

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPORTAMENTO
PLÁSTICO DO SISTEMA ARGILA-ÁGUA NO PROCESSO DE
EXTRUSÃO**

Fernando Augusto de Andrade

Orientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, Ph.D.
Coorientador: Prof. Dachamir Hotza, Dr. –Ing.

Florianópolis, outubro de 2009.

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPORTAMENTO
PLÁSTICO DO SISTEMA ARGILA-ÁGUA NO PROCESSO DE
EXTRUSÃO**

Dissertação apresentada
ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais,
do Centro de Ciências
Tecnológicas da
Universidade Federal de
Santa Catarina, para a
obtenção do grau de
Mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais.

Fernando Augusto de Andrade

Florianópolis, outubro de 2009.

Ficha Catalográfica

ANDRADE, Fernando Augusto de, 1982-

Modelamento matemático do comportamento plástico do sistema argila-água no processo de extrusão / Fernando Augusto de Andrade. – 2009.

94 p.: il.; 21 cm

Orientador: Hazim Ali Al-Qureshi. Co-orientador: Dachamir Hotza.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2009.

1. Argila. 2. Extrusão. 3. Modelamento. 4. Plasticidade. I. Al-Qureshi, Hazim Ali, II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPORTAMENTO
PLÁSTICO DO SISTEMA ARGILA-ÁGUA NO PROCESSO DE
EXTRUSÃO**

Fernando Augusto de Andrade

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do Título de Mestre,
Área de Concentração Cerâmica
e aprovada em sua forma final pelo Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Prof. Dr. Hazim Ali Al-Qureshi
Orientador (EMC/UFSC)

Prof. Dr. Dachamir Hotza
Coorientador (EQA/UFSC)

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira
Coordenador - PGMAT

Banca examinadora:

Prof. Dr. Orestes Estevam
Alarcon
(EMC/UFSC)

Prof. Dr. Guilherme Mariz de
Oliveira Barra
(EMC/UFSC)

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Membro externo (UFRGS)

Florianópolis, outubro de 2009.

A todos aqueles que acreditam em seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, na pessoa de seus colaboradores, que direta ou indiretamente contribuíram para o aprendizado e desenvolvimento do acadêmico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, coordenadores, professores e colaboradores.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro da bolsa de mestrado.

Ao orientador deste trabalho, Professor Hazim Ali Al-Qureshi, pelo carinho, paciência e por toda sua disposição em ensinar, que só um grande mestre possui.

Ao coorientador deste trabalho, Professor Dachamir Hotza, por sua notável dedicação ao ensino e pesquisa.

Ao pessoal da Engenharia Civil no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica: Roque, Luiz Henrique, Renato e Prof. Humberto Roman. No Laboratório de Solos: Karina, César e Prof. Marciano Maccarini. Ao Fabio, Carmen e Prof. João Laurindo, do Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos no Departamento de Engenharia de Alimentos. A Marilena Valadares da UDESC/Joinville.

A Débora Schmitz, Daniel Holanda, Alencar Milioli e Leandro Golinski pela presteza em ajudar nos trabalhos experimentais.

À empresa Paraná Mineração pela disponibilização das argilas para realização dos trabalhos.

Aos amigos do Cermat, pela convivência, amizade e constante troca de informações visando sempre o aprendizado comum.

À Muriélle Benthien, por acreditar sempre no meu potencial e estimular meu aprimoramento pessoal e profissional.

À minha família, por toda a educação e o amor que sempre tive, sempre incentivando e acolhendo minhas decisões.

A Deus, por colocar em meu caminho pessoas com quem posso aprender e evoluir sempre.

“A verdadeira revolução não é revolução violenta, mas a que se realiza pelo cultivo da integração e da inteligência de entes humanos, os quais, pela influência de suas vidas, promoverão gradualmente radicais transformações na sociedade.”

Jiddu Krishnamurti

RESUMO

As argilas, quando misturadas com água, adquirem a propriedade chamada plasticidade que tem papel fundamental durante o seu processamento. As técnicas empregadas na caracterização da plasticidade muitas vezes não revelam resultados quantitativos que permitam sua aplicação em modelos matemáticos do processo de conformação a que serão submetidas as argilas. Este projeto teve por objetivo estudar os métodos empregados na medição de plasticidade do sistema água-argila e desenvolver um modelo matemático baseado em ensaio de compressão para avaliação da plasticidade. Foram estudadas três argilas e a plasticidade foi também caracterizada pelos métodos de Pfefferkorn e de Atterberg. A partir dos ensaios de compressão, parâmetros foram obtidos para inserção no modelo matemático desenvolvido para o processo de extrusão. Foi possível observar uma correlação entre tensão efetiva de compressão e umidade, dentro de cada grupo de argila. Em seguida, os resultados teóricos da pressão de extrusão foram comparados aos resultados experimentais para bocais circulares e retangulares. Os modelos desenvolvidos mostraram um ótimo acordo com os valores experimentais obtidos, bem como aqueles encontrados na literatura. Para a equação que modela o processo de extrusão, a tensão efetiva obtida pelo ensaio de compressão foi um parâmetro significativo que revela o comportamento da argila durante o seu processamento.

Palavras-chave: argila, extrusão, modelamento, plasticidade,

ABSTRACT

The clays, when mixed with water, acquire the property known as plasticity which has a key role during processing. The techniques used in the characterization of plasticity often does not show quantitative results that allow their application in mathematical models of the forming process, to which the clays will be submitted. This project aimed to study the methods used to measure the plasticity of clay-water systems and develop a mathematical model based on compression test to evaluate the plasticity. Three clays were studied and plasticity was also characterized by Atterberg's and Pfefferkorn's methods. From the compression test, parameters were obtained for inclusion in the mathematical model developed for the extrusion process. Then, the theoretical results of the extrusion pressure were compared with experimental results for circular and rectangular dies. The developed models showed a good agreement with experimental values obtained and those found in the literature. For the equation modeling the extrusion process, the effective stress obtained by compression test was a significant parameter that reveals the behavior of clay during processing.

Key-words: clay, extrusion, modelling, plasticity,

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

<i>Figura 3.1 - Estrutura da caulinita (Adaptado de CALLISTER, 2007).</i>	6
<i>Figura 3.2 - Influência da água do mar no (a) limite líquido e (b) índice de plasticidade para argilas estudadas por diversos autores (Adaptado de YUKSELEN-AKSOY et al., 2008).</i>	8
<i>Figura 3.3 – Estados de consistência e limites de plasticidade para argilas (Adaptado de REED, 2005).</i>	10
<i>Figura 3.4 – Índice de plasticidade em função do limite plástico pra diversas argilas (Adaptado de DONDI, 1999).</i>	11
<i>Figura 3.5 – Efeito de substâncias orgânicas sobre o limite plástico (Adaptado de ZENTAR et al., 2008).</i>	12
<i>Figura 3.6 - Efeito da temperatura sobre o limite líquido para diferentes combinações de argilas (Adaptado de JEFFERSON AND ROGERS, 1998).</i>	14
<i>Figura 3.7 – Curva típica de um ensaio de compressão (Adaptado de RIBEIRO, 2003).</i>	17
<i>Figura 3.8 – Curva de trabalhabilidade obtida por ensaio de compressão. (Adaptado de BARAN et al., 2001)</i>	18
<i>Figura 3.9 – Esquema dos processos unitários para a extrusão.</i>	21
<i>Figura 3.10 – Esquema de extrusão com pistão. (adaptado de CALLISTER, 2007)</i>	22
<i>Figura 3.11 – Esquema de extrusão utilizando parafusos helicoidais (a) simples e (b) duplos. (adaptado de HÄNDLE, 2007).</i>	24
<i>Figura 3.12 – Perfil de deformação desenvolvido durante a extrusão (HÄNDLE, 2007).</i>	24
<i>Figura 3.13 – Cálculo da energia de deformação. (Adaptado de DIETER, 1988)</i>	29
<i>Figura 4.1 – Aparelho para medição do índice de plasticidade de Pfefferkorn. (E. J. PAYNE, 2008)</i>	32
<i>Figura 4.2 – Esquema de filmagem do ensaio de compressão.</i>	34
<i>Figura 4.3 – Laminador refinador Gelenski LIG-05. (GELENSKI, 2009)</i>	35
<i>Figura 4.4 – Extrusora Gelenski MVIG-05. (GELENSKI, 2009)</i>	36
<i>Figura 4.5 – Esquema de instalação do manômetro.</i>	36
<i>Figura 5.1 – Processo de compressão em um cilindro argiloso e análise de volume infinitesimal do corpo-de-prova.</i>	37
<i>Figura 5.2 - Processo de extrusão simplificado.</i>	43
<i>Figura 5.3 - Processo de extrusão com atrito.</i>	46
<i>Figura 5.4 - Processo de extrusão com variação angular.</i>	50

<i>Figura 5.5 - Balanço de forças na região (A).</i>	50
<i>Figura 5.6 - Balanço de forças na região (B).</i>	54
<i>Figura 5.7 – Variação da pressão total em função da distância z percorrida pelo pistão.</i>	57
<i>Figura 5.8 – Variação da pressão na primeira parte da equação.</i>	58
<i>Figura 5.9 – Variação da pressão devido à segunda parte da equação.</i>	58
<i>Figura 5.10 – Variação da pressão devido à terceira parte da equação.</i>	59
<i>Figura 5.11 – Variação de pressão total em função de z, para alguns valores de Raio final.</i>	60
<i>Figura 5.12 – Variação de pressão total em função de z, para alguns valores de Lc.</i>	60
<i>Figura 5.13 – Variação de pressão total em função de z, para alguns valores de μ do cilindro.</i>	61
<i>Figura 5.14 – Variação de pressão total em função de z, para alguns valores de μ_w.</i>	61
<i>Figura 5.15 – Curvas teóricas geradas e resultados experimentais publicados por Benbow e Bridgwater (1993), mostrando excelente acordo para o regime estacionário.</i>	62
<i>Figura 5.16 – Variação da pressão total em função da distância z percorrida pelo pistão.</i>	63
<i>Figura 5.17 - Variação da pressão na primeira parte da equação.</i>	63
<i>Figura 5.18 - Variação da pressão devido à segunda parte da equação.</i>	64
<i>Figura 5.19 – Difração de raios-x para as três argilas.</i>	66
<i>Figura 5.20 – Ensaio de plasticidade de Pfefferkorn.</i>	68
<i>Figura 5.21 – Evolução do ensaio de compressão. Amostra com 48,9 % de umidade da argila A3.</i>	69
<i>Figura 5.22 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A1.</i>	70
<i>Figura 5.23 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A2.</i>	71
<i>Figura 5.24 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A3.</i>	71
<i>Figura 5.25 – Amostras da argila A3 ao término do ensaio, mostrando semelhança do efeito embarrilamento, com (a) 42,9 %, (b) 48,9 % e (c) 56,5 % de umidade.</i>	73
<i>Figura 5.26 – Variação do coeficiente de atrito altera a forma das curvas de compressão. Argila A2 com 38,6 % de umidade. Tensão efetiva de compressão de 27,0 kPa.</i>	73
<i>Figura 5.27 - Variação da tensão efetiva de compressão altera a forma das curvas de compressão. Argila A2 com 38,6 % de umidade. Coeficiente de atrito de 0,15.</i>	74

<i>Figura 5.28 – Correlação entre a tensão efetiva de compressão e a umidade, para as argilas (a) A1, (b) A2 e (c) A3. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,48$.</i>	75
<i>Figura 5.29 – Correlação entre a pressão experimental de extrusão para bocal circular e a tensão efetiva de compressão, para as argilas (a) A2, (b) A3 e (c) A1. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,97$.</i>	78
<i>Figura 5.30 – Correlação entre a pressão experimental de extrusão para bocal retangular e a tensão efetiva de compressão, para as argilas (a) A2, (b) A3 e (c) A1. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,94$.</i>	79
<i>Figura 5.31 – Variação da pressão total em função do coeficiente de atrito do cilindro, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.</i>	80
<i>Figura 5.32 – Variação da pressão total em função do coeficiente de atrito entre parede e massa, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.</i>	81
<i>Figura 5.33 – Variação da pressão total em função do raio final, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico. Raio inicial: 38 mm.</i>	82
<i>Figura 5.34 – Variação da pressão total em função da relação Raio Inicial / Raio Final, para diferentes níveis de umidade. Argila A1.</i>	82
<i>Figura 5.35 – Variação da pressão total em função do ângulo de saída da extrusora, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.</i>	83
<i>Tabela 5.1 – Análise química das argilas</i>	65
<i>Tabela 5.2 – Quantificação das fases presentes nas argilas</i>	65
<i>Tabela 5.3 – Limites de Atterberg</i>	66
<i>Tabela 5.4 – Índices de Pfefferkorn</i>	67
<i>Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de compressão</i>	72
<i>Tabela 5.6 – Parâmetros da extrusão das argilas para bocal circular</i>	76
<i>Tabela 5.7 – Parâmetros da extrusão das argilas para bocal retangular</i>	77

ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
A_0	Área inicial
A_f	Área final
F	Força externa aplicada
F_r	Força radial por unidade de volume
h_0	Altura inicial
h	Altura final
IPA	Índice de plasticidade de Atterberg
LL	Limite líquido
LP	Limite plástico
L_0	Comprimento inicial do cilindro da extrusora
P_{ave}	Pressão média de extrusão
r	Raio instantâneo do corpo-de-prova no processo de compressão
R_0	Raio final do corpo-de-prova no processo de compressão
R_f	Raio final da massa no processo de extrusão
W_e	Trabalho externo
W_i	Trabalho interno

Letras Gregas

$\bar{\varepsilon}$	Deformação efetiva
μ_{comp} argilosa	Coefficiente de atrito entre a face do punção e a massa
μ_w argilosa	Coefficiente de atrito entre a parede cilíndrica e a massa
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva
$\bar{\sigma}_{ave}$	Tensão média de extrusão
$\bar{\sigma}_{comp}$	Tensão efetiva de compressão
σ_r	Tensão radial
σ_θ	Tensão normal
σ_z	Tensão axial de compressão

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	vii
ABREVIATURAS E SIGLAS	x
1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Revisão bibliográfica	4
3.1. Argilas	4
3.1.1. Características e aplicações	4
3.1.2. Estrutura dos argilominerais.....	5
3.2. Água	7
3.3. Plasticidade	9
3.3.1. Fatores que afetam a plasticidade.....	11
3.3.1.1. Relacionados à massa	11
3.3.1.2. Relacionados ao processo	13
3.3.2. Índice de Plasticidade de Atterberg.....	15
3.3.3. Índice de Plasticidade de Pfefferkorn.....	15
3.3.4. Curvas Tensão-Deformação	16
3.3.5. Vantagens e limitações dos métodos de medição de plasticidade	18
3.4. Extrusão	20
3.5. Cálculos de esforços em extrusão	25
3.5.1. Modos de deformação	26
3.5.1.1. Deformação homogênea	26
3.5.1.2. Deformação por atrito.....	27
3.5.1.3. Deformação redundante.....	27
3.5.2. Método da deformação homogênea	28
3.5.3. Método dos blocos	29
4. Materiais e Métodos	31

4.1.	Composição química	31
4.2.	Plasticidade pelo Índice de Atterberg.....	31
4.3.	Plasticidade pelo Índice de Pfefferkorn	32
4.4.	Comportamento da argila sob compressão.....	33
4.5.	Comportamento da argila sob extrusão	34
5.	<i>Resultados e discussão.....</i>	<i>37</i>
5.1.	Modelamento matemático para plasticidade e extrusão	37
5.1.1.	Equação do processo de compressão	37
5.1.2.	Extrusão.....	42
5.1.2.1.	Equação simplificada do processo de extrusão sem atrito	42
5.1.2.2.	Processo de extrusão sem atrito	44
5.1.2.3.	Processo de extrusão com atrito e sem variação angular	46
5.1.2.4.	Processo de extrusão com atrito e variação angular...	49
5.2.	Análise teórica da influência das variáveis	56
5.2.1.	Processo de Extrusão sem variação angular	56
5.2.2.	Processo de Extrusão com variação angular.....	62
5.3.	Resultados experimentais	65
5.3.1.	Composição química e mineralógica.....	65
5.3.2.	Plasticidade pelo Índice de Atterberg	66
5.3.3.	Plasticidade pelo Índice de Pfefferkorn.....	67
5.3.4.	Comportamento da argila sob compressão	67
5.3.5.	Caracterização do comportamento da argila sob extrusão...	75
6.	<i>Considerações finais</i>	<i>84</i>
7.	<i>Sugestões de trabalhos futuros.....</i>	<i>86</i>
8.	<i>Publicações.....</i>	<i>87</i>
9.	<i>Referências.....</i>	<i>88</i>

1. Introdução

A argila é um material usado desde os tempos mais remotos para variadas aplicações, tanto na área cerâmica quanto em outras áreas tecnológicas, devido a sua fácil extração, trabalhabilidade e abundância na natureza. Pode-se dizer que em quase todos os segmentos de cerâmica tradicional a argila constitui total ou parcialmente a composição das massas.

A indústria cerâmica brasileira tem participação de cerca de 1% no PIB nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pelo setor de cerâmica vermelha. O setor de cerâmica vermelha consome cerca de 70 milhões de toneladas de matérias-primas por ano, através das 12 mil empresas distribuídas pelo país, a maioria de pequeno porte, gerando centenas de milhares de empregos (MACEDO et al., 2008).

Para o processamento de materiais baseados em argilas, equipamentos semelhantes às extrusoras atuais começaram a ser utilizados desde o século XVI e muitos avanços no campo da tecnologia da extrusão foram alcançados. Existem poucas áreas na tecnologia cujo desenvolvimento tem encontrado tanto campo de aplicação como a extrusão. Inicialmente, era aplicada apenas para materiais cerâmicos simples, mas hoje em dia a extrusão é aplicada nas mais diversas áreas, como na indústria de polímeros, metalúrgica, química ou mesmo alimentícia. Atualmente, muitos estudos nesta área vem se concentrando na obtenção de cerâmicas avançadas a partir da extrusão.

Apesar disso, ensaios que simulem o comportamento da argila durante a extrusão, bem como o modelamento matemático de algumas de suas características, em especial a plasticidade, torna-se dificultada pelo fato de muitas variáveis estarem envolvidas e não haver consenso quanto à escolha do método a ser utilizado.

