no *software* comercial AbaqusTM v6.14) foram calibrados combinando técnicas experimentais e dados da literatura. A fim de obter um modelo de material preciso e confiável, foram estudados: os mecanismos de escoamento atuantes em compactados verde, as propriedades elásticas do material e as tensões limite de escoamento do material em vários níveis de compactação. A aplicação da técnica de correlação de imagens digitais (CID) nos ensaios mecânicos colaborou sobremaneira nas análises acerca do comportamento mecânico do material compactado - a ser destacada a identificação do escoamento por meio de medidas de deformações obtidas via CID.

Portanto, o objetivo central do trabalho foi a calibração do modelo de Drucker-Prager/*Cap* para o material em estudo utilizando uma metodologia robusta e con-

fiável, que contou apenas com ensaios mecânicos simples (uniaxiais) e dados da literatura. O modelo calibrado foi aplicado em uma simulação computacional do processo de prensagem uniaxial a frio e validado por meio de um ensaio experimental. A validação foi realizada a partir da comparação entre os resultados teóricos e experimentais para as dimensões da peça e final e para a curva carga vs. deslocamento. Os resultados teóricos mostraram boa concordância com os resultados experimentais.

2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Revisão da literatura

O estudo da compactação e densificação mecânica de pós, por meio do MEF, tem sido tema de diversos trabalhos [1–17]. Esta temática vem sendo impulsionada pela viabilização de ferramentas computacionais passíveis de utilização em computadores de baixo custo e pela demanda crescente por produtos processados através da MP [18, 19], principalmente por parte da indústria automotiva [20]. Dentre as etapas do processo de fabricação via MP a prensagem é a principal, pois defeitos como gradientes severos de densidade e trincas podem surgir nesta etapa. Sabe-se que qualquer não homogeneidade introduzida no compactado verde afeta negativamente a sinterização, comprometendo a precisão dimensional e a resistência mecânica das peças finais.

Nas últimas décadas, os modelos numéricos utilizados para simulação da compactação a frio de pós seguem, principalmente, duas abordagens: modelos discretos (micromecânica) [21] e modelos que se utilizam da mecânica do contínuo (macromecânica) [14–16]. Os modelos micromecânicos tratam individualmente cada uma das partículas do pó. A outra abordagem, modelos baseados na mecânica do contínuo, considera que as partículas do pó, os aditivos e o ar intersticial formam um meio contínuo - embora materiais particulados (pós) sejam descontínuos no nível das partículas, quando analisados em escalas dimensionais maiores, como em compactados verde industriais, a hipótese de meio contínuo torna-se válida.

Os modelos baseados na micromecânica são capazes de reproduzir os mecanismos físicos associados ao processo de compactação mecânica de pós, porém sua complexidade e custo computacional os tornam inviáveis para aplicações em situações industriais e estudos de engenharia. Os modelos macromecânicos são capazes de reproduzir a fenomenologia do processo, ou seja, o material (meio contínuo formado pelo pó e seus poros) é representado por um modelo constitutivo capaz de representar numericamente a compactação, o encruamento e o atrito entre as partículas do pó.

Os modelos constitutivos mais utilizados para o estudo da compactação de pós são: Cam-Clay e Drucker-Prager, que tem origem na geologia, especificamente, no estudo da compactação de solos e foram adaptados para o estudo da compactação a frio de pós.

Em 1999, o grupo europeu PM MODNET [22] realizou um estudo comparando o modelo de Cam-Clay e o de Drucker-Prager *Cap*, o material utilizado neste estudo foi um pó atomizado de ferro e foram analisados dados acerca do gradiente de densidade nos compactados e da carga exercida no ferramental durante a compactação. O grupo concluiu que o modelo de Drucker-Prager *Cap* é mais preciso nas previsões acerca do gradiente de densidade nos compactados, enquanto que o modelo de Cam-Clay mostrou maior precisão na predição dos esforços presentes no ferramental durante a prensagem.

Apesar de existirem muitos trabalhos que estudaram os processos de prensagem de materiais em pó com o objetivo da aplicação em simulação computacional - sejam para pós metálicos [11,23–25], para pós cerâmicos [1,3–5,8,26,27], para pós poliméricos [28–34] e para aplicações farmacêuticas [35–41] - nestes trabalhos, os modelos de material são parcialmente identificados e, em muitos casos, são aplicadas simplificações que podem resultar em aproximações grosseiras nos resultados finais, por exemplo: identificação das tensões limites dos diferentes ensaios mecânicos e determinação dos parâmetros elásticos do material. Muitos trabalhos [23,37,41–44] caracterizam parâmetros das superfícies de escoamento dos modelos a partir das tensões de ruptura em diferentes ensaios mecânicos. Porém, as superfícies limites dos modelos utilizados são de escoamento e não de ruptura. A falta de critério - para a identificação do escoamento em compactados verde - fica evidente quando Brown e Abou-Chedid [24], em 1994, utilizam o critério de escoamento comumente aplicado aos metais dúcteis para determinar o escoamento em compactados verde metálicos. Este fato pode causar não só uma identificação incorreta dos parâmetros como pode ignorar o encruamento destas superfícies. Outra simplificação adotada com frequência na literatura diz respeito às propriedades elásticas do material - muitos trabalhos adotam o módulo elástico e o coeficiente de Poisson como constantes, o que

não é adequado para descrever o comportamento não linear dos compactados verde durante situações de descarregamento. A análise do comportamento elástico é crítica no estudo de processos de prensagem em matrizes rígidas, pois a recuperação elástica, *springback*, pode nuclear trincas nos compactados verde durante a etapa de desmoldagem ou ejeção.

2.2 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó é um processo de fabricação pelo qual uma mistura de pós é compactada mecanicamente, formando peças verdes e, posteriormente, sinterizadas, consolidando a peça verde em um corpo denso com geometria e propriedades desejadas. Originalmente, como o próprio nome sugere, essa terminologia se referia somente à classe de materiais metálicos, embora, atualmente, este termo seja também utilizado para outras classes de materiais em pó, como os cerâmicos, os poliméricos e os farmacêuticos. Como exemplo, as etapas envolvidas na fabricação de peças metálicas por MP estão ilustradas esquematicamente na Figura 2.1.

No caso dos pós metálicos, foco deste trabalho, as principais etapas do processo são: mistura, prensagem e sinterização. A etapa de mistura é importante para que haja homogeneidade no pó, mas também é quando são adicionados aditivos e/ou outros elementos de liga.

A etapa de prensagem, objeto de estudo deste trabalho, tem como principais objetivos:

- Conformar o pó na geometria projetada com dimensões que levam em conta as alterações dimensionais que ocorrem na sinterização;
- Conferir densidade verde adequada à peça, proporcionando maior área de contato entre as partículas para que a sinterização ocorra de forma adequada e rapidamente;
- Conferir resistência verde necessária para o manuseio da peça durante o processamento.

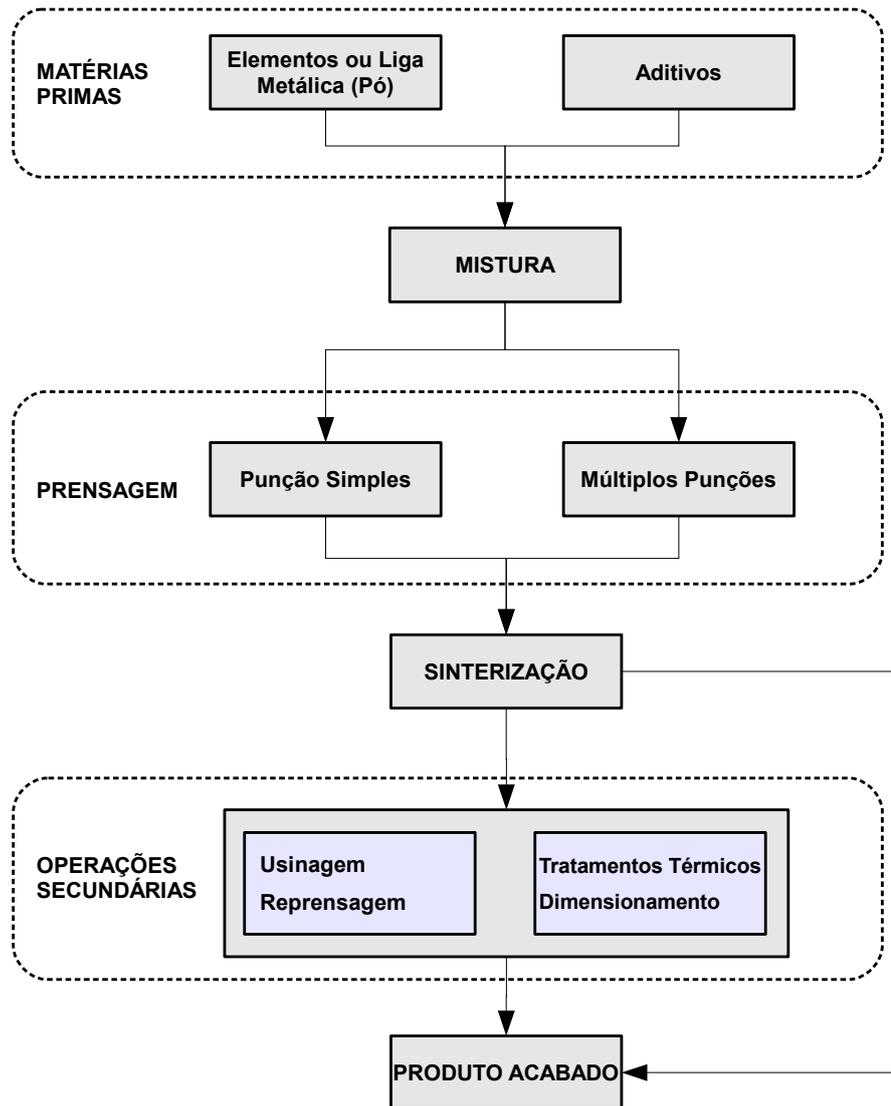


Figura 2.1 Fluxograma geral do processamento via metalurgia do pó.

O processo de prensagem mais utilizado envolve matrizes rígidas e prensas hidráulicas, mecânicas ou uma combinação das duas - a prensagem se dá, genericamente, em três etapas: carregamento, descarregamento e desmoldagem ou ejeção. A densidade do compactado deve ser a mais elevada e também a mais homogênea possível, para que a sinterização ocorra adequadamente.

A sinterização é o processo em que o compactado verde é aquecido em um forno com atmosfera controlada a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão, para o caso de sinterização no estado sólido; ou à temperatura que funda parcialmente o material, para o caso de sinterização com fase líquida. Neste processo, as interações mecânicas, oriundas da prensagem, que dão coesão

ao compactado verde (contato entre partículas) tornam-se interações metalúrgicas, transformando o compactado verde em um sólido mais denso e coeso, porém com alguma porosidade residual. Dependendo da temperatura, tempo e histórico do processo, diferentes estruturas e porosidades podem ser obtidas no compactado sinterizado, afetando suas propriedades. Peças que apresentam distribuição não homogênea de densidade, advinda do processo de prensagem, poderão, eventualmente, sofrer distorções dimensionais ou até a ruptura durante a sinterização.

A MP se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelas seguintes características:

- Capacidade de produzir peças com o conceito *near net shape*, dispensando operações secundárias e diminuindo o desperdício de material;
- Possibilidade de criar ligas incompatíveis com outras rotas de processamento metalúrgico;
- Capacidade de produzir peças com níveis controlados de porosidade, útil na fabricação de filtros e componentes autolubrificantes;
- Utilização de altas taxas de resfriamento na produção dos pós metálicos, resultando em uma microestrutura dendrítica bastante refinada e com baixo nível de segregação, melhorando assim as propriedades mecânicas do material.

Todavia, o processo possui limitações. A etapa de produção de pós metálicos pode ser bastante custosa. Além disso, para materiais particulados, o quociente entre área superficial e volume das partículas é elevado, tornando alguns metais bastante reativos, como consequência pode haver a introdução de óxidos e nitretos na peça final [45]. As dimensões das peças constituem uma limitação mais séria, devido à necessidade de utilização de prensas com capacidades crescentes, podendo tornar o processo inviável economicamente.

As vantagens desse processo vêm sendo exploradas, principalmente, pela indústria automotiva que, em 2010, consumiu mais de 75% dos produtos fabri-

cados pela MP [20]. Para que todas as vantagens inerentes à MP sejam obtidas, o processo e seus parâmetros devem ser bem estudados e compreendidos. Em um mercado altamente competitivo, ávido por aumento de desempenho, diminuição de custos e projetos com geometrias cada vez mais complexas [18, 19], os modelos numéricos e as simulações computacionais tornaram-se ferramentas indispensáveis para o estudo, compreensão e otimização das diversas variáveis que compõem um processo em escala industrial.

2.3 Simulação computacional do processo de prensagem de pós

Para se utilizar o MEF na simulação da prensagem de pós, dois tipos principais de abordagem podem ser utilizadas: a micromecânica e a macromecânica.

Na abordagem micromecânica modela-se um conjunto de partículas do pó, sendo cada uma delas um sólido independente, que interage com suas vizinhas por meios de modelos de contato. O comportamento mecânico da partícula é o comumente usado para representar o material que a constitui, que no caso dos pós metálicos pode ser um modelo elasto-plástico com critério de escoamento de von Mises, por exemplo. Nesta abordagem o custo computacional é alto, tornando possível somente o estudo de pequenas regiões localizadas de um processo.

Na abordagem macromecânica ou fenomenológica, utilizada neste trabalho, todos os constituintes do pó - partículas, aditivos e ar intersticial - constituem um meio contínuo homogeneizado, no qual suas propriedades médias são resultados das propriedades e interações de todos os constituintes. Esta homogeneização possibilita uma maior robustez da simulação tornando viável o estudo de um processo completo de prensagem, ou seja, no qual se considera a peça a ser conformada, o ferramental e as interações entre estes.

Um aspecto bastante importante advindo da homogeneização utilizada na abordagem macromecânica é que quando se refere ao escoamento do material em pó, considera-se o efeito combinado da deformação (elástica e/ou plástica) local das partículas, dos movimentos relativos entre estas (rearranjo) e de suas interações mecânicas (atrito) e metalúrgicas e, mesmo que não seja possível

conhecer estes efeitos de maneira independente, seu resultado global pode ser conhecido por meio de ensaios mecânicos em corpos de prova (CDPs) do material em pó prensado ou durante a prensagem.

A fim de compreender a compactação de pós metálicos e otimizar o processo de prensagem, modelos matemáticos e simulações computacionais acerca da prensagem a frio de pós, utilizando o MEF, são temáticas de diversos estudos [9, 11–13, 15–17, 46]. Neste contexto, o MEF pode fornecer valiosas informações sobre o processo de prensagem, entre elas:

- Previsões acerca da distribuição de densidades no compactado verde [11, 12] ou de sua geometria [3];
- Previsão das tensões atuantes no ferramental;
- Informações sobre eventuais nucleações de trincas no compactado durante a prensagem e desmoldagem (*springback*) [9, 16];
- Otimização dos parâmetros do processo de prensagem [15].

Sendo assim, a abordagem macromecânica aplicada na simulação computacional usando o MEF possibilita a visualização e otimização do processo de prensagem antes que se faça qualquer investimento em projetos de ferramentais e em testes experimentais (geralmente de tentativa e erro). Para que os resultados obtidos pelo MEF sejam confiáveis, deve-se, primeiro, escolher um modelo de material adequado para a compactação mecânica do pó e, segundo, deve-se seguir uma metodologia consistente de identificação e/ou calibração deste modelo, a fim de determinar seus parâmetros com precisão e coerência.

2.4 Compactação do pó metálico

A compactação mecânica se dá na etapa de prensagem, na qual a mistura de pós é colocada em uma matriz rígida com cavidade na forma da peça a ser produzida e submetida a uma alta pressão de confinamento, na qual predomina estados de tensão compressivos. Esta etapa é muito importante para a seguinte

(sinterização), sendo crítica para a qualidade e homogeneidade estrutural da peça final. É desejável alta densidade verde do compactado, pois com isso tem-se maior resistência verde para manipulação da peça e também o número de pontos e áreas de contatos entre as partículas do pó serão maiores, o que favorece o processo de sinterização. Além disso, o compactado verde deve ser o mais homogêneo possível em termos de densidade em todo seu volume.

Os pós não se comportam como um líquido que, quando submetido à pressão em uma matriz fechada, transmite essa pressão igualmente por todo o volume da matriz. O pó se move primariamente na direção da força aplicada, sendo comprimido até que esforços de reação (normais e tangenciais) são formados nas paredes da matriz - os esforços tangenciais se formam devido ao atrito entre as partículas do pó e as paredes da matriz.

O resultado desse efeito são diferenças de densidade e tensões residuais ao longo do volume da peça verde, o que afeta negativamente a etapa de sinterização.

Do ponto de vista macroscópico ou fenomenológico, o processo de prensagem pode ser dividido em três estágios dominantes [47], de acordo com o aumento da tensão de compressão aplicada, representados na Figura 2.2.

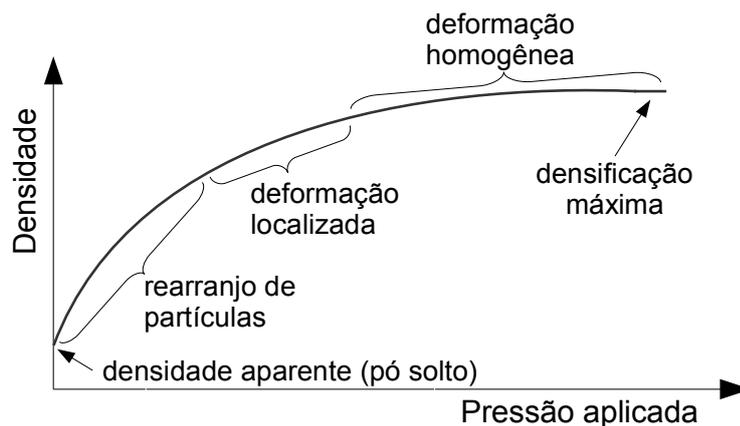


Figura 2.2 Estágios dominantes durante a prensagem de pós metálicos [48] (adaptado).

Como visto na Figura 2.2, no início do processo de prensagem, a variação da densidade em função da pressão aplicada é alta e esta diminui ao longo do processo por consequência do fenômeno de encruamento macroscópico do

material em pó.

O estágio inicial se estende desde o início da compactação do material até a tensão em que as partículas atingem o grau máximo de empacotamento sem que haja deformação plástica local no interior das mesmas. Neste estágio, o mecanismo de compactação predominante é o deslizamento e a reordenação (ou rearranjo) das partículas. A compactação atingida neste estágio é equivalente à que se pode obter através de um processo de vibração. Mesmo que não haja plastificação local nas partículas neste estágio, a abordagem macromecânica adotada considera que houve escoamento macroscópico do material, uma vez que este rearranjo das partículas causou deformações permanentes no meio contínuo homogeneizado (partículas, aditivos, ar intersticial) e, portanto, houve deformação plástica do meio contínuo (material em pó). De forma análoga, considera-se também que o material encruou uma vez que a medida que se torna mais denso devido ao rearranjo das partículas, maior tensão normal média é necessária para que o processo de reordenação progrida.

Sendo assim, para fins de padronizar a terminologia utilizada neste texto, quando termos como: escoamento, encruamento e deformação plástica forem mencionados, estes se referem ao meio contínuo idealizado a partir da homogeneização do material em pó. Por outro lado, quando estes termos forem referidos para indicar fenômenos ocorrendo no interior das partículas que formam o pó, uma menção particular será indicada no texto.

Os estágios intermediários (deformação localizada e homogênea) são caracterizados pela ocorrência de deformação plástica nas partículas do pó. Sob tensões de compressão baixas, a deformação plástica estará restrita às áreas de contato entre as partículas (deformação localizada) e, à medida em que se aumenta a tensão, a deformação plástica passa a ocorrer também no interior das partículas (deformação homogênea). A deformação plástica das partículas e a soldagem a frio aumentam a coesão do compactado verde [47] - a Figura 2.3 representa de forma esquemática as interações que dão coesão ao compactado verde. Na análise macromecânica, a plastificação e encruamento das partículas metálicas do pó serão computadas no encruamento macroscópico do material,

uma vez que o aumento da força de coesão entre as partículas dificulta o processo de reordenação das partículas.

No estágio final, à medida que o compactado se aproxima da densificação máxima, alguns contatos ainda podem se formar entre as partículas do compactado, porém o estágio dominante é o de deformação homogênea. Nesta etapa, o escoamento e o encruamento global serão mais influenciados pelos fenômenos locais intraparticulares, uma vez que os vazios já diminuiram bastante e os rearranjos interparticulares são menos intensos.

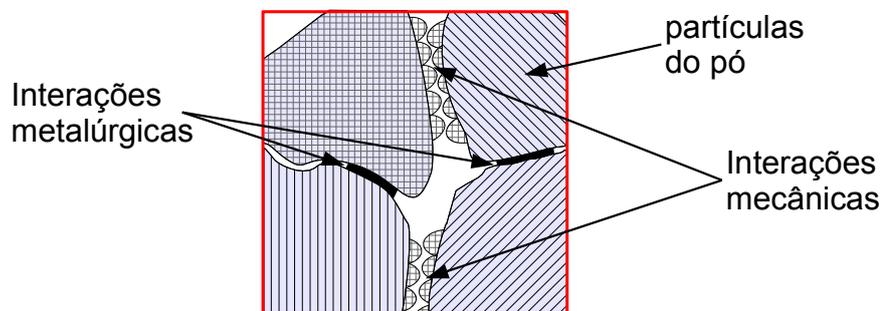


Figura 2.3 Representação esquemática das interações que dão coesão ao compactado verde.

A distribuição e duração desses estágios dependem das características mecânicas do pó e do coeficiente de atrito entre o pó e as paredes da matriz.

A resistência do compactado após o processo de prensagem é chamada de resistência verde e deve ser alta o suficiente para permitir o manuseio e a realização das próximas etapas de processamento.

2.5 Sinterização

A sinterização é o processo em que o compactado verde é aquecido em um forno com atmosfera controlada a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão, para o caso de sinterização no estado sólido; ou à temperatura que funda algum componente da mistura, para o caso de sinterização com fase líquida - em ambos os casos há união de partículas.

A força motriz para sinterização com fase líquida é a mesma da sinterização no estado sólido (energia interfacial), porém com um mecanismo adicional de

transporte de material que é a fase líquida, que leva a um processo de densificação muito mais rápido, pois permite maior mobilidade atômica. Esse tipo de sinterização é caracterizado por três estágios:

- Fluxo do líquido;
- Reprecipitação do soluto ou desaparecimento da fase líquida;
- Sinterização da fase sólida.

No primeiro estágio, o compactado verde, ao ser aquecido, tem fusão de um de seus componentes; o líquido será formado entre as partículas, preenchendo rapidamente os vazios pela força de capilaridade, resultando em rápido aumento de densidade.

No segundo estágio ocorrem reprecipitação quando se tem solubilidade dos componentes da fase sólida na fase líquida formada, isto é, os componentes da fase líquida não tem solubilidade na fase sólida. Neste caso, as partículas sólidas se solubilizam no líquido, havendo um processo de desaparecimento das partículas menores. Concomitante, há reprecipitação de soluto junto às partículas maiores, com isso as partículas maiores tendem a crescer em detrimento das menores. Para o caso em que há solubilização da fase líquida no sólido, ocorre o desaparecimento da fase líquida. Um exemplo é o caso da fabricação de peças de $Cu - Sn$; na sinterização, há fusão do Sn e, nesse estágio, após fundir-se, o estanho é solubilizado na fase sólida de cobre [49].

No terceiro estágio, quando a fase líquida não está mais presente, ocorre uma pequena densificação, baseada na difusão no estado sólido.

Como a densificação promovida durante a sinterização se dá pela difusão de partículas e fechamento de poros, a presença de regiões com porosidades diferentes no volume do compactado (gradiente de densidade) pode ocasionar contração diferencial nas peças durante a sinterização e, eventualmente, nucleação e propagação de trincas - comprometendo a qualidade das peças finais.

2.6 Comportamento elasto-plástico de materiais particulados

Os pós (materiais particulados) podem ser considerados como meios contínuos (partículas do pó e poros formando um meio contínuo), uma vez que, em situações industriais, sua granulometria assume tipicamente valores da ordem de 10 a 100 μm , enquanto que o compactado possui, geralmente, dimensões da ordem de 10 a 100 mm , isto é, as dimensões dos compactados são muito maiores do que as dimensões das partículas do pó e dos poros. As teorias da elasticidade e da plasticidade no contínuo serão discutidas com mais detalhes nesta seção.

2.6.1 Elasticidade

A teoria da elasticidade descreve o comportamento mecânico dos materiais em casos em que as deformações se dão por mecanismos reversíveis.

2.6.1.1 Elasticidade Linear

Para meios homogêneos, contínuos e isotrópicos, são necessários apenas dois parâmetros para que o comportamento elástico do material esteja completo, são eles: Módulo Elástico (E) e Coeficiente de Poisson (ν).

2.6.1.2 Elasticidade não linear

Materiais porosos apresentam, tipicamente, comportamento elástico não linear. Nesse caso, o módulo elástico e o coeficiente de Poisson são funções do nível de porosidade do material - poroelasticidade [50]. É importante ressaltar que o nível de porosidade é dependente da densidade relativa, ρ_{rel} , do compactado verde e também do estado de tensão a que o material está submetido - a densidade relativa é o quociente entre a densidade do compactado e a densidade teórica que o material assumiria na ausência de porosidade.

O comportamento elástico do material afeta de maneira significativa o processo de prensagem em matrizes rígidas. Como visto na Seção 2.2, o processo de prensagem uniaxial em matriz rígida é realizado em três etapas: durante o

carregamento, a densificação do pó se dá por plasticidade, envolvendo uma série de mecanismos irreversíveis; em contrapartida, as etapas de descarregamento e desmoldagem são regidos mecanicamente pela elasticidade.

2.6.2 Plasticidade: breve introdução

A teoria da plasticidade descreve o comportamento mecânico dos materiais em situações nas quais a teoria da elasticidade sozinha não é capaz de fazê-lo, isto é, em casos onde há deformações permanentes [51].

O modelo de material utilizado para simular o comportamento mecânico do pó metálico neste trabalho demanda o conhecimento de conceitos fundamentais da teoria da plasticidade. Portanto, apresenta-se, a seguir, uma breve introdução à teoria da plasticidade.

2.6.2.1 Definição das tensões, deformações e seus invariantes

Para que um modelo elasto-plástico numérico seja versátil, ou seja, independente da orientação do sistema de coordenadas inicialmente adotado, deve-se defini-lo em função dos invariantes do tensor de tensões.

Este tensor (Equação 2.1), definindo o estado de tensões em um ponto e tempo de referência no qual o fenômeno ocorre, é conhecido como tensor de tensões e é representado por uma matriz simétrica:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

sendo que os índices 11, 22 e 33 referem-se a um sistema de eixos coordenados ortogonais entre si. As tensões indicadas por σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} são denominadas tensões normais e as componentes τ_{12} , τ_{23} e τ_{13} recebem o nome de tensões tangenciais ou cisalhantes.

Um estado de tensões qualquer, como o representado pela Equação 2.1, pode ser descrito em relação a um outro conjunto de eixos coordenados ortogonais entre si sobre o qual as projeções das tensões cisalhantes sejam nulas e

somente as tensões normais podem ser diferentes de zero.

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Neste caso, as tensões normais são chamadas de tensões principais e estão direcionadas segundo as direções principais. As direções principais, por convenção, são numeradas de 1 a 3 e podem ser obtidas através da solução do sistema de equações posto a seguir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \sigma \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

sendo que $\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}$ representa os co-senos diretores da direção normal ao plano em que as tensões cisalhantes são nulas. O sistema de equações 2.3 representa uma rotação no eixo de coordenadas.

Pode-se reescrever o sistema de equações 2.3 da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} - \sigma & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} - \sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

A existência de uma solução não trivial para o sistema de equações lineares 2.4, leva à seguinte condição:

$$\det \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} - \sigma & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} - \sigma \end{bmatrix} = 0 \quad (2.5)$$

que resulta:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 é chamada de equação característica, sendo que I_1 , I_2 e I_3 são invariantes do tensor de tensões. Quando calculados em relação às tensões principais, obtém-se:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2.7)$$

$$I_2 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_1 \cdot \sigma_3 \quad (2.8)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \quad (2.9)$$

As raízes da Equação 2.6 são as três tensões principais: σ_1 , σ_2 e σ_3 .

Qualquer tensor de tensões pode ser dividido em duas componentes: uma componente esférica (puramente hidrostática), e outra componente anti-esférica (também conhecida como componente desviadora):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} + p & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} + p & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} + p \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

sendo:

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.11)$$

a tensão normal média. O sinal negativo é usado neste texto por ser convencional em estudos da mecânica dos solos e em problemas de compactação de pós o que faz com que durante um processo de prensagem o valor de p seja positivo.

Podem-se definir os invariantes do tensor desviador como:

$$J_1 = 0 \quad (2.12)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (2.13)$$

$$J_3 = \frac{2I_1^3}{27} - \frac{I_1 I_2}{3} + I_3 \quad (2.14)$$

A tensão de von Mises é função do segundo invariante do tensor desviador (J_2), isto é, representa uma medida das tensões desviadoras.

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (2.15)$$

O tensor das deformações pode ser estudado de maneira análoga ao tensor de tensões. A seguir, definem-se dois invariantes do tensor de deformações que serão úteis para a compreensão do texto:

1. Deformação volumétrica (ε_{vol})

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (2.16)$$

sendo que ε_{11} , ε_{22} , e ε_{33} são as deformações normais nas direções 1, 2 e 3.

2. Deformação desviadora (ε_{dev})

A deformação desviadora é definida por:

$$\varepsilon_{dev} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{ij}^d : \varepsilon_{ij}^d)} \quad (2.17)$$

sendo ε_{ij}^d o tensor desviador das deformações. Para o caso particular de um estado plano de tensões, que será abordado neste trabalho, o tensor desviador é dado por:

$$\varepsilon_{ij}^d = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{vol}}{3} & \gamma_{12} & 0 \\ \gamma_{12} & \varepsilon_{22} - \frac{\varepsilon_{vol}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} - \frac{\varepsilon_{vol}}{3} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

o que resulta em um ε_{dev} dado por:

$$\varepsilon_{dev} = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2 - (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33}) + 3\gamma_{12}^2} \quad (2.19)$$

2.6.2.2 Critério de escoamento

O critério de escoamento define o limite elástico do material, acima do qual há escoamento plástico. Geralmente, para definir a superfície de escoamento, define-se uma função escalar como:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, k_2, \dots, k_n) \quad (2.20)$$

ou,

$$f(\sigma_{ij}, \bar{k}) \quad (2.21)$$

sendo que σ_{ij} define o estado de tensão e \bar{k} define um conjunto de parâmetros k_i específicos do material. A função $f(\sigma_{ij}, \bar{k})$ define uma superfície no espaço das tensões. Por convenção, define-se a superfície de escoamento de maneira que a fronteira de $f(\sigma_{ij}, \bar{k}) = 0$ determina o limite elástico do material.

Durante o escoamento plástico, o ponto que representa o estado de tensões nunca superará a superfície de escoamento, isto é, pode-se imaginar que este ponto deslizará sobre a superfície de escoamento. Se considerarmos o encruamento, este ponto continuará sobre a superfície $f(\sigma_{ij}, \bar{k}) = 0$, mas a fronteira da superfície será expandida e/ou transladada, de acordo com a regra de encruamento, à medida que o carregamento avança. No descarregamento, o ponto representativo do estado de tensões move-se da fronteira para o interior da superfície de escoamento e o material, imediatamente, retoma um regime puramente elástico.

O critério de escoamento mais utilizado para materiais metálicos isotrópicos é o critério de von Mises [52], formulado em 1913. Ele afirma que um metal se

plastifica num ponto se o invariante J_2 neste ponto atingir um valor crítico Y , logo:

$$f(J_2) = q - Y \quad (2.22)$$

sendo Y uma propriedade do material, isto é, a tensão de von Mises de escoamento (q^{esc}).

O critério de von Mises é representado por uma reta horizontal no plano meridional (p vs. q), conforme ilustrado na Figura 2.4.

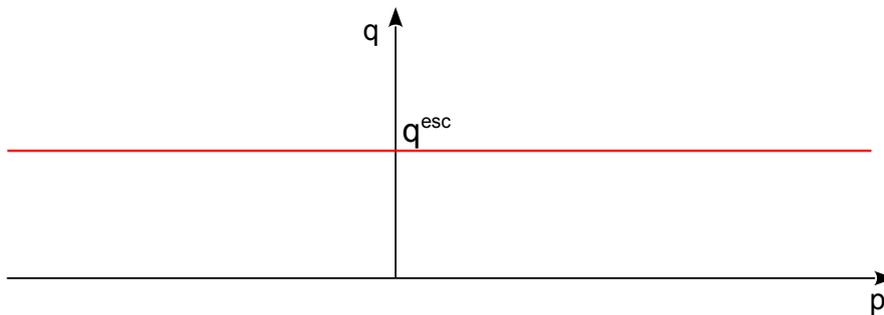


Figura 2.4 Critério de von Mises no plano meridional (p vs. q).

Nota-se que o modelo não é sensível à tensão normal média (p), ou seja, o valor crítico de escoamento para a tensão de von Mises (q^{esc}) será o mesmo independente se o tipo de sollicitação mecânica (tração, torção, flexão, compressão, entre outras) apresentar ou não valores de p nulos.

O critério de Drucker-Prager [53], formulado em 1952, é uma modificação do critério de von Mises na seguinte forma:

$$f(J_2, I_1) = q + \tan(\beta)p - d \quad (2.23)$$

isto é, há a introdução de I_1 no critério de escoamento, tornando-o sensível a p .

O critério de Drucker-Prager é representado, no plano meridional, por uma reta cujo coeficiente angular é tangente de β e o coeficiente linear é d ; em que β e d são propriedades do material. Conforme ilustrado na Figura 2.5.

O critério de Drucker-Prager foi formulado para descrever o comportamento de materiais geológicos (solos e rochas, por exemplo). A tensão crítica de von Mises (q^{esc}) de escoamento para estes materiais aumenta à medida que o material

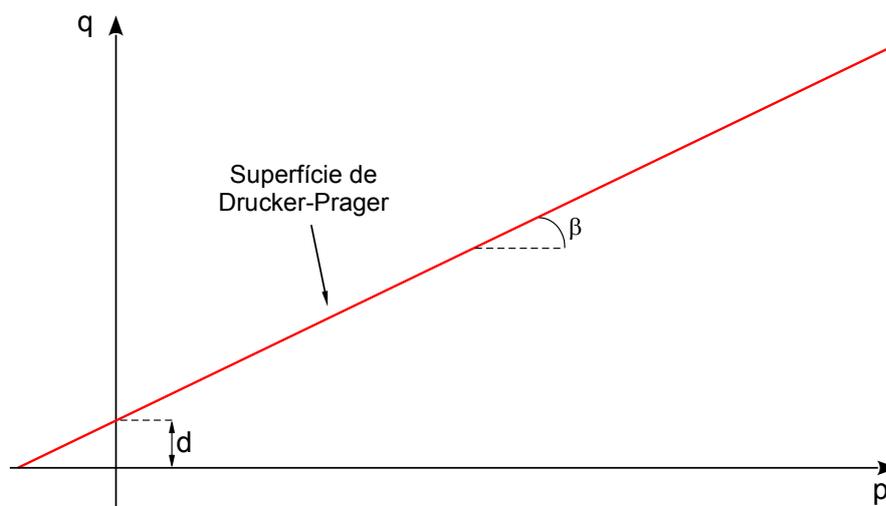


Figura 2.5 Critério de Drucker-Prager no plano meridional (p vs. q).

está sujeito a maiores níveis de confinamento, isto é, quanto maior a magnitude da tensão normal média compressiva (p) atuante num ponto do material, maior será a tensão de von Mises necessária para iniciar o escoamento naquele ponto.

Os critérios de von Mises e de Drucker-Prager são "abertos" no sentido de que um estado de tensões de compressão hidrostática pode ser aplicado sem que haja qualquer escoamento. Entretanto, para o estudo da compactação de pós, pressões hidrostáticas compressivas induzem deformações permanentes no material, por exemplo: um processo de prensagem isostática é capaz de conformar um pó solto em uma peça com geometria definida. Nesse caso, um critério de escoamento "fechado" é necessário. Um exemplo é o critério de Drucker-Prager/*Cap* (Figura 2.6).

Assim, introduziu-se uma superfície elíptica, chamada de *cap*, que limita o critério de escoamento no eixo da tensão normal média - tornando o modelo sensível à aplicação da tensão normal média de compressão (valores positivos de p).

Como forma de reforçar a comparação entre os dois critérios apresentados, pode-se afirmar que o critério de Drucker-Prager/*Cap* é adequado para modelar o processo de compactação mecânica do material em pó homogeneizado, ou seja, este vai considerar no processo de densificação macroscópica todos os

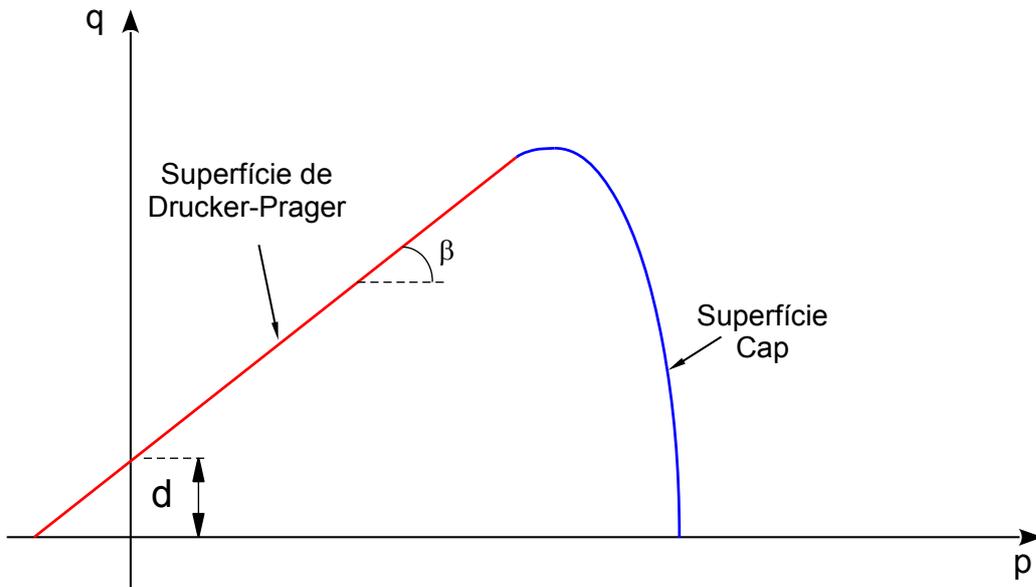


Figura 2.6 Introdução da superfície *cap* no modelo de Drucker-Prager, limitando o critério no eixo da tensão normal média.

mecanismos de rearranjo e interações interparticulares combinados às deformações intraparticulares, enquanto que o critério de von Mises é capaz de modelar somente este último mecanismo (deformações plásticas intraparticulares).

2.6.2.3 Condição de consistência

Como visto na seção anterior, durante o escoamento, o ponto representativo do estado de tensões estará localizado sobre a superfície de escoamento. Entretanto, com o aumento do carregamento, este pode continuar fixo sobre a superfície de escoamento ou deslizar ao longo da mesma com a redistribuição dos seus componentes. Matematicamente, essa condição pode ser escrita como:

$$f(\sigma_{ij} + d\sigma_{ij}) = f(\sigma_{ij}) + \nabla f^T d\sigma \quad (2.24)$$

sendo:

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_2}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_3}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{12}}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{23}}, \frac{\partial f}{\partial \tau_{13}} \right] \implies \nabla f^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} \\ \frac{\partial f}{\partial \tau_{12}} \\ \frac{\partial f}{\partial \tau_{23}} \\ \frac{\partial f}{\partial \tau_{13}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

sendo ∇f a normal à superfície de escoamento e $d\sigma_{ij}$ um incremento infinitesimal de tensão e como, na superfície de escoamento, $f = 0$, tem-se:

$$df = \nabla f^T d\sigma_{ij} = 0 \quad (2.26)$$

Portanto, mostra-se que: durante o escoamento, as eventuais mudanças nas tensões atuantes no material se darão de forma tangencial à superfície de escoamento. Esta é a condição de consistência, como mostrado na Figura 2.7.

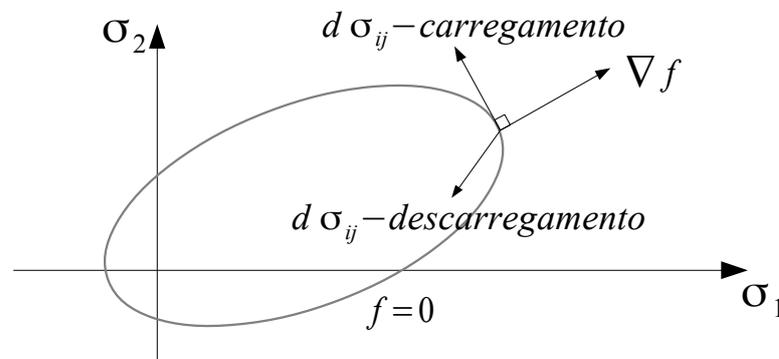


Figura 2.7 Condição de consistência.

Durante o descarregamento, o estado de tensões torna-se imediatamente elástico. Matematicamente, tem-se:

$$df = \nabla f^T d\sigma_{ij} < 0 \quad (2.27)$$

Ou seja, no descarregamento, o gradiente de f , ∇f , forma um ângulo obtuso com o vetor incremento de tensão ($d\sigma_{ij}$).

2.6.2.4 Postulado de Drucker

Para um elemento infinitesimal de volume (dV) submetido a um estado de tensão σ_{ij} e a uma deformação plástica ε_{ij}^p , o produto $\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^p$ corresponde à energia por unidade de volume. Considera-se então um incremento de carga, que causa um incremento de tensão ($d\sigma_{ij}$), que por sua vez provoca um incremento de deformação ($d\varepsilon_{ij}$), o qual pode ser decomposto da seguinte maneira: $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p$, chamada de decomposição associativa, esta é válida considerando a hipótese de pequenas deformações. Com o descarregamento do incremento de carga aplicado, o trabalho realizado por este será:

$$W = d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij} = d\sigma(d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p) \quad (2.28)$$

Analisando um processo cíclico de carregamento e descarregamento, partindo do mesmo estado de tensão e de deformação iniciais, σ_{ij} e ε_{ij} , respectivamente, o trabalho desenvolvido pelo sistema depende apenas da parcela plástica do incremento de deformação, portanto:

$$W = d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}^p \quad (2.29)$$

Para incrementos de tensão e, conseqüentemente, de deformação, verifica-se que o trabalho correspondente à componente elástica do estado de deformação é sempre positivo. Enquanto que o trabalho realizado pela componente plástica é maior ou igual a zero.

Assim, Drucker definiu que um material é suscetível ao encruamento com o incremento do estado de deformação plástica se, para um carregamento incremental, o trabalho desenvolvido for positivo e, em um processo cíclico de carregamento e descarregamento, o trabalho realizado for não negativo. Matematicamente, tem-se:

$$d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij} > 0 \quad (2.30)$$

$$d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (2.31)$$

O Postulado de Drucker pode ser estendido para um incremento finito de tensão. Considerando um caso em que o estado inicial de tensão (σ_{ij}^*) se encontra no interior da superfície de escoamento (regime elástico) e que o estado final de tensão (σ_{ij}) se encontra sobre a superfície de escoamento (regime plástico), admitindo também que um incremento de carga conduza o estado de tensão de σ_{ij}^* para σ_{ij} e que, posteriormente, um descarregamento conduza novamente σ_{ij} para o estado de tensão inicial, σ_{ij}^* , tem-se a seguinte relação:

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)d\varepsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (2.32)$$

As consequências do Postulado de Drucker são duas:

1. Normalidade do incremento de deformação plástica ($d\varepsilon_{ij}^p$):

Considerando uma superfície de escoamento diferenciável em todos os seus pontos, pode-se definir, em um ponto qualquer da superfície, um plano tangente à superfície e um vetor normal a esse plano.

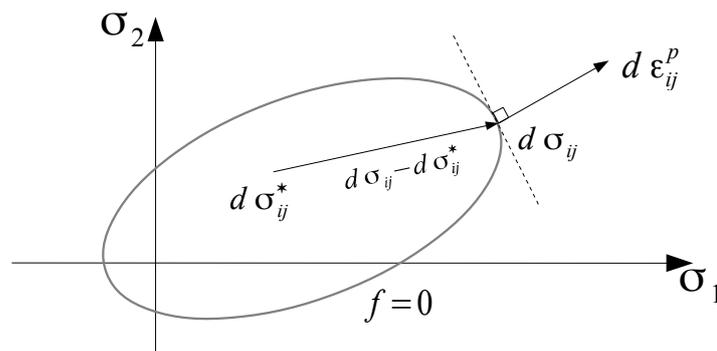


Figura 2.8 Normalidade do vetor $d\varepsilon_{ij}^p$.

Considerando a representação esquemática da Figura 2.8, a Equação 2.32 representa um produto escalar e, para que este seja válido para qualquer estado de tensões elástico inicial (σ_{ij}^*), o vetor incremento de deformação plástica ($d\varepsilon_{ij}^p$) deve ser normal ao plano tangente à superfície de escoamento e com sentido apontando “para fora” da superfície.

2. Convexidade da superfície de escoamento:

Analisando a representação esquemática da Figura 2.9, se o estado de tensão elástico inicial (σ_{ij}^*) se encontrar “do outro lado” do plano tangente, o postulado de Drucker é violado.

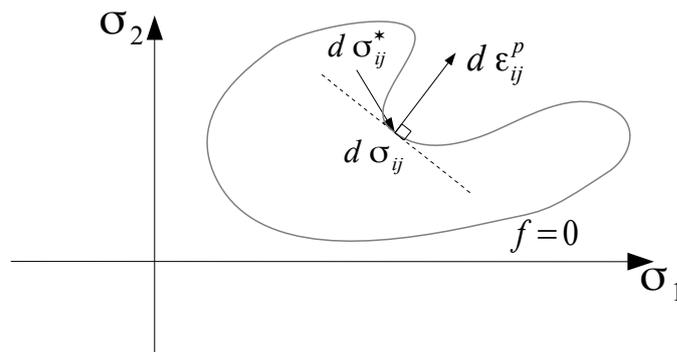


Figura 2.9 Convexidade da superfície de escoamento.

Portanto, conclui-se que toda a região elástica deve se encontrar “no mesmo lado” do plano tangente, isto é, a superfície de escoamento deve ser convexa.

2.6.2.5 Lei de fluxo

Considerando o regime elástico, a relação tensão-deformação é definida pela Lei de Hooke (ver seção 2.6.1). Durante a deformação plástica, pode-se definir a relação tensão-deformação da seguinte maneira:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = d\lambda \nabla g \quad (2.33)$$

Esta relação é conhecida como lei de Levy-Mises [51]. Sendo $d\lambda$ um escalar de proporcionalidade, chamado de multiplicador plástico, e g é uma função escalar conhecida como potencial plástico, dependente do material. Sendo ∇g um vetor normal à superfície $g = 0$. O incremento de deformação plástica, $d\varepsilon^p$, terá direção normal à superfície de potencial plástico com módulo determinado por $d\lambda$. A função g precisa ser determinada experimentalmente (analogamente à determinação da superfície de escoamento). Esta tarefa é bastante árdua e uma

aproximação razoável para g seria: $g = f$. Portanto, o incremento de deformação plástica poderia ser escrito como:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = d\lambda \nabla f \quad (2.34)$$

Com essa simplificação ($g = f$), define-se o conceito de fluxo associativo. O fluxo não associativo se dá quando não há relação entre o incremento de deformação plástica e a superfície de escoamento.

2.6.2.6 Lei de encruamento

A lei de encruamento estabelece as condições para que, atingido o regime plástico do material, um novo escoamento possa ocorrer. Ou seja, a superfície de escoamento pode sofrer contínuas alterações à medida que se dá o escoamento plástico.

As alterações na superfície de escoamento podem ser modeladas matematicamente de acordo com dois modelos elementares, como ilustrado na Figura 2.10 abaixo:

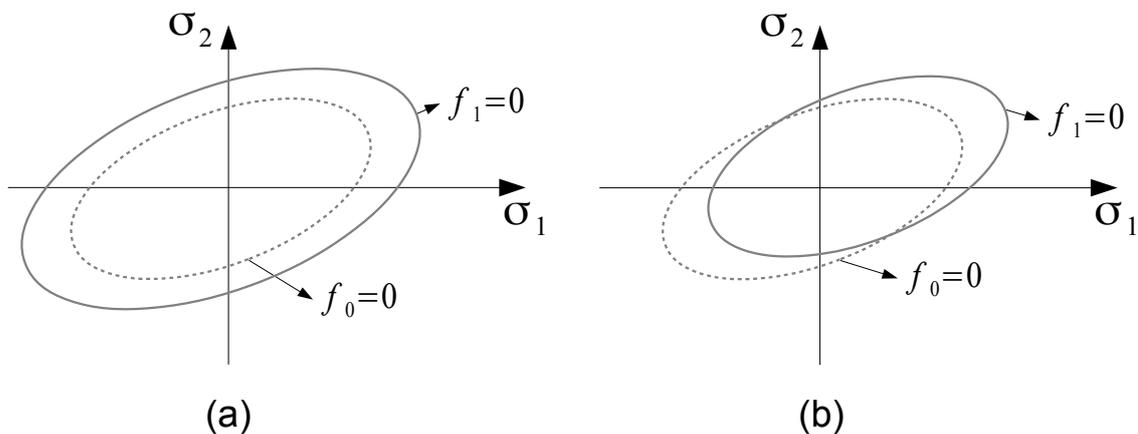


Figura 2.10 Modelos Elementares de Encruamento: (a) encruamento isotrópico e (b) encruamento cinemático.

Os modelos elementares de encruamento, descritos acima, dão origem à três leis de encruamento distintas, são elas:

1. Encruamento isotrópico: a nova superfície de escoamento é exclusivamente uma expansão uniforme da superfície precedente;

2. Encruamento cinemático: a superfície de escoamento mantém sua forma original, mas a nova superfície é transladada no espaço das tensões como um corpo rígido;
3. Encruamento misto: neste caso admite-se a expansão e a translação da nova superfície de escoamento em relação à superfície precedente.

2.6.3 Modelo de Drucker-Prager/Cap (AbaqusTM v6.14)

Este modelo é uma modificação daquele proposto originalmente por Drucker e Prager em 1952 [53]. Há a introdução de uma superfície elíptica (conhecida como superfície *cap*) que limita a superfície de escoamento no eixo das tensões hidrostáticas, tornando o modelo sensível a diferentes trajetórias de carregamento. O modelo de material implementado no AbaqusTM v6.14 permite um mecanismo de encruamento que simula o encruamento do pó.

O modelo de Drucker-Prager/Cap, disponível no *software* AbaqusTM v6.14, é mostrado no espaço das tensões principais na Figura 2.11 e no plano meridional (q vs. p) na Figura 2.12.

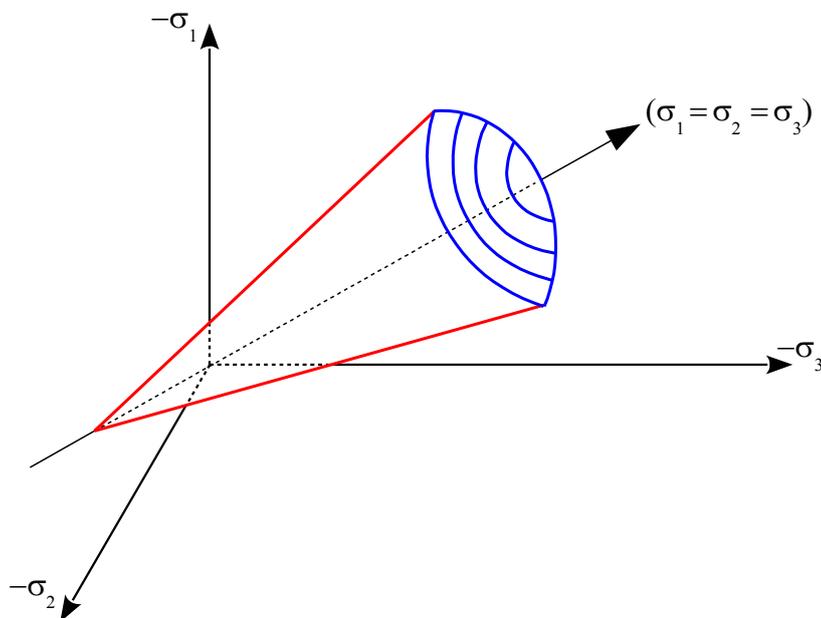


Figura 2.11 Modelo de Drucker-Prager/Cap no espaço das tensões principais [3, 54] (adaptado).

Conforme esquematizado na Figura 2.11, o modelo de Drucker-Prager/Cap,

representado no espaço das tensões principais, é um cone que envolve o eixo das tensões hidrostáticas ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) e é limitado pela superfície *cap*.

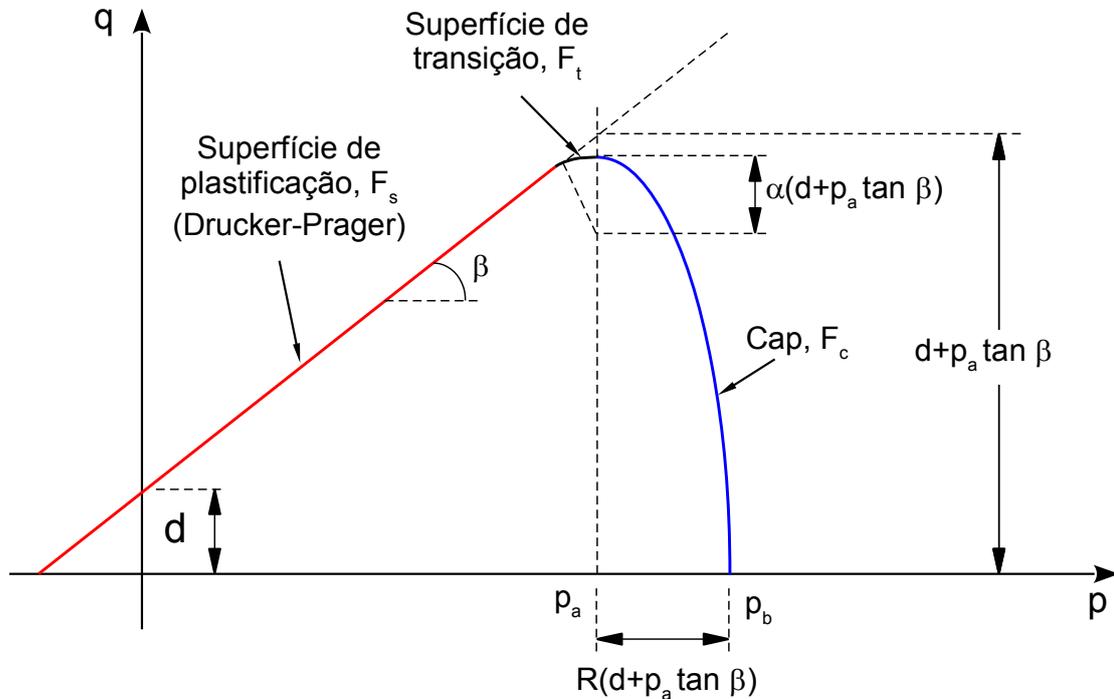


Figura 2.12 Modelo de Drucker-Prager/*Cap*: superfícies de plastificação no plano meridional [3, 54] (adaptado).

No plano meridional, a superfície de Drucker-Prager, F_s , é dada pela Equação 2.35, β é o ângulo de atrito interno e d é a coesão do material.

$$F_s = q - p \tan(\beta) - d = 0 \quad (2.35)$$

A superfície *cap*, F_c , é descrita pela Equação 2.36, sendo R um parâmetro do material que controla o formato da superfície *cap*, p_a , dado pela Equação 2.37, é um parâmetro de evolução que representa o grau de encruamento (compactação) sofrido pelo material durante o escoamento plástico e o parâmetro α é um número da ordem de 10^{-2} (tipicamente entre 0,01 e 0,05) usado para definir a superfície de transição, F_t , dada pela Equação 2.38. A superfície de transição, F_t garante uma transição suave entre as superfícies F_s e F_c , tornando a curva do

critério de escoamento diferenciável em todo o seu domínio.

$$F_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{Rq}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos(\beta)}} \right]^2} - R(d + p_a \tan(\beta)) = 0 \quad (2.36)$$

$$p_a = \frac{p_b - Rd}{1 + R \tan(\beta)} \quad (2.37)$$

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[q - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos(\beta)} \right) (d + p_a \tan(\beta)) \right]^2} - \alpha (d + p_a \tan(\beta)) = 0 \quad (2.38)$$

A lei de encruamento é definida por uma função que relaciona a tensão isotática aplicada, p_b , com a deformação plástica volumétrica, ε_{vol}^p , mostrada na Figura 2.13.

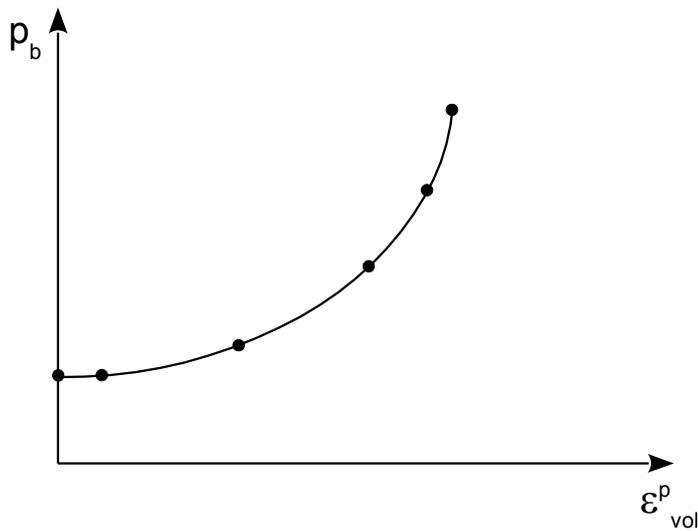


Figura 2.13 Curva típica de encruamento da superfície *cap* [3, 54] (adaptado).

Durante a compactação mecânica do pó, há uma mudança no módulo de ε_{vol}^p . O *software* calcula então, através da curva de encruamento, o valor de p_b correspondente. O novo valor de p_b resulta em uma mudança no valor de p_a (Equação 2.37), que, por sua vez, altera o formato e posição da superfície *cap* (Equação 2.36). Assim, durante a simulação numérica de um processo de

prensagem, haverá uma série de superfícies *cap* (F_c), caracterizando a lei de encruamento do material.

O parâmetro K define a geometria da superfície de escoamento no plano-II. Para $K = 1$ a superfície de escoamento é uma circunferência (como no critério de von Mises). O modelo numérico possibilita o ajuste do parâmetro K . Para que a superfície de escoamento permaneça convexa, o parâmetro K deve obedecer: $0,778 \leq K \leq 1$. Neste trabalho, considera-se K constante e igual a 1.

O potencial de fluxo do modelo de Drucker-Prager/*Cap*, definido pelo *software* AbaqusTM v6.14, é associativo na superfície *cap* (F_c) e não-associativo nas superfícies de Drucker-Prager (F_s) e de transição (F_t); como ilustrado na Figura 2.14.

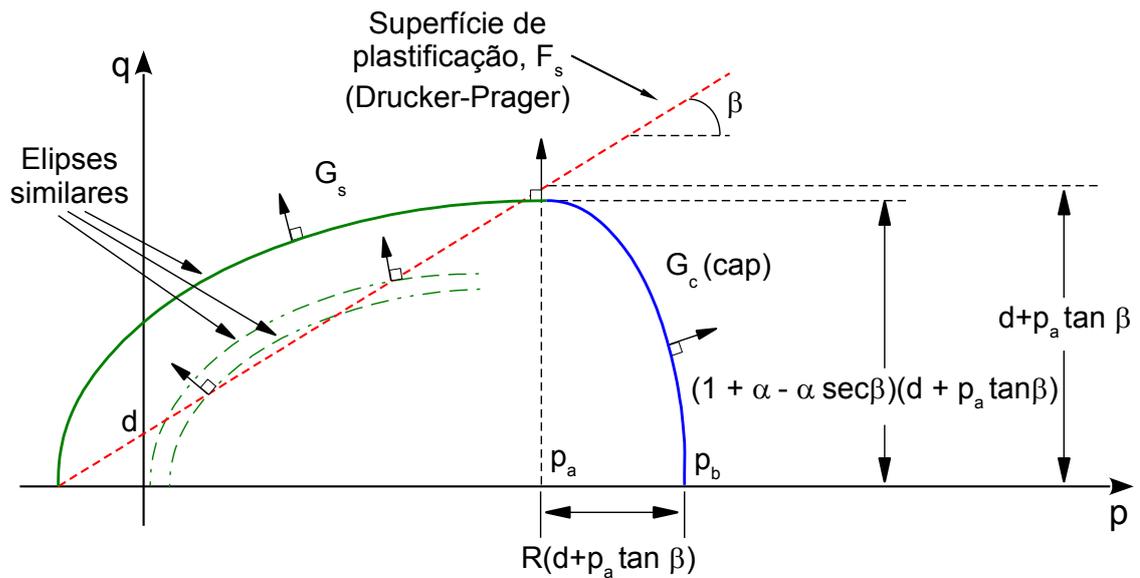


Figura 2.14 Superfície de potencial de fluxo do modelo de Drucker-Prager/*Cap* no plano q vs. p [54].

A superfície de potencial de fluxo é definida por duas elipses: G_c e G_s , descritas pelas Equações 2.39 e 2.40, respectivamente. As duas elipses formam uma superfície contínua e diferenciável.

$$G_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{Rq}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos(\beta)}} \right]^2} \quad (2.39)$$

Tabela 2.1 Parâmetros para calibração do modelo de Drucker-Prager/*Cap*.

E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
d	Coesão
β	Atrito interno entre as partículas do pó
R	Parâmetro de forma das superfícies <i>cap</i> e F_t
$\varepsilon_{vol}^p _0$	Estado inicial de deformação volumétrica do material
K	Parâmetro de forma do cone da superfície de Drucker-Prager
α	Parâmetro de forma da superfície de transição
p_b vs. ε_{vol}^p	Lei de encruamento da superfície <i>cap</i>

$$G_s = \sqrt{[(p - p_a) \tan(\beta)]^2 + \left[\frac{q}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos(\beta)}} \right]^2} \quad (2.40)$$

Para que o modelo de Drucker-Prager/*Cap* esteja completamente definido, são necessários os 8 parâmetros mostrados na Tabela 2.1 e a lei de encruamento (Figura 2.13), que serão discutidos com mais detalhes na Seção 3.2 (página 39).

Os parâmetros mais relevantes para o modelo são os 5 primeiros da Tabela 2.1 e a lei de encruamento (última linha). Acerca dos outros parâmetros:

- O parâmetro α , responsável pela transição suave entre as superfícies F_s e F_c é necessário para a implementação numérica do modelo, mas não há necessidade de identificá-lo experimentalmente [54];
- O parâmetro $\varepsilon_{vol}^p|_0$, é utilizado quando se pretende fazer uma simulação a partir de um estado de compactação diferente do pó solto, ou seja, quando se pretende realizar simulações acerca da resistência verde do compactado. Caso contrário, utiliza-se um valor muito próximo de zero;
- O parâmetro K é geralmente considerado como igual a 1 (todos os trabalhos encontrados na literatura trazem este valor).

2.7 Correlação de imagens digitais (CID)

Na realização de ensaios mecânicos em materiais informações acerca do campo de deslocamentos nos corpos de prova (CDPs) são de grande valia. A técnica de CID torna possível essa análise. A concepção do método é simples: uma câmera digital de alta resolução é utilizada para capturar imagens em sequencia cronológica da superfície (bidimensional) de um CDP durante um ensaio mecânico, como ilustrado na Figura 2.15. As imagens capturadas são armazenadas num computador e processadas subsequentemente por um *software* dedicado à CID. Neste trabalho, foi utilizado o Correli-Q4TM, implementado em MatlabTM por pesquisadores do LMT - Cachan (França) [55, 56]. No Brasil, este programa vem sendo utilizado em inúmeras aplicações para a medição de campos de deslocamento e de deformação em diferentes ensaios mecânicos aplicados em diversas classes de materiais, como ensaios de tração [57] e compressão [58] em laminados compósitos de matriz polimérica, tração e compressão simples [59, 60] ou fratura [61] em materiais poliméricos, tração e compressão simples em espumas poliméricas [62], compressão diametral em compactados verdes de materiais metálicos [17], ensaios de fratura pelo método da cunha em refratários [63] e para a identificação da fissuração de concretos refratários durante o processo de secagem [64].

A superfície do CDP é coberta com uma pintura apropriada, chamada aqui de mosqueado¹, representada na Figura 2.16. A finalidade desta pintura é formar um contraste com tons de cinza aleatórios para possibilitar ao *software* a identificação dos pixels nas imagens capturadas e, sobretudo, determinar suas trajetórias durante o ensaio mecânico, o que, por sua vez, possibilita o cálculo do campo de deslocamentos na superfície do CDP.

Os ensaios mecânicos realizados com o auxílio da CID apresentam diversas vantagens em relação àqueles realizados convencionalmente, por exemplo:

- A CID fornece uma medida global do deslocamento em inúmeros pontos

¹este termo foi escolhido pelo autor para traduzir a palavra *speckle* (da língua inglesa) e *mouchetis* (da língua francesa), usadas para descrever esta pintura.

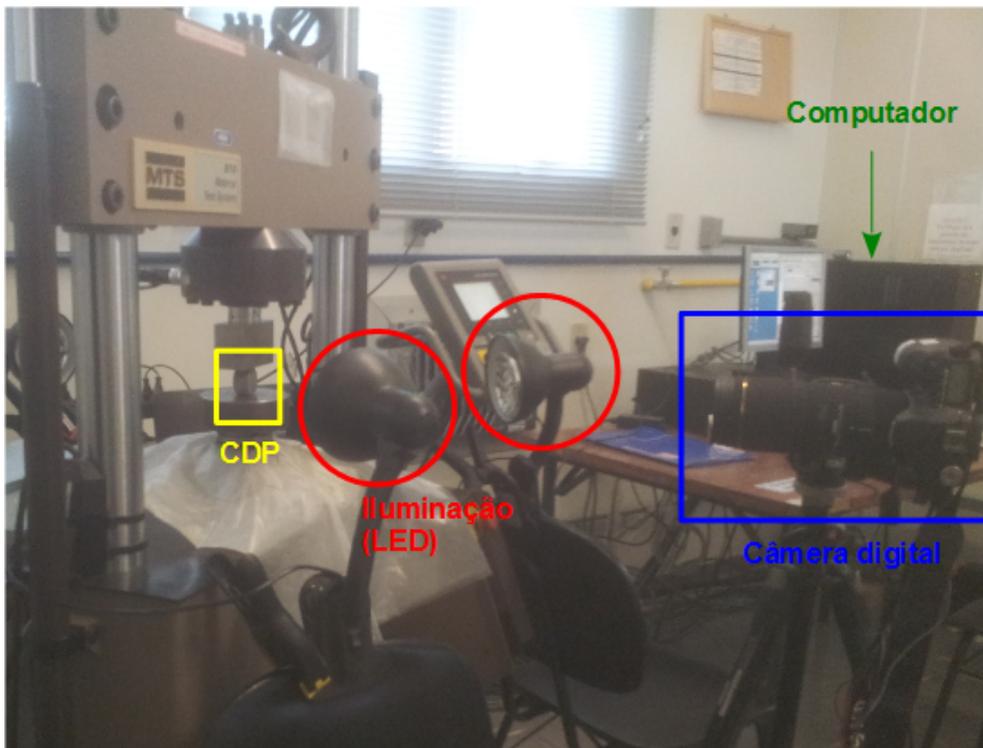


Figura 2.15 Aparato experimental utilizado nos ensaios mecânicos para capturar imagens digitais.