Os mecanismos que governam a plasticidade de uma argila e por consequência, a sua conformabilidade aplicada à extrusão, ainda dependem em muitos casos, do *know-how*, da habilidade do operador na realização dos ensaios, e de equações e constantes empíricas que se adéquam somente a casos específicos. Sendo assim, modelos de caracterização da plasticidade que se assemelham à realidade do processamento são mais úteis e permitem uma otimização das

propriedades finais de um produto, pelo maior conhecimento acerca do processo.

A medida da plasticidade é fundamental para que se consigam produtos extrudados isentos de defeitos e com menor tempo de processamento, além de garantir a qualidade para as próximas etapas de processamento, como o corte, tratamento térmico e acabamento. Além disso, o conhecimento acerca das variáveis envolvidas permite definir as limitações de cada uma no processo, possibilitando assim apontar ajustes ou melhorias para que se produzam massas cerâmicas com plasticidade otimizada para cada aplicação.

Até recentemente, a extrusão de massas cerâmicas tem sido compreendida e estudada de modo limitado. A razão disso é o fato de que, historicamente, a extrusão de massas cerâmicas estava restrita à produção de tijolos, telhas ou produtos de baixo custo da cerâmica vermelha que não requeriam rigoroso controle dimensional ou de qualidade (BURBIDGE & BRIDGWATER, 1995).

De acordo com Ribeiro (2003), a extrusão de materiais cerâmicos visa a produzir produtos com geometria de seção transversal constante e com um comprimento de acordo com o corte do material que sai da extrusora. A economia energética, a regularidade do fluxo e a pressão adequada de extrusão são fatores que dependem do tipo de fieira e da plasticidade da massa.

Neste intuito, pretende-se com o desenvolvimento deste trabalho apresentar a aplicação de um modelo matemático para o cálculo da pressão de extrusão para argilas, baseado no método aplicado à teoria da plasticidade dos metais, que já está bastante consolidado.

2. Objetivos

Este trabalho tem o objetivo geral de utilizar um modelo matemático a ser aplicado ao método da curva tensão-deformação para caracterização da plasticidade de sistemas argila-água. Este método, por sua vez, minimiza o efeito da adição de constantes empíricas e fornece parâmetros quantitativos para serem usados no modelamento do processo de extrusão de argilas.

Assim, os objetivos específicos são:

- Estudar as características e limitações dos métodos de medição de plasticidade em argilas;
- Caracterizar amostras de argilas com diferentes plasticidades utilizando-se métodos já consolidados, como índice de Atterberg e método de Pfefferkorn;
- Investigar os métodos de cálculo de esforços em conformação mecânica, aplicando os mesmos à extrusão de argilas;
- Efetuar ensaios de compressão em diferentes condições de plasticidade para cada argila, a fim de verificar a validade do modelo aplicado à plasticidade, bem como obter dados quantitativos para inserção no modelo matemático aplicado à extrusão;
- Obter dados experimentais do processo de extrusão com perfil circular e retangular, para verificar a coerência com o modelo teórico desenvolvido.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Argilas

O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água (SHAKELFORD & DOREMUS, 2008; SOUZA SANTOS, 1989).

Na natureza, as argilas ocorrem em praticamente todas as formações rochosas, desde as mais antigas até as mais recentes, em formações ígneas ou sedimentares. Comumente, originam-se da desagregação de rochas feldspáticas, por ação de intemperismo. Segundo Souza Santos (1989) são usualmente classificadas em dois grupos:

- *Argilas residuais ou primárias*: São aquelas que permaneceram no local em que se formaram devido a condições adequadas de intemperismo, topografia e natureza da rocha matriz. A maior parte dos caulins e bentonitas utilizados no Brasil são residuais. Caracterizam-se por apresentarem maior pureza, tamanho de partícula e dureza, porém sendo menos plásticas e tendo menor retração após a queima.
- *Argilas sedimentares ou secundárias*: Aquelas que foram removidas do local original de formação, seja por meio de correntes de água, geleiras ou do ar. Caracterizam-se por apresentarem menor pureza, tamanho de partícula e dureza. No entanto, necessitam mais água para adquirir plasticidade e têm maior retração após a queima.

3.1.1. Características e aplicações

Souza Santos (1989) e Bergaya et al. (2006) trazem algumas características para um material ser classificado como argila:

- Ser constituída essencialmente por argilominerais;
- Possuir elevado teor de partículas de diâmetro equivalente abaixo de 2 μm ;

- Quando pulverizada e umedecida, tornar-se plástica; após secagem ser dura e rígida e após queima em temperatura elevada (superior a 1000 °C) adquirir dureza de aço;
- Possuir capacidade de troca iônica de cátions entre 3 e 150 meq/100 g de argila;
- Apresentar anisotropia das camadas ou partículas;
- Possuir uma superfície externa, que seja facilmente modificada (por adsorção, troca iônica).

Quanto a argilominerais, esses são os minerais constituintes característicos das argilas, geralmente cristalinos. Quimicamente, são compostos de silicatos de alumínio hidratados, contendo outros elementos como magnésio, ferro, cálcio, sódio, potássio, lítio, entre outros. Além desses, uma argila pode conter também outros materiais e minerais, como sais solúveis, matéria orgânica e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, bem como minerais não-cristalinos ou amorfos (SOUZA SANTOS, 1989).

A argila se destaca nas mais diversas áreas como matéria-prima ou como componente acessório ou alternativo e entre elas pode-se citar o setor cerâmico, metalúrgico, de papel, de polímeros e petrolífero. Dentre as aplicações, citam-se tijolos e telhas, catalisadores, cimento, pesticidas, tintas e inseticidas, produtos alimentícios, trocadores de calor, materiais porosos expandidos, isoladores, produtos medicinais e farmacêuticos, entre outros.

3.1.2. Estrutura dos argilominerais

Os grupos fundamentais com os quais são constituídos todos os tipos de estruturas cristalinas dos argilominerais conhecidos são grupos octaédricos e tetraédricos de átomos ou íons de oxigênio e de íons de hidroxila, ao redor de pequenos cátions, principalmente Si^{4+} e Al^{3+} (ocasionalmente Fe^{3+} e Fe^{2+}) nos grupos tetraédricos e Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} e Ti^{4+} (ocasionalmente Cr^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Li^+) nos grupos octaédricos, geralmente com certo grau de substituição isomórfica.

Os grupos tetraédricos e octaédricos estão ligados entre si para formar folhas hexagonais contínuas. Essas folhas estão dispostas na forma de empilhamento, e de acordo com o arranjo espacial, podem formar diversas estruturas que dão origem aos argilominerais. As ligações entre os íons de uma mesma folha são ligações fortes

(covalentes e iônicas), mas as ligações entre as camadas (folhas) se dão de maneira fraca (forças de van der Waals). Esse último tipo de ligação é a responsável pela facilidade de ocorrer a clivagem paralela aos planos basais, conferindo aos sistemas argilosos a sua característica de plasticidade (SOUZA SANTOS, 1989).

O argilomineral mais abundante na natureza é a caulinita, e sua estrutura está apresentada na Figura 3.1. Nota-se que a caulinita é formada por duas camadas, ou folhas, uma de $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$, e outra de $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$. Os ânions do plano intermediário consistem em íons O^{2-} da camada de $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ bem como de íons OH^- que fazem parte da camada de $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$. Os cristais de caulinita são formados pelo empilhamento de várias dessas camadas, de forma quase hexagonal e tipicamente da ordem de 1 μm . A fórmula química final dessa unidade é $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ (CALLISTER, 2007).

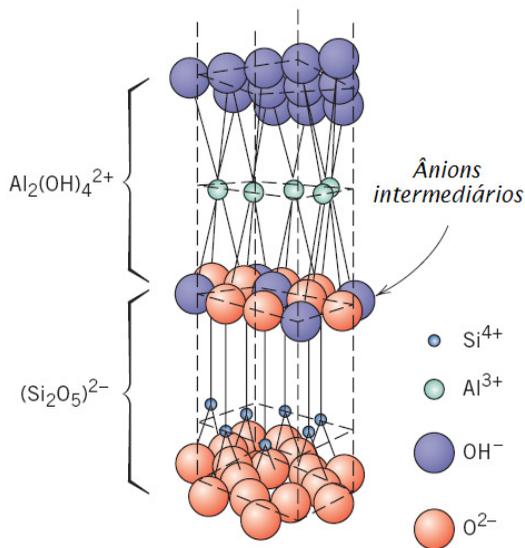


Figura 3.1 - Estrutura da caulinita (Adaptado de CALLISTER, 2007).

Outros tipos de argilominerais mais complexos podem surgir quando ocorre a substituição do Al^{3+} por outros íons como o Fe^{2+} ou Mg^{3+} . Como essas substituições deixam uma carga negativa nas unidades estruturais, pode ocorrer também uma compensação dessas cargas pela adição de íons alcalinos como Na^+ e K^+ ou alcalino-terrosos, como Mg^{2+} ou Ca^{2+} . Esses cátions, por sua vez, podem atacar a estrutura

entre as camadas, ou também se alojar nos sítios tetraédricos de Si-O (SHAKELFORD & DOREMUS, 2008).

3.2. *Água*

Os líquidos são usados no processamento cerâmico para molhar partículas e prover um meio viscoso entre eles para dissolver sais, compostos e substâncias poliméricas. A água é o principal líquido usado pra este fim devido ao seu baixo custo, disponibilidade e consistência (REED, 1995). Em processos industriais ou ensaios de laboratório, a água deve ser tratada e preparada para evitar a ocorrência de substâncias orgânicas e inorgânicas ou sais minerais suspensos na água. Uma propriedade de interesse é a dureza da água, que está relacionada com a concentração de íons de determinados minerais dissolvidos nesta substância. A dureza da água é proporcional ao conteúdo de sais presentes, como cálcio, magnésio e sódio, bem como também de alguns metais polivalentes como o ferro, alumínio, manganês, estrôncio e zinco.

Cruz et al. (2009) mostraram a influência do tipo de água na plasticidade de argilas. De acordo com os autores, a utilização de água destilada ou de água natural (não tratada e obtida a partir do sistema público do abastecimento) não mostrou variações expressivas no índice de plasticidade. Entretanto, a adição de cloreto de sódio em baixas concentrações (simulando a água salobra, como é comumente encontrada no Nordeste brasileiro), alterou significativamente o índice de plasticidade de Atterberg das argilas. Esses comportamentos podem estar associados a um efeito defloculante do sódio se sobrepondo ao efeito floculante do íon cloreto.

A influência de água do mar na plasticidade e consistência das argilas foi estudada por Yukselen-Aksoy et al. (2008). Os autores mostraram que apenas argilas com elevado limite líquido (acima de 110%) são afetadas pela utilização de água do mar (Figura 3.2). Notadamente, foi observado que o grupo de argilominerais da montimorilonita é mais afetado neste quesito do que o grupo das caulinitas, cloritas ou misturas de minerais argilosos.

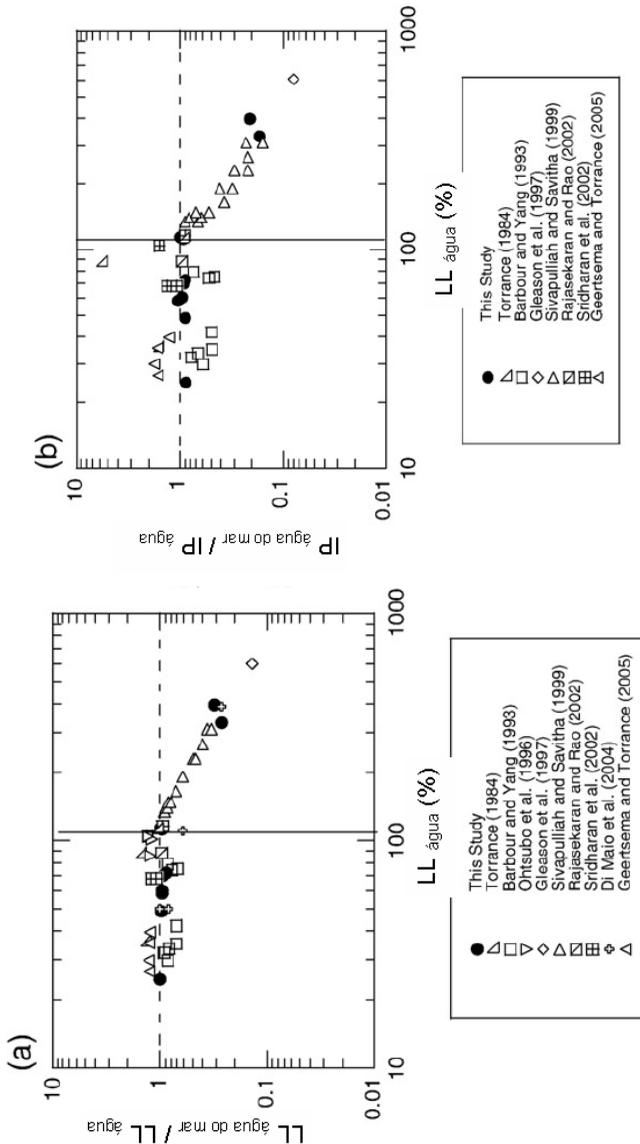


Figura 3.2 - Influência da água do mar no (a) limite líquido e (b) índice de plasticidade para argilas estudadas por diversos autores (Adaptado de YUKSELEN-AKSOY et al., 2008).

3.3. *Plasticidade*

A definição das características de comportamento plástico tem envolvido muitas áreas da ciência e engenharia e tem aplicações em diversos materiais, tais como solos, argilas, concreto, plástico e metais. No início, o conceito de plasticidade foi utilizado para explicar e caracterizar o comportamento reológico de materiais que têm comportamento sólido ou líquido, dependendo das circunstâncias (ANCEY, 2007).

Segundo Ancey (2007) as investigações sobre plasticidade começaram com os estudos de Coulomb no século 18, em seu trabalho sobre a estabilidade das pilhas e aterros. No século passado, os trabalhos de Mohr na análise de tensões serviram como base para detalhar alguns conceitos utilizados atualmente como a deformação elástica e plástica, escoamento e cisalhamento localizado.

O termo plasticidade se refere à propriedade que um sistema possui de se deformar pela aplicação de uma força e de manter sua forma quando essa força é retirada. Nas argilas, a plasticidade é resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares. A plasticidade se desenvolve quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível do argilomineral com uma película de “água rígida” (água um pouco orientada, com propriedades mais próximas do gelo do que a água no estado líquido) mais um pouco de água líquida, não orientada, que age como um meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada (SOUZA SANTOS, 1989). Sendo assim, argilas com composições mineralógicas diferentes apresentam comportamentos plásticos diferentes, embora os seus teores de água possam ser iguais.

Reed (1995) usa o termo "consistência" referindo-se a estados de matérias-primas cerâmicas, ou seja, em pó, grânulos, corpo plástico, pasta e barbotina, que são dependentes do conteúdo líquido. A Figura 3.3 apresenta a resistência ao cisalhamento aparente em função do teor de água para um típico material argiloso. Quando a água é adicionada à argila seca, o primeiro efeito é um aumento da coesão, o que tende a atingir um máximo, quando a água consegue deslocar quase todos os poros de ar entre as partículas. A quantidade mínima de água necessária para fazer uma argila apresentar plasticidade é comumente chamado "limite plástico" (LP). Adição de água entre os poros induz a formação

de corpo com alta resistência ao escoamento que, no entanto, pode facilmente trincar ou romper sob deformação.

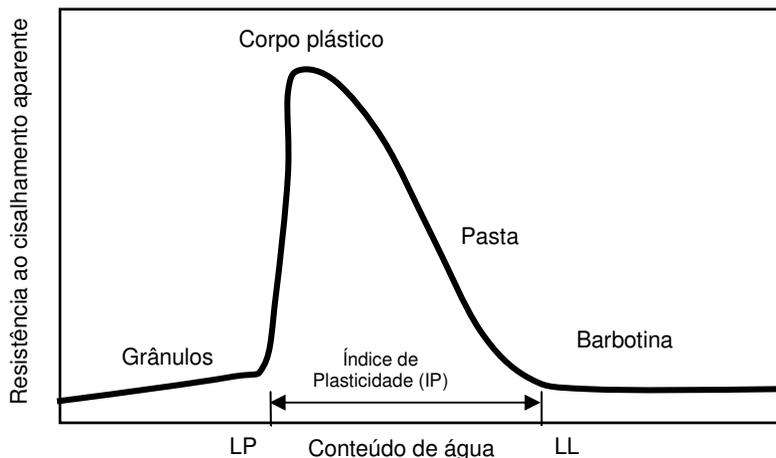


Figura 3.3 – Estados de consistência e limites de plasticidade para argilas (Adaptado de REED, 2005).

O corpo plástico argiloso pode suportar uma considerável adição de água, passando por uma fase em que permanece seco para os dedos das mãos e é facilmente moldado. Quando a proporção de água aumenta, o corpo passa para uma pasta, em que a resistência ao escoamento diminui progressivamente; a argila torna-se úmida e pegajosa para os dedos e não pode mais manter uma forma. O teor de água, no qual corresponde esta pasta pode ser associado ao chamado “limite líquido” (LL). Posteriormente, este se torna uma suspensão (barbotina). A diferença na porcentagem de água entre estes dois pontos, calculado para o peso seco da argila, pode ser expresso como o “índice de plasticidade” (IP). Esses pontos estão representados na Figura 3.3, para um típico material argiloso.

Para Souza Santos (1989), quanto mais plástica é uma argila, maior é o seu limite de plasticidade, significando que mais água é necessária para formar uma massa plástica. Já para Dondi (1999), argilas mais plásticas são aquelas que possuem um alto limite de plasticidade com um elevado índice de plasticidade, como é o caso das argilas do tipo “Montepiano FM”, exemplificado na Figura 3.4.

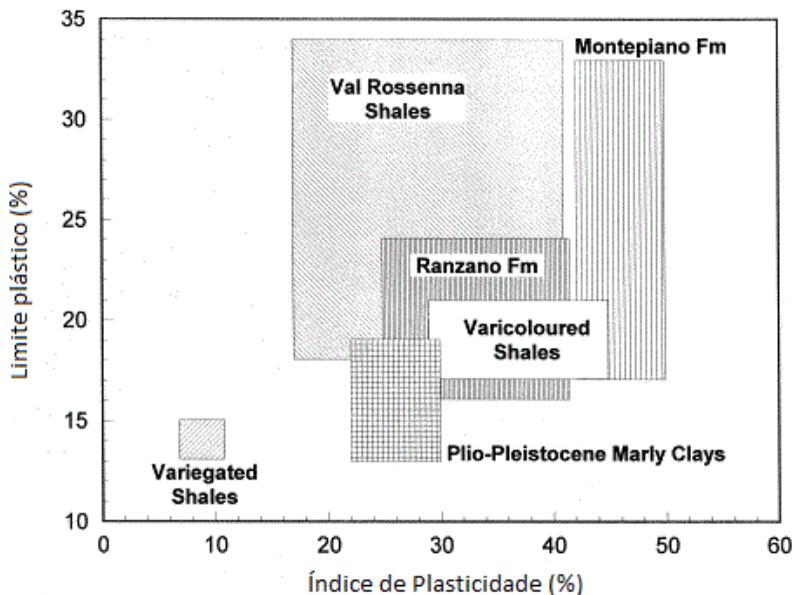


Figura 3.4 – Índice de plasticidade em função do limite plástico pra diversas argilas (Adaptado de DONDI, 1999).