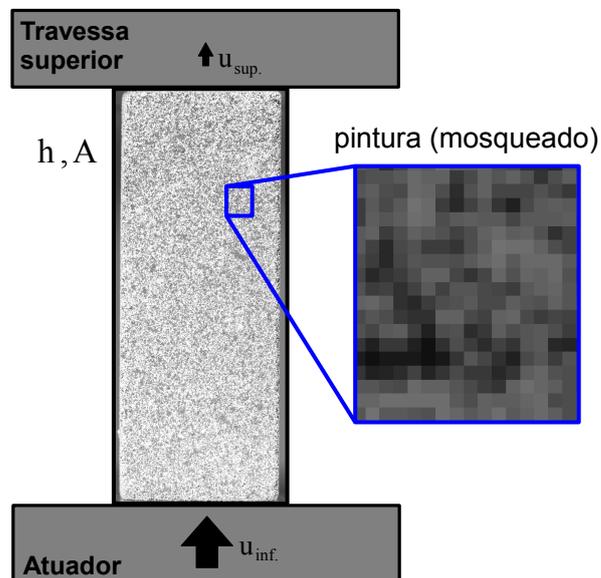


Figura 2.16 Representação esquemática de um ensaio de compressão simples, com CDP preparado para o uso da técnica de CID, detalhe para o mosqueado.

distribuídos sobre toda a superfície fotografada do CDP, enquanto que técnicas convencionais, como o uso de extensômetros, fornecem medidas médias de deformação de uma região escolhida no CDP que consideram so-

mente a posição relativa de dois pontos que limitam essa região;

- Pode-se analisar a evolução do campo de deslocamentos e de deformações na superfície do CDP durante o ensaio mecânico, tornando possíveis: avaliar um estado crítico a partir da visualização da nucleação de macrotrincas no CDP;
- A técnica de CID calcula os campos de deslocamentos a partir dos movimentos relativos dos pixels das imagens, portanto não são levados em consideração eventuais deslocamentos da máquina de ensaios (folgas nas interfaces e elasticidade do equipamento).

Pode-se citar também alguns pontos negativos da técnica, como: alta complexidade de implementação, alto custo e tempo de processamento de dados.

O *software* Correli-Q4TM é baseado em uma técnica de abordagem multi-escalar para determinação de campos de deslocamentos por CID. O campo de deslocamentos é primeiramente estimado em uma baixa resolução da imagem original e progressivamente maiores detalhes são introduzidos na imagem analisada [56]. Deste modo, o deslocamento é determinado com melhor exatidão e com maior robustez.

Este *software*, utiliza-se da técnica Q4-CID que confere significado mecânico à malha utilizada nos cálculos dos campos medidos pela técnica de CID. A partir da discretização das imagens digitais em pixels são criados elementos finitos quadrados que formam uma malha, os deslocamentos são descritos por funções de forma do tipo Q4P1 (elemento mais simples com quatro nós). O *software* calcula o deslocamento bidimensional, direções 1 e 2 indicadas na Figura 2.17, de uma dada superfície.

O campo calculado pelo programa é discretizado em nós que compõem os elementos, Figura 2.17. Cada nó possui coordenadas (x, y) e é representado por números inteiros (n, m) .

Para calcular o tensor de deformações para um estado plano de deformações (Equação 2.41), deve-se utilizar a teoria clássica para pequenas deformações

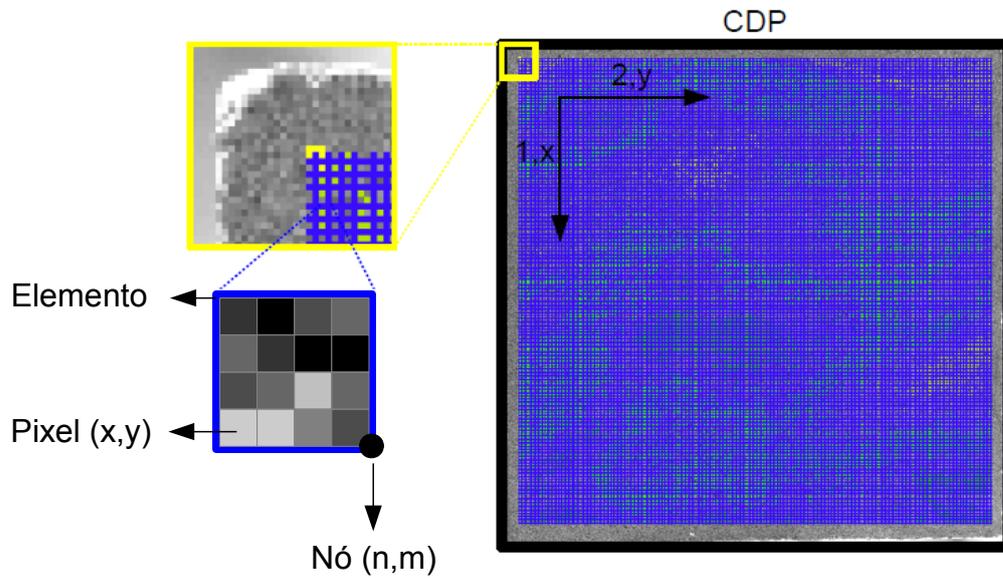


Figura 2.17 Representação esquemática dos eixos adotados para análise de CID de um ensaio mecânico e representação das partes essenciais para compreensão da técnica: pixels, nós e elementos [65] (adaptado).

mostrada nas Equações 2.42 e 2.43 para o caso uniaxial de deformações.

$$[\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\varepsilon_{normal} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.42)$$

$$\varepsilon_{cisalhamento} = \frac{\delta}{l_0} \quad (2.43)$$

sendo l_0 o comprimento inicial do elemento, l o comprimento final do elemento e δ a distorção do elemento.

Como dito, o campo de deslocamentos calculado é discreto em valores nodais (Figura 2.17) e para se obter as deformações é preciso adaptar as Equações 2.42 e 2.43 para cada componente do campo. Para isso se toma como base a Figura 2.18, na qual são mostrados os deslocamentos nodais e os comprimentos do elemento nas direções x e y .

Desta forma, pode-se escrever os componente do tensor de deformações

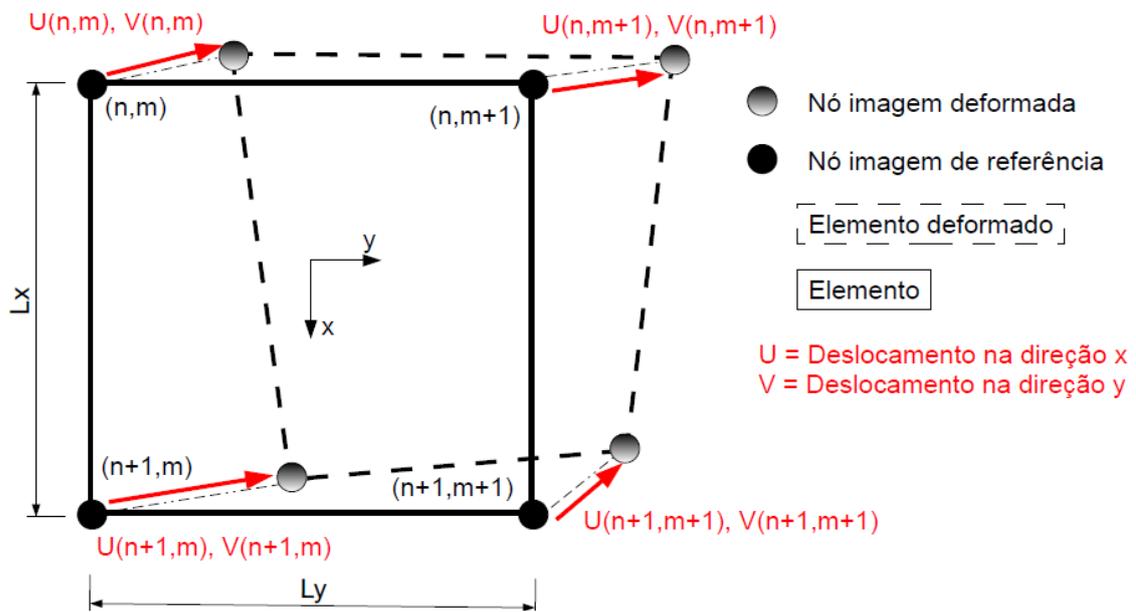


Figura 2.18 Representação esquemática de um elemento utilizado na análise de CID (imagem de referência e estado deformado) [65] (adaptado).

(Equação 2.41) utilizando as Equações 2.44, 2.45 e 2.46.

$$\varepsilon_{11} = \frac{U(m+1, n) + U(m+1, n+1) - U(m, n) - U(m, n+1)}{2L_x} \quad (2.44)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{V(m, n+1) + V(m+1, n+1) - V(m, n) - V(m+1, n)}{2L_y} \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \frac{\frac{U(m, n+1) + U(m+1, n+1) - U(m, n) - U(m+1, n)}{2L_y} + \frac{V(m+1, n) + V(m+1, n+1) - V(m, n) - V(m, n+1)}{2L_x}}{2} \quad (2.46)$$

Para que os resultados calculados pelo Correli-Q4TM sejam confiáveis, o experimento deve atender aos seguintes requisitos:

- A superfície do CDP deve ser plana e os deslocamentos fora do plano devem ser pequenos;
- A superfície do CDP deve conter um contraste de cinza adequado;
- A iluminação deve ser intensa e constante durante o ensaio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O pó metálico utilizado neste trabalho foi cedido pela empresa *BS Metalúrgica*, é fabricado pela *Höganäs* e recebe o nome comercial de BSM-1018. O material possui, segundo certificado de análise fornecido pela própria fabricante (Anexo A), a composição apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição do pó metálico BSM-1018 fornecida pela *Höganäs* (Anexo A).

Composição (porcentagem mássica)	
ASC 100,29	95,94
Fe ₃ P	2,96
Kenolube P11	1,00
Grafite 9925 MP	0,10

O material ASC 100,29 é um pó de ferro atomizado com alta compressibilidade apropriado para fabricação de peças estruturais que requerem alta densidade [66]. Algumas propriedades típicas desse material são apresentadas na Tabela 3.2 e sua distribuição granulométrica é mostrada na Figura 3.1.

O Fe₃P (fosfeto de ferro) presente na composição do pó metálico é responsável pela formação de uma fase líquida durante a etapa de sinterização, diminuindo a porosidade da peça final.

O composto Kenolube P11, um lubrificante orgânico em estado sólido, tem como função minimizar o atrito entre o material em pó e o ferramental, que, por sua vez, diminui o gradiente de densidade no compactado verde e aumenta a vida útil do ferramental. Entretanto, o composto orgânico ocupa uma fração volumétrica da peça (que não poderá ser preenchida com metal), tornando seu uso restrito a pequenas quantidades.

3.2 Métodos

Como visto na Tabela 2.1 (página 32), há oito parâmetros e uma lei de encruamento a serem determinados para que o modelo de Drucker-Prager/*Cap* esteja

Tabela 3.2 Propriedades típicas do pó ferroso ASC 100,29 que compõe a mistura do material em estudo (BSM-1018) [66].

Componentes não ferrosos	Carbono: < 0,01 %
	Outros: 0,08 %
Densidade aparente (pó solto)	2,98 g cm ⁻³

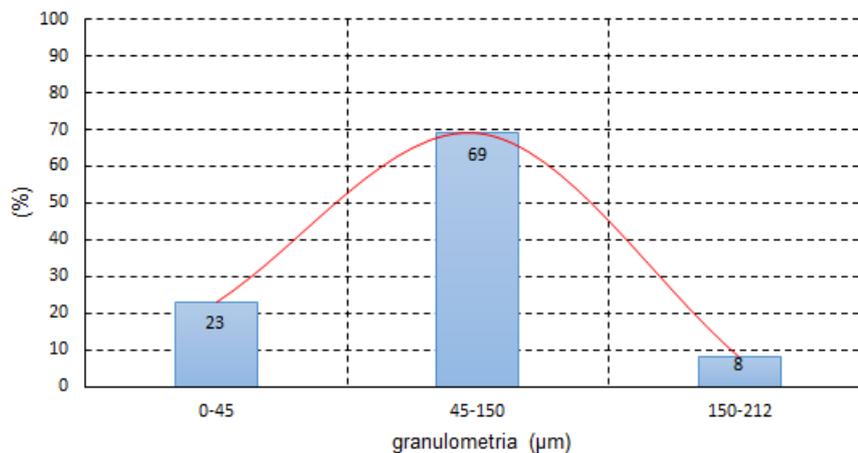


Figura 3.1 Granulometria do pó ferroso ASC 100,29 que compõe a mistura do material em estudo (BSM-1018) [66].

completo, mas nem todos precisam ser determinados experimentalmente. Neste trabalho, identificou-se experimentalmente os seguintes parâmetros do modelo:

- Lei de encruamento (p_b vs. ε_{vol}^p);
- Parâmetros elásticos (E e ν);
- Parâmetros da superfície de Drucker-Prager (β e d).

O parâmetro R , que rege a forma das superfícies F_c e F_t , foi considerado conforme descrito na literatura [23, 43, 44], uma vez que sua identificação exige ensaios triaxiais [10, 13].

Após a identificação dos parâmetros que compõem o modelo de material, foi realizada uma simulação computacional via MEF com o auxílio do *software* comercial AbaqusTM v6.14 aplicada em um caso de prensagem uniaxial de um cilindro.

3.2.1 Preparação dos CDPs

Para a identificação do modelo de Drucker-Prager foram realizados ensaios mecânicos de compressão simples e de compressão diametral também conhecidos como ensaios brasileiros [67]. Na Tabela 4.1 (página 55) é mostrada a caracterização experimental dos 7 CDPs ensaiados sob compressão simples e na Tabela 4.2 (página 56) é mostrada a caracterização experimental dos 9 CDPs ensaiados sob compressão diametral. Os procedimentos adotados para a fabricação dos mesmos são descritos nesta Seção.

Para os ensaios de compressão simples, os CDPs foram preparados com o auxílio de uma prensa isostática (a fim de evitar eventual anisotropia introduzida por outros processos de prensagem) conforme esquematizado na Figura 3.2.

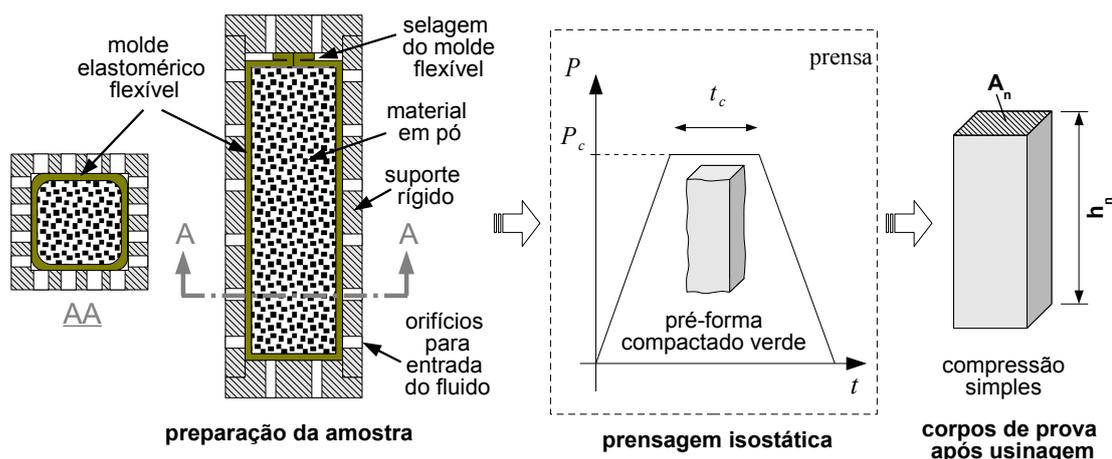


Figura 3.2 Preparação de CDPs para ensaios mecânicos de compressão simples.

Os moldes elastoméricos possuem a geometria de uma casca em forma de paralelepípedo com seção transversal quadrada. Estes foram preenchidos com o pó metálico, lacrados, colocados num suporte rígido (para que mantenham a geometria durante a prensagem) e finalmente prensados isostaticamente até os níveis de pressão desejados. Em seguida, as barras compactadas foram usadas para a obtenção dos CDPs com auxílio de uma retificadora plana, marca *Sulmecânica*, modelo *RAPH645/E*. Estes foram medidos e por fim receberam uma pintura com esmalte sintético em spray para formar o mosqueado.

Para os ensaios de compressão diametral, os CDPs foram pré-formados com o auxílio de uma matriz metálica de ação uniaxial formada por um conjunto pis-

tão e cilindro. Para minimizar a anisotropia induzida pelo processo de prensagem uniaxial em matriz rígida, foi aplicada uma pressão de compactação mínima, suficiente para imprimir uma pré-forma nos discos, sendo esta de ≈ 50 MPa, aplicada por um tempo $t_c = 1$ min. Os discos pré-formados foram então reprensados em prensa isostática até a pressão final desejada. Após esta prensagem final, os CDPs apresentaram forma e dimensões adequadas e a usinagem não foi necessária (Figura 3.3). Estes foram medidos e receberam a pintura com esmalte sintético em spray para formar o mosqueado.

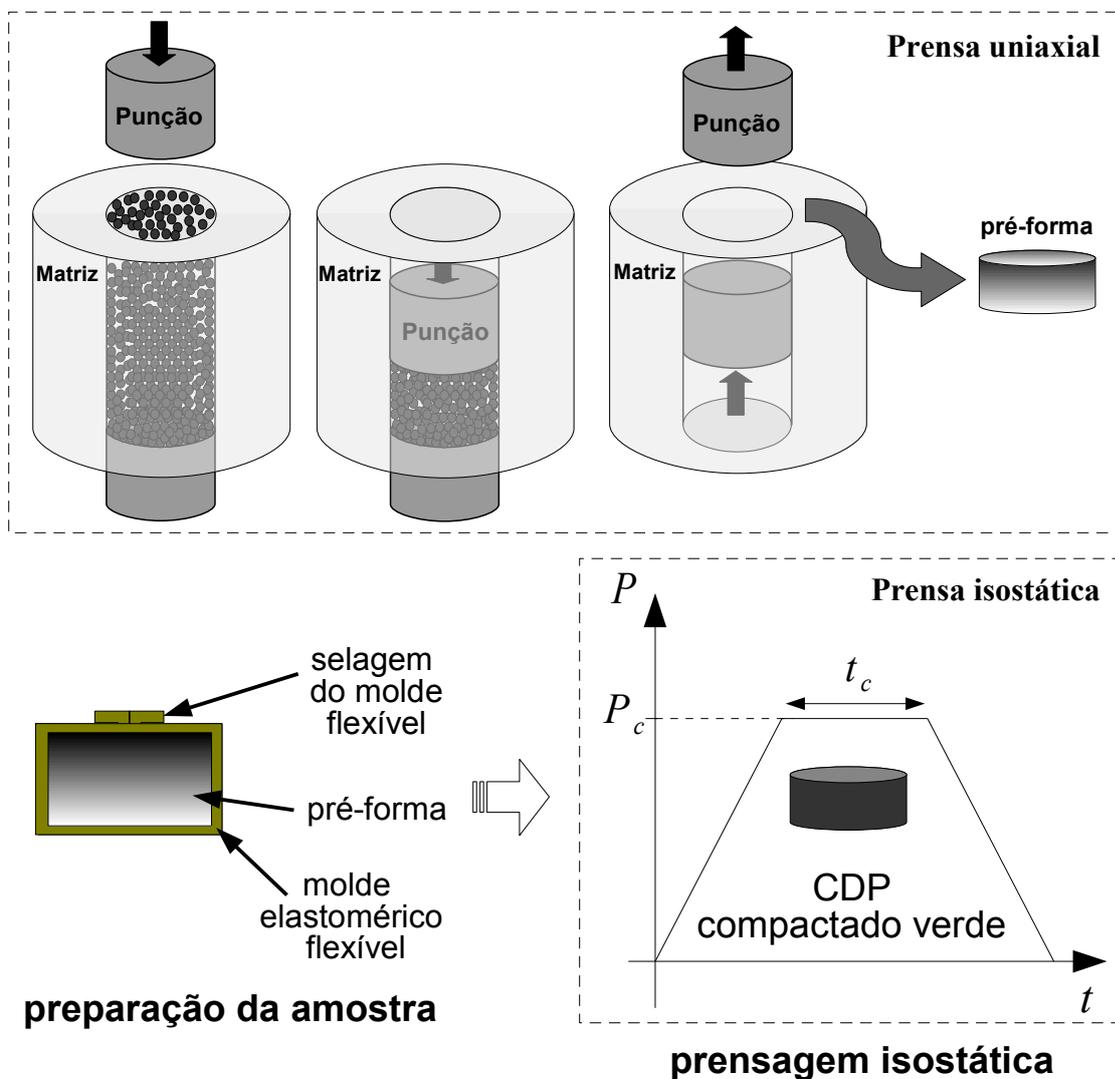


Figura 3.3 Preparação de CDPs para ensaios mecânicos de compressão diametral.

3.2.2 Lei de encruamento (p_b vs. ε_{vol}^p)

A lei de encruamento consiste na relação entre deformação plástica volumétrica (ε_{vol}^p) e tensão isostática aplicada (p_b). Experimentalmente, esta relação foi determinada na etapa de fabricação dos CDPs.

Foram fabricados CDPs em diversos níveis de compactação, sob pressões de 100, 200 e 300 MPa. Como os CDPs foram fabricados via prensagem isostática, tem-se o valor de p_b para cada nível de compactação. Foram medidas as dimensões e a massa dos CDPs fabricados, possibilitando o cálculo da densidade (Tabelas 4.1 e 4.2, páginas 55 e 56, respectivamente). A partir do valor da densidade, calcula-se a deformação plástica volumétrica (ε_{vol}^p) em relação ao estado inicial (pó solto) através da Equação 3.1.

$$\varepsilon_{vol}^p = \ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_0}\right) \quad (3.1)$$

sendo ρ_0 a densidade aparente, correspondente àquela do pó solto. Segundo laudo fornecido pela fabricante do material $\rho_0 = 3,04 \text{ g cm}^{-3}$, Anexo A.

Por fim, obteve-se os valores de deformação plástica volumétrica (ε_{vol}^p) em função da tensão aplicada na prensagem isostática (p_b), conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.13 (página 30).

3.2.3 Ensaios Mecânicos com auxílio da técnica de CID

Com o objetivo de compreender o efeito do aumento da densidade relativa do compactado sobre as propriedades mecânicas do BSM-1018, realizaram-se ensaios de compressão simples e de compressão diametral em CDPs compactados em diferentes níveis de pressão (diferentes densidades relativas). Esses ensaios foram realizados em uma máquina com atuador servo-hidráulico, marca MTS, modelo 810, equipada com uma célula de carga de 50 kN de capacidade máxima.

As fotografias para a aplicação da técnica de CID foram capturadas em instantes determinados antes e durante os ensaios, com câmeras digitais de alta resolução, tipo reflex, marca Canon. Foi utilizada iluminação artificial com LEDs.

A partir do tratamento das imagens digitais com o auxílio do programa Correli-Q4 (cedido pelo LMT-Cachan, França) foram obtidos os campos de deslocamentos e de deformações que atuam na face fotografada do CDP.

3.2.4 Superfície de Drucker-Prager (d e β)

Na Figura 3.4 estão ilustrados, esquematicamente, diferentes ensaios mecânicos que podem ser utilizados para determinação dos parâmetros das superfícies F_s e F_c . As linhas coloridas (em azul e em vermelho) representam as trajetórias do incremento de tensão em cada modalidade de ensaio e os pontos, sobre a superfície de escoamento, representam o estado de tensões referente ao escoamento plástico.

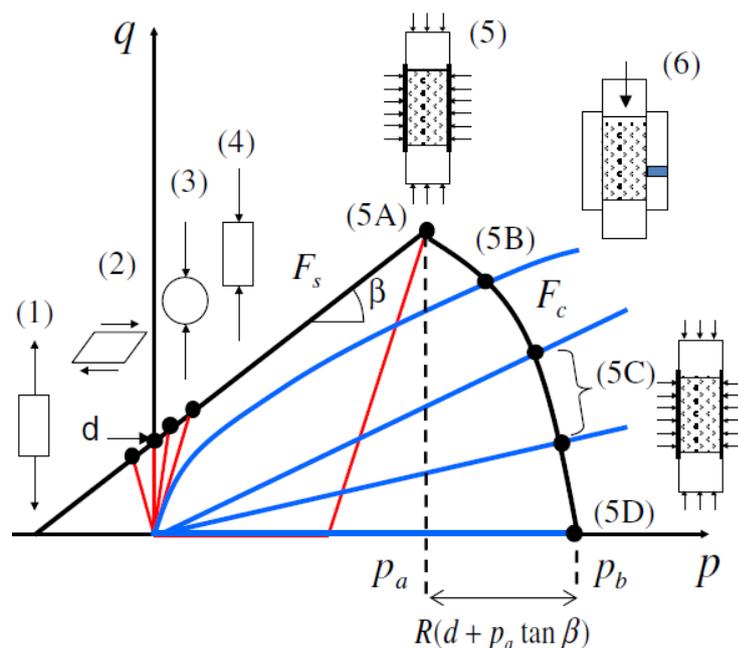


Figura 3.4 Modelo de Drucker-Prager/Cap: procedimentos experimentais para determinação dos parâmetros. Superfície F_s : (1) Ensaio de tração; (2) Ensaio de torção; (3) Ensaio de Compressão diametral; (4) Ensaio de compressão uniaxial. Exemplos de ensaios triaxiais que permitem a identificação da Superfície F_c : (5A) (5B) (5C) (5D) [44].

Como a superfície de Drucker-Prager (F_s) é linear no plano p vs. q , os parâmetros d e β podem ser obtidos através da combinação dos resultados de, no mínimo, dois ensaios mecânicos. Neste trabalho, a superfície F_s foi determinada por meio da identificação da tensão de escoamento em ensaios de compressão uniaxial e de compressão diametral, conforme ilustrado na Figura 3.5.

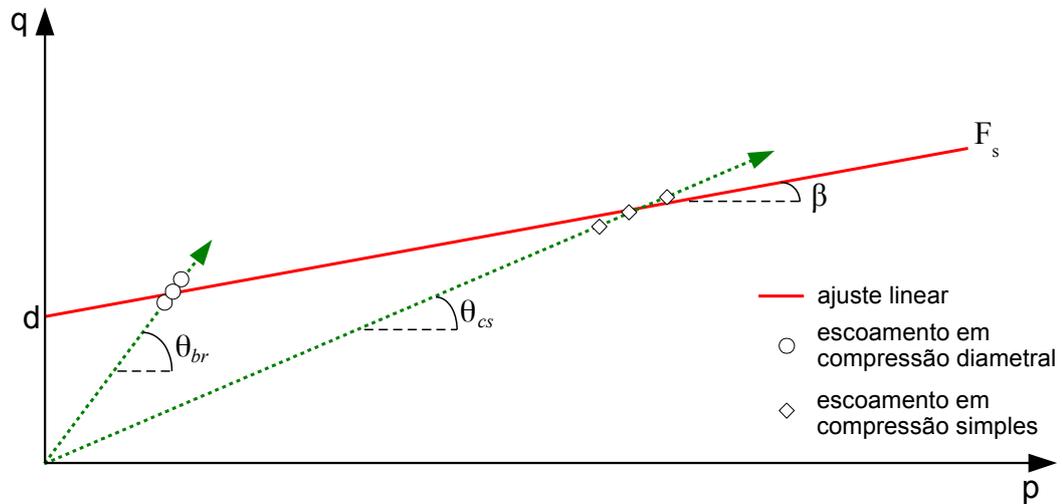


Figura 3.5 Trajetos do incremento de tensão para os ensaios mecânicos de compressão simples (cs) e compressão diametral (br).

O ensaio de compressão simples implica em um estado de tensões uniaxial, e o tensor que representa o ensaio pode ser escrito na forma da Equação 3.2.

$$[\sigma_{cs}] = \begin{bmatrix} -\frac{F_{cs}}{A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

sendo F_{cs} o módulo da força aplicada e A a área da seção transversal do CDP. Tem-se, portanto: $-\frac{F_{cs}}{A} = \sigma_c$ (compressão).

Pode-se, então, reescrever as Equações 2.15 e 2.11 da seguinte forma:

$$q = \sqrt{(\sigma_c)^2} = |\sigma_c| \quad (3.3)$$

$$p = -\frac{\sigma_c}{3} \quad (3.4)$$

De acordo com a Norma ASTM D3967-08, o ensaio de compressão diametral consiste na aplicação de uma carga, F_{br} , em um disco (diâmetro D e espessura t , conforme ilustrado na Figura 3.6) ao longo de dois pontos diametralmente opostos, induzindo um estado plano tensões no centro do CDP (representado pelo

tensor descrito na Equação 3.5) - os discos devem possuir $0,20 < \frac{t}{D} < 0,75$ para que a hipótese de estado plano de tensões seja assumida.

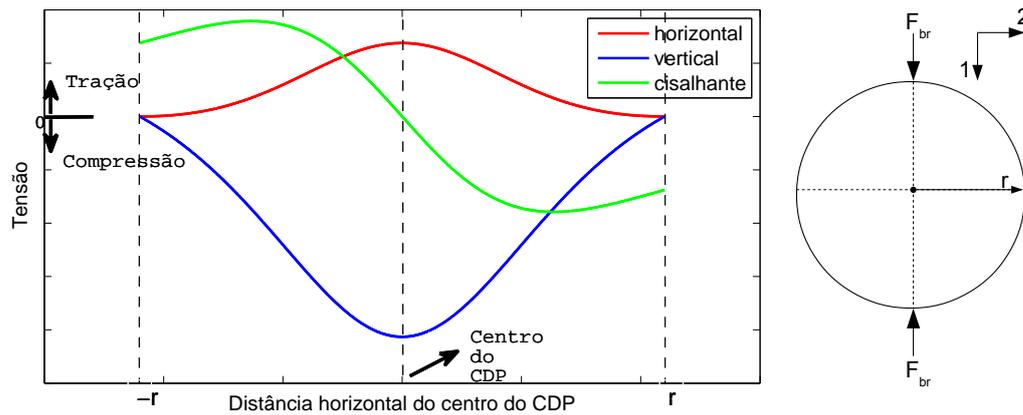


Figura 3.6 Campo de tensões no plano de carregamento durante o ensaio brasileiro: solução analítica.

Na Figura 3.6 é mostrada a solução analítica para o campo de tensões atuante no plano transversal médio do CDP durante a etapa inicial de carregamento elástico no ensaio de compressão diametral. A linha vertical tracejada representa o centro do CDP e observa-se que nesta região central ocorrem tensões de natureza trativa na direção horizontal e de natureza compressiva na vertical (direção de aplicação da carga). O tensor de tensões resulta em:

$$[\sigma_{br}] = \begin{bmatrix} -\frac{6F_{br}}{\pi Dt} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2F_{br}}{\pi Dt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

sendo F_{br} a força, em módulo, exercida pelo atuador, D o diâmetro do CDP e t a espessura do CDP. Tem-se, na direção 1: $-3\sigma_{br} = -\frac{6F_{br}}{\pi Dt}$ (compressão). E, na direção 2: $\sigma_{br} = \frac{2F_{br}}{\pi Dt}$ (tração).

Para o caso da compressão diametral, pode-se reescrever as Equações de p

e q , Equações 2.15 e 2.11, respectivamente, da seguinte maneira:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} [(-3\sigma_{br} - \sigma_{br})^2 + (\sigma_{br} - 0)^2 + (-3\sigma_{br} - 0)^2]} = \sigma_{br} \sqrt{13} \quad (3.6)$$

$$p = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = -\frac{-3\sigma_{br} + \sigma_{br} + 0}{3} = \frac{2\sigma_{br}}{3} \quad (3.7)$$

Portanto, de acordo com as Equações 3.8 e 3.9, os trajetos do incremento de tensão, no plano p vs. q , para os ensaios de compressão simples e compressão diametral são conforme ilustrado na Figura 3.5. Neste caso, tem-se $\theta_{cs} = 71,57^\circ$ e $\theta_{br} = 79,52^\circ$. Indicando-se os pontos referentes às tensões de escoamento obtidas em ensaios de compressão simples e de compressão diametral no plano p vs. q , identifica-se a superfície F_s conforme ilustrado na Figura 3.5.

$$\text{Compr. Simples : } \begin{cases} p = -\frac{\sigma_c}{3} \\ q = \sigma_c \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\text{Compr. Diametral : } \begin{cases} p = \frac{2\sigma_{br}}{3} \\ q = \sigma_{br} \sqrt{13} \end{cases} \quad (3.9)$$

A superfície de Drucker-Prager foi identificada para o material compactado em diferentes níveis de pressão com o objetivo de avaliar a evolução dos parâmetros do modelo com a densificação mecânica do pó, conforme ilustrado na Figura 3.7.

3.2.5 Critério para identificação do limite elástico

Como visto, o comportamento elástico não linear dos materiais porosos torna complexa a identificação do limite elástico em ensaios mecânicos. Portanto, o critério de escoamento proposto é baseado no fenômeno de dilatância (Figura 3.8).

A dilatância pode ser definida como o aumento de volume, causado ao material, devido à tensão de cisalhamento. Como ilustrado esquematicamente na Figura 3.8, a aplicação de carregamentos com parcelas desviadoras (q) pode causar um desempacotamento das partículas que, por sua vez, causa um aumento no volume do material. Sendo assim, pode-se estabelecer que quando

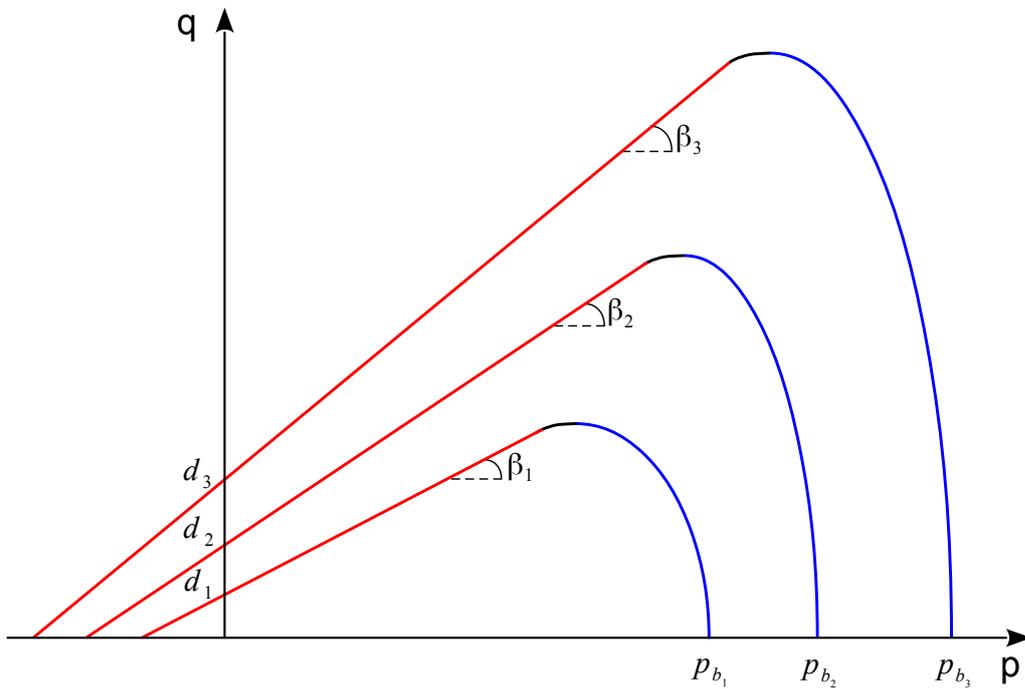


Figura 3.7 Evolução dos parâmetros do modelo de material com o aumento da densidade relativa do material compactado.

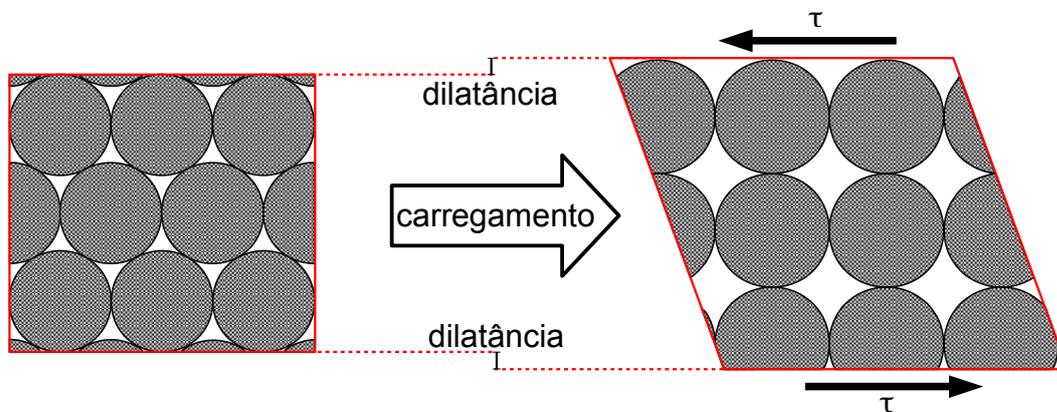


Figura 3.8 Representação esquemática do fenômeno da dilatância, em que há desempacotamento das partículas do pó associada a uma tensão cisalhante crítica.

um valor limite da tensão de von Mises é atingido, denominado aqui de q^{esc} , inicia-se o processo de escoamento segundo a superfície de Drucker-Prager. O valor de q^{esc} pode ser definido como aquele que supera as forças de coesão entre as partículas do compactado verde que, em grande parte, advém de contatos mecânicos e atrito, causando um aumento permanente no volume ocupado pelas mesmas. Macroscopicamente, pode-se analisar a evolução da deformação

volumétrica (ε_{vol}) como parâmetro para identificação do escoamento. Neste sentido, a técnica de CID tem importância crucial uma vez que possibilita avaliar ε_{vol} durante os ensaios mecânicos.

Neste trabalho, o limite elástico do material ensaiado em compressão simples e em compressão diametral foi definido em função dos primeiros estágios de aparecimento do mecanismo de dilatância. A hipótese adotada para o limite elástico foi verificada experimentalmente através de ensaios mecânicos cíclicos e será discutida com maiores detalhes na Seção 4.5 (página 73), sendo que os descarregamentos possibilitam estimar quando o mecanismo de dilatância ocorre de forma permanente.

3.2.6 Parâmetros elásticos

Tipicamente, materiais porosos apresentam elasticidade não linear. Neste trabalho, o comportamento mecânico sob elasticidade foi investigado durante as fases de descarregamento das curvas tensão-deformação em compressão simples, uma vez que, em situações de descarregamento, pode-se garantir que o material esteja em regime elástico. Na Figura 3.9 está representada, de maneira esquemática, dois ciclos (i e $i+1$) de carregamento-descarregamento de uma curva tensão vs. deformação típica para um ensaio cíclico de compressão simples em um compactado verde. O procedimento adotado para identificação do módulo elástico consiste em linearizar pequenos trechos da curva (de 3 a 5 pontos), o que possibilita a análise da inclinação da curva de descarregamento em função da tensão aplicada (σ_{11}) para os diferentes ciclos do ensaio mecânico. O módulo de elasticidade é então obtido em função do carregamento aplicado segundo a equação:

$$E_i(\sigma_{11}) = \tan(\theta_{E_i}) \quad (3.10)$$

A partir da Equação 3.10, traçou-se, para cada nível de compactação estudado e para cada trecho de descarregamento um gráfico do valor do Módulo elástico em função da tensão normal média em que o material está sujeito.

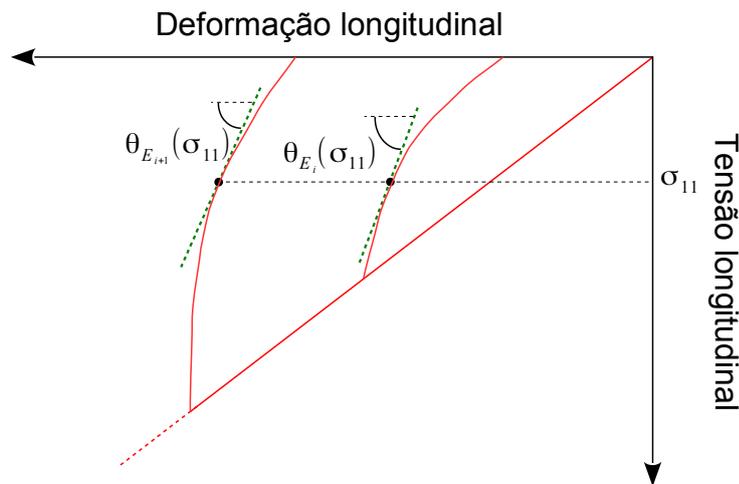


Figura 3.9 Representação esquemática da metodologia adotada para determinação do módulo elástico do material.

Analogamente, a investigação do coeficiente de Poisson é feita a partir das inclinações dos trechos de descarregamento da curva deformação transversal vs. deformação longitudinal em compressão simples correspondente ao descarregamento, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 3.10 - a função linear foi escolhida com base nos dados experimentais. O coeficiente de Poisson é então obtido em função do carregamento aplicado segundo a equação:

$$\nu_i(\sigma_{11}) = \tan(\theta_{\nu_i}) \quad (3.11)$$

A partir da Equação 3.10, traçou-se, para cada nível de compactação estudado e para cada trecho de descarregamento um gráfico do valor do coeficiente de Poisson em função da tensão normal média em que o material está sujeito.

A investigação da elasticidade foi aplicada no material compactado em diferentes níveis de pressão (diferentes densidades relativas) com o objetivo de avaliar a evolução dos parâmetros elásticos do modelo com a densificação mecânica do pó e com o nível de carregamento (tensão normal média).

3.2.7 Simulação computacional via MEF

Foi realizada uma simulação computacional do processo de prensagem uniaxial em matriz rígida do pó metálico BSM-1018. A modelagem do processo foi

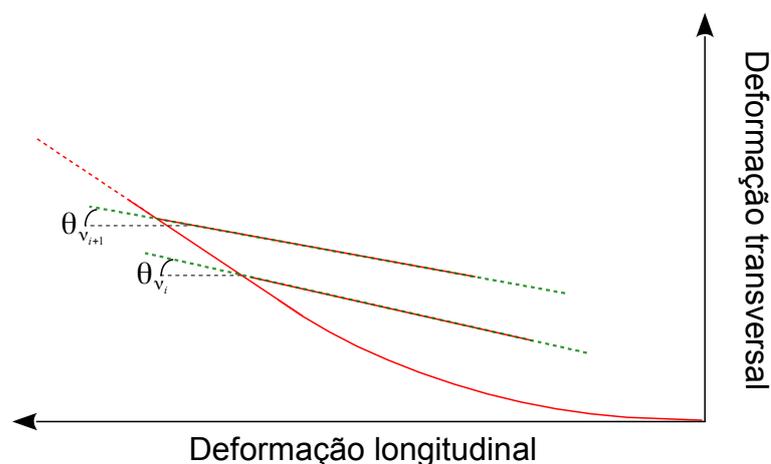


Figura 3.10 Representação esquemática da metodologia adotada para determinação do coeficiente de Poisson no regime elástico do material.

realizada utilizando-se o MEF por meio do programa AbaqusTM v6.14. O modelo geométrico é apresentado na Figura 3.11.

O modelo axissimétrico (Figura 3.11) é composto por quatro estruturas: punção, matriz, tampa inferior e peça a ser compactada (pó metálico). Todas as quatro estruturas foram modeladas com elementos axissimétricos de 8 nós (CAX8). O punção e a tampa inferior foram considerados corpos rígidos. A matriz foi modelada com modelo de material linear elástico; com $E = 210$ GPa e $\nu = 0,3$, valores típicos para aços ferramenta. O pó metálico foi modelado com modelo de material elasto-plástico - região elástica linear e modelo de plasticidade de Drucker-Prager/*Cap*. Nas interfaces das estruturas foram definidas interações de contato do tipo *surface-to-surface* com atrito tangencial definido com algoritmo do tipo penalidade e comportamento normal com algoritmo *hard*. Na interface entre a parede da matriz e o pó foi utilizado o algoritmo de contato *finite sliding* e nas interfaces matriz/tampa inferior e punção/pó o algoritmo de contato utilizado foi o *small sliding*. A interação entre as superfícies verticais da tampa inferior e da matriz, mostrada em verde, foi definida como um MPC (*multi-point constraint*) do tipo *tie* para que não haja deslocamento relativo entre essas superfícies. No eixo de simetria foi imposta uma condição de contorno que impede o movimento dos elementos na direção radial - não é necessário restringir o giro dos elementos em torno de z , pois os elementos do tipo CAX8 não possuem grau de liberdade

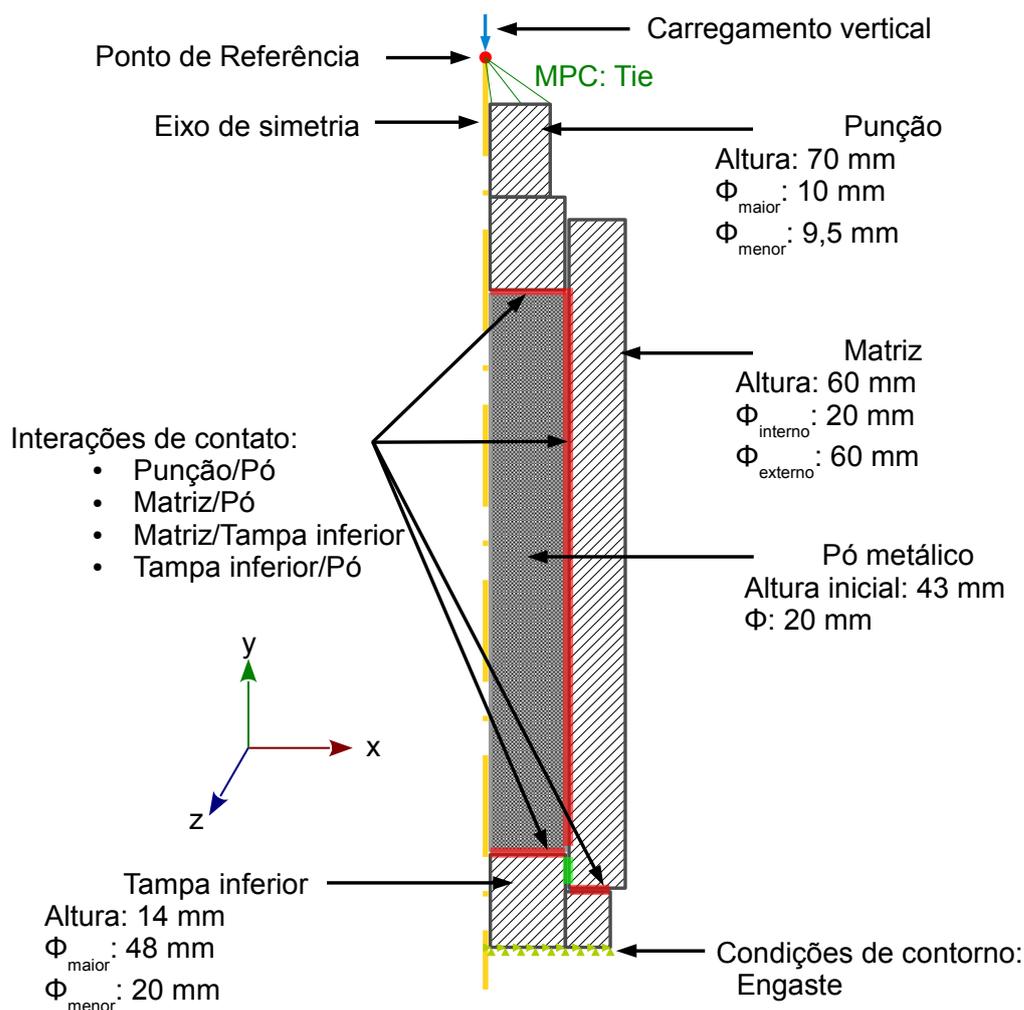


Figura 3.11 Figura esquemática do modelo axissimétrico para a simulação da prensagem uniaxial em matriz rígida.

para girar. A malha gerada para a simulação pode ser vista na Figura 3.12, o modelo geométrico do pó metálico conta com 203 elementos em sua malha.

O processo de compressão uniaxial em matriz rígida foi reproduzido experimentalmente para a validação do modelo utilizado na simulação computacional. A matriz, o punção e a tampa inferior foram fabricados em aço ferramenta (VC-131) e acoplados a uma máquina universal de ensaios. Foram realizados três ciclos sucessivos de carregamento seguidos de descarregamento. Realizou-se também um ensaio “branco”, em que o dispositivo de compactação foi submetido ao mesmo procedimento de ensaio, com o objetivo de subtrair a flexibilidade do sistema. E, por fim comparou-se as curvas de carga vs. deslocamento obtidas experimentalmente e via MEF. As dimensões finais da peça compactada também

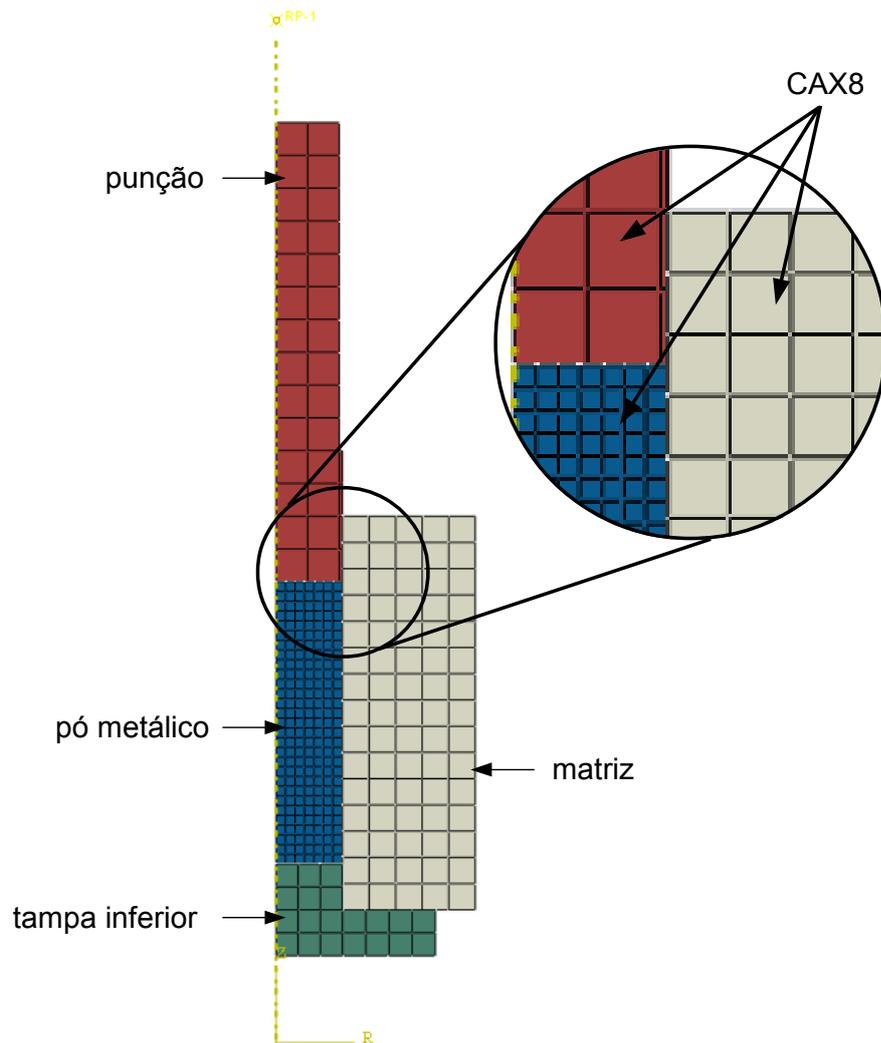


Figura 3.12 Malha construída no *software* AbaqusTM v6.14 para a simulação da prensagem uniaxial em matriz rígida.

foram comparadas.

O carregamento cíclico foi simulado através da aplicação de um deslocamento com amplitude variável em um ponto de referência, conforme esquematizado na Figura 3.11, que, por sua vez, é ligado ao punção por meio de um MPC do tipo *tie*, esse procedimento facilita a análise dos resultados de força de reação no punção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais e discussões acerca dos mesmos e, por fim, apresenta-se uma simulação computacional do processo de prensagem a frio do pó metálico em estudo (BSM-1018).

4.1 Caracterização dos CDPs

Foram fabricados CDPs para os ensaios mecânicos de compressão simples e compressão diametral. Para os ensaios de compressão simples, os CDPs apresentam geometria paralelepípedica (viabilizando a utilização da técnica de CID) enquanto que os ensaios de compressão diametral foram realizados em CDPs com a geometria de discos - os CDPs foram fabricados de acordo com o procedimento descrito na Seção 3.2.1. A caracterização completa dos CDPs pode ser consultada nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Caracterização experimental dos CDPs fabricados para realização dos ensaios de compressão simples.

tipo de ensaio	nome	pressão de compactação (MPa)	massa (g)	altura (mm)	espessura (mm)	largura (mm)	razão de aspecto	volume (cm ³)	densidade (g cm ⁻³)	densidade relativa
compressão simples cíclico	cs82-01	100	282,50	97,50	22,50	22,40	4,34	49,14	5,75	0,82
compressão simples	cs82-02	100	72,20	33,60	19,00	19,60	1,74	12,51	5,77	
compressão simples	cs91-01	200	330,90	109,45	21,90	21,80	5,01	52,25	6,33	0,91
compressão simples cíclico	cs91-02	200	120,50	38,05	22,35	22,20	1,71	18,88	6,38	
compressão simples	cs96-01	300	325,90	105,85	21,35	21,55	4,93	48,70	6,69	0,96
compressão simples	cs96-02	300	127,50	39,35	21,85	21,95	1,80	18,87	6,76	
compressão simples cíclico	cs96-03	300	129,00	40,15	21,80	21,85	1,84	19,12	6,75	

4.2 Lei de encruamento (p_b vs. ε_{vol}^p)

A lei de encruamento foi identificada concomitante à fabricação dos CDPs. Os valores médios de densidade, densidade relativa e de deformação plástica

Tabela 4.2 Caracterização experimental dos CDPs fabricados para realização dos ensaios de compressão diametral.

tipo de ensaio	nome	pressão de compactação (MPa)	massa (g)	diâmetro (mm)	espessura (mm)	razão de aspecto	volume (cm ³)	densidade (g cm ⁻³)	densidade relativa
compressão diametral	br82-01	100	128,80	37,00	21,00	0,57	22,58	5,70	0,82
compressão diametral	br82-02	100	129,80	36,75	21,30	0,58	22,59	5,75	
compressão diametral	br82-03	100	10,50	19,10	6,40	0,34	1,83	5,73	
compressão diametral	br91-01	200	129,60	35,45	20,70	0,58	20,43	6,34	0,91
compressão diametral cíclico	br91-02	200	128,50	35,50	20,30	0,57	20,09	6,40	
compressão diametral	br96-01	300	129,10	34,90	20,05	0,57	19,18	6,73	0,96
compressão diametral cíclico	br96-02	300	129,70	34,75	20,40	0,59	19,35	6,70	
compressão diametral	br96-03	300	129,80	34,85	20,37	0,58	19,43	6,68	
compressão diametral	br96-04	300	129,20	34,82	20,25	0,58	19,28	6,70	

volumétrica para cada nível de compactação estudado (P) são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Valores médios de densidade, densidade relativa e de deformação plástica volumétrica calculados para CDPs compactados em diferentes níveis de pressão.

* Valores fornecidos pelo fabricante. ** Considerou-se que a 600 MPa o pó atinge densificação máxima.

P (MPa)	Densidade (g cm ⁻³)	Densidade relativa (%)	ε_{vol}^p
0*	3,04	43,4	0,00
100	5,74	82	0,60
200	6,36	91	0,71
300	6,72	96	0,76
600*	7,01	100**	0,80

O nível de compactação de 600 MPa não foi estudado experimentalmente, o valor da densidade do compactado neste nível de tensão foi fornecido pelo fabricante. A densidade aparente (referente ao pó solto) também foi um dado fornecido pelo fabricante - Anexo A. Comumente, em processos industriais da MP, o pó metálico é compactado a tensões próximas a 600 MPa, por este motivo, neste trabalho a densidade do material compactado a 600 MPa será considerada como a máxima densificação mecânica alcançada pelo pó. Este foi o valor de referência utilizado no cálculo da densidade relativa.

Observa-se, na Figura 4.1 que com o aumento da pressão isostática compressiva, diminui-se a taxa de densificação do material - consequência do fenô-

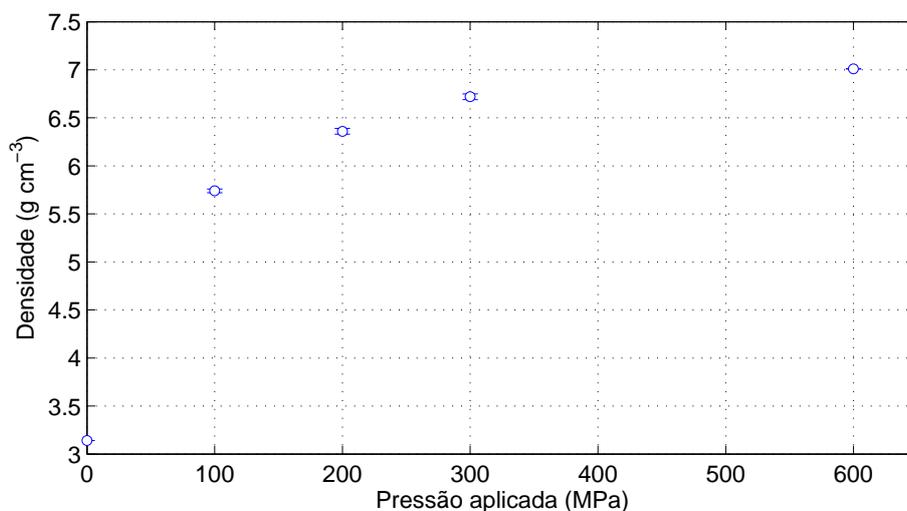


Figura 4.1 Evolução da densidade do pó em função do aumento da pressão hidrostática de compressão aplicada. As barras de erro são simétricas e representam uma unidade de desvio padrão.

meno de encruamento; corroborando a fenomenologia introduzida na Seção 2.4 e mostrada na Figura 2.2 (página 10).

Na Figura 4.2 está apresentada a curva p_b vs. ε_{vol}^p que possibilita ao AbaqusTM v6.14 estabelecer a lei de encruamento da superfície *cap*. Os dados foram obtidos a partir dos valores de densidade apresentados na Tabela 4.3 aplicados na Equação 3.1 (página 43). Foi realizado um ajuste numérico de uma função exponencial ($f(x) = a \exp(bx)$) para representar a tendência apresentada pelos dados experimentais. Os coeficientes do ajuste são mostrados na Tabela 4.4. No *software* AbaqusTM v6.14 esta lei é inserida em forma de uma tabela e este realiza uma interpolação linear entre os pontos. Os dados de entrada podem ser tomados da função ajustada ou diretamente dos pontos experimentais.

Tabela 4.4 Valores identificados para o ajuste dos pontos experimentais da curva de encruamento

parâmetro	valor identificado
a	0,02634
b	12,49

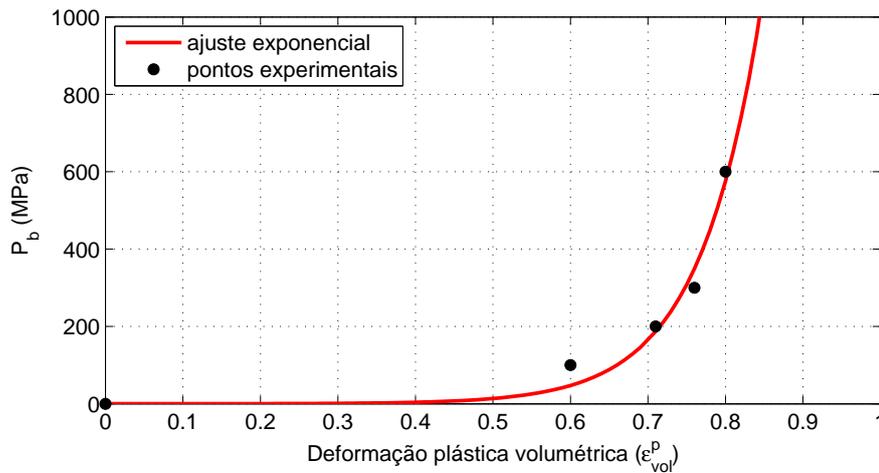


Figura 4.2 Curva para obtenção da lei de encruamento da superfície F_s obtida a partir da prensagem isostática em diferentes níveis de pressão.

4.3 Ensaios de compressão simples

A fim de avaliar a evolução das propriedades mecânicas do material com a densificação mecânica, estudaram-se três níveis de compactação diferentes: 100, 200 e 300 MPa. As medidas de deformação apresentadas nesta seção foram obtidas com o auxílio da técnica de CID.

A terminologia utilizada para se estabelecer as variáveis e direções associadas aos ensaios mecânicos apresentados neste trabalho foi:

- ε_{11} : deformação normal na direção 1 - direção longitudinal do CDP (vertical) ou direção do carregamento;
- ε_{22} : deformação normal na direção 2 - direção transversal do CDP (horizontal) ou direção perpendicular à direção do carregamento;
- U_{11} : deslocamento na direção 1;
- U_{22} : deslocamento na direção 2.

Na Figura 4.3 é apresentado um exemplo típico de alguns resultados que podem ser obtidos a partir da técnica de CID aplicada ao ensaio de compressão uniaxial.

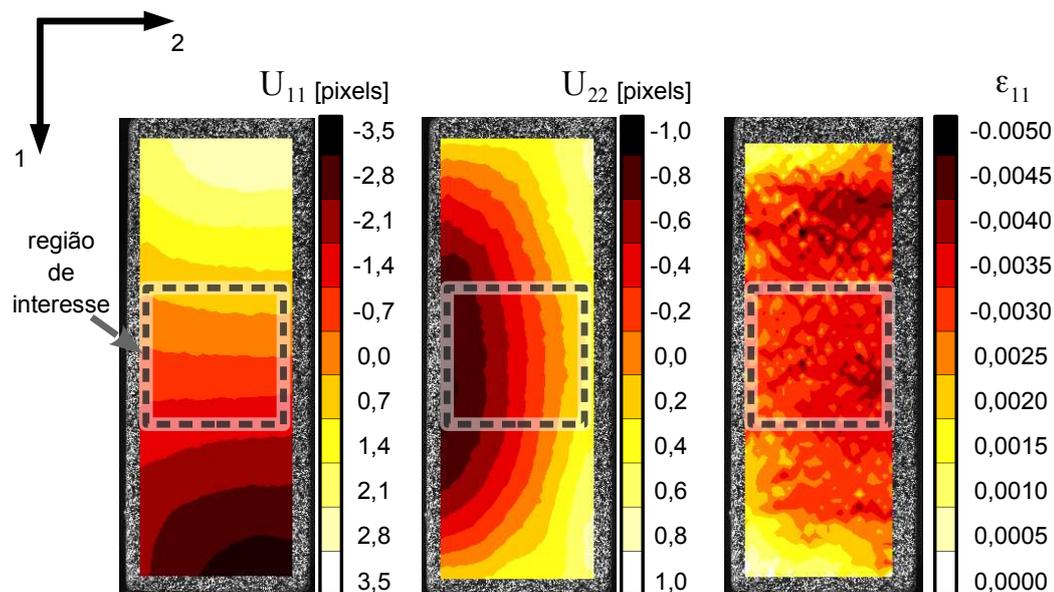


Figura 4.3 Representação esquemática dos campos de deslocamentos nas direções 1 (U_{11}) e 2 (U_{22}) e do campo de deformações na direção 1 (ϵ_{11}) calculados pela CID em um ensaio de compressão simples (CDP $cs82 - 01$ - imagem 44). Os deslocamentos de corpo rígido foram subtraídos

Os resultados de campos de deslocamento (em pixels: relação de 1 pixel = $19,34 \mu\text{m}$) na direção longitudinal (U_{11}), campos de deslocamento na direção transversal (U_{22}) e de deformação na direção longitudinal (ϵ_{11}) são mostrados para a imagem 44 (no total de 179) do ensaio no CDP $cs82 - 01$. Esta imagem corresponde ao pico de tensão ($\sigma_{11} = -14,47 \text{ MPa}$) do terceiro ciclo do ensaio apresentado na Figura 4.4. Neste exemplo, os deslocamentos de corpo rígido são subtraídos, restando apenas os deslocamentos que causam deformações no CDP e observa-se que, na região de interesse (tomada como referência para a obtenção dos dados), os isovalores de deslocamentos são paralelos entre si e perpendiculares à direção analisada. Esta observação possibilita constatar a qualidade do ensaio, podendo assim considerá-lo ou descartá-lo da análise. Em relação ao campo de deformação apresentado, observa-se que este pode ser considerado homogêneo dentro da região de interesse analisada.

O cálculo das deformações volumétrica e desviadora foram feitos partindo das Equações 2.16 e 2.19. Considerando o caso uniaxial de tensões e a hipótese de isotropia do material, foi assumido que as deformações nas duas direções

transversais são iguais ($\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$), resultando em:

$$\varepsilon_{vol}^{cs} = \varepsilon_{11} + 2\varepsilon_{22} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{dev}^{cs} = \frac{2}{3}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \quad (4.2)$$

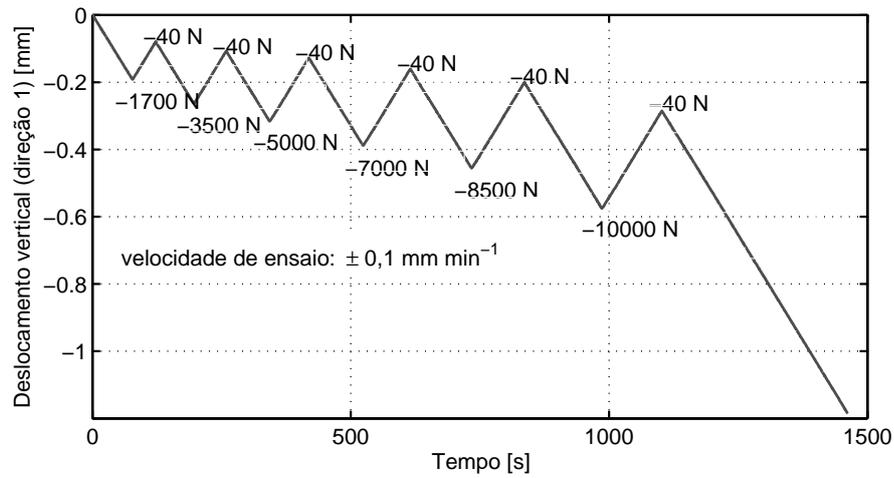
4.3.1 Ensaios cíclicos

Para avaliação das propriedades elasto-plásticas do material foram conduzidos ensaios de compressão simples com ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento. Os ciclos foram realizados com os objetivos de avaliar o aparecimento de deformações residuais, auxiliando na identificação da tensão de escoamento, e de auxiliar na identificação das propriedades elásticas, discutida adiante. Já os ensaios monotônicos tiveram como objetivo a avaliação da repetibilidade dos resultados. Utilizou-se pré-carga de -20 N e a velocidade dos ensaios foi de $0,1 \text{ mm min}^{-1}$ em todos os ensaios.