3.3.1. Fatores que afetam a plasticidade

3.3.1.1. Relacionados à massa

Segundo Ribeiro et al. (2003), Handle (2007), e Al-Qureshi et al. (2008), a plasticidade depende de fatores intrínsecos à própria massa, tais como:

- Diferentes tipos de minerais argilosos existente na massa (bem como a proporção de minerais não plásticos e matéria orgânica),
- Granulometria, distribuição e área de superfície específica das partículas envolvidas e a forma dos cristais,
- Características da água (viscosidade, tensão superficial), bem como o estado de deflocação das partículas, que por

sua vez depende da troca iônica e da natureza e proporção de aditivos,

- Grau de deaeração da massa,
- Temperatura da massa.

A forma laminar de todos os argilominerais é favorável à plasticidade. Quando o limite de escoamento é ultrapassado, estas se orientam paralelamente à direção de cisalhamento, e uma grande quantidade de água tem um efeito lubrificante.

As argilas sedimentares apresentam uma presença mais elevada de substâncias orgânicas, melhorando a plasticidade das argilas. Isso ocorre porque estas têm uma superfície específica elevada e uma boa capacidade de moldagem. Isso foi estudado por Zentar et al. (2009), que demonstrou o efeito da matéria orgânica nos índices da plasticidade de Atterberg. Quando o material é lavado, praticamente não se observou diferença nesses limites, mas quando o material é tratado com água oxigenada para a eliminação da substância orgânica, uma redução do limite da plasticidade foi observada (Figura 3.5).

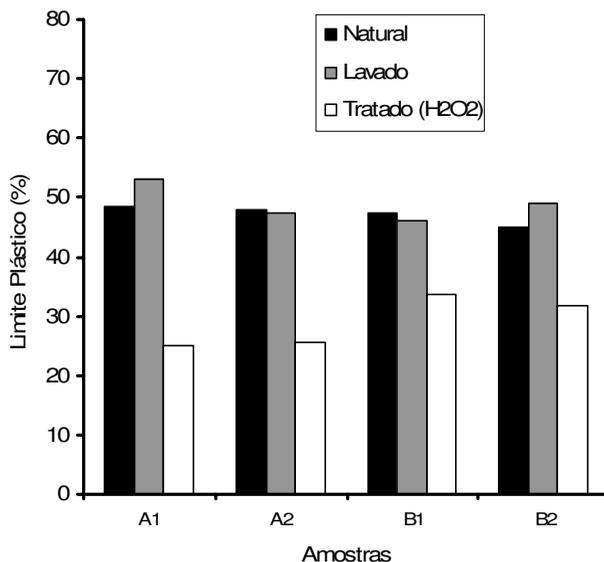


Figura 3.5 – Efeito de substâncias orgânicas sobre o limite plástico (Adaptado de ZENTAR et al., 2008).

A influência da matéria orgânica na plasticidade, entretanto, é controversa. É comum relatar que sua presença promove um aumento da plasticidade, mas alguns autores citam que não verificaram diferenças nos resultados após testes com remoção do material orgânico. Enquanto uma pequena quantidade de matéria orgânica pode ser útil no desenvolvimento da plasticidade, uma quantidade excessiva deixará a argila excessivamente pegajosa, difícil de trabalhar, e com alta retração durante a queima (MALKAWI et al., 1999; RIBEIRO et al., 2004).

Outro fator é a natureza de superfícies planas de uma partícula de argila. Por exemplo, a superfície de uma partícula de caulinita é constituída por grupos OH, os quais podem formar pontes de hidrogênio com a água e, assim, produzir um filme de moléculas orientadas de água. Essas superfícies são ausentes em matérias-primas não-argilosas como o talco ou pirofilito, e, portanto estas não são facilmente molhadas. No caso de micas hidratadas e montmorilonitas, propriedades plásticas são controladas por cátions trocáveis em superfícies planas.

3.3.1.2. Relacionados ao processo

Argilas com elevada área de superfície têm mais sensibilidade às mudanças de temperatura devido ao mecanismo de adsorção da água, que se torna mais evidente. Este fator é a chave para explicar a sensibilidade de alguns minerais para mudar seu limite líquido quando as mudanças de temperaturas ocorrem. Argilas com baixa área superficial apresentam uma redução no limite líquido em temperaturas elevadas, enquanto argilas com elevada área de superfície mostram uma tendência oposta (JEFFERSON & ROGERS, 1998). Por exemplo, esmectitas são consideravelmente mais sensíveis a variações de temperatura que caulinitas. Em argilas do tipo esmectitas, o limite do líquido aumenta com a temperatura, enquanto que uma ligeira diminuição ocorre com a caulinita (Figura 3.6).

Outro fator de impacto é a pressão. A argila que, na pressão ambiente, é plástica entre 20% e 30% de água, tem uma menor porosidade sob pressões muito elevadas e, portanto, só será plástica com menor conteúdo de água.

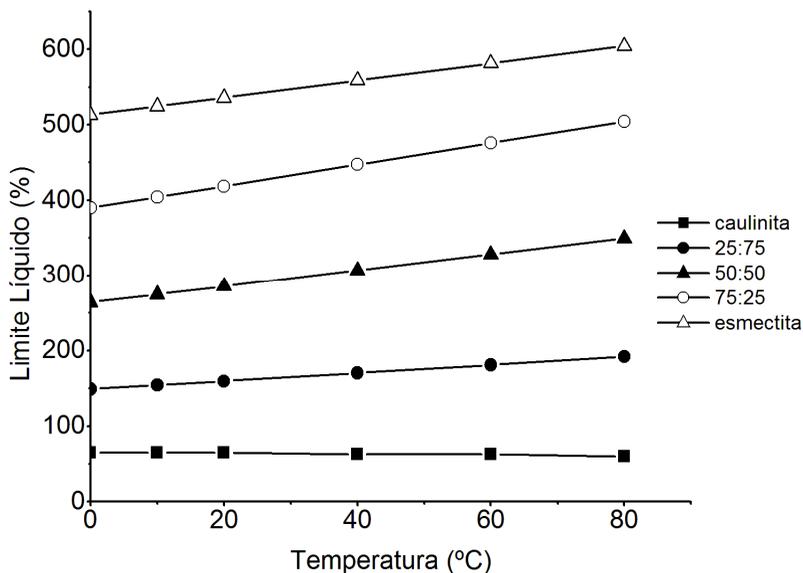


Figura 3.6 - Efeito da temperatura sobre o limite líquido para diferentes combinações de argilas (Adaptado de JEFFERSON AND ROGERS, 1998).

Finalmente, a presença de eletrólitos também é relevante, na medida em que estes afetam a carga elétrica das partículas. Por exemplo, pequenas adições de álcalis à caulinita aumentam a carga negativa sobre as partículas e promove a dispersão, e pequenas adições de ácidos promovem coagulação. A argila que dispersa facilmente, como nas argilas a base de sódio, requer menos água de plasticidade e apresenta um menor índice de plasticidade do que uma argila baseada em hidrogênio (ou seja, argila livre de eletrólito). Argilas baseadas em cálcio, por outro lado, são intermediárias na plasticidade entre argilas Na e H. Montmorilonitas, como seria de esperar, pela sua grande capacidade de troca catiônica, são muito mais afetadas pelos seus cátions. (Carman, 1949).

Segundo Dondi (2006) a reologia das pastas plásticas, como aquelas usadas na extrusão, não têm sido bem investigadas até os dias atuais, mesmo que métodos reológicos e modelos tenham sido propostos já há algum tempo para sistemas simplificados. Por outro lado, numerosos testes empíricos, como por exemplo, os limites de Atterberg, Pfefferkorn e Barna são usados na prática para avaliar a plasticidade das

argilas com o intuito de prever o comportamento durante a conformação. Alguns desses métodos fornecem resultados equivalentes (por exemplo: índice de Atterberg e índice de azul de metileno), porém, outros são independentes, como o índice de Pfefferkorn.

A seguir, são descritos os principais ensaios correntemente usados para determinação da plasticidade em argilas.

3.3.2. Índice de Plasticidade de Atterberg

Segundo Ribeiro et al. (2003), em geral uma massa mais plástica aceita mais água até fluir (comportamento de uma barbotina). Isto significa que uma argila mais plástica precisa de mais água, para desenvolver a plasticidade, do que outra menos plástica. Este é o fundamento de índice de plasticidade de Atterberg. Quando pequenas quantidades de água são adicionadas pouco a pouco a uma massa seca, alcança-se inicialmente um estado em que esta começa a apresentar alguma coesão. Este estado corresponde à quantidade mínima de água requerida para formação de um filme estável envolvendo cada partícula argilosa. Se continuar a ser adicionada mais água, a massa plástica torna-se cada vez mais mole, alcançando-se um estado em que começa a fluir sob ação do seu próprio peso (passa a comportar-se como uma barbotina).

O índice de plasticidade de Atterberg (IPA) é dado por:

$$\text{IPA} = \text{LL} - \text{LP} \quad (3.1)$$

em que o *limite plástico* (LP) é o teor de água, expresso em percentagem do peso de massa seca a 110 °C, acima do qual a massa argilosa pode ser enrolada em rolos, com cerca de 3 mm de diâmetro e cerca de 15 cm de comprimento, e em que o *limite líquido* (LL) é o teor de água, expresso em percentagem do peso de massa seca a 110 °C, acima do qual a massa flui como um líquido quando ligeiramente agitada.

3.3.3. Índice de Plasticidade de Pfefferkorn

O método de Pfefferkorn avalia a plasticidade, de uma massa ou de uma argila, medindo o grau de deformação sofrido por um corpo-de-prova cilíndrico, sujeito à queda de um punção de uma altura constante e

com um peso bem definido (1,192 kg). Para esse efeito fazem-se diversos ensaios sobre amostras da mesma massa com diferentes teores de água.

O coeficiente de plasticidade determinado por este método, corresponde à percentagem de água presente, para a qual o corpo-de-prova apresenta uma deformação de 30%, em relação à sua dimensão inicial. O grau de deformação do cilindro (h_0/h_1), isto é, a relação entre a altura inicial do cilindro (h_0) e a altura após a deformação (h_1), se for inferior a 2,5 significa que a massa é difícil de trabalhar por estar demasiado seca, por outro lado, se a relação for superior a 4 a massa está muito pastosa. A percentagem de água correspondente a uma relação de deformação de 3,3 (média entre 2,5 e 4) dá-nos o índice de plasticidade de Pfefferkorn. Quanto maior for este índice maior será a plasticidade de uma massa (BARBA et al., 1997).

3.3.4. Curvas Tensão-Deformação

Assim como para outros tipos de materiais, o teste de compressão pode ser usado para avaliar a plasticidade das argilas. Em uma curva típica deste ensaio, algumas informações são geralmente obtidas: módulo de elasticidade, limite de escoamento, força e deformação máxima.

Neste método um corpo-de-prova cilíndrico previamente moldado é sujeito a um teste de compressão a velocidade constante. Teoricamente as curvas tensão-deformação de uma massa cerâmica argilosa são do tipo apresentado na Figura 3.7. Até o ponto A (denominado por ponto de fluência) o material mostra um comportamento elástico. A partir desse ponto, o aumento contínuo do movimento de compressão dá origem a um comportamento plástico (zona plástica do material) em que a deformação do corpo-de-prova ocorre para valores de tensão aproximadamente constantes (zonas plásticas mais extensas indicam massas mais plásticas). Finalmente, quando se atinge o ponto B (ponto de máxima deformação) a ruptura do corpo-de-prova tem início e a tensão cai rapidamente. No entanto, na maioria dos casos, depois de atingido este limite registra-se um anormal crescimento da tensão, originada pelo aumento da área instantânea (provocado pela fissura lateral do corpo-de-prova) (Ribeiro et al., 2005).

Ainda de acordo com Ribeiro et al. (2005), alguns parâmetros obtidos no teste de compressão são fortemente influenciados pela

composição química e umidade da argila. Assim, este método mostra um grande potencial para ser utilizado na avaliação da plasticidade de argilas utilizadas na extrusão. A alta precisão e reprodutibilidade do teste são fatores que tornam possível a obtenção de informações valiosas para avaliar e comparar diferentes sistemas de água e argila, variando a umidade e composição.

Baran et al. (2001) têm trabalhado na aplicação do teste de trabalhabilidade para metais para avaliar uma medida da trabalhabilidade (limite de plástico) em argilas. Os autores usaram testes de compressão para obter o limite de elasticidade ($\sigma_{0,2}$) e o limite de deformação plástica (ϵ_{*0}). O produto dos dois valores ($\sigma_{0,2}\epsilon_{*0}$) foi definido como trabalhabilidade. A variação destes três valores como uma função do teor de umidade dos corpos de prova à verde foi discutida e a partir dos valores máximos destes gráficos (Figura 3.8), a umidade ótima é determinada.

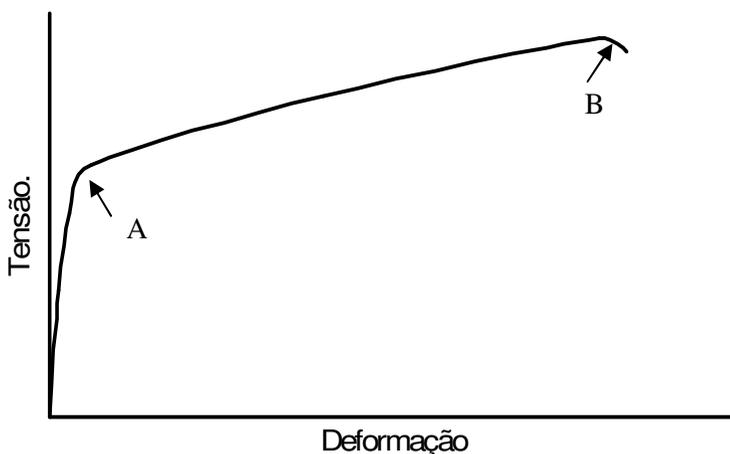


Figura 3.7 – Curva típica de um ensaio de compressão (Adaptado de RIBEIRO, 2003).



**Figura 3.8 – Curva de trabalhabilidade obtida por ensaio de compressão.
(Adaptado de BARAN et al., 2001)**

3.3.5. Vantagens e limitações dos métodos de medição de plasticidade

Devido ao fato dos métodos de medição apresentados dependerem, em alguns casos, da habilidade do operador, a comparação de resultados entre os diferentes ensaios se torna problemática. No tradicional ensaio de LL, por exemplo, o próprio Casagrande (CASAGRANDE, 1958 apud SILVEIRA, 2001) reconhece a desvantagem do método, que consiste essencialmente em um ensaio dinâmico de cisalhamento. De acordo com Casagrande (1958) apud Campos et al. (1999), isso significa que este ensaio não é capaz, portanto, de produzir resultados reprodutivos para estabelecer comparações entre argilas de granulometria fina, uma vez que estas apresentam diferentes reações se o teste for realizado com vibrações. Ainda segundo Silveira (2001), outros inconvenientes são:

- Dificuldade de se fazer uma ranhura em solos com predominância arenosa;

- Argilas de baixa plasticidade tendem a se liquefazer antes de fluir por plasticidade;
- Influência do operador na execução da profundidade da canelura e observação oportuna do momento de fechamento da mesma.

Por outro lado, o ensaio de LP, considerado pelos pesquisadores como um ensaio rudimentar e que depende essencialmente da habilidade individual do operador, principalmente em argilas com LP baixos ou próximos do LL, onde se torna difícil a formação do cilindro, e operadores inexperientes ou mesmo sem paciência, são induzidos a classificar a argila como não plástica.

Já em relação ao método de Pfefferkorn, que é um dos mais usados, as análises são frequentemente imprecisas e incoerentes. Os principais problemas são relacionados à análise das misturas, à relação entre argila sedimentada e residual e o tempo gasto para o ensaio. Além disso, o método determina um valor de plasticidade em função da umidade da argila e não como uma resistência à penetração ou à deformação plástica (MODESTO & BERNARDIN, 2008). Ainda no caso deste método, para materiais com baixo empacotamento, como no caso dos caulins, o índice de Pfefferkorn tende a dar muito alto, apesar de a plasticidade ser normalmente baixa. Isso se deve ao fato de que à medida que se baixa o empacotamento das partículas, mais água é necessária para que seja alcançada uma determinada consistência, já que o volume de poros que deve ser preenchidos é maior (BARBA, 2007).

Testes em que o corpo cerâmico é comprimido durante o ensaio, simulando um processo industrial, devem fornecer resultados que se assemelham àqueles encontrados durante o seu processamento industrial. Segundo Reed (1995), estudos para desenvolvimento de testes usando sistemas bem caracterizados que forneçam um estado bem definido de tensões são necessários para desenvolver a ciência da plasticidade.

Para tanto, o método da curva tensão-deformação se mostra potencialmente útil, pois permite um modelamento matemático mais preciso, permitindo que possam ser extraídas informações que sirvam não apenas para comparar diferentes sistemas argilosos, mas também para caracterizar a tensão efetiva de compressão. Estas informações são úteis para o conhecimento prévio do comportamento durante o seu processamento, e permitem a formulação de uma massa ideal para cada aplicação (AL-QURESHI et al., 2008).

3.4. *Extrusão*

A extrusão é uma técnica de conformação de pós, utilizada para o processamento de produtos cerâmicos há mais de 150 anos. É uma técnica de produção associada a um baixo custo e uma elevada produtividade, principalmente para produtos de seção transversal constante (RIBEIRO et al., 2003).

O processo de extrusão consiste geralmente em passar uma massa cerâmica por uma abertura, conhecida como matriz, fieira, boquilha ou bocal de extrusão. Esta abertura contém o perfil da seção transversal que dará a forma ao produto final. Após, o material é cortado para obter as partes que serão passadas através dos estágios subsequentes do processo de produção cerâmico.