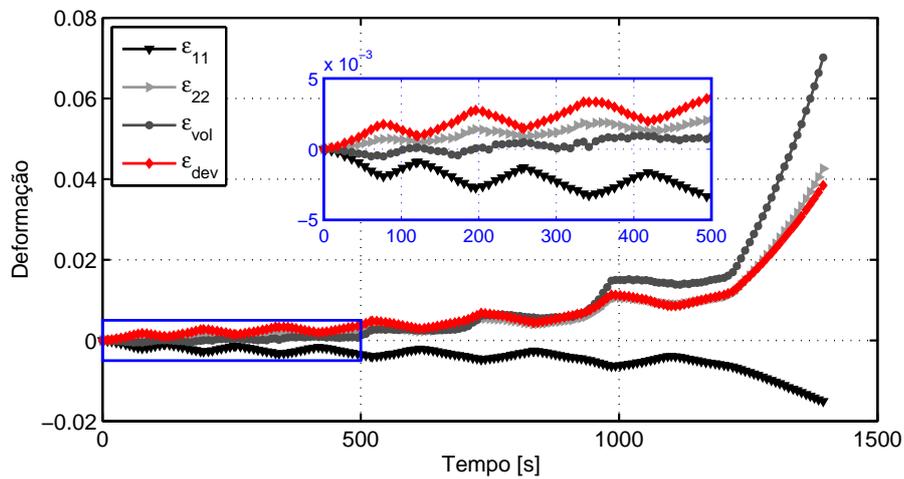
4.3.1.1 Corpo de prova compactado sob 100 MPa ($\rho_{rel} = 0,82$)

Foram programados ciclos de carregamento e descarregamento e um carregamento final que levou o material à falha. Na Figura 4.4 estão traçadas as curvas de deslocamentos prescritos no atuador da máquina de ensaios e das deformações no CDP em função do tempo do ensaio, traçou-se também a curva tensão em função das deformações.

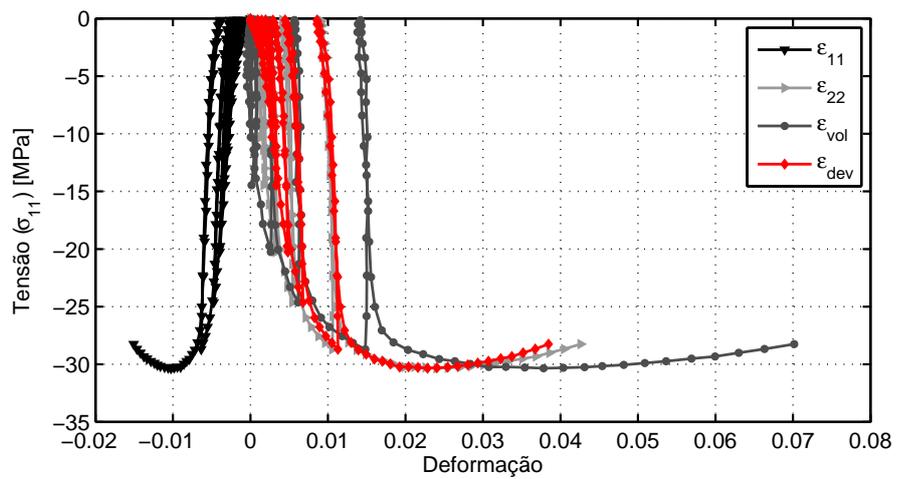
Na Figura 4.4 (a) mostra-se a programação do ensaio, com os picos e vales de força programados para cada ciclo; são, no total, seis ciclos de carregamento-descarregamento e um carregamento final levando o CDP à falha. A velocidade programada para o ensaio foi de $0,15 \text{ mm min}^{-1}$ e a pré-carga utilizada foi de -40 N. O ensaio foi realizado no CDP *cs82 - 01* (Tabela 4.1).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 Ensaio de compressão simples cíclico (CDP cs-82-01): (a) deslocamento do atuador vs. tempo; (b) deformações vs. tempo; (c) tensão vs. deformações.

Na Figura 4.4 (b) estão traçadas as deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} em função do tempo de ensaio. Nota-se que a deformação volumétrica é levemente negativa no início do ensaio, revelando uma tendência de compactação adicional do material. Esta tendência se inverte a partir de um determinado nível de carregamento, fato importante na identificação do escoamento, que será discutido mais adiante.

Na Figura 4.4 (c) são traçadas curvas da tensão aplicada (σ_{11}) em função das deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Nota-se que o material em estudo deforma-se muito pouco até a fratura, sendo que no ponto de tensão máxima (≈ -30 MPa), a deformação $\varepsilon_{11} \approx -0,01$ e a $\varepsilon_{22} \approx 0,02$. A tensão σ_{11} é a tensão verdadeira; as alterações na área do CDP durante o ensaio são calculadas a partir dos valores de ε_{22} e de ε_{33} que, por hipótese, $\varepsilon_{33} = \varepsilon_{22}$. Observa-se um encruamento progressivo do material até a formação do pico de tensão na curva, a queda na tensão deve-se ao dano induzido no material durante o carregamento, isto é, há o aparecimento de macrotrincas que causam “aumento” na área transversal do CDP. Para esta condição de compactação, a razão entre ε_{22} e ε_{11} é bastante elevada e será mostrada adiante (coeficiente de Poisson), causando grande variação volumétrica (7 %) durante o ensaio no ponto de falha.

Analisando os descarregamentos, conclui-se que o material apresenta elasticidade não linear, comportamento típico de materiais porosos - com o aumento da tensão normal média, tende-se a fechar os poros do material, aumentando o contato e a coesão entre as partículas do compactado, tornando-o mais rígido e alterando suas propriedades mecânicas.

Na Figura 4.5 é apresentada uma análise de CID que mostra a evolução de ε_{22} com o carregamento durante o ensaio (CDP cs82-01), as imagens são referentes aos picos de carregamento dos ciclos de 1 a 6 e pode-se constatar o aparecimento de deformações localizadas nas duas últimas imagens, referentes ao quinto e ao sexto ciclo do ensaio. Deformações localizadas são evidências do aumento do dano induzido no material e da formação de macrotrincas, fato importante no estudo das propriedades elásticas que será discutido adiante.

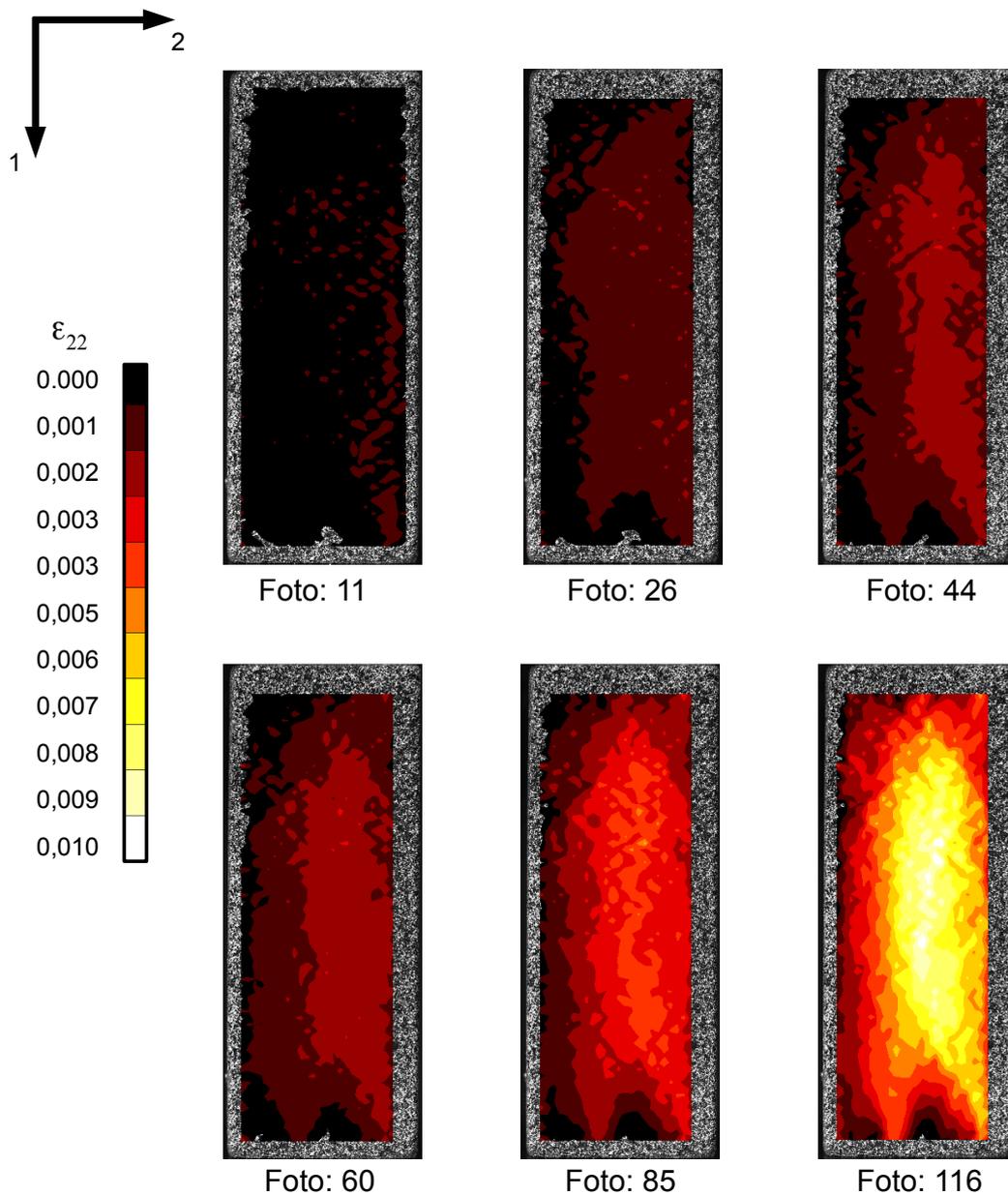


Figura 4.5 Campo de deformações na direção 2 (ϵ_{22}) calculados pela CID (CDP *cs82 - 01* - imagens referentes aos picos dos 6 ciclos do ensaio).

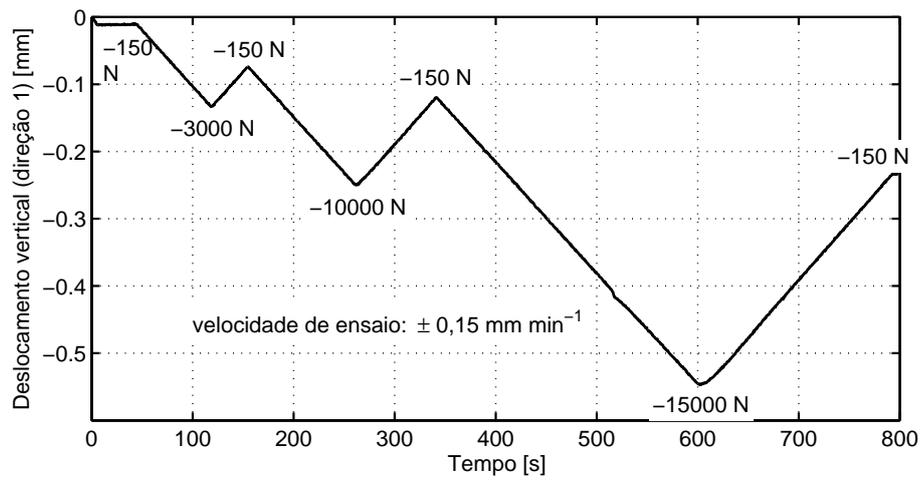
4.3.1.2 Corpo de prova compactado sob 200 MPa ($\rho_{rel} = 0,91$)

Neste caso, por uma limitação da máquina de ensaios (limitada, por segurança, a 35 kN), o material não foi levado até a falha. Na Figura 4.6 (a) mostra-se a programação do ensaio: são, no total, três ciclos de carregamento-descarregamento. A velocidade programada para o ensaio foi de $0,1 \text{ mm min}^{-1}$ e a pré carga utilizada foi de -150 N. O ensaio foi realizado no CDP *cs91 – 02* (Tabela 4.1).

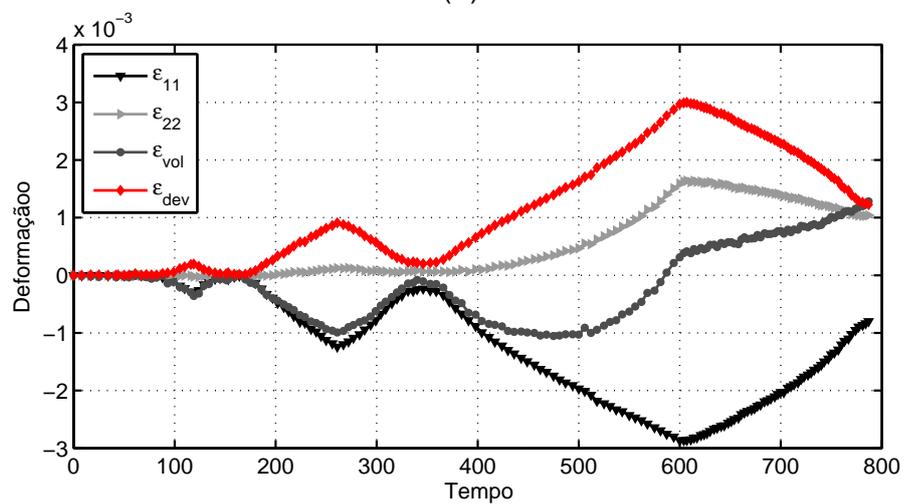
Na Figura 4.6 (b) estão traçadas as deformações ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Neste nível de compactação, notou-se comportamento análogo ao observado na condição de compactação de 100 MPa para a deformação volumétrica.

Na Figura 4.6 (c) são traçadas curvas de σ_{11} em função das deformações ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Nota-se que, em relação ao nível de compactação mais baixo (100 MPa), houve perda de ductilidade, ou seja, o material tornou-se mais rígido e, conseqüentemente, mais frágil. Sendo que, no ponto de tensão máxima ($\approx -70 \text{ MPa}$), a deformação $\varepsilon_{11} \approx -0,003$ e a $\varepsilon_{11} \approx 0,0015$. Nesta condição de compactação, ainda se observa alta ε_{22} , devido ao dano, mas em menor proporção quando comparada ao ensaio realizado no material compactado a 100 MPa. Os descarregamentos mostram a não linearidade do regime elástico.

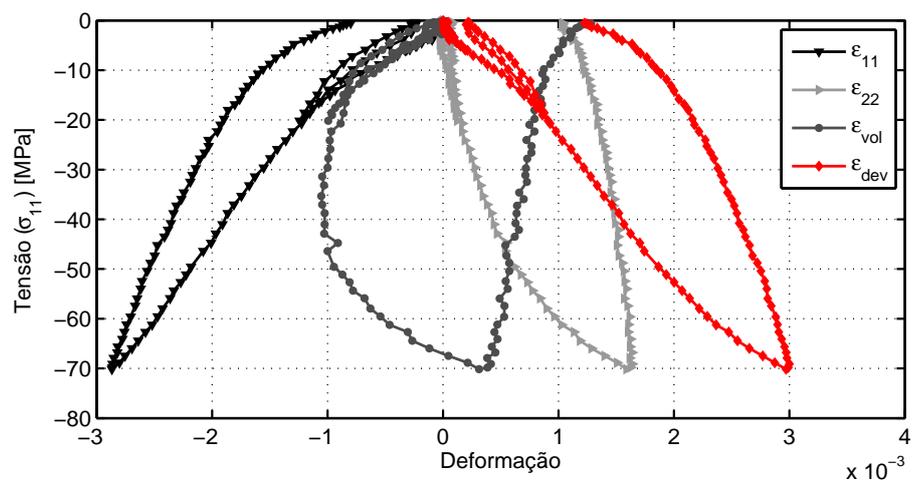
Na Figura 4.5, apresenta-se a evolução de ε_{22} com o carregamento durante o ensaio (CDP *cs91-02*), imagens referentes aos 3 picos de carregamento. Nesta condição de compactação não foi possível levar o CDP à falha, porém a análise de CID mostra que, no último carregamento (terceiro ciclo), houve deformação localizada, evidenciando a formação de dano.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 Ensaio de compressão simples cíclico (CDP cs91-02): (a) deslocamento do atuador vs. tempo; (b) deformações vs. tempo; (c) tensão vs. deformações.

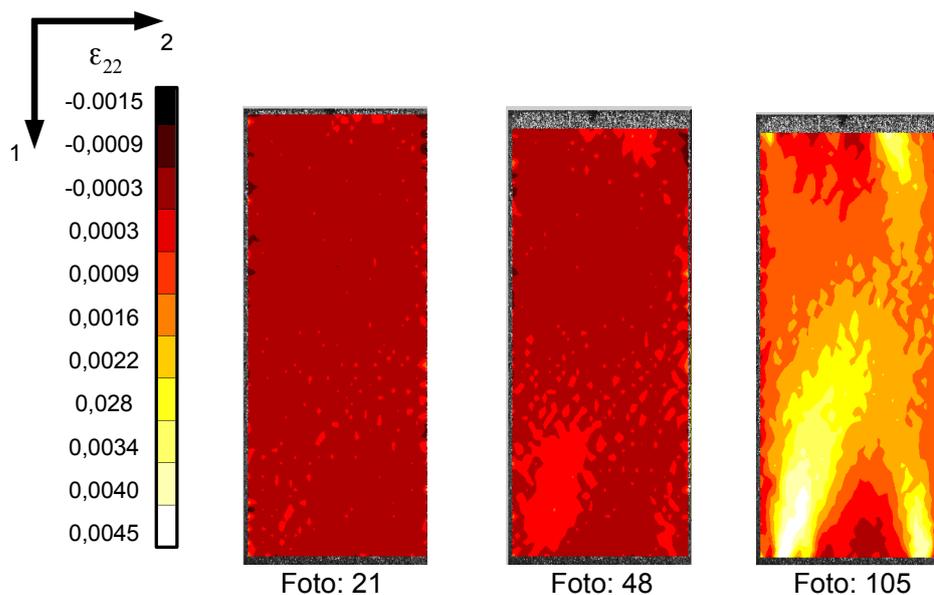


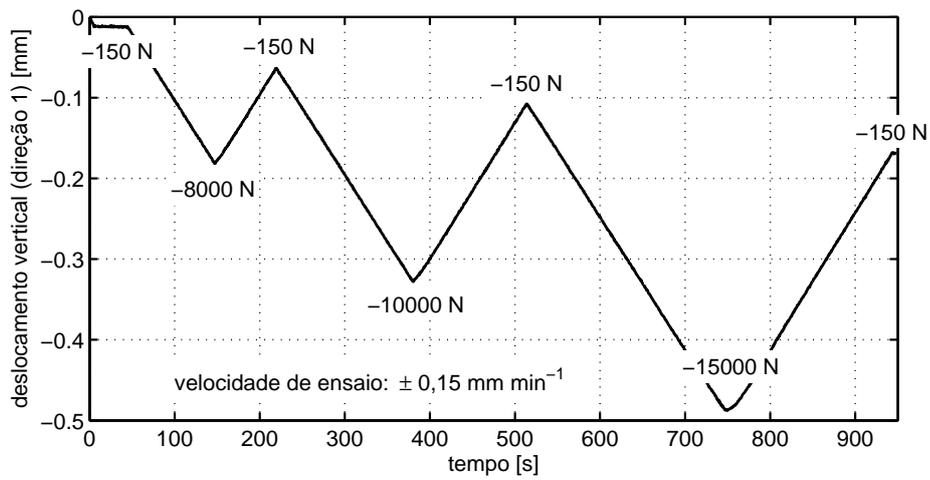
Figura 4.7 Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP $cs91 - 02$ - imagens referentes aos 3 picos dos ciclos do ensaio).

4.3.1.3 Corpo de prova compactado sob 300 MPa ($\rho_{rel} = 0,96$)

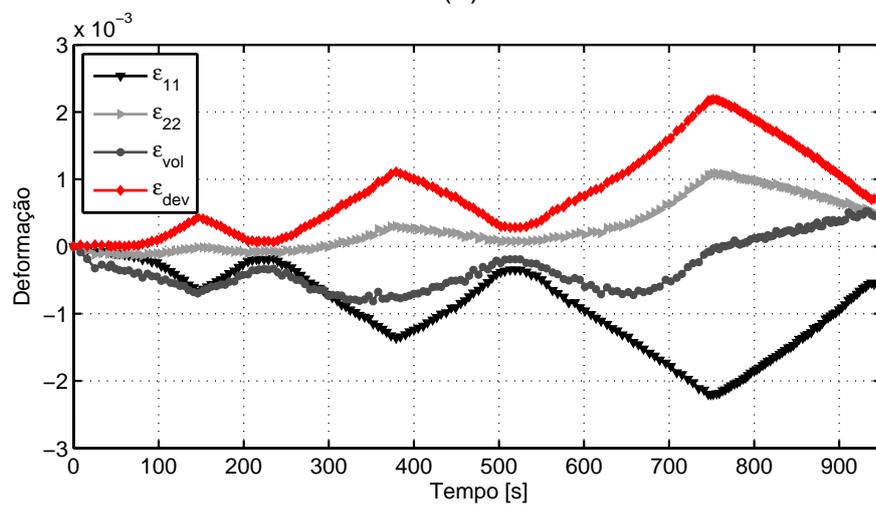
Neste caso, também não foi possível conduzir o ensaio até a falha do material. Na Figura 4.8 (a) mostra-se a programação do ensaio; são, no total, três ciclos de carregamento-descarregamento. A velocidade programada para o ensaio foi de $0,1 \text{ mm min}^{-1}$ e pré-carga de -150 N . O ensaio foi realizado no CDP $cs96 - 03$ (Tabela 4.1).

Na Figura 4.8 (b) estão traçadas: ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Neste nível de compactação, a deformação volumétrica apresentou comportamento análogo ao observado para os outros níveis de compactação.

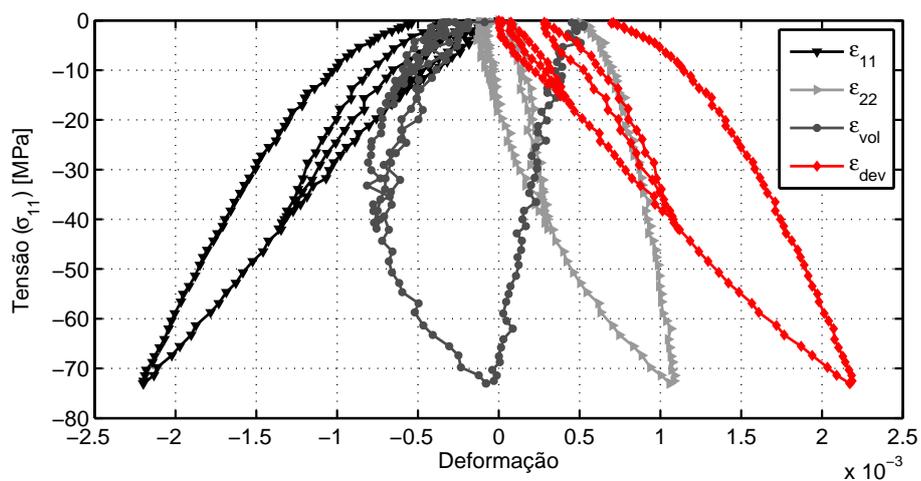
Na Figura 4.8 (c) são traçadas curvas de σ_{11} em função das deformações ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Nota-se que o material se tornou ainda mais frágil em relação aos outros níveis de compactação (100 e 200 MPa), sendo que no ponto de tensão máxima ($\approx -70 \text{ MPa}$), a deformação $\varepsilon_{11} \approx -0,002$ e a $\varepsilon_{22} \approx 0,001$. Analogamente, observou-se elasticidade não linear. Porém, nota-se que, neste nível de compactação, o material apresenta comportamento mecânico mais próximo ao de um sólido coeso; a não linearidade no regime elástico é menos pronunciada e ε_{22} apresenta valores mais baixos em relação aos outros níveis de compactação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 Ensaio de compressão simples cíclico (CDP cs96-03): (a) deslocamento do atuador versus tempo; (b) deformações versus tempo; (c) tensão vs. deformações.

A evolução do campo de deformação ε_{22} com o carregamento durante o ensaio (CDP cs96-03), mostrada na Figura 4.5, evidencia a formação de dano no terceiro ciclo do ensaio.

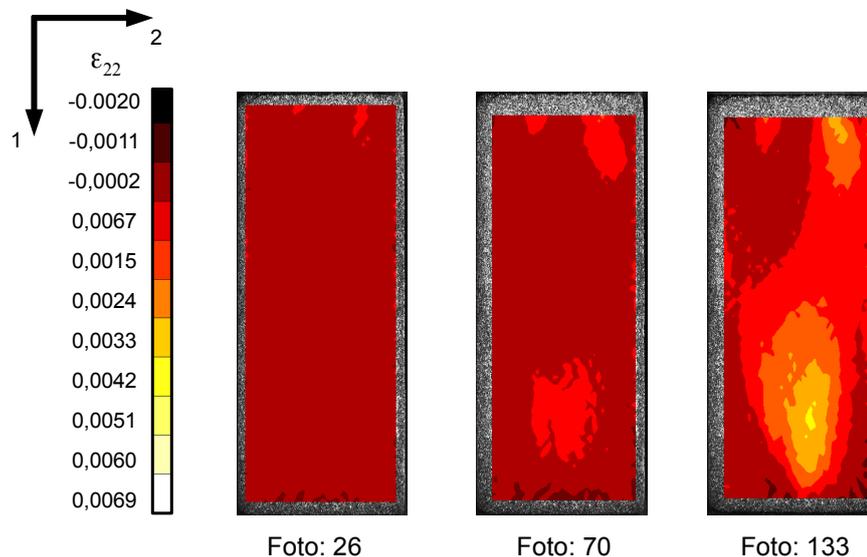


Figura 4.9 Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP cs96 – 03 - imagens referentes aos picos dos 3 ciclos do ensaio).

4.3.2 Ensaios monotônicos

Com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos resultados, foram realizados ensaios de compressão simples monotônicos nos três níveis de densidade relativa estudados. Estes ensaios foram realizados nos CDPs: *cs82 – 02*, *cs91 – 01* e *cs96 – 02* - conforme apresentado na Tabela 4.1, adotando-se uma pré-carga de -40 N e uma velocidade de ensaio de $0,15 \text{ mm min}^{-1}$. Os resultados individuais destes ensaios são apresentados no Apêndice A (página 103).

4.4 Ensaios de compressão diametral

Como visto na Figura 3.4 (página 44), são necessários, ao menos, dois tipos de ensaios mecânicos para determinação dos parâmetros da superfície F_s do modelo de Drucker-Prager. Portanto, foram realizados ensaios de compressão diametral cíclicos e monotônicos. Os ensaios cíclicos foram realizados com o objetivo de avaliar o aparecimento de deformações residuais, auxiliando na identi-

ficação da tensão de escoamento, discutida adiante. Já os ensaios monotônicos tiveram como objetivo a avaliação da repetibilidade dos resultados. Utilizou-se pré-carga de -20 N e a velocidade dos ensaios foi de $0,1 \text{ mm min}^{-1}$ em todos os ensaios.

O ensaio de compressão diametral induz um estado plano de tensões no CDP, contudo tem-se, por efeito de Poisson, um estado triaxial de deformações. Pode-se, então, calcular a deformação na direção 3 (ε_{33}) através da Lei de Hooke (Equação 4.3), assumindo as seguintes hipóteses: meio contínuo e homogêneo, material isotrópico e regime linear elástico (por aproximação).

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (4.3)$$

os parâmetros elásticos utilizados foram os obtidos dos ensaios cíclicos de compressão simples e, tratando-se de um estado plano de tensões: $\sigma_3 = 0$.

Na Figura 4.10 é apresentado um exemplo típico de alguns resultados que podem ser obtidos a partir da técnica de CID aplicada ao ensaio de compressão diametral.

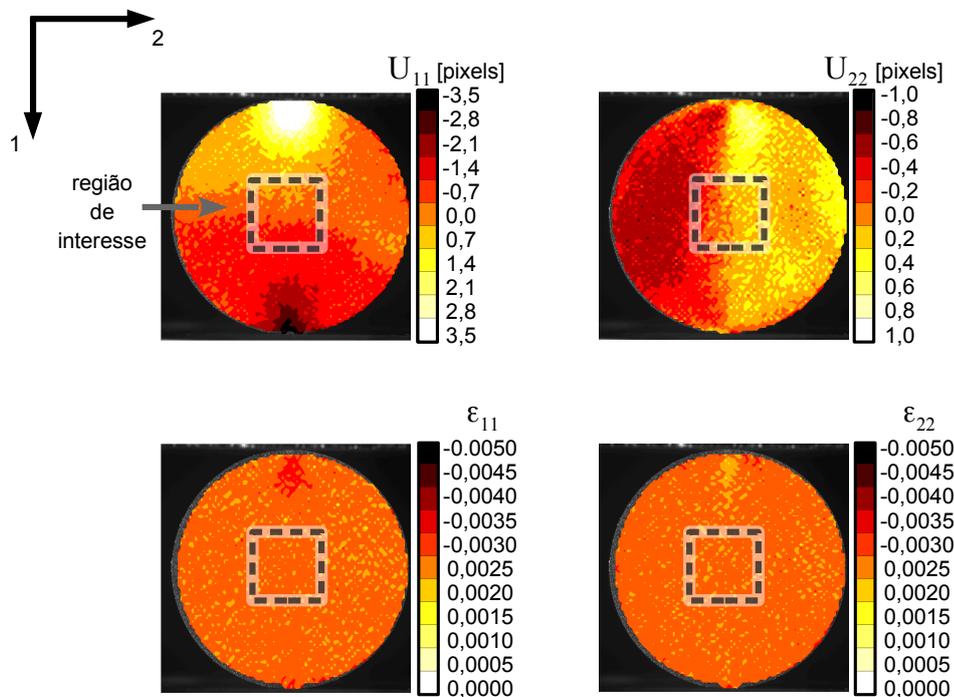


Figura 4.10 Representação esquemática dos campos de deslocamentos nas direções 1 (U_{11}) e 2 (U_{22}) e do campo de deformações na direção 1 (ε_{11}) calculados pela CID em um ensaio de compressão diametral (CDP *br96-01* - imagem 10).

Os resultados de campos de deslocamento (em pixels: relação de 1 pixel = 29,8 μm) na direção longitudinal (U_{11}), campos de deslocamento na direção transversal (U_{22}) e de deformação na direção longitudinal (ε_{11}) são mostrados para a imagem 10 (no total de 75) do ensaio no CDP *br96-01*. Esta imagem corresponde ao nível de tensão de von Mises ($q = 3,4 \text{ MPa}$) do ensaio apresentado na Figura 4.12. Neste exemplo, os deslocamentos de corpo rígido são subtraídos, restando apenas os deslocamentos que causam deformações no CDP e observa-se que, na região de interesse (tomada como referência para a obtenção dos dados), os isovalores de deslocamentos são paralelos entre si e perpendiculares à direção analisada. Esta observação possibilita constatar a qualidade do ensaio, podendo assim considerá-lo ou descartá-lo da análise. Em relação ao campo de deformação apresentado, observa-se que este pode ser considerado homogêneo dentro da região de interesse analisada.

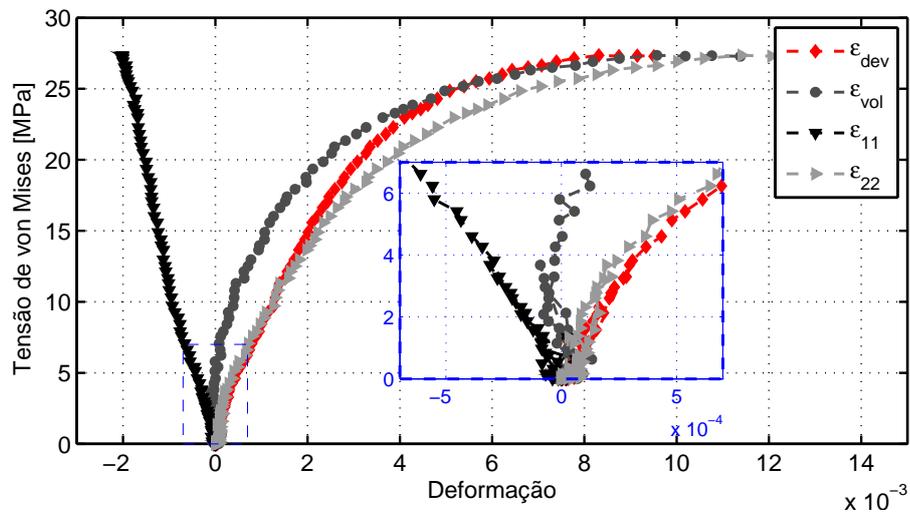
O cálculo das deformações volumétrica e desviadora foram feitos partindo das Equações 2.16 e 2.19. Considerando o caso biaxial de tensões e a hipótese de isotropia do material, chegou-se em:

$$\varepsilon_{vol}^{br} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (4.4)$$

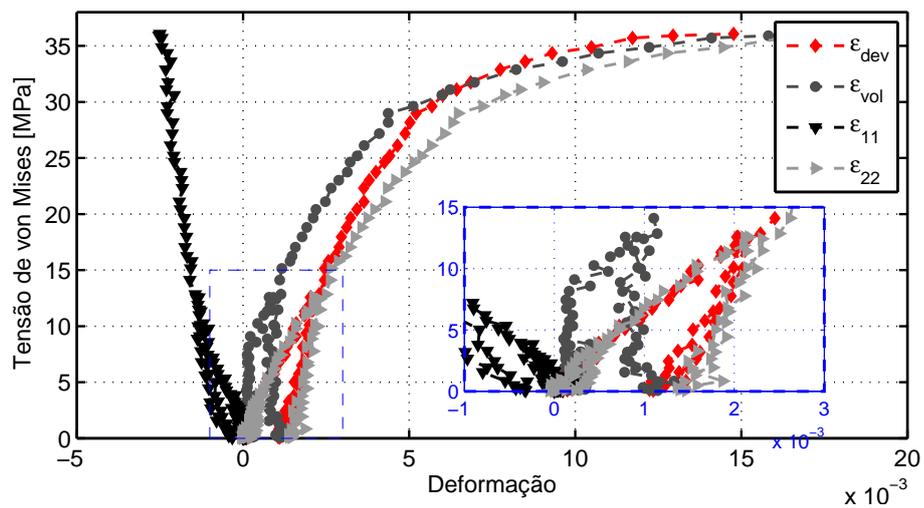
$$\varepsilon_{dev}^{br} = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2 - (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33})} \quad (4.5)$$

4.4.1 Ensaios cíclicos

Os ensaios cíclicos de compressão diametral foram realizados nos CDPs *br91-02* e *br96-02*, conforme apresentado na Tabela 4.2. Na Figura 4.11 são mostradas as curvas tensão vs. deformações para dois níveis de compactação diferentes (200 e 300 MPa). Os ensaios foram conduzidos em ciclos de carregamento e descarregamento e um carregamento final levando o CDP à falha.



(a)



(b)

Figura 4.11 Tensão de von Mises em função das deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{vol} e ε_{dev} .
(a) *br91-02*; (b) *br96-02*.

Nos detalhes mostrados na Figura 4.11 pode-se observar que o comportamento da ε_{vol} , nos dois primeiros ciclos dos ensaios cíclicos de compressão diametral, é análogo ao observado nos ensaios de compressão simples. Nota-se que a deformação volumétrica é levemente negativa no início do ensaio revelando uma tendência de compactação adicional do material. Esta tendência se inverte a partir de um determinado nível de carregamento, fato importante na identificação do escoamento, que será discutido mais adiante.

4.4.2 Ensaios monotônicos

Os ensaios monotônicos de compressão diametral foram realizados nos CDPs: *br82 - 01*, *br82 - 02*, *br82 - 03*, *br91 - 01*, *br96 - 01*, *br96 - 03* e *br96 - 04*, conforme apresentado na Tabela 4.2. Os resultados individuais destes ensaios são apresentados nos Apêndices B, C e D (a partir da página 105). Conclui-se que houve boa repetibilidade entre os ensaios (com exceção do ensaio realizado para $\rho_{rel} = 0,91$, condição na qual foi testado apenas um CDP).

Na Figura 4.12 são traçadas curvas da tensão de von Mises (q) em função das deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{dev} e ε_{vol} . Nota-se que o material em estudo deforma-se muito pouco até a fratura, sendo que no ponto de tensão de von Mises máxima (≈ 35 MPa), a deformação $\varepsilon_{11} \approx -0,002$ e a $\varepsilon_{22} \approx 0,03$. Nota-se que ε_{22} é muito maior do que ε_{11} , isso se deve ao fato de que na direção 2 atuam tensões de natureza trativa. O comportamento da ε_{vol} é análogo ao observado nos ensaios cíclicos de compressão diametral.

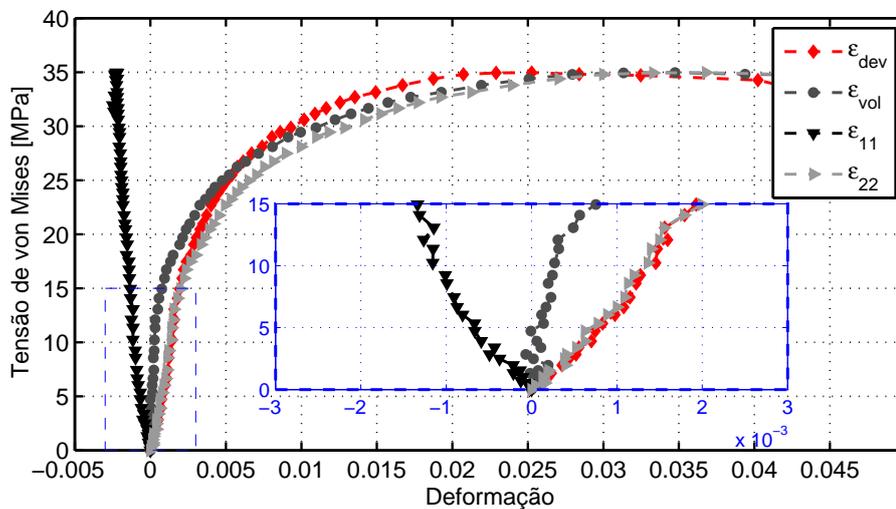


Figura 4.12 Ensaio de compressão diametral realizado no CDP br96-01.

Na Figura 4.13 é apresentada uma análise de CID que mostra a evolução de ε_{22} com o carregamento durante o ensaio mostrado na Figura 4.12, as imagens 10, 25 e 50 são referentes aos níveis de tensão de von Mises de: 3,38, 15,93 e 32,2 MPa, respectivamente. Nota-se a incidência de deformações localizadas, indicando a formação de macrotrincas. As tensões trativas (atuantes na dire-

ção 2) influenciam fortemente o comportamento de ε_{dev} e de ε_{vol} . Observa-se também que as curvas de ε_{22} , ε_{dev} e de ε_{vol} tendem a convergir no final do ensaio. Porém, em níveis baixos de carregamento (detalhe da Figura 4.12) ε_{22} e ε_{11} apresentam valores próximos e ε_{vol} é fortemente influenciada por ambas.

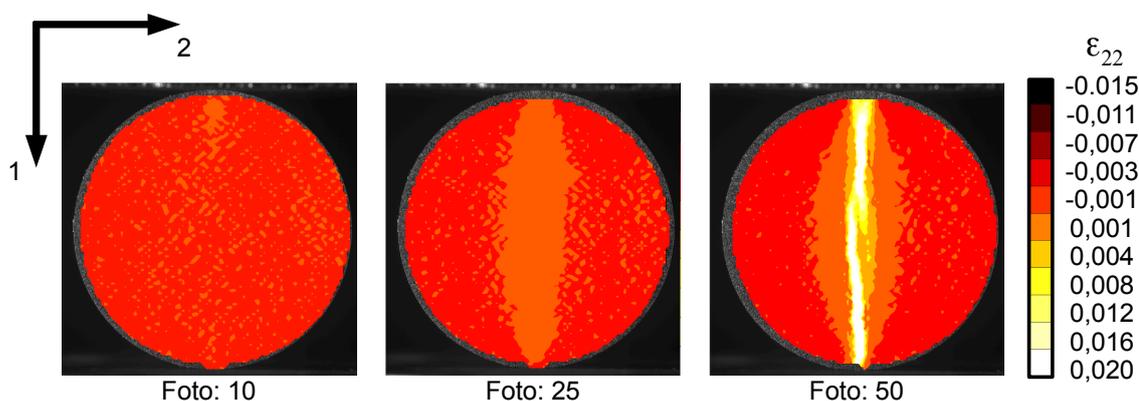
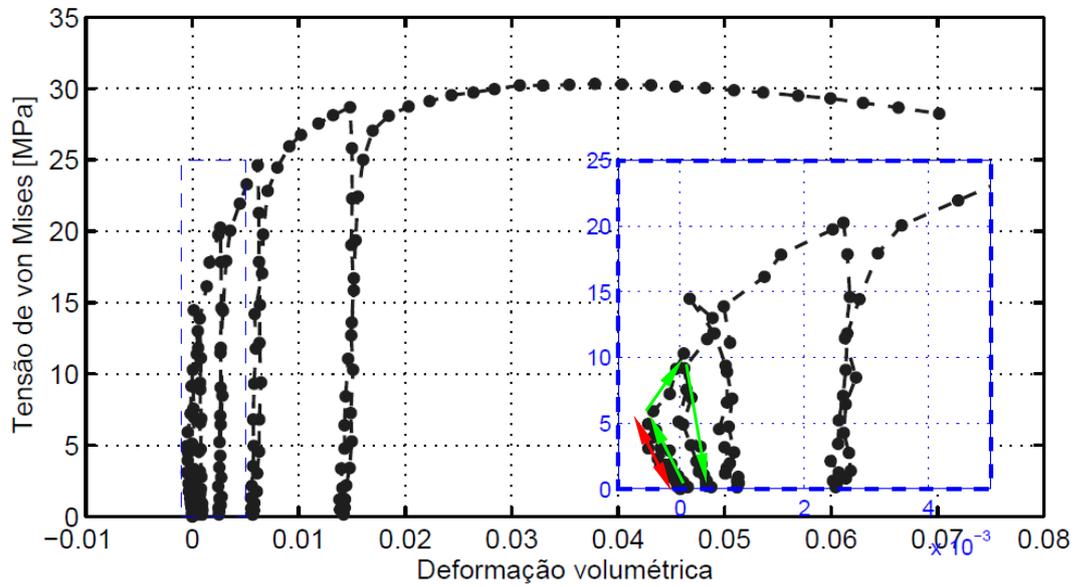


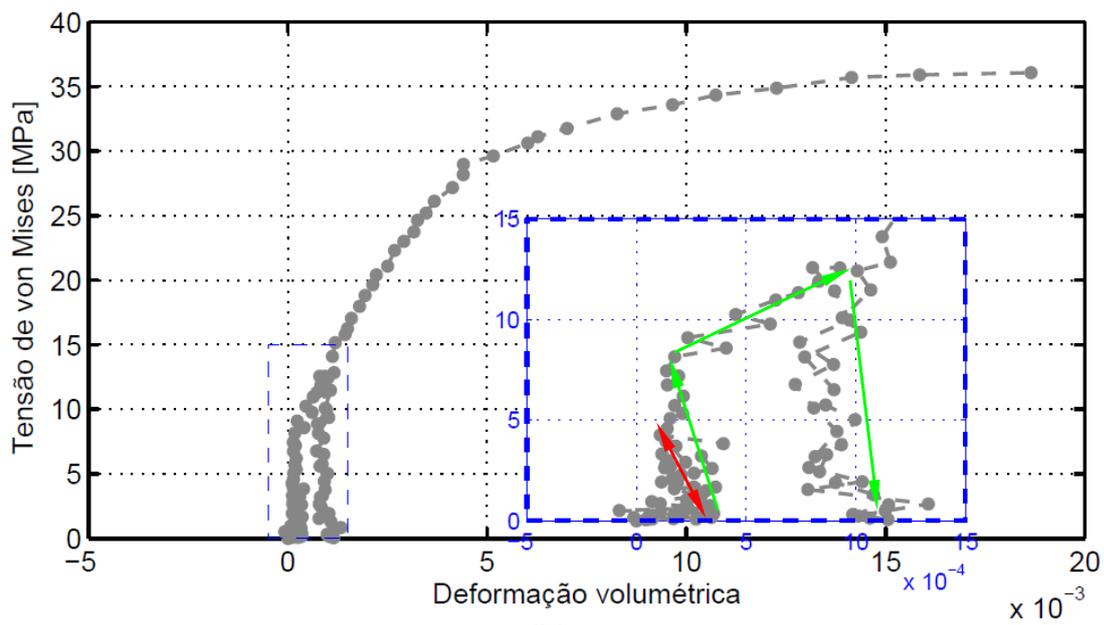
Figura 4.13 Campo de deformações na direção 2 (ε_{22}) calculados pela CID (CDP *br96 - 01* - imagens referentes aos picos dos ciclos do ensaio).

4.5 Avaliação do regime elástico e determinação da tensão de escoamento.

Durante o carregamento mecânico imposto nos ensaios de compressão simples e de compressão diametral, a deformação desviadora aumenta em função da parte desviadora do carregamento (aumento de q). Por outro lado, a evolução do carregamento também implica em aumento de p (ressalta-se que valores positivos de p indicam compressão, segundo a convenção utilizada neste trabalho) que, por sua vez, induz uma diminuição da ε_{vol} , ao menos nos estágios iniciais do ensaio (indicado pela seta vermelha da Figura 4.14). Isto ocorre principalmente devido à compressão elástica do material, apesar de que, em alguns ensaios, foi também constatado um efeito de recompactação irreversível do mesmo nos estágios iniciais de carregamento. Porém, a partir de um determinado nível de carregamento, a deformação volumétrica tende a cessar sua queda, invertendo sua tendência e passando a aumentar (indicado pelas setas verdes da Figura 4.14). Como introduzido na Seção 3.2.5, este fenômeno é chamado de dilatância e foi utilizado para identificar o início do escoamento macroscópico do material.



(a)



(b)

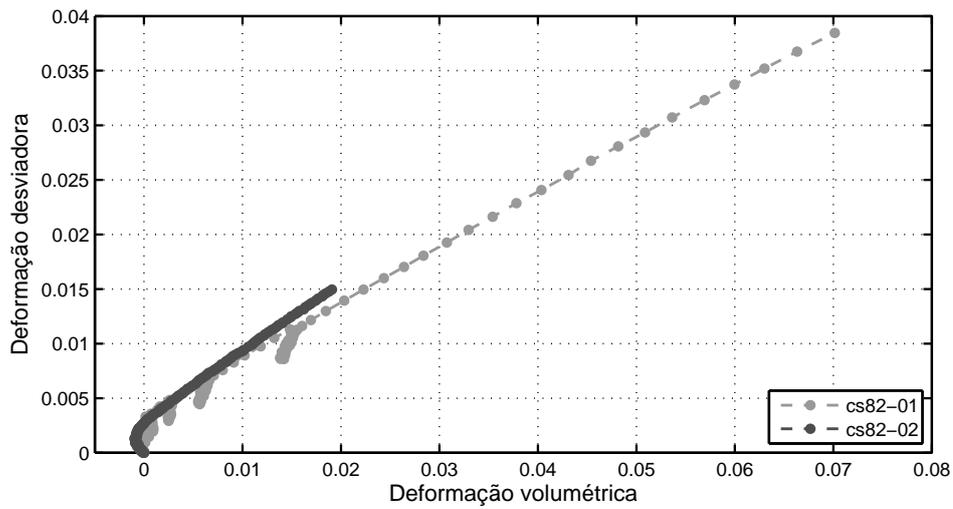
Figura 4.14 Curva q vs. ε_{vol} para: (a) ensaio cíclico de compressão simples (cs82-01);
 (b) ensaio cíclico de compressão diametral (br96-02).

4.5.1 Regime elástico

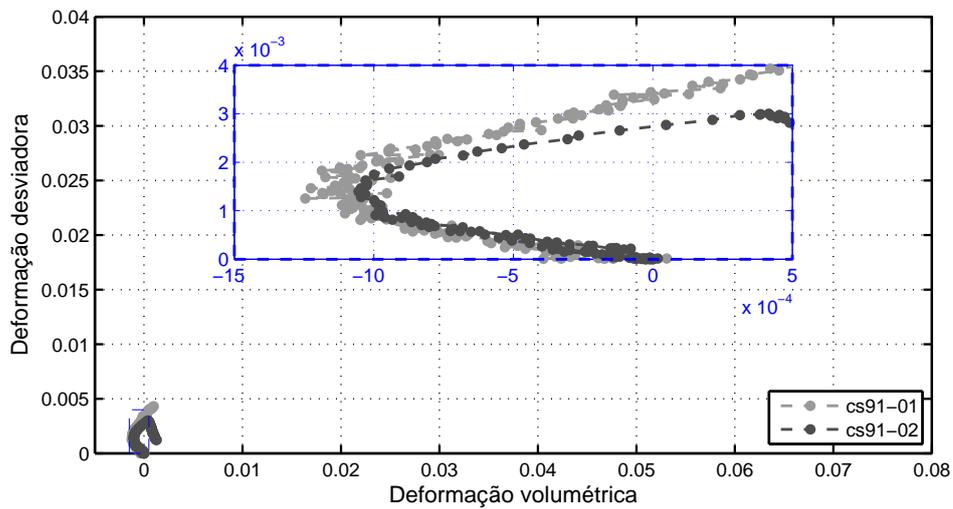
Uma vez que os mecanismos de escoamento macroscópico do material foram estudados e compreendidos, determinou-se um critério para identificação do limite elástico do material. Para tal, foram utilizadas informações provenientes somente da técnica de CID, sem depender das medidas realizadas por meio dos sensores da máquina de ensaios. Para tanto, utilizou-se a curva deformação desviadora (ε_{dev}) vs. deformação volumétrica (ε_{vol}). Nas Figuras 4.15 e 4.16 foram traçadas estas curvas para os ensaios de compressão simples e de compressão diametral, respectivamente. A escolha dos invariantes (ε_{dev} e ε_{vol}) amplifica os efeitos da transição elasto-plástica, viabilizando a identificação do limite elástico do material ensaiado em compressão simples e em compressão diametral.

Nas Figuras 4.16 e 4.15, pode-se observar o comportamento da ε_{vol} . Nota-se que o invariante apresenta comportamento análogo em ambos os tipos de ensaio mecânico e em todas as densidades relativas estudadas.

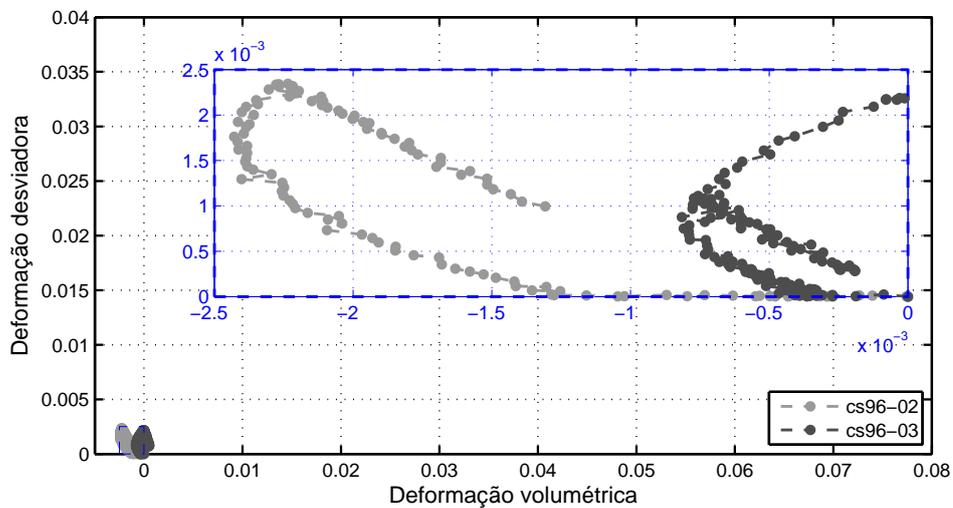
Nos ensaios de compressão simples, em níveis de $\varepsilon_{vol} \approx 1.10^{-3}$ nota-se a mudança no comportamento de ε_{vol} , que passa a aumentar; caracterizando o fenômeno da dilatância e, conseqüentemente, o escoamento macroscópico do material. Nos ensaios de compressão diametral, identifica-se a dilatância em níveis menores de ε_{vol} ($\approx 0,5.10^{-3}$). Isto se deve ao fato da ocorrência de tensões trativas durante os ensaios de compressão diametral, o que facilita o movimento relativo entra as partículas e, conseqüentemente, favorece o desempacotamento das mesmas.



(a)

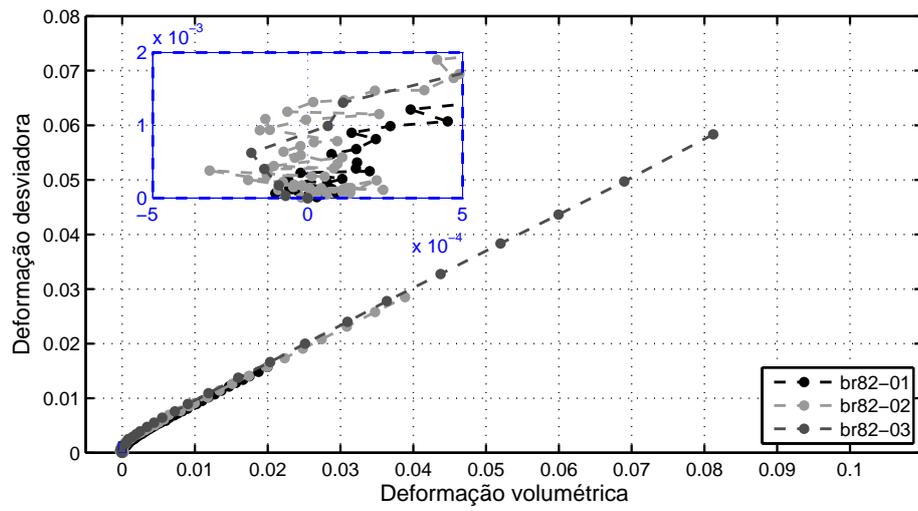


(b)

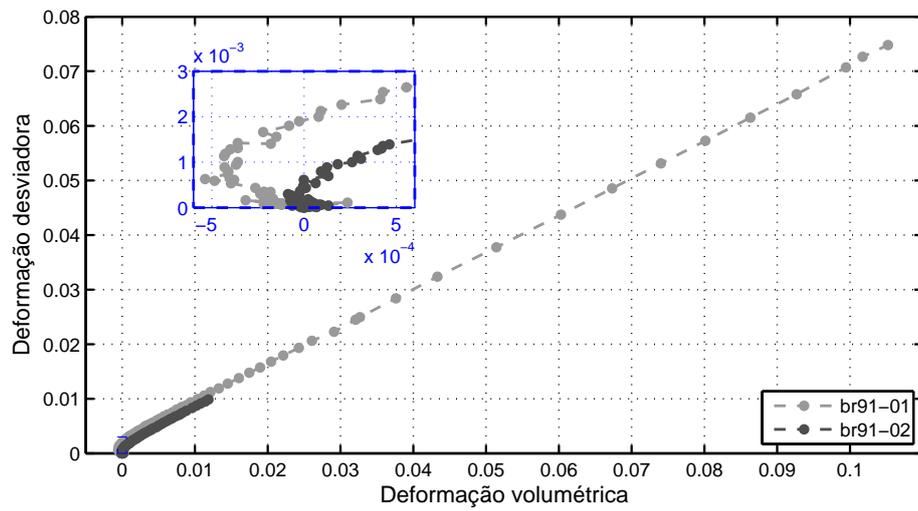


(c)

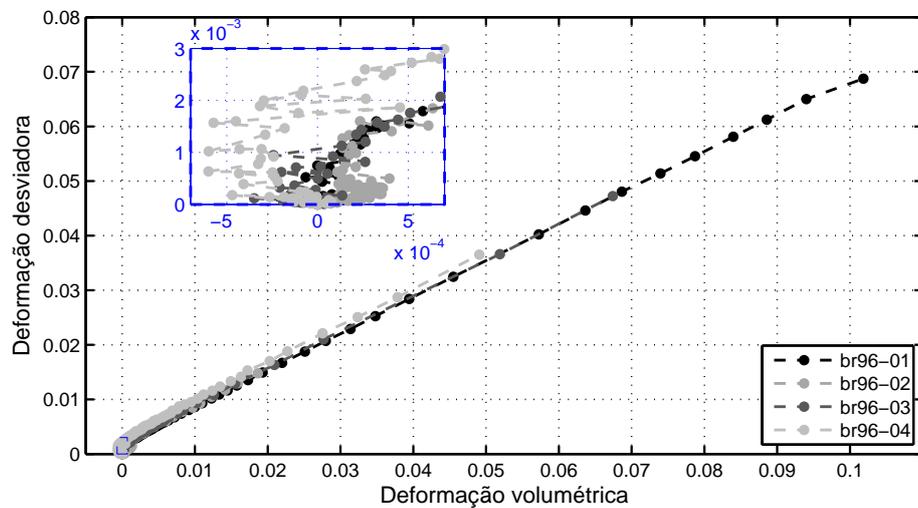
Figura 4.15 Detalhe da curva ε_{dev} vs. ε_{vol} para os ensaios de compressão simples.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16 Detalhe da curva ε_{dev} vs. ε_{vol} para os ensaios de compressão diametral.

4.5.2 Determinação da tensão de escoamento

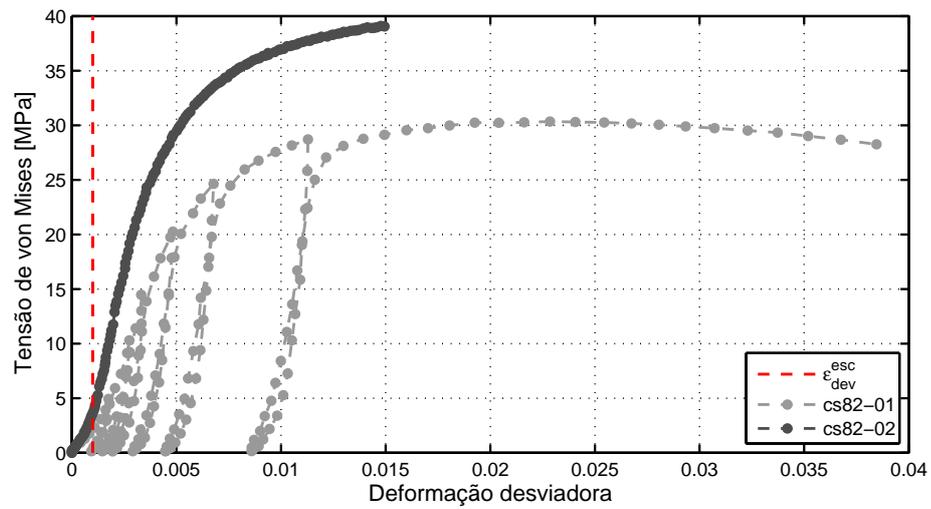
Na Figura 4.17 são mostradas as curvas q vs. ε_{dev} para todas as condições ensaiadas em compressão simples. A reta vertical em vermelho representa a deformação desviadora crítica de escoamento ($\varepsilon_{dev}^{esc} = 1.10^{-3}$). Foram identificadas graficamente as tensões de escoamento (q^{esc}) para cada ensaio e os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

Na Figura 4.18 são mostradas as curvas q vs. ε_{dev} para todas as condições ensaiadas em compressão diametral. A reta horizontal em vermelho representa a deformação desviadora crítica de escoamento ($\varepsilon_{dev}^{esc} = 0,5.10^{-3}$). Foram identificadas graficamente as tensões de escoamento (q^{esc}) para cada ensaio e os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

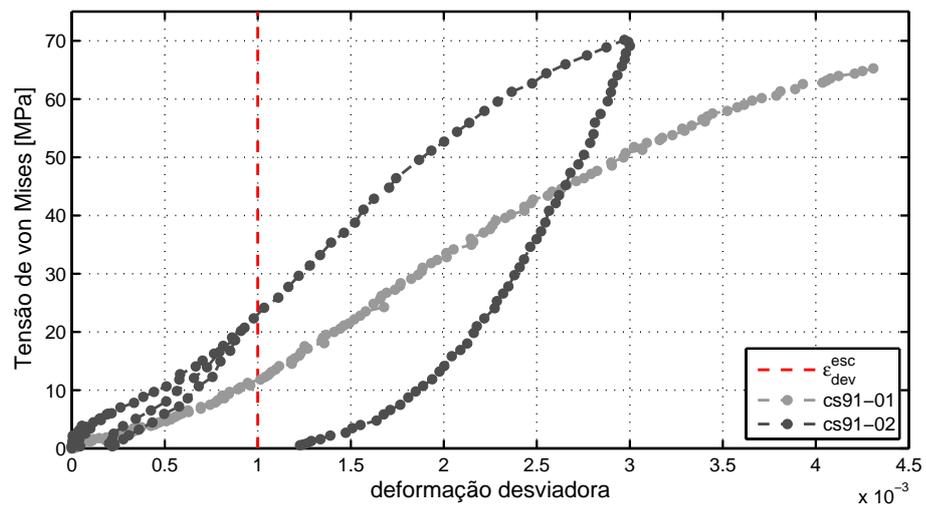
Houve grande dispersão nos valores identificados para tensão de escoamento, isso se deve principalmente ao fato de que os fenômenos de interesse ocorrem em níveis muito baixos de deformação (da ordem de 1.10^{-3}) que coincidem com o limite de precisão da técnica de CID adotada para medição dos campos de deslocamento. Outro fator limitante neste trabalho foi a técnica de fabricação dos CDPs para os ensaios de compressão simples, os quais foram usados em equipamentos improvisados e não havia garantia de paralelismo entre suas faces após usinagem. Deve-se levar em consideração a natureza frágil do material que normalmente leva a grandes dispersões em ensaios mecânicos.

Tabela 4.5 Valores identificados graficamente para o escoamento do material compactado em todas as condições estudadas.

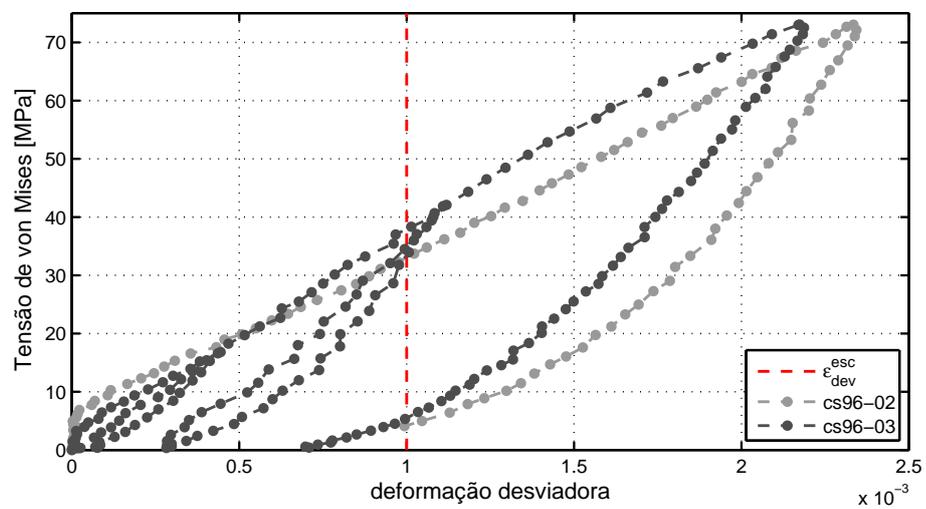
Densidade relativa (ρ_{rel})	Compressão simples		Compressão diametral	
	CDP	q^{esc} [MPa]	CDP	q^{esc} [MPa]
0,82	cs82-01	2,1	br82-01	0,97
	cs82-02	3,6	br82-02	1
			br82-03	1,3
0,91	cs91-01	11,7	br91-01	1,4
	cs91-02	23	br91-02	5,2
0,96	cs96-02	33	br96-01	2,8
			br96-02	3,8
	cs96-03	33,5	br96-03	3,7
			br96-04	2,8



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17 Curvas q vs. ϵ_{dev} para os ensaios de compressão simples.

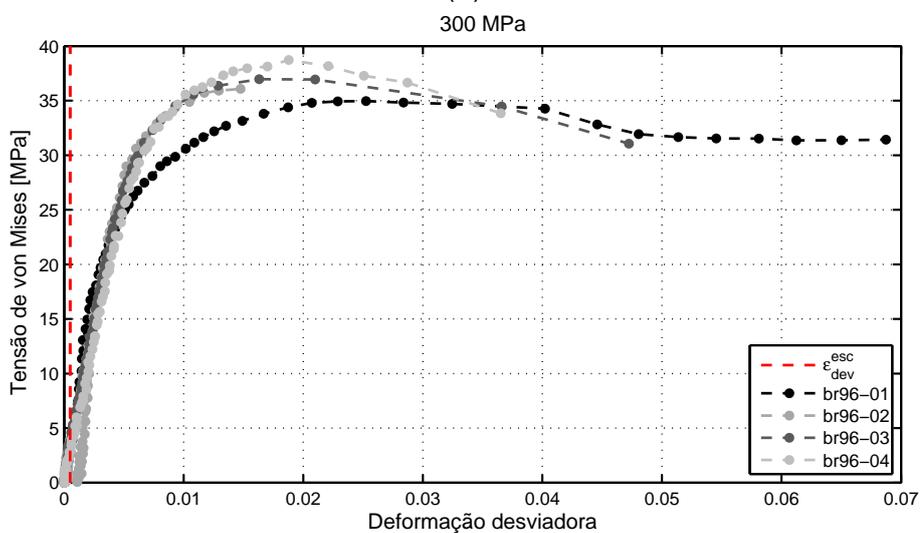
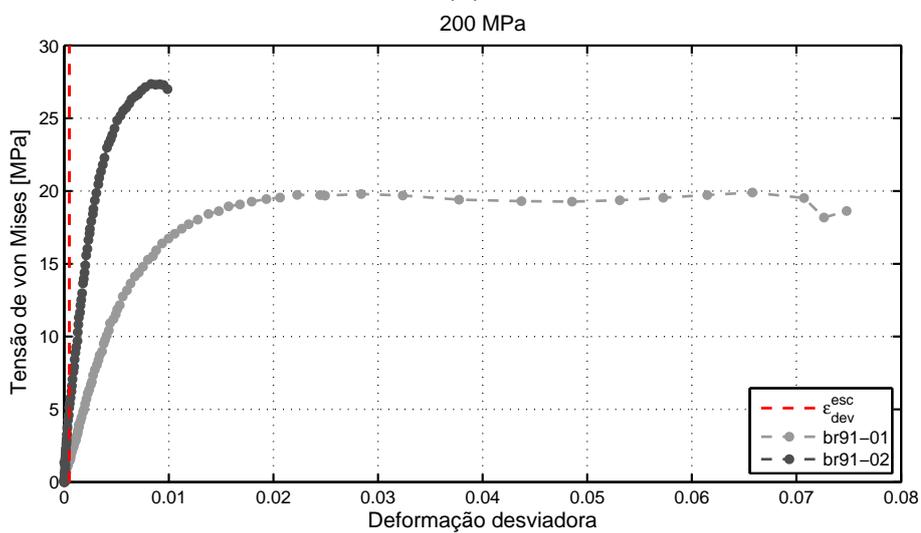
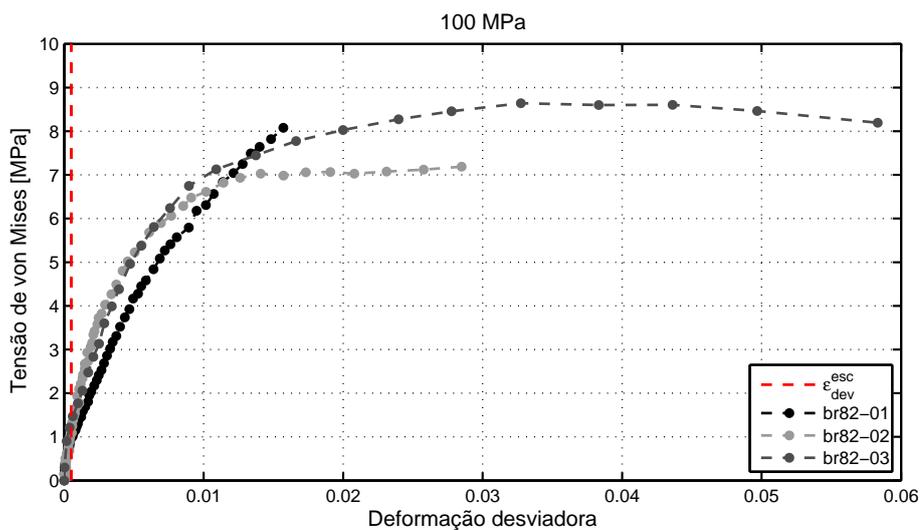


Figura 4.18 Curvas q vs. ϵ_{dev} para os ensaios de compressão diametral.