Os estágios necessários para formar um produto extrudado são mostrados na Figura 3.9. Dependendo da natureza do produto, podem existir outras etapas anteriores e posteriores às identificadas (operações de acabamento, por exemplo).

Primeiramente, os componentes na forma de pós são misturados a seco. Estes componentes podem ser não apenas as matérias primas, mas também aditivos introduzidos para alterar as propriedades do sistema. Esta etapa é notadamente um processo que demanda grande atenção, pois frequentemente não se alcança boas condições de homogeneidade (BENBOW & BRIDGWATER, 1993).

Após a mistura a seco, é adicionado líquido (água, no caso das argilas) à mistura, que, como já visto, tem por função servir de agente de plasticidade. Aqui também os cuidados recaem sobre a necessidade de se alcançar uma boa homogeneização, além das habituais dificuldades como a entrada de ar no sistema e a aderência da massa à superfície. Ainda, dependendo do tipo de argila e sua composição, o tempo de mistura poderá variar. Trabalhos desenvolvidos com materiais cerâmicos extrudados têm mostrado que a sua resistência mecânica é controlada pela presença de defeitos como trincas internas, fraturas superficiais, laminações e bolhas de ar. Também a homogeneização insatisfatória durante a etapa de mistura das matérias primas pode causar a geração de aglomerados ou heterogeneidades que servem de base para nucleação de trincas, diminuindo a tenacidade a fratura do material formado (AMARASINGHE & WILSON, 1999).

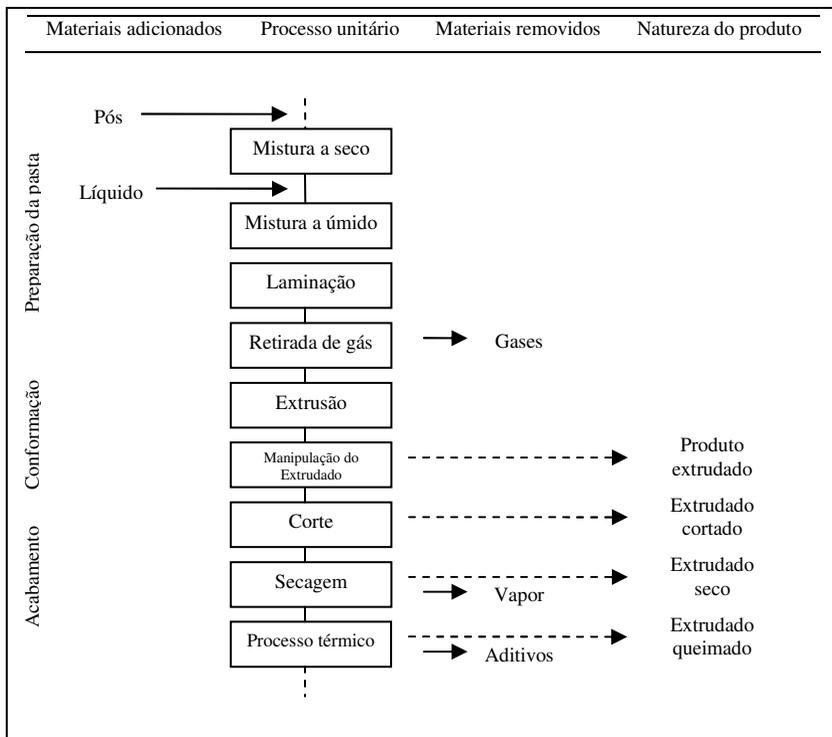


Figura 3.9 – Esquema dos processos unitários para a extrusão.

Amarasinghe & Wilson (1998, 1999) relatam que experimentos com extrusão de massas cerâmicas indicaram que a pressão medida na fieira flutua bastante quando a massa é insuficientemente misturada. Essas variações são atribuídas à composição não-uniforme da massa e causam defeitos no produto extrudado, como bolhas ou regiões com aglomerados. Pesquisas desenvolvidas têm mostrado a possibilidade de utilizar a medição da pressão como meio de inferirem-se informações acerca da qualidade da massa. Utilizando-se da medição do ruído na pressão, aliado a métodos estatísticos, pode-se verificar em tempo real o surgimento de bolhas de ar ou heterogeneidades e assim obter um controle mais rigoroso da massa que sai da extrusora.

As dificuldades da etapa anterior são minimizadas quando se faz uso de uma etapa de laminação. Esta tem por principal função quebrar os particulados mais grosseiros e proporcionar às partículas uma fina película de água. Tem sido demonstrado que esta etapa deixa a massa menos propensa a quebras durante a extrusão (HÄNDLE, 2007).

Atualmente sabe-se que o grau de moagem das massas é um dos fatores que pode influenciar a plasticidade das massas cerâmicas. Assim, uma moagem mais fina tem como consequência um aumento da superfície específica das partículas da massa, o que provoca um aumento da plasticidade (RIBEIRO et al., 2003).

A próxima etapa é a retirada do gás, que pode ser feito em conjunto com o equipamento de extrusão, com bombas de vácuo. Sua função é prevenir a ocorrência de espaços vazios na peça e dependendo do tipo de extrusora e do material processado, pode ser difícil alcançar determinadas pressões que permitam a total retirada de gás da massa.

Posteriormente, a massa é alimentada na entrada da extrusora e então comprimida por um sistema de pistão (Figura 3.10) ou um sistema com hélice ou parafuso helicoidal simples ou duplo (Figura 3.11). O produto dessa compressão passa por uma matriz (fieira ou bocal) com a geometria do produto final. Benbow & Bridwater (1993) assinalam que extrusoras do primeiro tipo (pistão) permitem a obtenção de altas pressões e controle preciso do fluxo de saída, mas são melhores para pequenas produções, pois funcionam por operação intermitente. Já as extrusoras com hélice podem operar com produção contínua, mas não alcançam altas pressões. Outra vantagem desse grupo é a possibilidade de incorporar ao longo da extrusora, um sistema de misturador ou laminação, bem como podem possuir um sistema de deaeração contínua. Entretanto, este modelo não é adequado para pequenas produções por causa da dificuldade de limpeza (AYDIN et al., 2000).

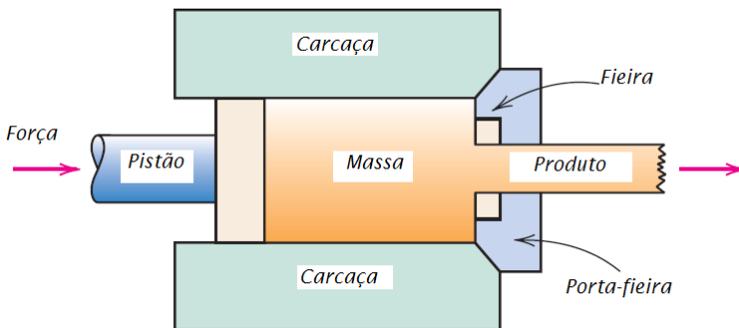


Figura 3.10 – Esquema de extrusão com pistão. (adaptado de CALLISTER, 2007)

No caso da extrusora com hélice, esta desenvolve as funções de arraste, compactação e compressão da massa deaerada. Entre o final da hélice e a fieira existe um espaço, sem componentes mecânicos internos, onde se acumula o material pressionado pela ação da hélice. Esta zona permite à massa atenuar as forças de rotação geradas pelo movimento da hélice e de recompatar-se, preenchendo os vazios produzidos pelo volume da hélice e de seu eixo. A rotação da hélice promove uma distribuição da pressão (a qual está sujeita à massa), que aumenta à medida que esta se aproxima da extremidade de saída da hélice. O aumento da pressão provoca também aumento na força de atrito entre hélice e massa. A maior parte da energia que é necessária para manter o movimento é utilizada na zona de pressão mais elevada, isto é, na parte de saída da hélice, e é dissipada por atrito (BERTAN, 2006).

Um aspecto importante no projeto de uma extrusora é o dimensional do bocal de saída da massa, já que este determina a extensão das perdas por trabalho redundante durante o processo de deformação. Nesse quesito, a determinação da pressão de extrusão total e a distribuição de tensões na fieira é muito importante no projeto do ferramental (REDDY et al., 1995). Segundo Bertan (2006), quando se trabalha com massa de baixa plasticidade, devem-se utilizar fieiras mais compridas e menos cônicas. Neste tipo de massa, o atrito sobre a superfície interna da fieira é muito maior que o atrito entre as camadas da massa, porque esta flui com mais facilidade pelo centro, podendo originar tensões nas peças ao saírem do molde. Finalmente, para o mesmo comprimento e conicidade na fieira, quanto maior o diâmetro do molde, maior será a sua velocidade de saída e menor será a compactação da massa (menor atrito específico).

Após a saída da extrusora, a massa agora deverá ser cortada, e para isso, é necessário ter uma boa resistência a verde. Isso significa que a peça deverá ser forte o suficiente para que possa ser manipulada e cortada sem que sofra deformações significativas que alterem sua geometria. Podem ser usadas facas de corte e as principais dificuldades residem quando da presença de geometrias complexas ou com muitos furos, como no caso de catalisadores.

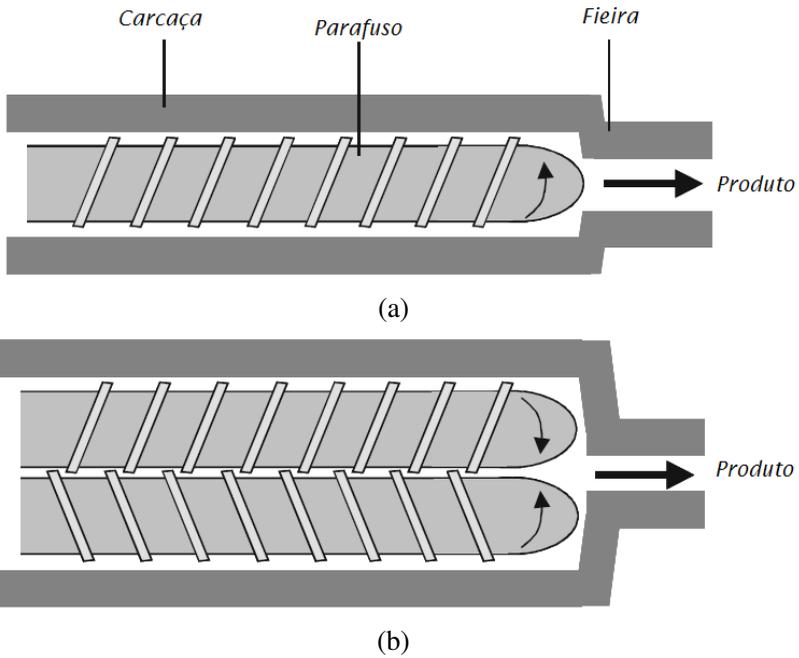


Figura 3.11 – Esquema de extrusão utilizando parafusos helicoidais (a) simples e (b) duplos. (adaptado de HÄNDLE, 2007)

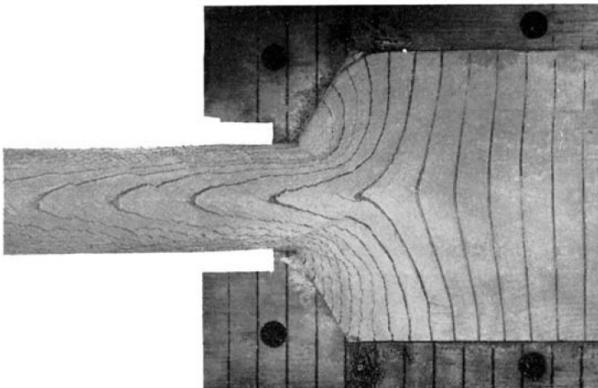


Figura 3.12 – Perfil de deformação desenvolvido durante a extrusão (HÄNDLE, 2007).

Durante a secagem, a fase líquida é removida e o produto passa por um encolhimento. O produto deve reter sua forma e o cuidado nesta etapa se refere à taxa de secagem, que não deve ser muito grande para que não ocorram trincas ou se desenvolvam tensões residuais.

O processo térmico queima toda matéria orgânica e possivelmente alguns aditivos e o extrudado agora adquire sua resistência mecânica. É possível controlar essa resistência, bem como a porosidade residual variando-se os parâmetros como tempo e temperatura de queima.

A plasticidade das massas interfere na qualidade final dos produtos extrudados. Para isso deve-se, sempre que possível extrudar as massas na zona de máxima plasticidade evitando situações desvantajosas em termos de extrusão (RIBEIRO et al., 2003). Souza Santos (1989) aponta que o aumento da plasticidade após o trabalho mecânico, como a extrusão, é devido ao fato de haver uma destruição de interações face-aresta e aresta-aresta, de forma a tornar todas as placas paralelas entre si, restando apenas a interação face-face.

Quanto menor a plasticidade da massa, maior a sensibilidade a possíveis variações de umidade. Uma variação de 1, 2 ou 3% de umidade numa massa plástica pode não influenciar no processo de extrusão, mas em uma massa com baixa plasticidade provocará uma alteração total da plasticidade e das condições de fluxo através da boquilha, devido à menor força de coesão entre as partículas. Dado que as condições de fluxo do material através da extrusora dependem basicamente da sua plasticidade, compreende-se facilmente a necessidade de manter o mais constante possível as características da massa (composição, grau de moagem, teor de umidade, etc.) para que o valor da plasticidade se mantenha (RIBEIRO et al., 2003).

3.5. Cálculos de esforços em extrusão

O objetivo primordial dos cálculos da conformação plástica é a determinação do esforço de conformação do material até a forma final desejada. Indiretamente, os métodos de cálculo também permitem obter dados, tais como:

- Esforços de conformação (principal);
- Potência a ser utilizada (importante no dimensionamento dos equipamentos e períodos de utilização);

- Dimensionamento das ferramentas e/ou equipamentos auxiliares;
- Necessidade do tipo e quantidade de lubrificação ou aditivos;
- Distribuição das tensões e/ou deformações durante e após a conformação;
- Previsão da alteração nas propriedades mecânicas;

Segundo Button (2001), os métodos de cálculos podem ser agrupados em métodos teóricos e métodos experimentais. Os métodos teóricos ainda podem ser agrupados em métodos analíticos e métodos numéricos.

Os métodos experimentais apresentam a vantagem de fornecerem resultados mais próximos dos observados na prática industrial, mas apresentam os inconvenientes de exigirem a execução de um grande número de experimentos e serem restritos a algumas condições de processamento (geometria dos produtos, materiais utilizados).

Os métodos teóricos apresentam resultados mais precisos quanto maior for a sua dificuldade de desenvolvimento. Para fins de aproximação dos resultados esperados, os métodos teóricos são suficientes para a escolha dos equipamentos de extrusão e para o dimensionamento das ferramentas.

3.5.1. Modos de deformação

Existem três tipos de deformação em materiais sob conformação mecânica, e todas as três ocorrem nos processos de conformação mecânica: deformação homogênea, deformação por atrito e deformação redundante.

3.5.1.1. Deformação homogênea

Um processo de conformação mecânica necessita, para ocorrer, de uma energia ao menos igual àquela para produzir a alteração geométrica macro do material, obtida a partir das dimensões iniciais e finais da peça conformada. Assim sendo, o cálculo da deformação homogênea, revela a mínima quantidade de energia para a viabilidade de qualquer processo de conformação mecânica.

Porém, sabe-se que a conformação plástica é imposta ao material, sempre através da aplicação desigual de tensões e deformações, o que produz outros componentes de deformação além da homogênea. Estas demais deformações, que podem ou não ser desprezadas nos cálculos, absorvem mais energia para a conformação do material, reduzindo sua eficiência (BUTTON, 2001). A deformação homogênea ocorreria para um material que estivesse livre para se deformar e no qual somente importa a dimensão inicial e final do mesmo para o cálculo da energia de deformação absorvida no processo.

3.5.1.2. Deformação por atrito

O atrito ocorre quanto existe movimento relativo de duas partes em contato. Na região de contato são geradas tensões que modificam o campo de deformações local em maior ou menor grau. Esta alteração no campo de deformações produz uma absorção de energia que, às vezes, torna-se importante para o cálculo da força de conformação do material.

Alguns equacionamentos do processo de conformação levam em consideração, de maneira mais ou menos precisa, o efeito do atrito. Tais equacionamentos podem ser concebidos de modo a considerar o atrito da seguinte maneira:

- Algumas vezes o atrito é considerado como gerador de um campo de deformações nas regiões próximas das interfaces (onde o atrito está presente). Nestes casos, as deformações presentes neste campo e sua conseqüente absorção de energia são consideradas nos equacionamentos;
- Muitas vezes o atrito é considerado apenas como uma força na interface que se dispõe contra a força de conformação, diminuindo a sua eficácia para a conformação;
- O atrito pode ser então negligenciado, quando se admite que o seu efeito seja suficientemente pequeno no processo, não exigindo equacionamentos desnecessariamente complicados.

3.5.1.3. Deformação redundante

A deformação redundante é aquela deformação induzida pelo processo de conformação mecânica que não contribui em nada às mudanças dimensionais da peça em questão. Existem várias formas de se produzir esta deformação final.

Considerando o processo de extrusão, nota-se que durante a redução de secção reta, o material sofre uma pequena deformação intermediária por cisalhamento. Esta deformação, apesar de não estar presente na peça final (ou seja, redundante), absorve energia ao longo do processo de conformação, sendo especialmente maior quanto maior for o grau de deformação (redução da secção) (DIETER, 1988).

Em geral, a deformação redundante é tanto maior quanto maior for a complexidade da conformação que se deve dar ao material. No caso da extrusão, será tanto maior quanto maior for o grau de redução da secção reta e quanto maior for o ângulo da matriz utilizada. Dependendo da complexidade do campo de deformações, a deformação redundante poderá ser significativamente grande de modo a absorver grandes quantidades de energia, assim aumentando a força necessária para a conformação do material.

3.5.2. Método da deformação homogênea

O método da deformação homogênea parte do princípio de que as deformações ocorridas no processo de conformação mecânica são todas homogêneas, ou seja, que não existam deformações por atrito ou redundantes presentes.

Conhecendo-se a deformação associada ao processo de conformação plástica, pode-se calcular facilmente a energia consumida, por unidade de volume, simplesmente pela determinação área sobre a curva tensão versus deformação, ou seja, pela integração da tensão pela deformação infinitesimal, conforme ilustrado na Figura 3.13.

Pode-se notar como sugerido pela Figura 3.13, que as deformações elásticas são consideradas suficientemente pequenas para serem desprezadas no cálculo da energia de conformação. Esta prática é razoável para a maioria dos processos, onde as deformações elásticas são comparativamente menores do que as deformações plásticas. A força necessária para produzir a conformação pode ser obtida considerando-se que o trabalho realizado pela mesma é igual á energia gasta para a deformação homogênea do material (DIETER, 1988).

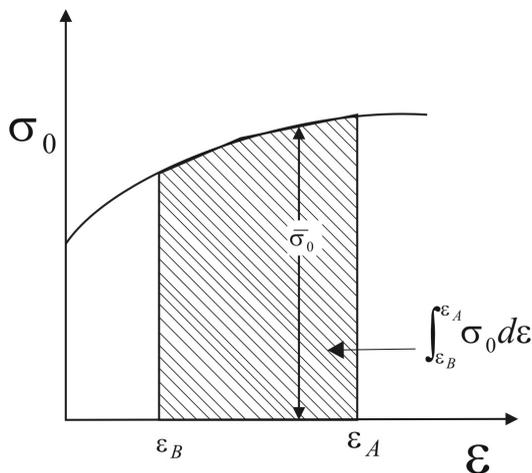


Figura 3.13 – Cálculo da energia de deformação. (Adaptado de DIETER, 1988)

O método da deformação homogênea apresenta limitações na estimativa da força real para conformar o material, pois o método negligencia as demais deformações que ocorrem no sistema.

3.5.3. Método dos blocos

O método dos blocos baseia-se no estudo das forças atuantes em um determinado elemento de volume (bloco). Este elemento de volume deve ser tomado de modo a melhor representar o processo de deformação plástica do material. A geometria deste elemento de volume, que depende da geometria do processo de conformação mecânica, pode variar entre uma tira, um disco, um bloco ou um tubo (CHITKARA & ALEEM, 2001).

Algumas hipóteses simplificadoras e convenções são tomadas para viabilizar o estudo do elemento de volume separado, nem todas são essencialmente empregadas:

- As direções do sistema de referência adotado no estudo devem ser iguais às direções principais de deformação;
- As tensões atuantes variam predominantemente em uma direção apenas ou então podem ser facilmente correlacionáveis à variação da tensão em apenas uma direção;

- Quando considerado, o atrito fica confinado somente na superfície e seu efeito é representado não pela deformação localizada que promove, mas sim por uma força superficial que se opõe à conformação;
- O material deverá iniciar a sua deformação quando as forças, atuantes no elemento de volume tomado para estudo, estiverem na situação crítica de equilíbrio;
- Após o isolamento do elemento de volume e da descrição das forças em equilíbrio, a representação deste equilíbrio reduz-se a uma equação como descrita por Avitzur et al. (1967):

$$\frac{d\sigma_{xi}}{dx_i} + \frac{1}{x_i} F(\sigma_{xi}, \sigma_{xj}) = 0 \quad (3.2)$$

onde: x_i é a coordenada correspondente à direção na qual as tensões variam predominantemente; σ_{xi} e σ_{xj} são as tensões principais correspondentes às direções x_i e x_j e $F(\sigma_{xi}, \sigma_{xj})$ é uma função linear e inclui o efeito do atrito e a incidência dos parâmetros geométricos do processo.

Como o método modela o estado de deformações como sendo um processo estático (em equilíbrio), este encontra maior aplicabilidade em processos de conformação plástica que possuam geometria adequada para esta aproximação, como no caso da extrusão. Nestes casos, os valores calculados a partir de modelos derivados do método dos blocos constituem aproximações razoáveis da força do processo, permitindo a avaliação de uma ampla gama de problemas.

4. Materiais e Métodos

Para a investigação da adequação do modelo matemático com os resultados experimentais, é necessária a aquisição dos dados referentes às variáveis envolvidas.

Foram selecionadas três argilas que abrangem uma ampla variação de plasticidade, para que se possa verificar a validade dos modelos para argilas com comportamento variado de plasticidade.

As argilas foram fornecidas pela empresa Paraná Mineração sob a designação de CECÍLIA, TB-04 e MINA I e de agora em diante serão denominadas A1, A2 e A3.

4.1. Composição química

A caracterização químico-mineralógica de argilas e a determinação das propriedades que seus componentes atribuem às massas cerâmicas permitem estudar as alterações que devem ser feitas nas massas cerâmicas para melhorar as propriedades de corpos cerâmicos e do produto final. Várias técnicas espectrométricas podem ser utilizadas para caracterizar a argila, e entre elas se destacam a difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). Estas fornecem como resultados as fases presentes na argila e a relação dos elementos constituintes da argila com a sua proporção na forma de óxidos, respectivamente (VARELA et al., 2005).

4.2. Plasticidade pelo Índice de Atterberg

Para que se selecione a quantidade de água a ser adicionada para que a argila adquira plasticidade, é necessário que se conheça os limites de liquidez e de plasticidade de cada argila. Para tanto, foram realizados ensaios com o aparelho de Casagrande para obter os dados de limite de liquidez para cada argila, regido pela norma NBR 6459 (1984). Para a determinação do limite de plasticidade, foram realizados ensaios segundo a norma NBR 7180 (1984). A preparação das amostras de pó para ambos os ensaios seguiu a norma NBR 6457 (1986).

As argilas no estado de entrega foram secas ao ar até sua umidade higroscópica. Após, foram desagregadas em moinho de bolas por 20

min e então passadas em peneira com abertura de 0,42 mm. A argila assim obtida foi utilizada para os ensaios de Atterberg e Pfefferkorn.

4.3. Plasticidade pelo Índice de Pfefferkorn

Para a obtenção do índice de Pfefferkorn das argilas, as mesmas foram preparadas segundo norma NBR 6457 (1986). Posteriormente, tomou-se cerca de 400 g de argila seca, adicionou-se água até que a consistência da massa fosse adequada para começar os ensaios, ou seja, que sua relação h_0/h_1 resultasse em aproximadamente 5. Para que houvesse uma completa homogeneização, a massa foi deixada por 24 h em repouso em recipiente hermeticamente fechado.

Após este período, foram realizados os ensaios para cada argila em um plasticímetro de Pfefferkorn semelhante à Figura 4.1. A cada ensaio, a massa era seca ao ar por cerca de 15 min para que a relação de alturas fosse diminuindo a cada vez. Obtiveram-se então cinco pontos para a construção da regressão linear que forneceu o valor de umidade para o qual a relação entre alturas fosse igual a 3,3.



Figura 4.1 – Aparado para medição do índice de plasticidade de Pfefferkorn. (E. J. PAYNE, 2008)

4.4. *Comportamento da argila sob compressão*

Para cada composição de umidade do sistema água-argila, o seu comportamento em um ensaio de compressão uniaxial foi avaliado, com o objetivo de levantar os dados da tensão de compressão efetiva e também o valor do coeficiente de atrito, para aplicação no modelo teórico desenvolvido.

Para esta etapa, as argilas foram desagregadas a seco em moinhos de bolas por 20 min e então peneiradas em malha de 420 μm . Após, para a determinação da umidade contida nas argilas, amostras contendo 10 g de material foram introduzidas em vidros relógio e levadas ao forno a 110 ± 5 °C por 24 h.

Após isso, para cada uma das argilas, foram selecionados três valores de umidade, no intervalo compreendido entre o LL e o $(LP+LL)/2$ (obtidos a partir do ensaio de Atterberg). Estas então foram preparadas e homogeneizadas misturando-se manualmente e posteriormente deixadas em repouso por 24 h em recipiente hermeticamente fechado, para homogeneização da umidade. Em etapa posterior, foram preparados os corpos de prova cilíndricos, mediante moldagem manual, em moldes de PVC com diâmetro de 17,0 mm e altura de 23,0 mm.

Os corpos de prova foram então ser submetidos ao ensaio de compressão uniaxial em um texturômetro TA-XT2i da Stable Micro Systems, com velocidade de ensaio de 0,1 mm/min e célula de carga de 25 kg. O ensaio ocorreu até 50% de deformação, ou seja, altura final dos corpos de prova de 11,5 mm. Para evitar distorções nas medidas do diâmetro e da altura, foi utilizado uma escala milimétrica como referência, a qual foi posicionada ao lado do corpo-de-prova, durante os ensaios. Com auxílio de uma câmera digital CANON SX110, foi efetuada a filmagem do ensaio, que foi sincronizada com os dados obtidos pelo texturômetro (Figura 4.2).

Após isso, foram obtidas imagens a cada 15s a partir da filmagem com auxílio do programa Windows Movie Maker. A mensuração dos diâmetros e altura dos corpos de prova foi realizada por meio do programa ImageTool. Com isso, foi possível obter os valores de raio e altura instantâneos e relacionar com a força aplicada, obtendo-se assim os valores da tensão de compressão efetiva e o coeficiente de atrito, conforme Equação 5.15.

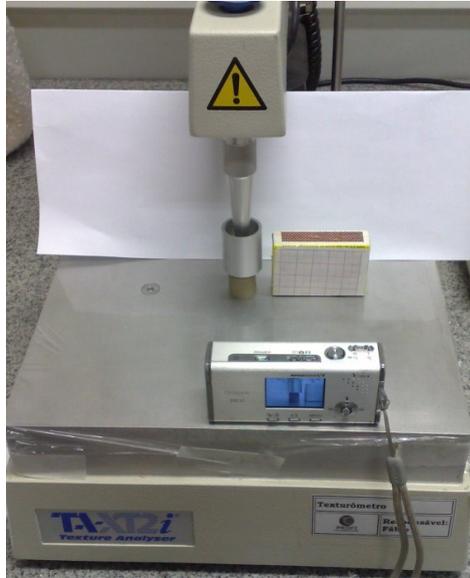


Figura 4.2 – Esquema de filmagem do ensaio de compressão.

Para cada umidade selecionada, foram ensaiadas 3 amostras, e posteriormente calculado a média, bem como o desvio padrão destas 3 amostras, para apresentação dos resultados.

4.5. *Comportamento da argila sob extrusão*

Para a extrusão das argilas, as mesmas foram obtidas conforme o item anterior, ou seja, foram secas até a umidade higroscópica, desagregadas em moinho de bolas por 25 min., peneiradas em malha de 420 μm , e posteriormente, adicionado água destilada e misturadas para que as umidades finais fossem iguais às utilizadas no ensaio de compressão.

Posteriormente, a massa foi passada em um laminador marca Gelenski LIG-05 (Figura 4.3), para que houvesse uma completa desagregação dos grânulos e uma melhor homogeneização da massa.



Figura 4.3 – Laminador refinador Gelenski LIG-05. (GELENSKI, 2009)

Após esta etapa, a massa foi conformada em uma extrusora Gelenski MVIG-05 (Figura 4.4), para que pudesse obter os valores da pressão de extrusão para cada sistema água-argila selecionado. Para fins de cálculos teóricos da pressão de extrusão, o raio inicial da extrusora é de 38 mm. O bocal circular de saída da extrusora possui um diâmetro de 30 mm e comprimento de 72,5 mm. Para o bocal retangular, o mesmo possui dimensões de 8 mm por 60 mm e comprimento de 72 mm. Para ambos os casos, o comprimento L total vale 147,4 mm.

Para medição da pressão de extrusão, foi instalado um manômetro entre o canhão da extrusora e o bocal intercambiável (Figura 4.5). O manômetro possui capacidade para medir até 20 kg/cm², e sua escala é graduada em 0,1 kg/cm².

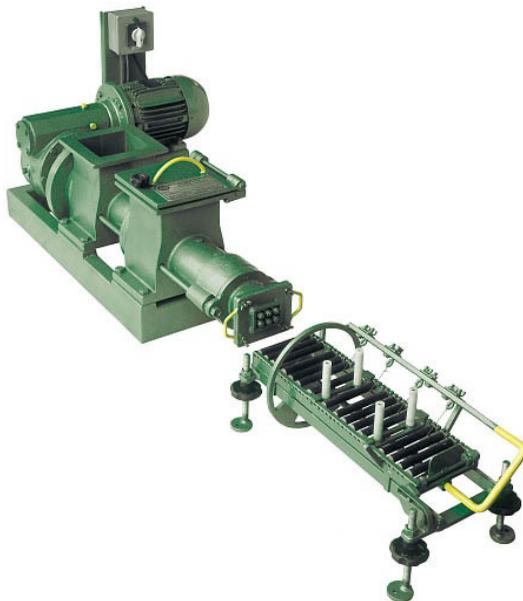


Figura 4.4 – Extrusora Gelenski MVIG-05. (GELENSKI, 2009)

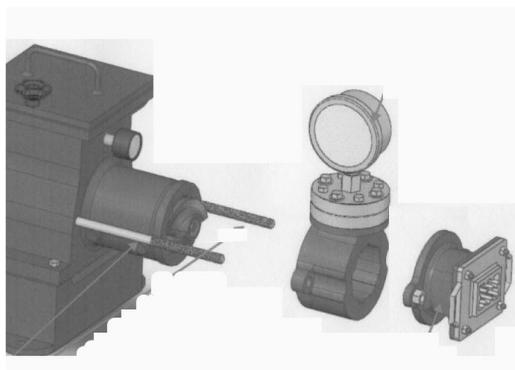


Figura 4.5 – Esquema de instalação do manômetro.

5. Resultados e discussão

5.1. Modelamento matemático para plasticidade e extrusão

Passa-se agora a desenvolver os modelos teóricos que serão aplicados à modelagem da plasticidade das argilas pelo método da curva tensão-deformação, bem como do processo de extrusão em perfis circulares com e sem variação angular no bocal.

5.1.1. Equação do processo de compressão

Para definir os parâmetros de processo, parte-se da hipótese de que o compacto argiloso, sob a forma cilíndrica, se deforma axial e simetricamente. À medida que o esforço de compressão é aplicado, a altura do compacto cilíndrico diminui e seu raio instantâneo aumenta, já que o corpo-de-prova não está confinado em uma matriz.

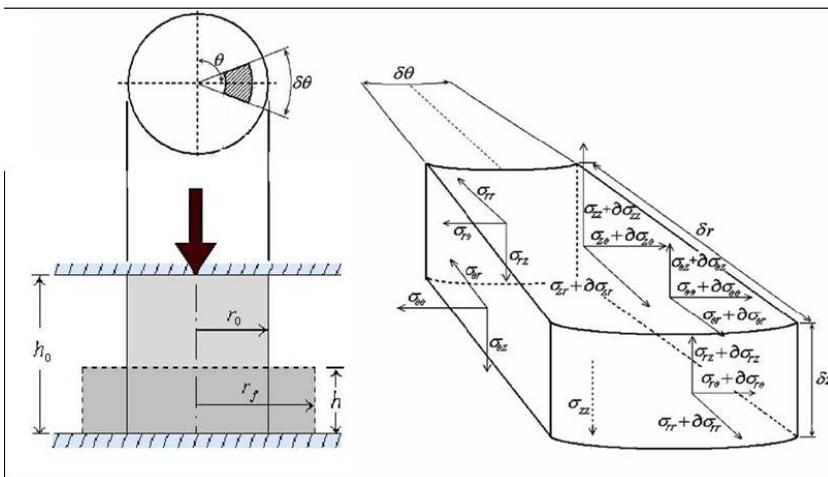


Figura 5.1 – Processo de compressão em um cilindro argiloso e análise de volume infinitesimal do corpo-de-prova.

Considerando um volume infinitesimal (Figura 5.1), em coordenadas cilíndricas (r , θ e z), e considerando o equilíbrio de forças na direção radial r , tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) + F_r = 0 \quad (5.1)$$

A tensão de compressão é considerada constante e, para a geometria do volume infinitesimal estudado, simplifica-se a Equação 5.1, levando em conta que o volume se deforma axial e simetricamente:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = \frac{-2\mu\sigma_z}{h} \quad (5.2)$$

onde σ_r é a tensão radial; σ_θ , a tensão normal; σ_z , a tensão axial; e μ , o coeficiente de atrito entre a superfície das placas da máquina de compressão e o compacto argiloso.

Sabendo que:

$$\varepsilon_r = \frac{r - r_o}{r_o} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{A - A_o}{A_o} \quad (5.4)$$

Derivando ambas:

$$d\varepsilon_r = \frac{dr}{r} \quad (5.5)$$

$$d\varepsilon_\theta = \frac{2\pi(r + dr) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{dr}{r} \quad (5.6)$$

Usando-se as equações de Levy-Mises para a zona plástica (AVITZUR et al., 1967):

$$d\varepsilon_r = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_\theta) \right] \quad (5.7)$$

$$d\varepsilon_\theta = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z) \right] \quad (5.8)$$

Igualando as duas, obtém-se $\sigma_r = \sigma_\theta$. Substituindo esta relação na equação 5.2, chega-se a:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{-2\mu\sigma_z}{h} \quad (5.9)$$

Usando-se a equação de von Mises para a tensão efetiva:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \right]^{1/2} \quad (5.10)$$

E sabendo que $\sigma_r = \sigma_\theta$, obtemos:

$$\bar{\sigma} = \pm(\sigma_r - \sigma_z) \quad (5.11)$$

Como o corpo se deforma no sentido de aumentar o seu raio, tomamos a tensão efetiva como sendo positiva:

$$\bar{\sigma} = \sigma_r - \sigma_z$$

Derivando:

$$d\sigma_r = d\sigma_z$$

Aplicando esta relação na equação 5.9:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} = \frac{-2\mu\sigma_z}{h} \text{ ou } \frac{d\sigma_z}{\sigma_z} = \frac{-2\mu dr}{h} \quad (5.12)$$

Resolvendo esta equação com as condições de contorno:

$$\begin{aligned} r &= r_f \\ \sigma_z &= -\bar{\sigma} \end{aligned}$$

Obtemos então a equação que relaciona a tensão axial instantânea em função dos parâmetros do processo de compactação:

$$\sigma_z = -\bar{\sigma} \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) \quad (5.13)$$

A força axial instantânea pode ser calculada pela equação:

$$F = \int_0^{r_f} 2\pi r \sigma_z dr \quad (5.14)$$

Substituindo a equação 5.13 na equação 5.14, fica:

$$F = -2\pi\bar{\sigma} \int_0^{r_f} r \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr$$

Para resolver esta integral, podemos tomar a relação:

$$\int_a^b u dv = uv \Big|_a^b - \int_a^b v du$$

Sendo as variáveis:

$$u = r$$

$$dv = \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr$$

$$du = dr$$

$$v = \int \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr$$

A última integral pode ser resolvida por substituição:

$$t = \frac{2\mu(r_f - r)}{h}$$

$$dt = -\frac{2\mu}{h} dr$$

$$dr = -\frac{h}{2\mu} dt$$

$$v = \int \exp(t) \left(-\frac{h}{2\mu}\right) dt = -\frac{h}{2\mu} \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right)$$

Juntando agora os termos da integral:

$$\int_0^{r_f} r \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr = r \left[-\frac{h}{2\mu} \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) \right]_0^{r_f} - \int_0^{r_f} -\frac{h}{2\mu} \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr$$

$$\int_0^{r_f} r \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr = -\frac{hr_f}{2\mu} + \frac{h}{2\mu} \left[-\frac{h}{2\mu} \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) \right]_0^{r_f}$$

$$\int_0^{r_f} r \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr = -\frac{hr_f}{2\mu} + \frac{h}{2\mu} \left[-\frac{h}{2\mu} \exp\left(\frac{2\mu r_f}{h}\right) \right]$$

$$\int_0^{r_f} r \exp\left(\frac{2\mu(r_f - r)}{h}\right) dr = \left[-\frac{h}{2\mu} \left(r_f + \frac{h}{2\mu} \right) + \frac{h^2}{4\mu^2} \exp\left(\frac{2\mu r_f}{h}\right) \right]$$

Por fim, temos:

$$F = -2\pi\bar{\sigma} \left[-\frac{h}{2\mu} \left(r_f + \frac{h}{2\mu} \right) + \frac{h^2}{4\mu^2} \exp\left(\frac{2\mu r_f}{h}\right) \right] \quad (5.15)$$

A equação acima (5.15) será usada para avaliar a plasticidade da argila no ensaio de compressão axial. Desta forma, poderá ser obtido o valor da tensão de compressão efetiva e o coeficiente de atrito entre a massa argilosa e o punção pelo método iterativo¹.