4.6 Identificação dos parâmetros do modelo de Drucker-Prager

A partir das tensões limites de escoamento identificadas para ensaios mecânicos de compressão simples e de compressão diametral, foi possível a identificação dos parâmetros d e β da superfície de Drucker-Prager para os três níveis de compactação estudados. A Figura 4.19 mostra, no plano q vs. p , as superfícies de Drucker-Prager identificadas para diferentes níveis de compactação.

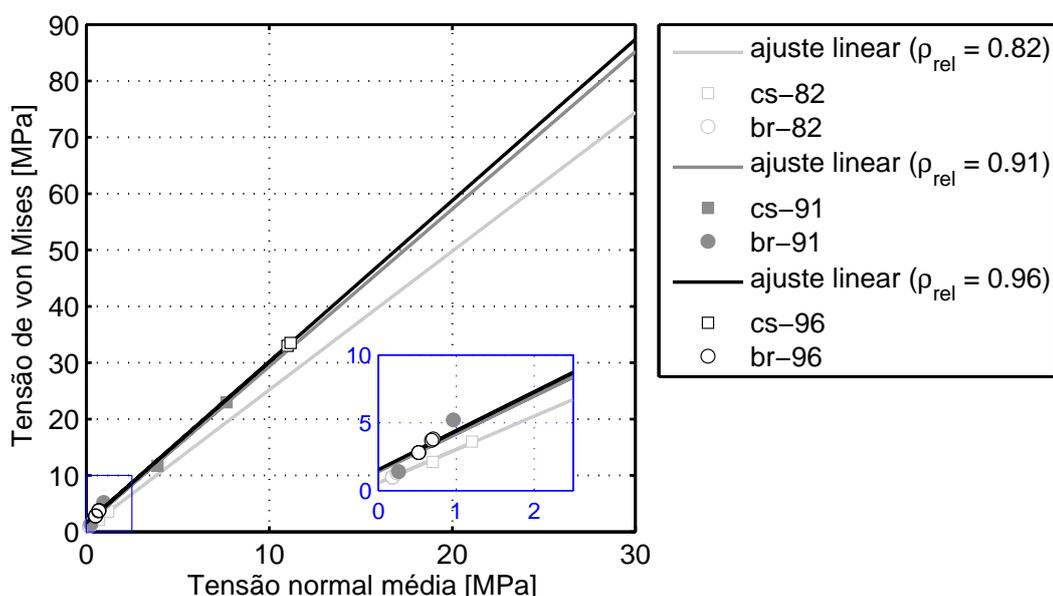


Figura 4.19 Evolução da superfície de Drucker-Prager com o aumento da densidade relativa (plano q vs. p).

As evoluções dos parâmetros d e β com a densidade relativa do compactado são mostradas nas Figuras 4.20 e 4.21. Pode-se observar na Figura 4.20 que há uma tendência de aumento de d com o aumento de ρ_{rel} . Este resultado já era esperado, uma vez que o aumento da densidade relativa promove diminuição na porosidade do compactado e aumenta o número de contatos entre as partículas, tornando o compactado mais coeso. O atrito interno entre as partículas do pó (β) tende a manter-se constante com o aumento da densidade relativa (Figura 4.21).

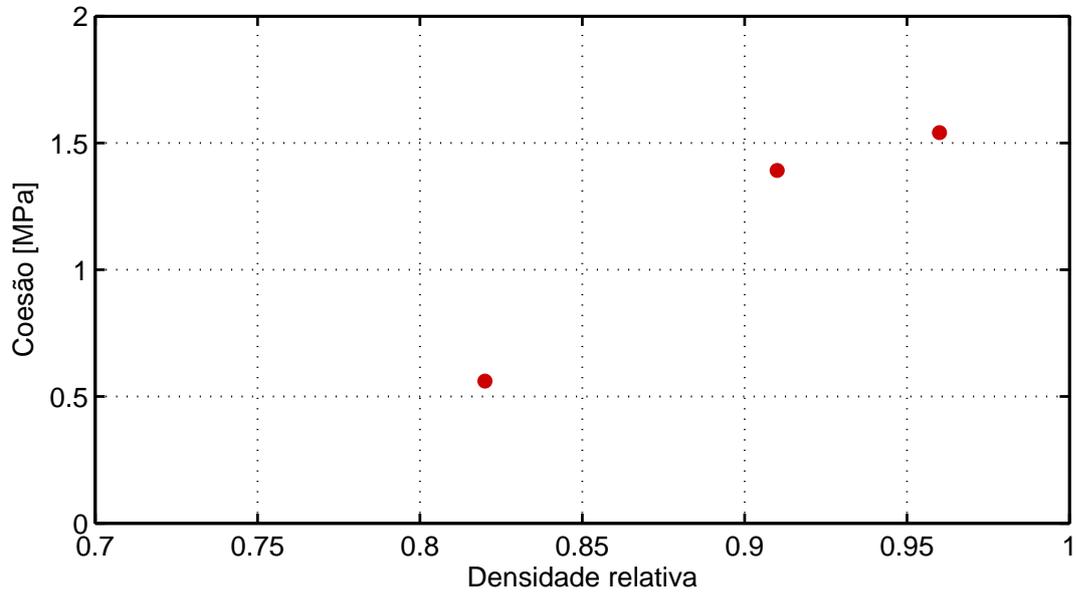


Figura 4.20 Evolução da coesão (d) com o aumento da densidade relativa.

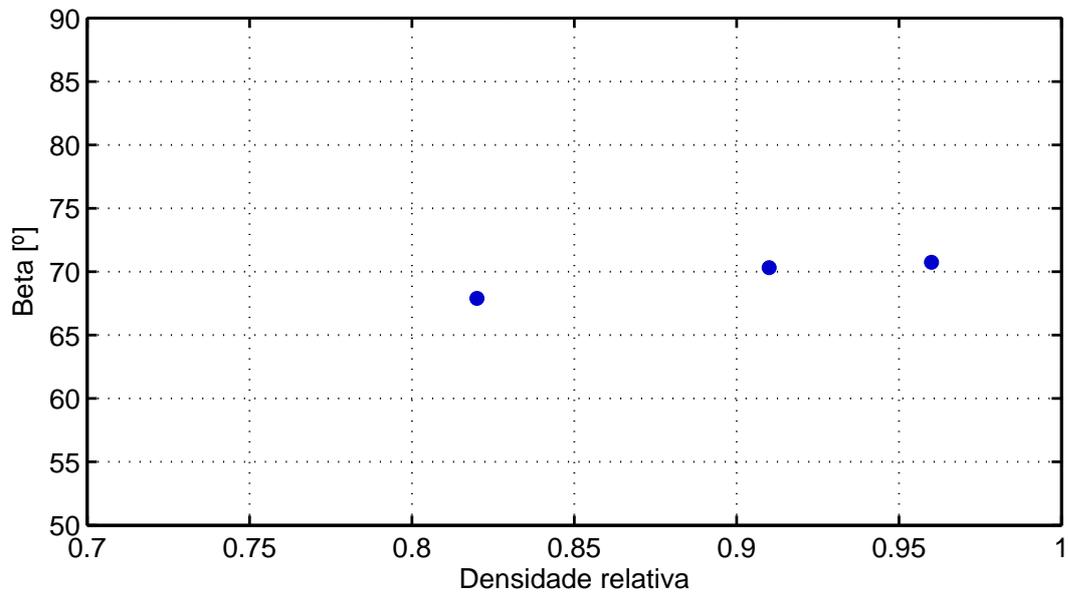


Figura 4.21 Evolução do atrito interno entre as partículas do pó (β) com o aumento da densidade relativa.

4.7 Identificação dos parâmetros elásticos

A metodologia discutida na Seção 3.2.6 foi aplicada nos ensaios de compressão simples cíclicos ($cs82 - 01$, $cs91 - 02$ e $cs96 - 03$) e, a partir das Equações 3.10 e 3.11, identificou-se a evolução dos parâmetros elásticos do material (E e ν) com a tensão normal média (p) para cada nível de compactação estudado.

Na Figura 4.22 é mostrada a evolução do módulo elástico com a tensão normal média para o material compactado sob 300 MPa ($\rho_{rel} = 0,96$). Como já foi discutido, com o aumento da tensão normal média compressiva, há o fechamento de vazios no interior do material, aumentando o número de contatos entre as partículas do pó e, conseqüentemente, aumentando a rigidez do compactado. Nota-se que há uma tendência de diminuição da rigidez do material com a progressão dos ciclos de carregamento-descarregamento, isto se deve ao fato do carregamento, aplicado ao material durante o ensaio, induzir dano ao mesmo, conforme demonstrado na Figura 4.9.

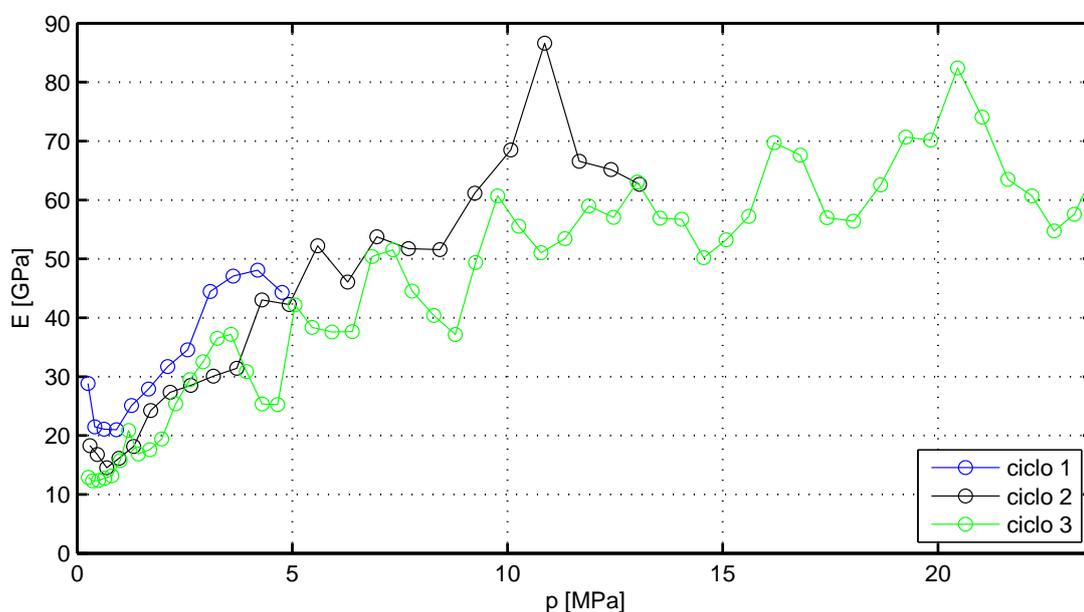


Figura 4.22 Evolução de E com p identificada a partir do ensaio cíclico de compressão simples realizado no CDP $cs96 - 03$.

Na Figura 4.23 é mostrada a evolução do coeficiente de Poisson com a tensão normal média para o material compactado sob 300 MPa ($\rho_{rel} = 0,96$). Como

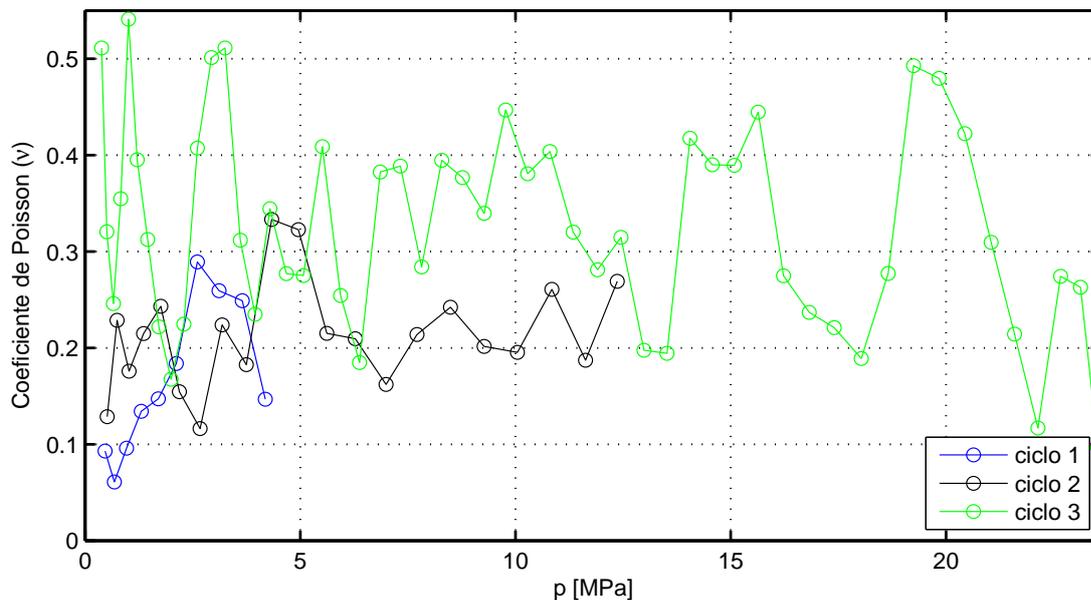


Figura 4.23 Evolução de ν com p identificada a partir do ensaio cíclico de compressão simples realizado no CDP *cs96 - 03*.

já foi discutido, o carregamento aplicado durante o ensaio mecânico causa dano ao material (Figura 4.9), mais especificamente, para o material compactado sob 300 MPa, constatou-se a incidência de dano considerável (deformações localizadas) no terceiro ciclo do ensaio de compressão simples. Corroborando esta análise, o coeficiente de Poisson assume valores discrepantes para o terceiro ciclo. Sendo assim, para identificação dos parâmetros elásticos desconsiderou-se, em cada nível de densidade relativa estudado, os níveis de carregamento em que se verificou a presença de dano ou deformações localizadas.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 são mostradas, para cada nível de densidade relativa estudado, as evoluções de E e de ν com a tensão normal média (já desconsiderando os níveis de carregamento que induziram dano considerável ao material). Nota-se que, conforme o esperado, há uma tendência de aumento de E com a densidade relativa dos compactados, pois uma maior coesão entre as partículas confere mais rigidez ao compactado. Como discutido anteriormente, o coeficiente de Poisson (ν), para o material compactado sob 100 MPa, assume valores relativamente altos, pois a baixa coesão entre as partículas do pó facilita o desempacotamento das mesmas, gerando grande variação volumétrica durante o

ensaio de compressão simples. Para os níveis mais altos de compactação (200 e 300 MPa), o coeficiente de Poisson flutuou em torno de 0,2 - corroborando a hipótese que o compactado, com o aumento da densidade relativa, tende a se comportar cada vez mais como um sólido coeso.

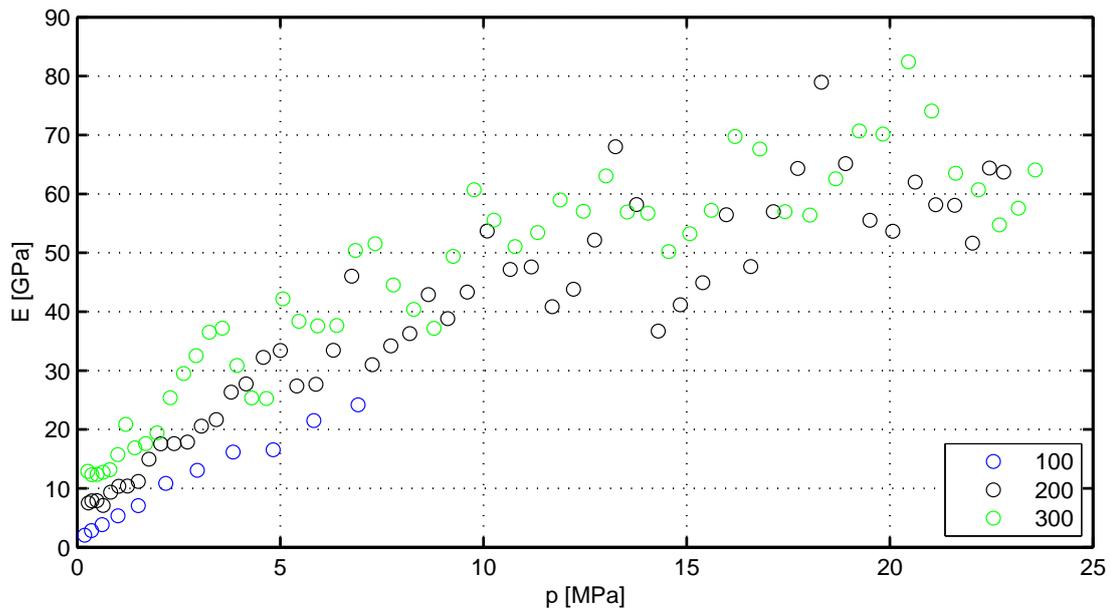


Figura 4.24 Evolução de E com p identificada a partir dos ensaios cíclicos de compressão simples.

A metodologia proposta mostrou a viabilidade em caracterizar a evolução de E e de ν com o nível de tensão normal média (p) ao qual o material está sujeito. Porém, o ruído verificado nos ensaios e o número reduzido de experimentos impossibilitaram a elaboração de um modelo elástico não linear capaz de simular a poroelasticidade.

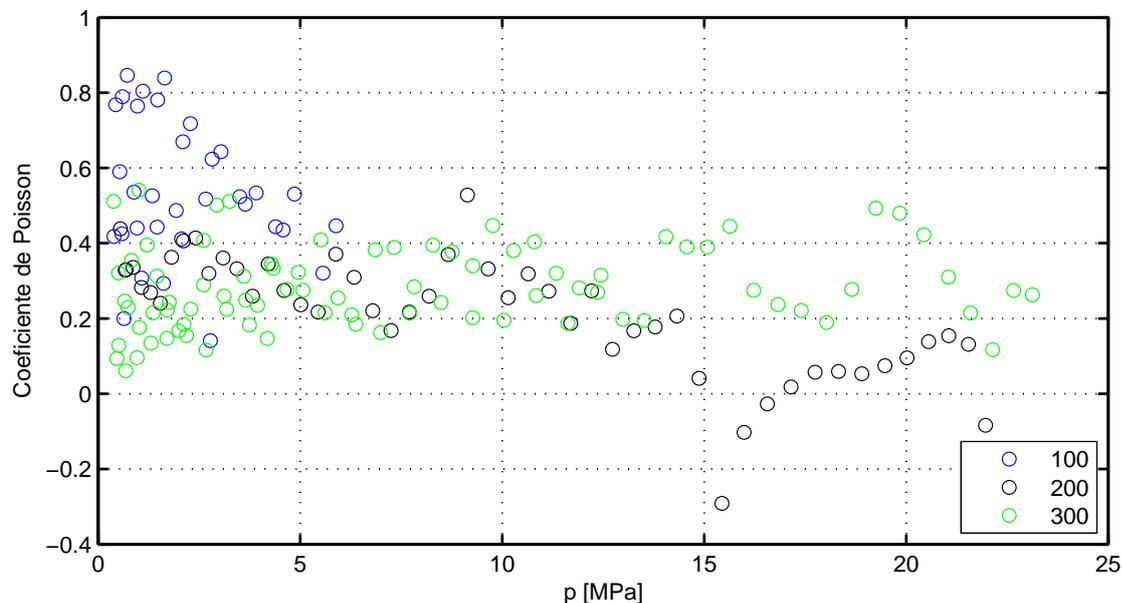


Figura 4.25 Evolução de ν com p identificada a partir dos ensaios cíclicos de compressão simples.

4.8 Simulação computacional do processo de prensagem uniaxial em matriz rígida

Para a simulação do processo foi utilizado o *software* AbaqusTM v6.14 e o modelo de material adotado para o pó metálico foi o de Drucker-Prager/*Cap*, implementado no *software*, em conjunto com o modelo linear elástico.

Tabela 4.6 Resumo dos parâmetros identificados experimentalmente para o modelo de Drucker-Prager/*Cap*.

Densidade relativa (ρ_{rel}) [%]	Drucker-Prager		Lei de encruamento
	d [MPa]	β [°]	p_b vs. ε_{vol}^{pl}
82	0,56	70	Figura 4.2 (página 58)
91	1,39	70	
96	1,54	70	

De acordo com a identificação experimental (Tabela 4.6), os parâmetros do modelo não se mantêm constantes com o aumento da densidade relativa do compactado. Para reproduzir os efeitos do aumento da densidade relativa nos parâmetros do modelo, foi utilizada uma *user-defined field* (USDFLD). Essa permite ao usuário inserir funções escritas em FORTRAN que definem novas variá-

veis na simulação. Neste sentido, adicionou-se uma subrotina que, incremento a incremento, calcula a deformação plástica volumétrica (Equação 4.6) e atualiza os valores de alguns dos parâmetros do modelo (d e E) de acordo com sua evolução. A subrotina implementada é apresentada no Anexo B (página 113).

O modelo elástico do material foi considerado conforme a Figura 4.26. Isto é, o efeito da poroelasticidade não foi levado em consideração. Tomou-se o valor máximo de E identificado experimentalmente (70 GPa para o material compactado a 300 MPa) e, para modelar o comportamento elástico do pó solto, partiu-se de um valor baixo para E (100 MPa). Para valores intermediários de densidade relativa, o *software* faz uma interpolação linear entre os valores extremos de E definidos.

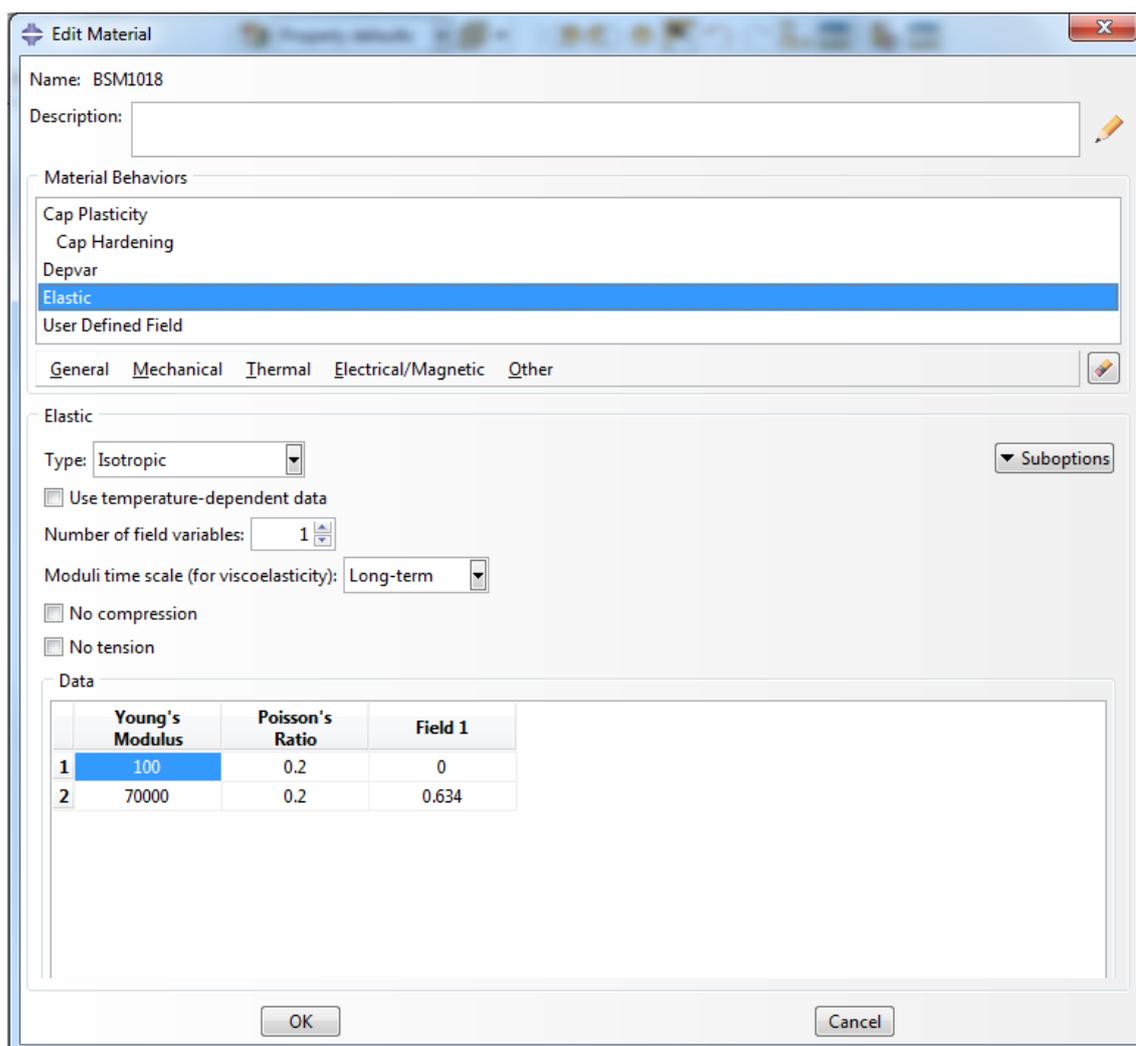


Figura 4.26 Parâmetros do modelo linear elástico utilizado na simulação computacional.

Os parâmetros do modelo de Drucker-Prager/*Cap* foram considerados conforme a Figura 4.27. Os parâmetros *Transition Surf Rad* (α) e *Flow Stress Ratio* (k) foram considerados conforme indicado pelo manual do AbaqusTM v6.14 [54]. O parâmetro *Cap Eccentricity* (R) foi determinado de acordo com a literatura [43]. O parâmetro *Field1* foi definido pela subrotina escrita em FORTRAN (Anexo B) da seguinte maneira:

$$Field1 = -(PE11 + PE22 + PE33) \quad (4.6)$$

em que $PE11$, $PE22$ e $PE33$, são variáveis de saída do AbaqusTM v6.14 e representam a deformação plástica nas direções 11, 22 e 33, isto é, *Field1* representa a deformação plástica volumétrica (variável que controla a evolução dos parâmetros do modelo de material). Portanto, os valores de *Field1* correspondem aos níveis de deformação plástica volumétrica atingidos na compactação dos CDPs a 100, 200 e 300 MPa.

A lei de encruamento, identificada a partir da Equação 3.1 conforme a metodologia apresentada na Seção 3.2.2, foi inserida no modelo em forma de tabela, de acordo com a Figura 4.28. Neste caso, para reproduzir a condição inicial do ensaio de validação (pré-carga de -300 N) a densidade inicial do material foi considerada como sendo $3,71 \text{ g cm}^{-3}$ (valor medido experimentalmente).

Os valores do coeficiente de atrito, segundo a literatura [68], variam entre 0,1 e 0,2. Neste trabalho assumiu-se coeficiente de atrito tangencial (com algoritmo do tipo penalidade) de 0,1 entre as estruturas do dispositivo (matriz, punção e tampa inferior) e de 0,15 entre o pó e a matriz e entre o pó e o punção. O algoritmo de atrito tangencial do tipo penalidade é análogo à lei de atrito de Coulomb.

O processo de compactação foi reproduzido experimentalmente para a validação do modelo utilizado na simulação do processo de prensagem a frio do pó metálico. O ensaio de compactação foi conduzido em três ciclos (carregamento seguido de descarregamento), com velocidade constante de 1 mm min^{-1} e aplicação de pré-carga de -300 N. Os ciclos foram programados para atingir três níveis crescentes de carga compressiva: 30, 60 e 90 kN que, dada a geometria

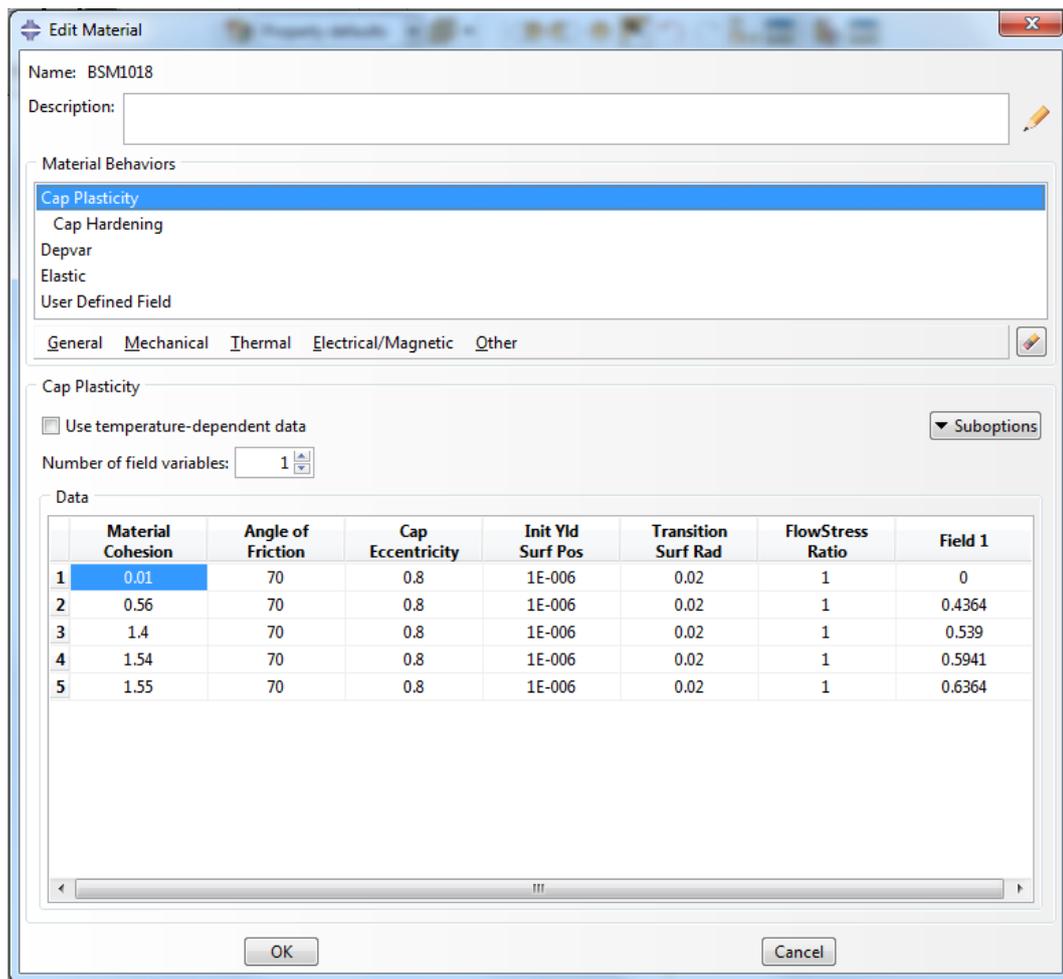


Figura 4.27 Parâmetros do modelo de material utilizado na simulação computacional.

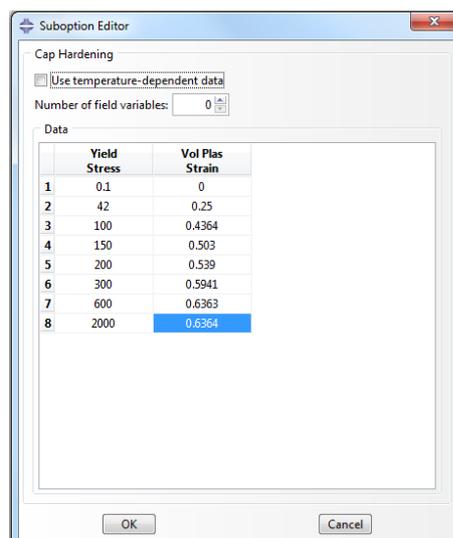


Figura 4.28 Lei de encruamento da superfície *cap* do modelo de material utilizado na simulação computacional.

da matriz, correspondem a tensões compressivas de 100, 200 e 300 MPa.

Na Figura 4.29 são comparadas as curvas de carga vs. deslocamento do ensaio experimental com a curva obtida para simulação, de maneira geral há boa concordância entre os resultados.

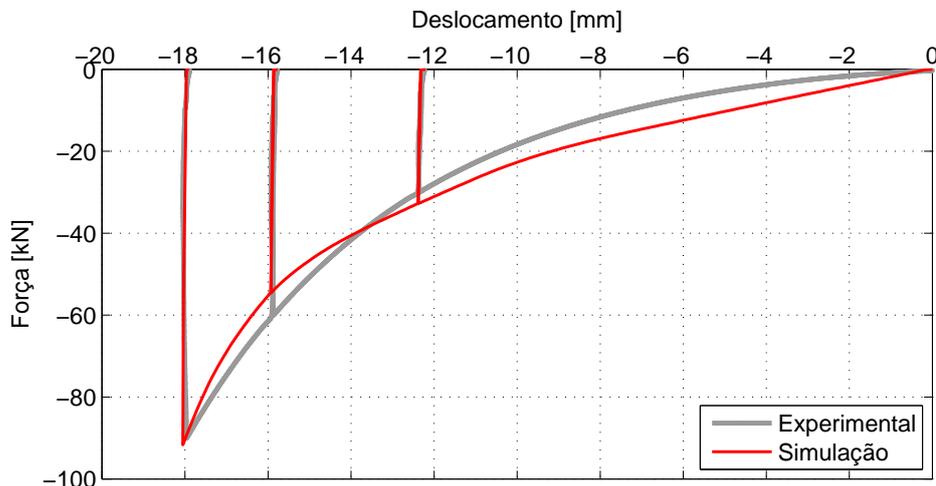


Figura 4.29 Comparação de resultados experimentais e teóricos: curvas de carga vs. deslocamento para o caso da compressão uniaxial em matriz rígida.