5.1.2. Extrusão

5.1.2.1. Equação simplificada do processo de extrusão sem atrito

Para o cálculo da pressão de extrusão utilizando-se o método da deformação homogênea (onde não envolve perdas), utiliza-se o esquema na Figura 5.2.

Primeiramente, analisa-se o trabalho de deformação plástica da extrusora para reduzir o diâmetro do cilindro extrudado de D_0 para D .

Se o volume é constante,

$$A_0 l_0 = Al \quad (5.16)$$

¹ ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Theoretical analysis of rectangular clay paste extrusion. In: International Conference on Advanced Materials, 11, 2009, Rio de Janeiro.

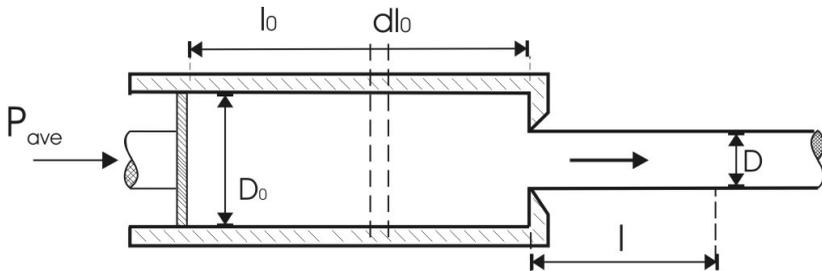


Figura 5.2 - Processo de extrusão simplificado.

Derivando:

$$Adl + l dA = 0 \quad (5.17)$$

Aplicando 5.16 em 5.17:

$$\frac{dA}{A} + \frac{Adl}{A_0 l_0} = 0 \quad \text{ou} \quad Adl = -A_0 l_0 \frac{dA}{A}$$

Sabendo que:

$$W = \int \sigma A dl \quad (5.18)$$

Logo:

$$W = \int_{A_0}^A -\sigma A_0 l_0 \frac{dA}{A} = \sigma A_0 l_0 \ln \frac{A_0}{A}$$

$$W = \sigma A_0 l_0 \ln \frac{\pi D_0^2 / 4}{\pi D^2 / 4} = \sigma A_0 l_0 \ln \frac{D_0^2}{D^2} \quad (5.19)$$

O trabalho realizado pela pressão de extrusão P é:

$$W = P A_0 l_0 \quad (5.20)$$

Igualando-se:

$$P = \sigma \ln \frac{D_0^2}{D^2} = 2\sigma \ln \frac{D_0}{D} \quad (5.21)$$

5.1.2.2. Processo de extrusão sem atrito

O trabalho interno (W_i) de deformação para reduzir o diâmetro de D_0 até D_1 é dado por:

$$W_i = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (\text{por unidade de volume})$$

Ou

$$W_i = L_1 \int_0^A \left(\int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \right) dA \quad (5.22)$$

O trabalho externo necessário para a extrusão sem atrito é:

$$W_e = \sigma_{ave} A L_0 = \sigma_{ave} \frac{\pi D_0^2}{4} L_0 \quad (5.23)$$

Igualando W_i e W_e :

$$\sigma_{ave} \frac{\pi D_0^2}{4} L_0 = L_1 \int_0^A \left(\int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \right) dA \quad (5.24)$$

Se o volume é constante, temos:

$$\frac{\pi D_0^2}{4} L_0 = \frac{\pi D_1^2}{4} L_1$$

Então:

$$\left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 = \frac{L_1}{L_0}$$

Aplicando esta relação na equação 5.24:

$$\sigma_{ave} \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{L_1}{L_0} \int_0^{\frac{\pi D_1^2}{4}} \left(\int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \right) dA$$

$$\sigma_{ave} \frac{\pi D_0^2}{4} = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 \frac{\pi}{4} D_1^2 \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

E por fim:

$$\sigma_{ave} = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (5.25)$$

Na prática, utiliza-se o fator de correção ($\approx 1,5$) para melhorar os resultados, pois isso inclui as variáveis que não foram consideradas, mas que influenciam o processo de extrusão, tais como o trabalho redundante, as perdas por atrito interno, entre outras. Assim,

$$\sigma_{ave} \Big|_{\mu=0} = 1,5 \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (5.26)$$

5.1.2.3. Processo de extrusão com atrito e sem variação angular

Nesta etapa, o balanço de tensões atuando no sistema inclui a ação do atrito, como demonstra a Figura 5.3.

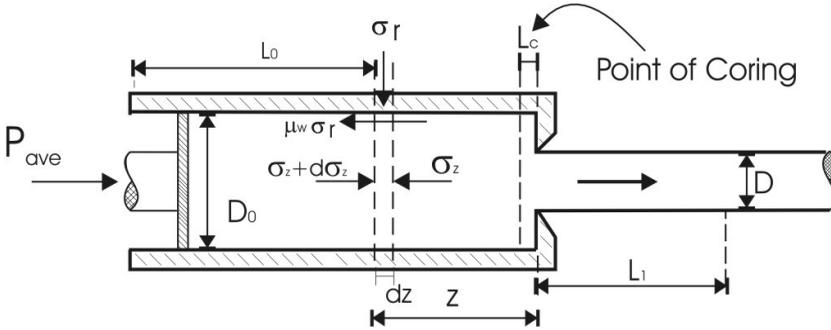


Figura 5.3 - Processo de extrusão com atrito.

Considerando agora o atrito entre o material e a parede do recipiente (μ_w) e fazendo o equilíbrio na direção z :

$$|(\sigma_z + d\sigma_z) - \sigma_z| \frac{\pi}{4} D_0^2 = \mu_w \sigma_r \pi D_0 dz$$

Simplificando:

$$d\sigma_z = \frac{4\mu_w \sigma_r}{D_0} dz \quad (5.27)$$

Como o diâmetro é constante no interior do cilindro de diâmetro D_0 :

$$d\varepsilon_r = \ln \frac{D_0}{D_0} = 0 = d\varepsilon_\theta$$

Usando as equações de Levy-Mises:

$$d\varepsilon_r = 0 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left| \sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_\theta) \right|$$

$$d\varepsilon_\theta = 0 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left| \sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z) \right|$$

De onde se obtém: $\sigma_r = \sigma_z$

Aplicando-se esta relação na equação 5.27 e integrando:

$$\int \frac{d\sigma_z}{\sigma_z} = \int \frac{4\mu_w}{D_0} dz$$

$$\ln \sigma_z = \frac{4\mu_w z}{D_0} + C$$
(5.28)

Para calcular C, é importante saber que no final do processo de extrusão o material se desloca da parede do recipiente para entrar na abertura da matriz. Esse ponto L_c é chamado “Point of Coring”, onde não há mais atrito entre o material e a parede.

$$\sigma_z \Big|_{z=L_c} = (\sigma_{ave})_{\mu=0}$$
(5.29)

Aplicando-se esta condição na equação 5.28, obtemos:

$$C = \ln(\sigma_z) - \frac{4\mu_w z}{D_0} = \ln(\sigma_{ave}) - \frac{4\mu_w L_c}{D_0}$$

$$\ln(\sigma_z) = \frac{4\mu_w z}{D_0} + \ln(\sigma_{ave}) - \frac{4\mu_w L_c}{D_0}$$

$$\ln\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{ave}}\right) = \frac{4\mu_w}{D_0}(z - L_c)$$

$$(\sigma_z)_{\mu=0} = (\sigma_{ave})_{\mu=0} \exp\left[\frac{4\mu_w}{D_0}(z - L_c)\right] \quad (5.30)$$

Como a tensão total do processo é equivalente às tensões da parte com atrito somado à parte sem atrito:

$$(\sigma_z)_{total} = (\sigma_z)_{\mu \neq 0} + (\sigma_z)_{\mu=0}$$

$$(\sigma_z)_{total} = \left\{1 + \exp\left[\frac{4\mu_w}{D_0}(z - L_c)\right]\right\} (\sigma_{ave})_{\mu=0}$$

$$P_{total} = (\sigma_z)_{total} = \left\{1 + \exp\left[\frac{4\mu_w}{D_0}(z - L_c)\right]\right\} 1,5 \int_0^{\bar{\varepsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} \quad (5.31)$$

Aplicando agora a equação do modelo matemático de compressão na extrusão:

$$\bar{\sigma} = \sigma_z = -\bar{\sigma}_{comp} \exp\left[\frac{2\mu}{h}(r_f - r)\right] \quad (5.32)$$

$$\sigma_{ave} \Big|_{\mu=0} = 1,5 \int_0^{\bar{\varepsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = 1,5 \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \bar{\sigma} d\varepsilon}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = 1,5 \frac{\int_{R_1}^{R_2} \bar{\sigma} dr}{R_2 - R_1}$$

$$\sigma_{ave} \Big|_{\mu=0} = 1,5 \frac{-\bar{\sigma}_{comp} \int_{R_0}^{R_f} \exp\left[\frac{2\mu}{h}(R_f - r)\right] dr}{R_f - R_0}$$

$$\sigma_{ave} \Big|_{\mu=0} = 1,5 \frac{-\bar{\sigma}_{comp} \left(-\frac{h}{2\mu_{comp}} \right) \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{h} (R_f - r) \right] \Big|_{R_0}^{R_f}}{R_f - R_0}$$

Obtemos por fim:

$$\sigma_{ave} \Big|_{\mu=0} = 1,5 \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{h}{2\mu_{comp}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{h} (R_f - R_0) \right] \right\} \quad (5.33)$$

Substituindo a equação (5.33) em (5.31):

$$P_{total} = 1,5 \left\{ 1 + \exp \left[\frac{4\mu_w}{D_0} (z - L_c) \right] \right\} \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{h}{2\mu_{comp}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{h} (R_f - R_0) \right] \right\}$$

Substituindo h por z e D₀ por R₀,

$$P_{total} = 1,5 \left\{ 1 + \exp \left[\frac{2\mu_w}{R_0} (z - L_c) \right] \right\} \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{z}{2\mu_{comp}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{z} (R_f - R_0) \right] \right\}$$

$$P_{total} = 0,75 \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{z}{\mu_{comp}} \left\{ 1 + \exp \left[\frac{2\mu_w}{R_0} (z - L_c) \right] \right\} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{z} (R_f - R_0) \right] \right\} \quad (5.34)$$

5.1.2.4. Processo de extrusão com atrito e variação angular

Nesta etapa, a condição de processamento aproxima-se das condições normalmente utilizadas na prática, onde é utilizada uma matriz cônica ao final do processo de extrusão, a fim de que diminua os efeitos do atrito e do *point of coring* (Figura 5.4).

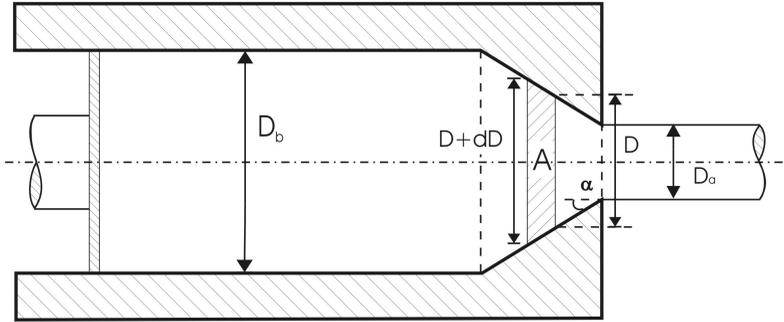


Figura 5.4 - Processo de extrusão com variação angular.

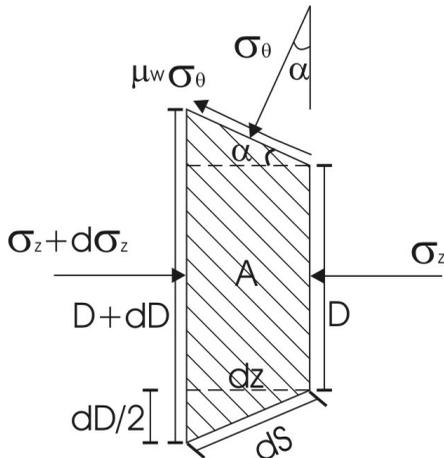


Figura 5.5 - Balanço de forças na região (A).

O balanço de forças na região (A) da extrusora (Figura 5.5) fica:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)\pi \frac{(D + dD)^2}{4} - \sigma_z \pi \frac{D^2}{4} - \mu_w \sigma_\theta \pi D dS \cos \alpha - \sigma_\theta \pi D dS \sin \alpha = 0$$

Para integrar a equação é necessário haver uma relação entre σ_θ e σ_z . Como $\sigma_\theta = \sigma_r$ e usando a relação de von Misses,

$$\bar{\sigma} = \pm(\sigma_r - \sigma_z)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_r - \sigma_z$$

$$(\sigma_z + d\sigma_z)\pi \frac{(D+dD)^2}{4} - \sigma_z\pi \frac{D^2}{4} - \mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z)\pi DdS \cos \alpha - (\bar{\sigma} + \sigma_z)\pi DdS \sin \alpha = 0$$

Multiplicando por $4/\pi$:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)(D+dD)^2 - \sigma_z D^2 - 4\mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z)DdS \cos \alpha - 4(\bar{\sigma} + \sigma_z)DdS \sin \alpha = 0$$

$$2\sigma_z DdD + d\sigma_z D^2 + 2Dd\sigma_z dD - 4\mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z)DdS \cos \alpha - 4(\bar{\sigma} + \sigma_z)DdS \sin \alpha = 0$$

Sendo que:

$$dS \cos \alpha = \frac{dD}{2 \tan \alpha}, \quad dS \sin \alpha = \frac{dD}{2}, \quad d\sigma_z dD = 0$$

$$2\sigma_z DdD + d\sigma_z D^2 - 4\mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z) \frac{DdD}{2 \tan \alpha} - 4(\bar{\sigma} + \sigma_z) \frac{DdD}{2} = 0$$

$$d\sigma_z D^2 = -2d\sigma_z DdD + 2\mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z) \frac{DdD}{2 \tan \alpha} + 2(\bar{\sigma} + \sigma_z)DdD$$

$$\frac{d\sigma_z D}{dD} = [-2d\sigma_z + 2\mu_w(\bar{\sigma} + \sigma_z) \cot \alpha + 2(\bar{\sigma} + \sigma_z)]$$

$$\frac{2dD}{D} = \frac{d\sigma_z}{[\bar{\sigma}(1 + \mu_w \cot \alpha) + \mu_w \sigma_z \cot \alpha]}$$

Sendo $B = \mu_w \cot \alpha$ e integrando,

$$\int_{D_a}^{D_b} \frac{2dD}{D} = \int \frac{d\sigma_z}{[\bar{\sigma}(1+B) + \sigma_z B]}$$

1) se $\mu_w = 0$, então $B = 0$:

$$\int_{D_a}^{D_b} \frac{2\bar{\sigma}dD}{D} = \int d\sigma_z$$

$$\sigma_z = \int_{D_a}^{D_b} \frac{2\bar{\sigma}dD}{D} = \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_b} d\bar{\varepsilon}$$

2) se $\mu_w \neq 0$, então $B \neq 0$:

$$\int \frac{2dD}{D} = \int \frac{d\sigma_z}{[\bar{\sigma}(1+B) + \sigma_z B]}$$

$$\frac{1}{B} \ln[\bar{\sigma}(1+B) + \sigma_z B] = 2 \ln D + \ln C$$

$$[\bar{\sigma}(1+B) + \sigma_z B]^{\frac{1}{B}} = D^2 C \quad (5.35)$$

Aplicando as condições de contorno: para $D = D_a$,
 $\sigma_z = (\sigma_z)_a = 0$:

$$\begin{aligned} [\bar{\sigma}(1+B)]^{\frac{1}{B}} &= D_a^2 C \\ C &= \frac{[\bar{\sigma}(1+B)]^{\frac{1}{B}}}{D_a^2} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Assim, aplicando (5.36) em (5.35):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(1+B) + \sigma_z B &= D^{2B} \frac{[\bar{\sigma}(1+B)]}{D_a^{2B}} \\ \sigma_z &= D^{2B} \frac{[\bar{\sigma}(1+B)]}{D_a^{2B}} - \frac{\bar{\sigma}(1+B)}{B} \\ \sigma_z &= \frac{(1+B)}{B} \bar{\sigma} \left[\left(\frac{D}{D_a} \right)^{2B} - 1 \right] \end{aligned} \quad (5.37)$$

Considerando que a pressão não varia ao longo das duas sessões e que $\bar{\sigma}$ é constante, a segunda condição de contorno é: para $D = D_b$, então $\sigma_z = P_{ave}$:

$$P_{ave} = \frac{(1+B)}{B} \bar{\sigma} \left[\left(\frac{D_b}{D_a} \right)^{2B} - 1 \right] \quad (5.38)$$

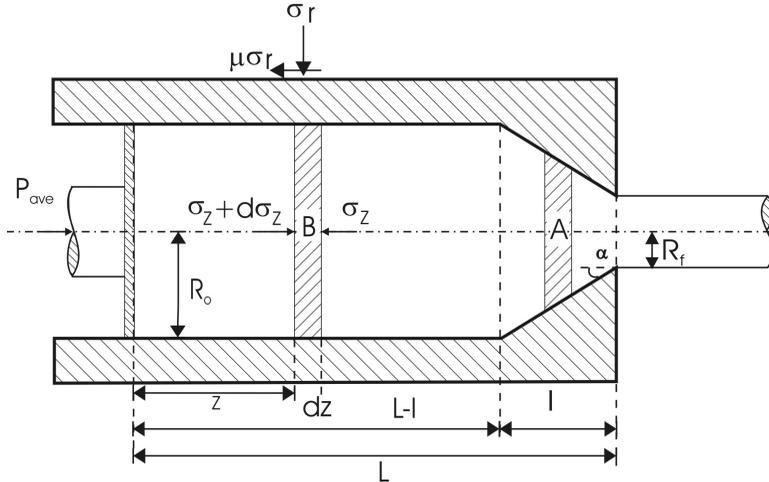


Figura 5.6 - Balanço de forças na região (B).

O balanço de força na região (B) da extrusora fica:

$$\pi R_0^2 (\sigma_z + d\sigma_z) - \pi R_0^2 \sigma_z - \mu_w \sigma_r 2\pi R_0 dz = 0$$

Sendo que:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 = \pm(\sigma_r - \sigma_z)$$

$$\sigma_r = \sigma_0 + \sigma_z$$

Fica então:

$$\pi R_0^2 d\sigma_z - \mu_w (\sigma_0 + \sigma_z) 2\pi R_0 dz = 0$$

$$\int \frac{d\sigma_z}{\sigma_0 + \sigma_z} = \int \frac{2\mu_w dz}{R_0}$$

$$\ln(\sigma_0 + \sigma_z) = \frac{2\mu_w z}{R_0} + C$$

Aplicando a condição de contorno: quando $z=L-l$,

$$\sigma_z = \sigma_0 \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] :$$

$$\ln \left\{ \sigma_0 + \sigma_0 \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right\} = \frac{2\mu_w(L-l)}{R_0} + C$$

$$C = \ln \left\{ \sigma_0 + \sigma_0 \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right\} - \frac{2\mu_w(L-l)}{R_0}$$

$$\ln(\sigma_0 + \sigma_z) = \frac{2\mu_w}{R_0} (z - L + l) + \ln \left\{ \sigma_0 \left[1 + \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right] \right\}$$

$$\sigma_0 + \sigma_z = \sigma_0 \left[1 + \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right] \exp \frac{2\mu_w}{R_0} (z - L + l) \quad (5.39)$$

Para $z=0$ (quando a pressão é inicialmente aplicada),

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_0} \Big|_{z=0} = \frac{P_{ave}}{\sigma_{ave}} = \left\{ 1 + \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right\}$$

$$\sigma_0 = \sigma_{ave} = \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{z}{2\mu_{comp}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{z} (R_f - R_0) \right] \right\}^* \\ \exp \left\{ 2B \left[-\frac{L}{R_0} \tan \alpha + \left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \right] \right\} - 1$$

Obtemos finalmente:

$$P_{ave} = \frac{\bar{\sigma}_{comp}}{(R_f - R_0)} \frac{z}{2\mu_{comp}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{2\mu_{comp}}{z} (R_f - R_0) \right] \right\}^* \\ \left\{ \left[1 + \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \right] \exp \left\{ 2B \left[-\frac{L}{R_0} \tan \alpha + \left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \right] \right\} - 1 \right\} \quad (5.40)$$

Para fins de delimitação de estudo, o modelo desenvolvido se limita às seguintes condições (AL-QURESHI, 1991):

1. Para a tensão efetiva de compressão, descrita pela relação de Hollomon $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$, o valor de n pode variar entre 0 e 1.
2. Para metais, o valor máximo do coeficiente de atrito é dado pela aplicação do critério de von Mises à lei de Amountons e vale 0,577. Porém, trabalhando-se com sistemas argila-água, que desenvolvem um comportamento viscoplástico, o valor do coeficiente de atrito pode variar entre 0 e 1.

5.2. Análise teórica da influência das variáveis

Para avaliar a influência das variáveis nas expressões para o cálculo da pressão de extrusão, tanto no caso onde não há variação angular, quanto no caso onde há esta variação, se fez o particionamento das equações, para que se possam analisar quais partes são as maiores responsáveis por aumentar ou diminuir a pressão final de extrusão.

5.2.1. Processo de Extrusão sem variação angular

No primeiro caso, onde não há variação angular (Eq. 5.34), os gráficos e suas respectivas partes de onde foram tirados da equação estão mostrados nas figuras seguintes.

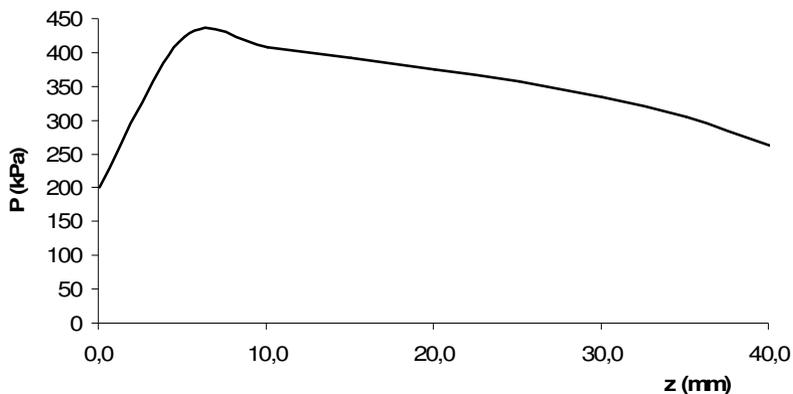


Figura 5.7 – Variação da pressão total em função da distância z percorrida pelo pistão.

Na Figura 5.7 observa-se o comportamento típico da curva da pressão de extrusão em função da distância percorrida pelo pistão. A pressão aumenta rapidamente devido ao rearranjo de material dentro da extrusora e também devido às deformações elásticas. Logo após, passando ao regime de deformação plástica, nota-se o valor da pressão diminuindo quase linearmente. Essa diminuição se deve ao fato da componente de força de atrito entre as paredes da extrusora estar diminuindo, pois uma menor quantidade de massa argilosa fica em contato com as paredes conforme o pistão vai chegando ao final.

Observa-se na Figura 5.8 o gráfico referente à primeira parte da equação. Para um dado coeficiente de atrito e dimensional da extrusora (relação R_f-R_0), e considerando-se que a tensão de compressão é constante após alcançar o regime plástico, a variação da pressão em função da distância percorrida pelo pistão “z”, é linear após a estabilização da tensão de compressão. A magnitude da pressão depende diretamente do valor da tensão de compressão da argila, obtida pelo ensaio de compressão uniaxial. Neste caso, R_0-R_f vale 30 mm e μ_{comp} vale 0,15.

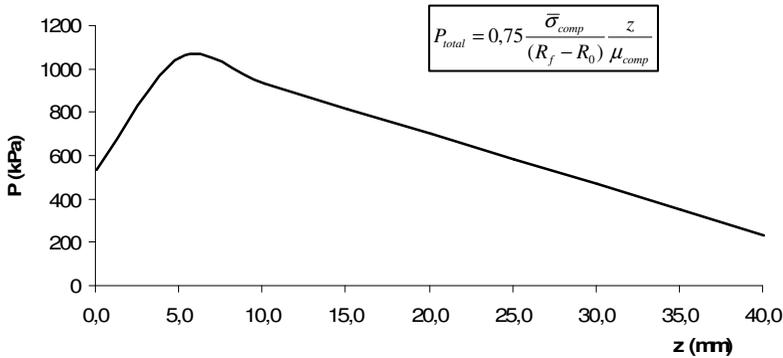


Figura 5.8 – Variação da pressão na primeira parte da equação.

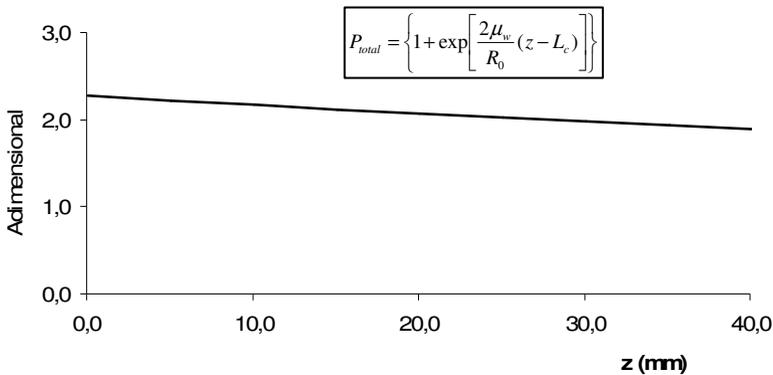


Figura 5.9 – Variação da pressão devido à segunda parte da equação.

Para a segunda parte da equação (Figura 5.9), a constante multiplicativa obtida (eixo das ordenadas) decai exponencialmente com a variação de z . Adotou-se valores de coeficiente de atrito da parede da extrusora, $\mu_w = 0,20$, bem como $R_0 = 45\text{mm}$ e $L_c = 22,5\text{ mm}$. Percebe-se que esta parte da equação é a responsável por ditar a magnitude do aumento da pressão devido ao: (1) atrito da argila entre as paredes da extrusora e (2) valor do comprimento L_c da extrusora, e tem seu valor diminuído exponencialmente conforme o processo chega ao final.

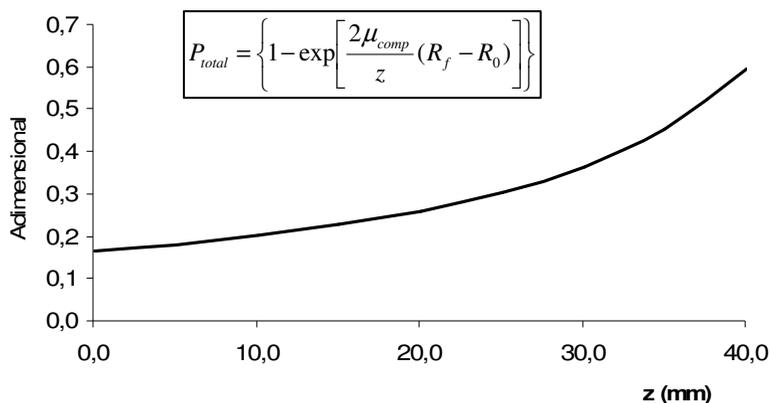


Figura 5.10 – Variação da pressão devido à terceira parte da equação.

A terceira e última parte da equação, diz respeito ao comportamento do atrito do pistão e pode-se notar na Figura 5.10 que a variação exponencial aumenta conforme se chega ao final da extrusão e que este termo é responsável pela variação de pressão devido ao coeficiente de atrito entre massa e pistão (cilindro de compressão).

Agora, fazendo-se a equação da pressão total variar em função da distância z para alguns valores de raio final (mantendo-se constante o raio inicial), percebe-se que a diminuição do raio final faz aumentar a pressão total envolvida no processo (Figura 5.11).

O valor da variável L_c é responsável por ditar o comportamento da argila quando atravessa pelo chamado “Coring Point”. Na Figura 5.12 pode-se ver que o aumento de L_c faz com que o material tenha menor contato diretamente com a parede, diminuindo assim a componente tangencial da tensão e fazendo com que a extrusão ocorra em condições ideais, isto é, sem atrito. Isso explica o comportamento das curvas geradas, que, conforme se aumenta L_c , diminui a pressão necessária para extrusão.

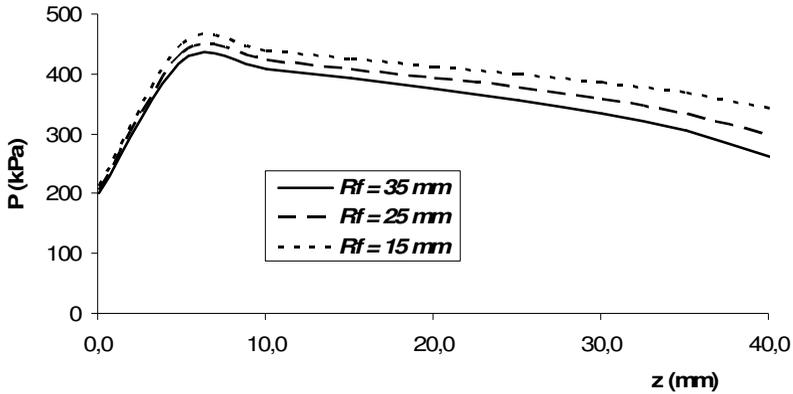


Figura 5.11 – Variação de pressão total em função de z , para alguns valores de Raio final.

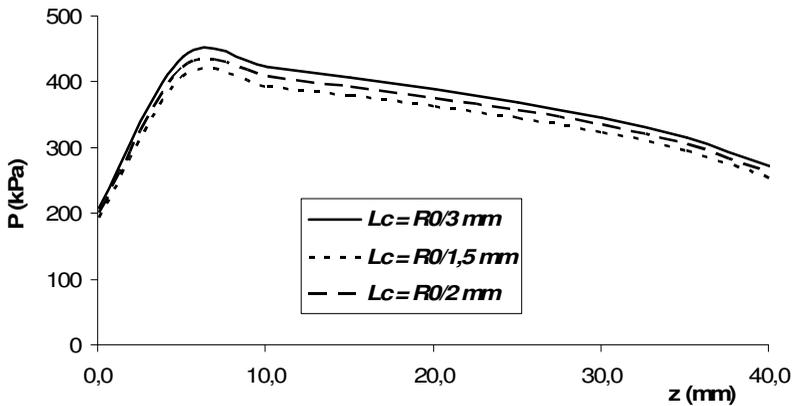


Figura 5.12 – Variação de pressão total em função de z , para alguns valores de L_c .

Como já comentado, o valor do atrito entre o pistão e a massa de argila faz modificar o valor da pressão no sentido de que, quando se aumenta o valor do atrito, diminui-se a pressão total necessária à extrusão, como se observa na Figura 5.13.

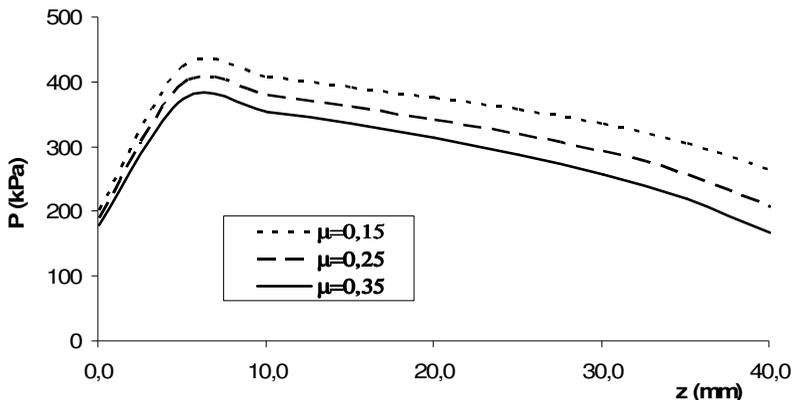


Figura 5.13 – Variação de pressão total em função de z , para alguns valores de μ do cilindro.

Já a variação da pressão devido ao atrito da parede (μ_w) tem relação direta com o comprimento L_c do processo. Na Figura 5.14 percebe-se que para vários valores de μ_w , ambas as curvas têm um ponto em comum no ponto onde $z=L_c$. Até chegar a este ponto, um valor de atrito maior será responsável por aumentar significativamente a pressão a ser aplicada para que o material passe ao regime estacionário.

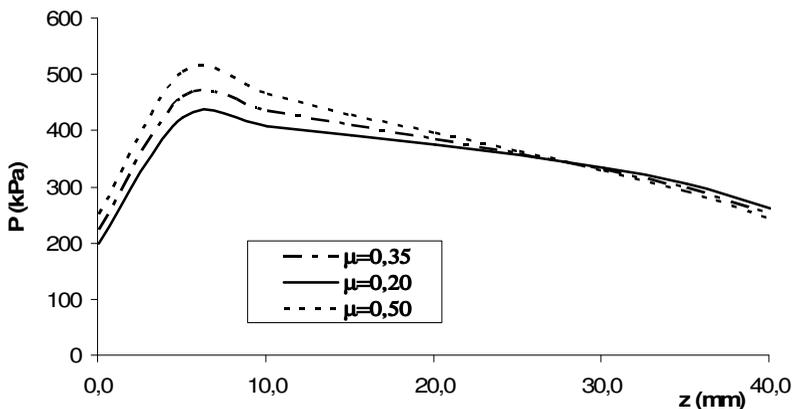


Figura 5.14 – Variação de pressão total em função de z , para alguns valores de μ_w .

O equipamento usado para a avaliação experimental não possuía bocal com $\alpha = 90^\circ$, de modo que fossem testadas essas equações na prática. Entretanto, podemos avaliar a característica da curva gerada teoricamente com resultados publicados anteriormente. A Figura 5.15 traz as curvas geradas pela equação 5.34 comparada com resultados experimentais de Benbow & Brigwater (1993). Nota-se o excelente acordo entre as curvas, principalmente para o estado estacionário. A curva experimental apresenta uma inclinação ao final da extrusão, devido provavelmente ao fator “point of coring” mascarar a pressão real.

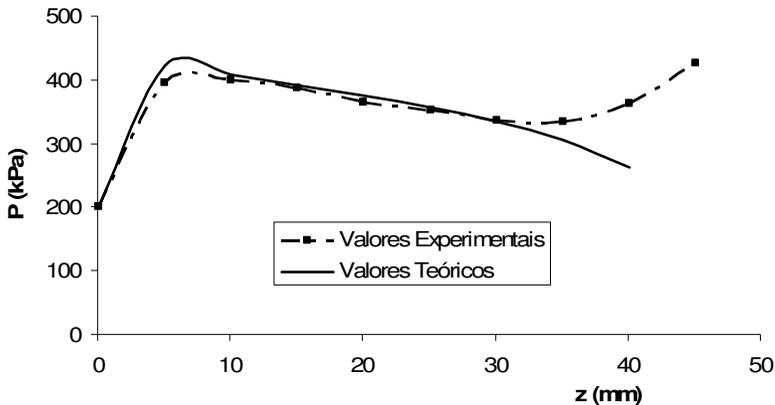


Figura 5.15 – Curvas teóricas geradas e resultados experimentais publicados por Benbow e Bridgwater (1993), mostrando excelente acordo para o regime estacionário.