Quanto à dimensão da peça compactada, a medida experimental para a altura do cilindro após descarregamento foi de 26 mm, enquanto que a altura obtida da simulação foi de 25,03 mm. Esta diferença, apesar de relativamente pequena ($\approx 3,7\%$), pode ser atribuída a diferentes fatores, tais como: os valores dos coeficientes de atrito utilizados, o ajuste da curva de encruamento e os valores dos parâmetros elásticos utilizados no modelo, que não representam com precisão o comportamento elástico real do material.

No contexto industrial, os principais objetivos da simulação computacional são as previsões acerca do gradiente de densidades na peça compactada e das tensões atuantes no ferramental. Como pode ser visto na Figura 4.30, a diferença relativa de densidade entre as regiões de maior e menor densificação supera 20 %.

Os isovalores de densidade do compactado mostrados na Figura 4.30 não são variáveis de saída do programa AbaqusTM v6.14 e foram obtidos a partir da deformação plástica volumétrica, conforme mostrado na Equação 4.7. A repre-

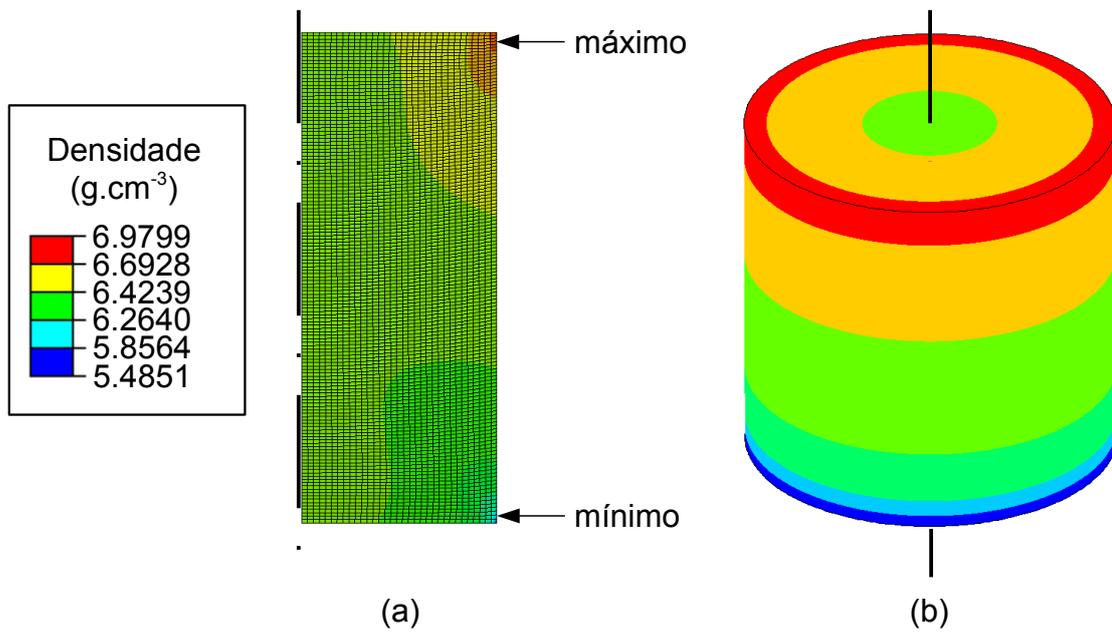


Figura 4.30 Isovalores de densidade da peça compactada.

sentação tridimensional do compactado verde é um artifício gráfico, uma vez que a simulação foi realizada com simetria axissimétrica.

$$\rho = \rho_0 \exp(\varepsilon_{vol}^p) \quad (4.7)$$

em que a variável de saída do programa é ε_{vol}^p e $\rho_0 = 3,71 \text{ g cm}^{-3}$.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, verificou-se que a identificação do início do escoamento, para pós metálicos compactados verde, não é uma tarefa simples e requer maior atenção e estudo. A técnica de CID mostrou-se de grande valor na análise dos resultados, pois, aumenta consideravelmente a quantidade e a qualidade dos dados obtidos nos ensaios mecânicos, viabilizando as análises apresentadas neste trabalho.

A metodologia proposta possibilitou a identificação, para a faixa de densidades relativas entre 0,82 e 0,96, da maior parte dos parâmetros do modelo de Drucker-Prager/*Cap* presente no programa comercial AbaqusTM v6.14, ou seja, quatro dos cinco parâmetros que necessitam de identificação experimental, mais a curva de encruamento da superfície *cap*. Para isso, foram necessários poucos ensaios mecânicos, sendo estes o de compressão simples e o de compressão diametral, além da medição das densidades dos corpos de prova utilizados.

A identificação da superfície F_s (Drucker-Prager) foi possível mesmo com dois tipos de ensaios mecânicos que resultam em trajetos de carregamento no plano q vs. p muito próximos: $\theta_{cs} = 71,57^\circ$ e $\theta_{br} = 79,52^\circ$ (ver Figura 3.5, pag. 45). Esta viabilidade está associada ao fato de o parâmetro β ser elevado ($\approx 70^\circ$) para o material estudado, o que diminui a sensibilidade deste parâmetro com a incerteza na identificação dos pontos de início de escoamento.

A simulação computacional apresentou boa concordância com os dados experimentais (carga vs. deslocamento e dimensão da peça final), mostrando que os parâmetros identificados são coerentes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podem-se enumerar:

1. Utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho para identificação da evolução dos parâmetros elasto-plásticos em níveis de compactação mais altos para o pó metálico em estudo;
2. Aprimorar a técnica de fabricação dos CDPs de compressão simples, com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos;
3. Realizar ensaios mecânicos com outros trajetos de carregamentos, por exemplo: ensaios de torção e de tração. A fim de verificar e/ou aumentar a precisão na identificação da superfície F_s ;
4. Desenvolver dispositivos de ensaios mecânicos instrumentados, com o objetivo de viabilizar a realização de ensaios oedométricos que permitirão a identificação de todos os parâmetros do modelo de Drucker-Prager/*Cap* implementado no AbaqusTM v6.14;
5. Aplicar o modelo elasto-plástico calibrado em uma simulação numérica com contexto industrial, com o objetivo de prever o gradiente de densidades no compactado verde resultante de um processo de prensagem a frio com múltiplos punções.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CANTO, R. B.; TITA, V.; CARVALHO, J.; PURQUERIO, B. M. Modelagem do processo de prensagem isostática de pós cerâmicos utilizando o método dos elementos finitos. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - XVI COBEM*. Uberlândia: [s.n.], 2001.
- [2] ZHANG, B.; CHEN, X.; LI, P. Discussion of compression strength after impact (cai) of bmi/carbon fiber composites. *Journal of advanced materials*, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, v. 33, n. 1, p. 13–16, 2001. ISSN 1070-9789.
- [3] CANTO, R. B. *Projeto e fabricação de moldes para prensagem isostática utilizando tecnologias CAD/CAE e prototipagem rápida*. Dissertação (Mestrado), 2002.
- [4] CANTO, R. B.; SANTOS, N. C. d.; CARVALHO, J.; PURQUERIO, B. M. Fabricação de moldes para prensagem isostática utilizando tecnologias CAD/CAE e prototipagem rápida. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF*. Uberlândia: [s.n.], 2003.
- [5] CANTO, R. B.; TITA, V.; CARVALHO, J.; PURQUERIO, B. M. A methodology for development of isostatic pressing moulds for near net shape components. In: *Fourth international latin-american conference on powder technology - PTECH*. Guarujá: [s.n.], 2003.
- [6] CEDERGRÉN, J.; SØRENSEN, N.; MELIN, S. Numerical investigation of powder compaction of gear wheels. *International journal of solids and structures*, Elsevier, v. 40, n. 19, p. 4989–5000, 2003.
- [7] MICHRAFY, A.; DODDS, J.; KADIRI, M. Wall friction in the compaction of pharmaceutical powders: measurement and effect on the density distribution. *Powder technology*, Elsevier, v. 148, n. 1, p. 53–55, 2004.
- [8] CANTO, R. B.; CARVALHO, J.; PURQUERIO, B. M.; SANTO, N. C. Fabricação de moldes para prensagem isostática utilizando tecnologias CAD/CAE e prototipagem rápida. *Ciência e Engenharia*, Uberlândia, v. 13, p. 61–67, 2004.
- [9] JONSÉN, P. Fracture and stress in powder compacts. Ph. D. Dissertation, Lulea University of Technology, 2006.
- [10] CANTO, R. B.; CARVALHO, J.; SCHMITT, N.; BILLARDON, R. Etude de la compaction d'une poudre polymérique sous chargements triaxiaux. In: *Colloque National MECAMAT*. [S.l.: s.n.], 2006.
- [11] SINKA, I. C.; COCKS, A. C. F. Constitutive modelling of powder compaction - ii. evaluation of material data. *Mechanics of Materials*, v. 39, p. 404–416, 2007.

- [12] CANTO, R. B. *Estudo teórico e experimental dos processos de compactação e sinterização do politetrafluoretileno (PTFE)*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - Brasil/École Normale Supérieure de Cachan - França, 2007.
- [13] 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*. [S.l.: s.n.], 2007.
- [14] 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*, Elsevier, v. 45, n. 10, p. 3088–3106, 2008.
- [15] SZANTO, M.; BIER, W.; FRAGE, N.; HARTMANN, S.; YOSIBASH, Z. Experimental based finite element simulation of cold isostatic pressing of metal powders. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, v. 50, n. 3, p. 405–421, 2008.
- [16] HERNÁNDEZ, J.; OLIVER, J.; CANTE, J.; WEYLER, R. Numerical modeling of crack formation in powder forming processes. *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, v. 48, n. 2, p. 292–316, 2011.
- [17] ROCCO, F. O.; MELO, C. C.; BALANCIN, O.; CANTO, R. B. Identificação de parâmetros para a simulação computacional da prensagem de pós ferrosos. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 21º CBECiMat*. Cuiabá: [s.n.], 2014. p. 5400–5407.
- [18] BROOKES, K. Unique values win {PM} design awards. *Metal Powder Report*, v. 66, n. 4, p. 18 – 20, 2011. ISSN 0026-0657.
- [19] CAPUS, J. 2012 pm progress report. *Metal Powder Report*, Elsevier, v. 67, n. 4, p. 12–15, 2012.
- [20] FEDERATION, M. P. I. *PM Industry Roadmap*. 2012. Disponível em: <<http://www.mpif.org/IntroPM/future.asp?linkid=9>>.
- [21] HENDERSON, R.; CHANDLER, H.; AKISANYA, A.; CHANDLER, C.; NIXON, S. Micro-mechanical modelling of powder compaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Elsevier, v. 49, n. 4, p. 739–759, 2001.
- [22] MODNET, P. Computer modelling group, comparison of computer models representing powder compaction process. *Powder Metallurgy*, v. 42, p. 301–311, 1999.
- [23] 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*, Elsevier, v. 204, n. 1, p. 27–41, 2010.

- [24] BROWN, S.; ABOU-CHEDID, G. Yield behavior of metal powder assemblages. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 42, n. 3, p. 383–399, 1994.
- [25] JONSÉN, P.; HÄGGBLAD, H.-A. Modelling and numerical investigation of the residual stress state in a green metal powder body. *Powder Technology*, v. 155, p. 196–208, 2005.
- [26] SHIMA, S.; MIMURA, K. Densification behaviour of ceramic powder volume 28, issue 1, , 1986, pages 53-59. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 28, n. 1, p. 53–59, 1986.
- [27] SOURIOU, D.; GOEURIOT, P.; BONNEFOY, O.; THOMAS, G.; DORÉ, F. Influence of the formulation of an alumina powder on compaction. *Powder Technology*, v. 190, n. 1–2, p. 152 – 159, 2009.
- [28] BIGG, D. M. Study of effect of pressure, time, and temperature on high-pressure powder molding. *Polymer Engineering and Science*, v. 17, n. 9, p. 691–699, 1977. ISSN 0032-3888.
- [29] CRAWFORD, R. J.; PAUL, D. W.; ADEEBNIA, Y. Microhardness and density distributions in polymeric powder compacts. *European Polymer Journal*, v. 16, p. 401–405, 1980.
- [30] CRAWFORD, R. J.; PAUL, D. W. Radial and axial die pressures during solid phase compaction of polymeric powders. *European Polymer Journal*, v. 17, p. 1023–1028, 1981.
- [31] CRAWFORD, R. J. Effect of compaction rate during the cold forming of polymeric powders. *Polymer Engineering and Science*, v. 22, n. 5, p. 300–306, 1982.
- [32] CRAWFORD, R. J.; SPREVAK, D. Cold compaction of polymeric powders in tapered dies. *European Polymer Journal*, v. 20, p. 441–446, 1984.
- [33] 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*, v. 51, n. 11, p. 2220–2235, 2011.
- [34] FRE'DY, C.; CANTO, R. B.; SCHMITT, N.; ROUX, S.; BILLARDON, R. Modelling of the mechanical behaviour of two pure ptfe powders during their compaction at room temperature. In: *POWDERS AND GRAINS 2013: Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*. Sydney: [s.n.], 2013. v. 1542, p. 1246–1249.
- [35] MICHRAFY, A.; RINGENBACHER, D.; TCHORELOFF, P. Modelling the compaction behaviour of powders: application to pharmaceutical powders. *Powder Technology*, v. 127, n. 3, p. 257–266, NOV 5 2002.

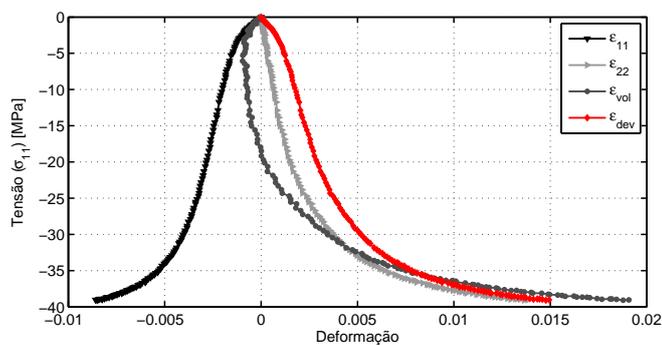
- [36] SINKA, I. C.; CUNNINGHAM, J. C.; ZAVALIANGOS, A. The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the drucker–prager cap model. *Powder Technology*, v. 133, p. 33–43, 2003.
- [37] CUNNINGHAM, J. C.; SINKA, I. C.; ZAVALIANGOS, A. Analysis of tablet compaction. i. characterization of mechanical behavior of powder and powder/tooling friction. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 93, n. 8, p. 2022–2039, AUG 2004. ISSN 0022-3549.
- [38] WU, C. Y.; RUDDY, O. M.; BENTHAM, A. C.; HANCOCK, B. C.; BEST, S. M.; ELLIOTT, J. A. Modelling the mechanical behaviour of pharmaceutical powders during compaction. *Powder Technology*, v. 152, n. 1-3, p. 107–117, 2005.
- [39] WU, C. Y.; HANCOCK, B. C.; MILLS, A.; BENTHAM, A. C.; BEST, S. M.; ELLIOTT, J. A. Numerical and experimental investigation of capping mechanisms during pharmaceutical tablet compaction. *Powder Technology*, v. 181, n. 2, p. 121–129, 2008. ISSN 0032-5910.
- [40] LAMARCHE, K.; BUCKLEY, D.; HARTLEY, R.; QIAN, F.; BADAWY, S. Assessing materials' tablet compaction properties using the drucker-prager cap model. *Powder Technology*, Elsevier, 2014.
- [41] 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*, Elsevier, v. 45, n. 10, p. 3088–3106, 2008.
- [42] WAGLE, G. *Die Compaction Simulation: Simplyfying the application of a complex constitutive model using numerical and physical experiments*. Tese (Doutorado) — The Pennsylvania State University, 2006.
- [43] LU, C. *Determination of Cap Model Parameters using Numerical Optimization Method for Powder Compaction*. Tese (Doutorado) — Marquette University, 2010.
- [44] SHANG, C.; SINKA, I.; PAN, J. Constitutive model calibration for powder compaction using instrumented die testing. *Experimental mechanics*, Springer, v. 52, n. 7, p. 903–916, 2011.
- [45] BEDDOES, J.; BIBBY, M. *Principles of metal manufacturing processes*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [46] MELO, C. C.; SCHMITT, N.; CARVALHO, J.; BILLARDON, R.; CANTO, R. B. Identificação de parâmetros do processo de compactação do PTFE utilizando procedimento experimental associado à análise inversa pelo método dos elementos finitos. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 20° CBECiMat*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 11638–11645.

- [47] FISCHMEISTER, H. F.; ARZT, E. Densification of powders by particle deformation. *Powder metallurgy*, Maney Publishing, v. 26, n. 2, p. 82–88, 1983.
- [48] GERMAN, R. M. *Powder metallurgy & particulate materials processing*. [S.l.]: Metal powder industries federation Princeton, NJ, 2005. v. 105.
- [49] KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. de. *Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos*. [S.l.]: Blucher, 2013.
- [50] CARNAVAS, P. C.; PAGE, N. W. Elastic properties of compacted metal powders. *Journal of Materials Science*, v. 33, n. 18, p. 4647–4655, SEP 15 1998. ISSN 0022-2461.
- [51] DIETER, G. E. *Mechanical metallurgy*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1976. v. 3.
- [52] MISES, R. V. Göttinger nachrichten. *Math. Phys. Klasse*, p. 582, 1913.
- [53] DRUCKER, D.; PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly Journal of Applied Mathematics*, v. 10, n. 2, p. 157–165, 1952.
- [54] ABAQUS6.14. *Abaqus 6.14 Documentation*. Providence, RI, USA., 2014.
- [55] BESNARD, G.; HILD, F.; ROUX, S. “finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to portevin-le chatelier bands. *Experimental Mechanics*, v. 46, n. 6, p. 789–803, DEC 2006. ISSN 0014-4851.
- [56] HILD, F.; ROUX, S. *CORRELI-Q4: A software for Finite-Element displacement Field measurements by digital image correlation*. LMT-Cachan. [S.l.], 2008.
- [57] RIUL, C.; TITA, V.; CARVALHO, J. de; CANTO, R. B. Processing and mechanical properties evaluation of glass fiber-reinforced ptfe laminates. *Composites Science and Technology*, v. 72, n. 11, p. 1451–1458, 2012. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353812002084?v=s5>>.
- [58] TARPANI, J. R.; CANTO, R. B.; SARACURA, R. G. M.; IBARRA-CASTANEDO, C.; MALDAGUE, X. P. V. Compression after impact and fatigue of reconsolidated fiber-reinforced thermoplastic matrix solid composite laminate. *Procedia Materials Science*, v. 3, n. 0, p. 485 – 492, 2014. ISSN 2211-8128. 20th European Conference on Fracture. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814000820>>.
- [59] 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*, SciELO Brasil, v. 24, n. 5, p. 612–619, 2014.

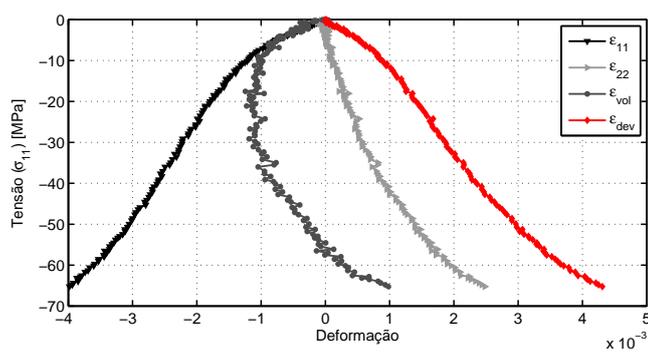
- [60] SCIUTI, V. F.; ANGÉLICO, R. A.; BOSE-FILHO, W. W.; SCHMITT, N.; CANTO, R. B. Identificação dos parâmetros de um modelo de comportamento mecânico para o PTFE sob -10°C assistida pela técnica de correlação de imagens digitais e por métodos de otimização. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 21° CBECiMat*. Cuiabá: [s.n.], 2014. p. 7109–7116.
- [61] 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: [s.n.], 2014. p. 7141–7148.
- [62] TITA, V.; CALIRI, M. F.; ANGÉLICO, R. A.; CANTO, R. B. Experimental analyses of the poly (vinyl chloride) foams' mechanical anisotropic behavior. *Polymer Engineering & Science*, Wiley Online Library, 2012.
- [63] STAFUZZA, D. B. D.; RODRIGUES, J. A.; MIYAJI, D.; CANTO, R. B. Aplicação da técnica de correlação de imagens digitais ao método da cunha de energia de fratura em concretos refratários. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 20° CBECiMat*. Joinville: [s.n.], 2012. p. 2300–2307.
- [64] SARACURA, R. G. M.; CANTO, R. B.; PANDOLFELLI, V. C.; SCHMITT, N.; HILD, F. Surface crack network detection on MgO-based refractory castable by digital image correlation. *China's Refractories*, v. 24, p. 32–37, 2015.
- [65] SARACURA, R. G. M. *Estudo da fissuração de concretos refratários durante o processo de cura auxiliado pela técnica de correlação de imagens digitais (exame de qualificação)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- [66] LEMOS, S.; COSTA, E. M. da; SANTOS, C. A. dos; COSTA, C. E. da; DEDAVID, B. A. Aplicação do processo de consolidação de pós metálicos por constricção radial (ccr) para a produção de pré-formas de ferro. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 63, n. 3, 2010.
- [67] LOBO, F. C. Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos. comunicação, 5. reunião associação brasileira de normas técnicas, publ. *Inst. Nac. Tecnol., Rio De Janeiro*, 1943.
- [68] FEDERZONI, L.; RIEDEL, H.; COUBE, O.; OLDENBURG, M.; HAGGBLAD, H.; GETHIN, D.; MOSBAH, P.; VIRTA, J.; MARTIKAINEN, H.; FRACHON, A. State of the art review-comparison of computer models representing powder compaction process. *Powder Metallurgy*, INST MATERIALS 1 CARLTON HOUSE TERRACE, LONDON SW1Y 5DB, ENGLAND, v. 42, n. 4, p. 301–311, 1999.

APÊNDICE A

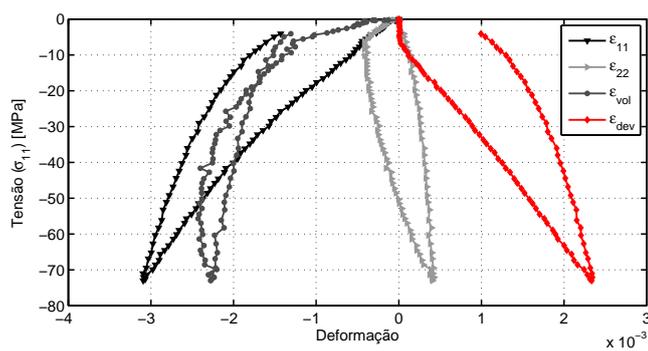
Ensaio monotônicos de compressão simples: tensão σ_{11} em função das deformações: ε_{11} , ε_{22} , ε_{vol} e ε_{dev} .



(a) cs82-02



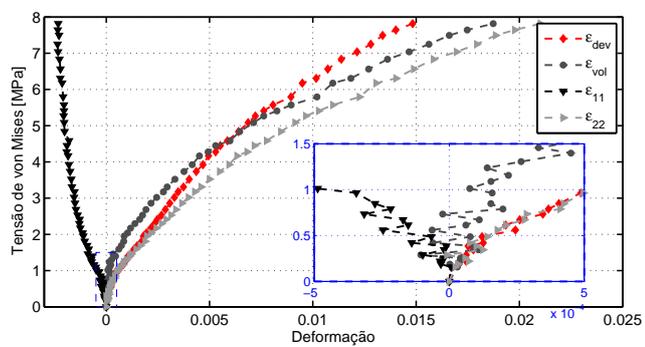
(b) cs91-01



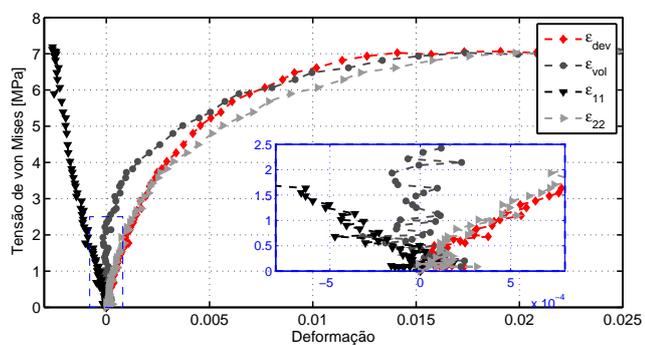
(c) cs96-02

APÊNDICE B

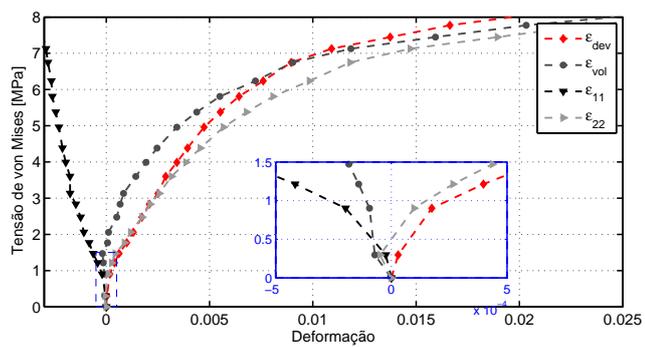
Ensaio monotônicos de compressão diametral ($\rho_{rel} = 0,82$).



(a) br82-01



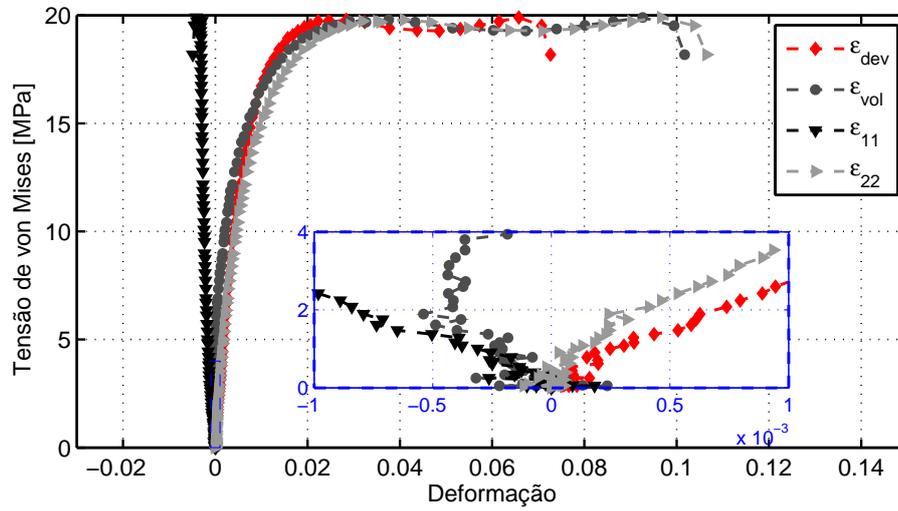
(b) br82-02



(c) br82-03

APÊNDICE C

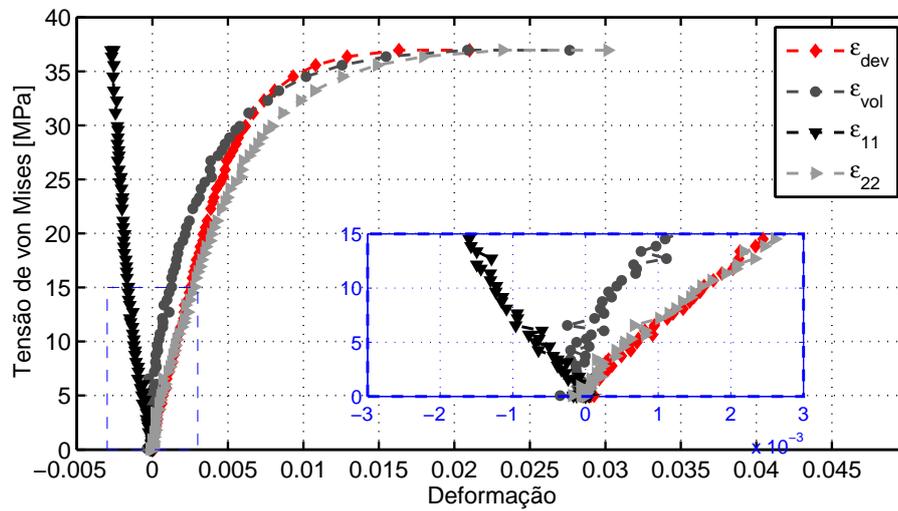
Ensaio monotônicos de compressão diametral ($\rho_{rel} = 0,91$).



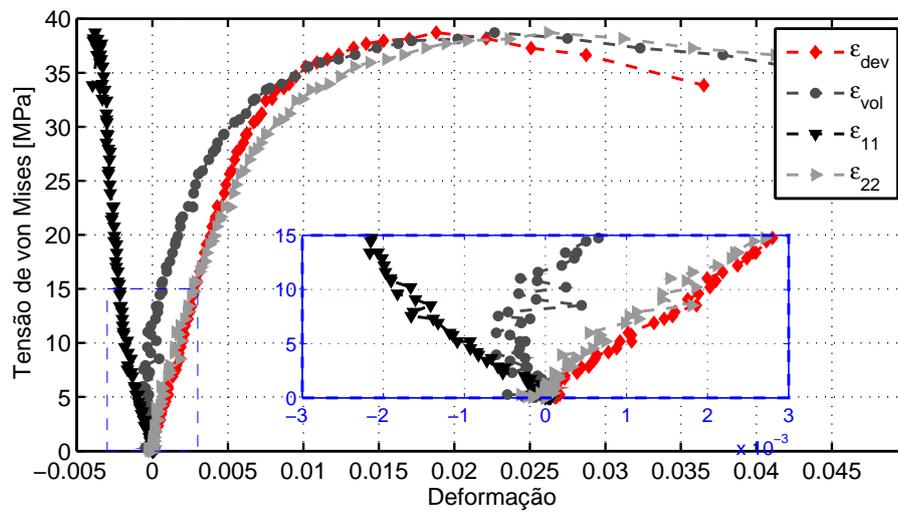
(a) br91-01

APÊNDICE D

Ensaio monotônicos de compressão diametral ($\rho_{rel} = 0,96$).



(a) br96-03



(b) br96-04

ANEXO A

Laudo das propriedades do pó fornecido pela Höganäs.

Composition		Resultados dos Testes		Especificação		ISSUE	ISSUI
	BAL %	Unid	MIN	MAX			
PRCPRIEIDADES QUÍMICAS							
ASC 100.29	2.96 %						
Fe3F	1.00 %						
Kenclube P11	0.10 %						
GRAFITE 9925 MP							
PRCPRIEIDADES FÍSICAS							
Densidade Aparente (+24h)	3.04 g/cm3		2.90	3.20 g/cm3			
Escoamento (+24h)	29.8 sec/50g		6.90	38.0 sec/50g			
Compressibilidade (600MPa)	7.01 g/cm3						
<p>19/03/10</p> <p>2013-09-03</p> <p>BRT</p> <p>COMMISSÃO</p> <p>Inspection certificate EN 10 204 3.1</p> <p>Aprovado por <i>JULIO PAQUAZEN</i> Quality Control Manager</p>							
Höganäs 		CERTIFICADO DE ANALISE			Pág: 1(1)		
Número do item PO DE FERRO BSM 1018 Código Produto 081325 PO DE FERRO BSM 1018 PO DE FERRO BSM 1018 - BSM1018-REV02		Nº lote 1687315 Nº pedido 0010186182			Dt Impressão 2013-09-03 Entrega 1477654 Expediente 3176955		
Quantidade 4000,00 Kg		Nossa Referência			Cliente BS IND. E COM. DE PRODUTOS MET. LTDA R PREFEITO JOSE CARLOS, SANTA JULIA ITUPEVA		
		Data produção 2013-08-30			Qtd produzida 5040 Kg		
					Dt expiração 2014-02-26		
					21318		
					www.hoganas.com.br		
ADMINISTRATION / FACTORY Höganäs Brasil Ltda Av. Pires José Marinho 110 - Vila Sucas Mogi das Cruzes - SP - Cep: 08810-020 BRASIL		Telephone +55 11 4793-7711 Telex +55 11 4793-7708			FILIAL VITÓRIA Höganäs Brasil Ltda Rodovia SP 101, Nova SMI - Rosário do Fomento Bahia - ES - Cep: 27161-901 BRASIL		
					Telephone +55 11 4793-7711 Telex +55 11 4793-7708		

ANEXO B

Rotina em FORTRAN que define a variável deformação plástica volumétrica e modifica os parâmetros do modelo de material a cada incremento da simulação computacional.

```
G:\elasticity_variation_epsvol_5.for                               segunda-feira, 13 de julho de 2015 17:34
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,TIME,DTIME,
1  CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,KSTEP,KINC,
2  NDI,nshr,coord,jmac,jmatyp,matlayo,laccflg)
C
C   INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
C
C   CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
C   CHARACTER*3  FLGRAY(15)
C   DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),T(3,3),TIME(2),*
C   coord(*),jmac(*),jmatyp(*)
C   DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15)
C
C
C   EPSVOL=STATEV(1)
C
C GET STRESS FROM PREVIOUS INCREMENT
CALL GETVRM('PE',ARRAY,JARRAY,FLGRAY,jrcd,
$   jmac, jmatyp, matlayo, laccflg)
PE11 = ARRAY(1)
PE22 = ARRAY(2)
PE33 = ARRAY(3)
C
EPSVOL = -(PE11+PE22+PE33)
C
FIELD(1) = EPSVOL
C
STATEV(1) = FIELD(1)
C
RETURN
END
```