5.2.2. Processo de Extrusão com variação angular

Para o segundo caso, havendo variação angular, a Equação 5.40 pode ser particionada em 4 partes.

No gráfico da Figura 5.16 percebe-se o incremento no valor da pressão até um limite em que estabiliza, chegando a um regime estacionário. Esse aspecto da curva explica-se levando em conta que no início da extrusão a tensão de compressão é menor, devido ao comportamento elástico da argila e rearranjo das partículas no interior da extrusora.

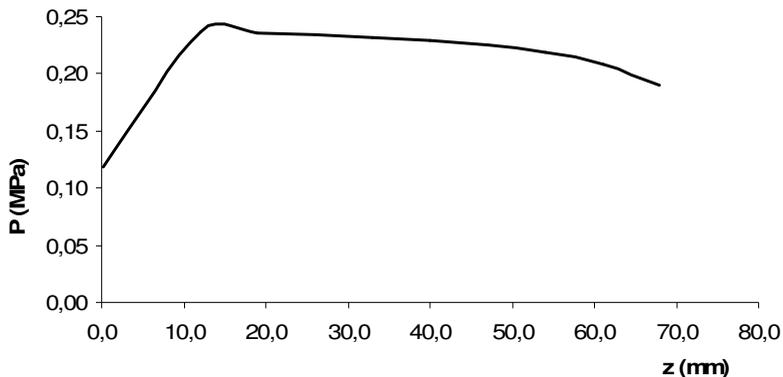


Figura 5.16 – Variação da pressão total em função da distância z percorrida pelo pistão.

Assim como no caso da extrusão sem variação angular, a primeira parte da equação é uma relação praticamente linear (após atingir o estado estacionário) da pressão total em função da distância percorrida pelo pistão, conforme pode ser visto na Figura 5.17.

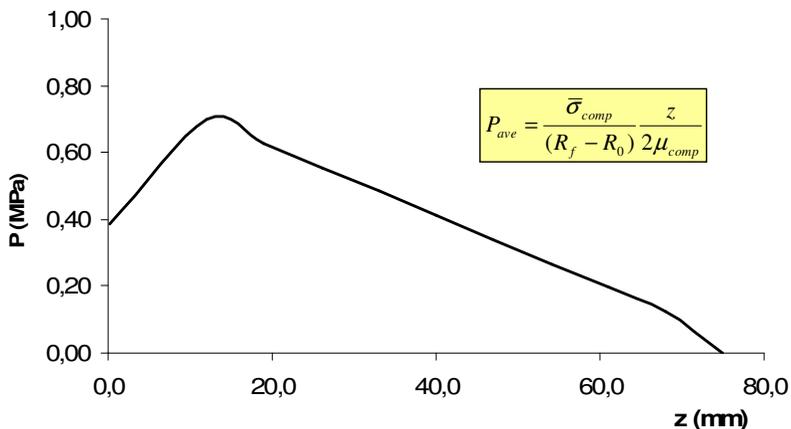


Figura 5.17 - Variação da pressão na primeira parte da equação.

Igualmente a segunda parte da equação tem semelhança ao que já foi comentado com relação à terceira parte da equação da extrusão sem variação angular, mostrado agora na Figura 5.18.

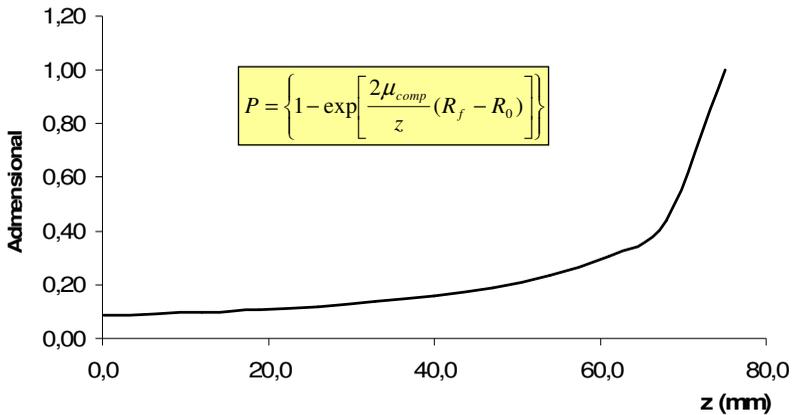


Figura 5.18 - Variação da pressão devido à segunda parte da equação.

A terceira parte da equação (eq. 5.41), que vem da relação de Sachs, bem como a quarta parte (eq. 5.42), não dependem de z , portanto, são constantes em relação a esta variável ao longo do processo.

$$P = 1 + \frac{(1+B)}{B} \left[\left(\frac{R_0}{R_f} \right)^{2B} - 1 \right] \quad (5.41)$$

$$P = \exp \left\{ 2B \left[-\frac{L}{R_0} \tan \alpha + \left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \right] \right\} \quad (5.42)$$

Para analisar como variam os outros parâmetros envolvidos nas relações acima, como o coeficiente de atrito, bem como variações de raio final, ângulo de saída, uma abordagem juntamente com os resultados experimentais será apresentada mais adiante.

5.3. Resultados experimentais

5.3.1. Composição química e mineralógica

Os resultados da análise química por fluorescência de raios-x estão presentes na Tabela 5.1 e na Figura 5.19. A Figura 5.19 traz os resultados da análise por difração de raios-x. A quantificação das fases presentes foi realizada por análise racional (COELHO et al., 2002) e é apresentada na Tabela 5.2.

Pode-se observar que o principal argilomineral presente nas três argilas é a caulinita. Para a argila A3, este corresponde à 84,64%, enquanto o teor de quartzo, que atua como material desplastificante, corresponde à 13,04%. Devido a estes valores, espera-se que esta argila desenvolva a maior plasticidade entre as três.

Tabela 5.1 – Análise química das argilas

Óxidos (%)	A1	A2	A3
SiO ₂	62,83	61,57	52,45
Al ₂ O ₃	22,86	25,08	33,43
Fe ₂ O ₃	2,39	0,38	0,73
CaO	0,02	0,02	0,00
Na ₂ O	0,07	0,01	0,01
K ₂ O	1,10	0,48	0,27
MnO	0,06	0,01	0,01
TiO ₂	1,36	0,42	2,11
MgO	0,57	0,13	0,10
P ₂ O ₅	0,06	0,05	0,06
Perda ao Fogo	9,26	8,37	13,33

Tabela 5.2 – Quantificação das fases presentes nas argilas

Fase (%)	A1	A2	A3
Caulinita	57,88	63,50	84,64
Quartzo	35,88	32,00	13,04
Acessórios	6,24	4,50	2,32

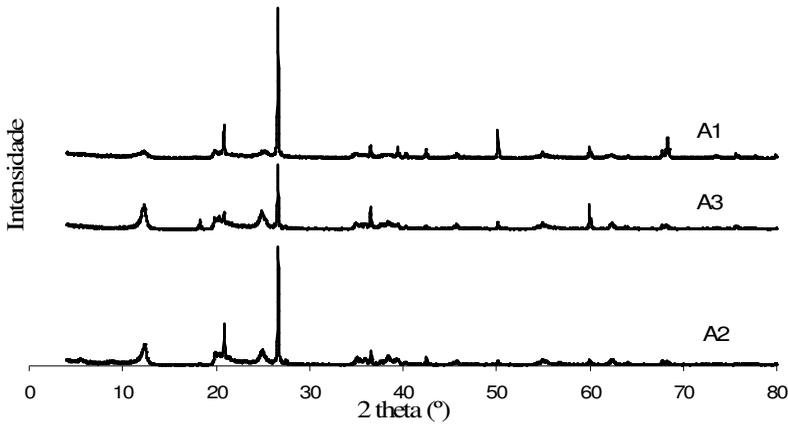


Figura 5.19 – Difração de raios-x para as três argilas.

5.3.2. Plasticidade pelo Índice de Atterberg

Os resultados dos ensaios para determinação do índice de plasticidade de Atterberg para as argilas são apresentados na Tabela 5.3. Pode-se notar que a argila A3 apresenta o maior limite de plasticidade, significando que mais água é necessária para que aquela adquira uma condição que possa ser conformada e manter sua forma depois sair da extrusora. Observa-se também a grande variação do IPA entre as argilas, que será útil para investigar a adequação do modelo matemático em condições variadas de plasticidade. Nota-se que para a argila A2, o baixo valor de IPA demonstra que pequenas variações de umidade podem influenciar significativamente a plasticidade do sistema água-argila.

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg

Argila	LL (%)	LP (%)	IPA (%)
A1	64,4	44,0	20,4
A2	44,6	30,9	13,7
A3	72,6	42,8	29,8

5.3.3. Plasticidade pelo Índice de Pfefferkorn

O índice de plasticidade de Pfefferkorn (IPP) também foi avaliado (Figura 5.20) e os resultados (Tabela 5.4) demonstram coerência com os valores encontrados de IPA, ou seja, são maiores para a argila A3 e menores para a argila A2.

Os resultados do coeficiente angular das retas obtidas permitem dizer que as argilas A3 e A1, com seus coeficientes menores, apresentam uma melhor plasticidade que a argila A2 (BARAN et al., 2001).

Tabela 5.4 – Índices de Pfefferkorn

Argila	IPP (%)	Coefficiente angular
A1	47,1	41,9
A2	37,9	57,6
A3	53,0	44,1

5.3.4. Comportamento da argila sob compressão

A partir dos resultados obtidos para obtenção dos limites de Atterberg, foram escolhidos três valores de umidade a serem utilizados nos ensaios de compressão e extrusão. Inicialmente, foram escolhidos os valores de umidade que correspondiam a LP, LL e uma média entre esses dois pontos. Porém, conforme foram realizadas as extrusões das massas com valores de umidade próximos ao LL, o manômetro da extrusora não possuía sensibilidade suficiente para medir a pressão de extrusão. Além disso, o produto da extrusão não possuía suficiente resistência a verde para que pudesse ser manipulado. Baran et al. (2001) encontraram dificuldades semelhantes na formulação do seu conceito de “trabalhabilidade” para argilas muito úmidas, ao trabalhar com ensaios de compressão em massas argilosas. Assim, adotou-se o procedimento de utilizar os valores próximos a LP, $(LL+LP)/2$ e um ponto médio entre esses dois.

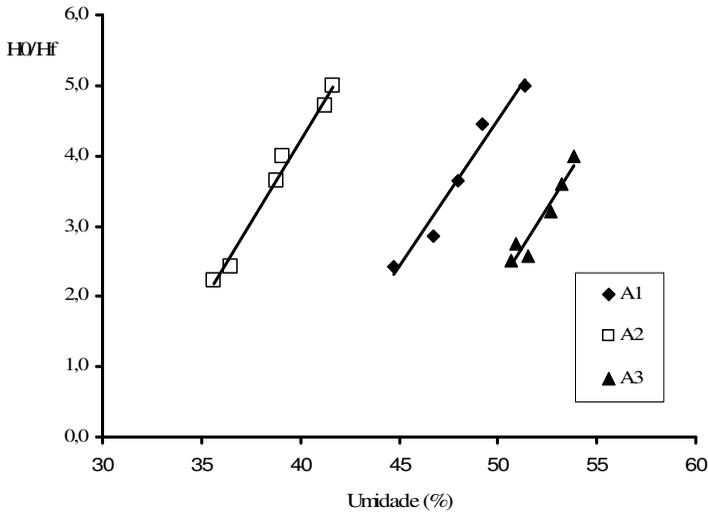


Figura 5.20 – Ensaio de plasticidade de Pfefferkorn.

A Figura 5.21 apresenta a seqüência de fotografias obtidas a partir de uma filmagem do ensaio de compressão. Para cada ensaio, foram tiradas 9 fotografias de modo que os raios instantâneos fossem mensurados e relacionados com a força instantânea.

A partir dos dados da carga em função do deslocamento gerados pelo texturômetro, puderam-se construir as curvas teóricas de força em função da variação de raio (segundo a equação 5.15), que são apresentadas nas Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.22, para as argilas A1, A2 e A3, respectivamente. Pode-se notar que as curvas teóricas são bem ajustadas com os pontos experimentais, escolhendo-se valores apropriados de tensão efetiva e coeficiente de atrito. Estes resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.5.

Observa-se que as três argilas apresentaram comportamento semelhante no que diz respeito à forma da curva. Apresentam uma região elástica, que é a região que diz respeito à rigidez da massa à deformação. Além disso, é possível distinguir um limite de escoamento, onde a argila começa a entrar na região plástica, ou seja, ao ser imposta uma força sobre a mesma, esta retém sua forma após a retirada dessa força. Esta seria a região a partir da qual o trabalho de conformação teria efeitos significativos.

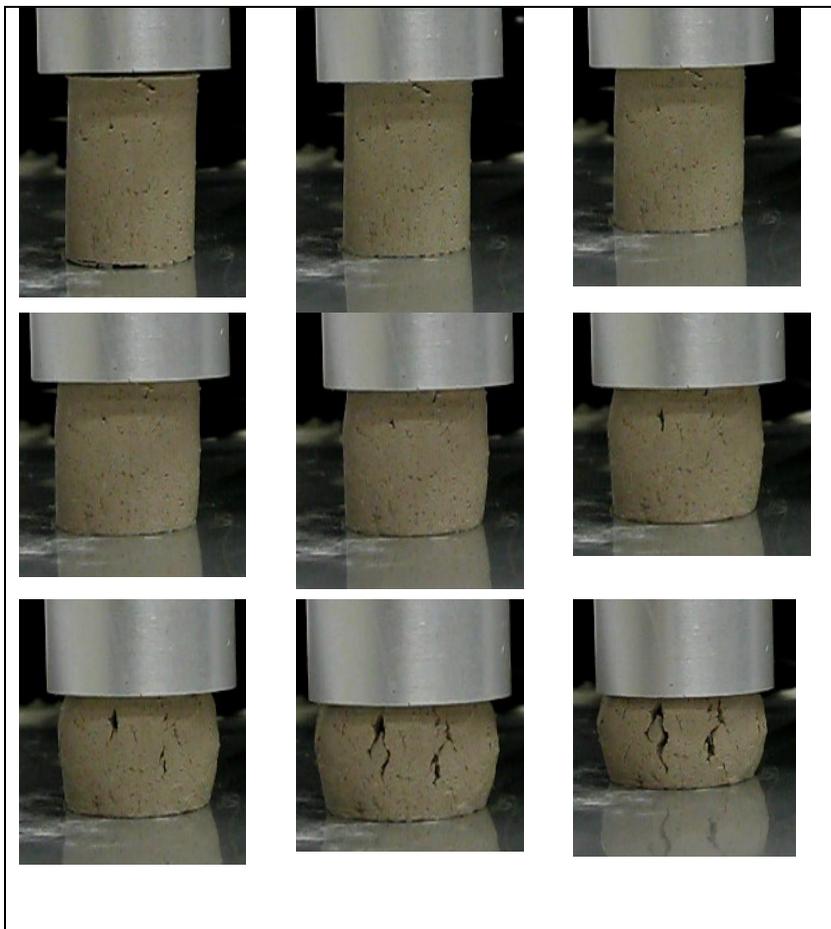


Figura 5.21 – Evolução do ensaio de compressão. Amostra com 48,9 % de umidade da argila A3.

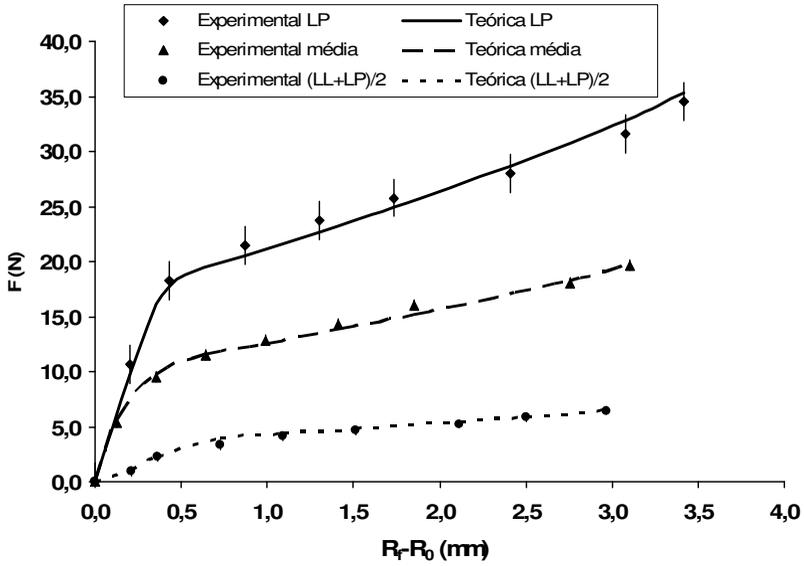


Figura 5.22 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A1.

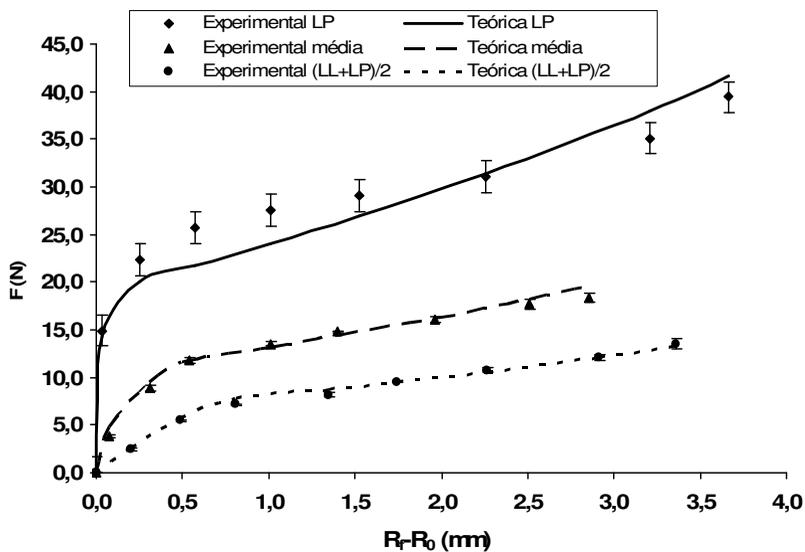


Figura 5.23 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A2.

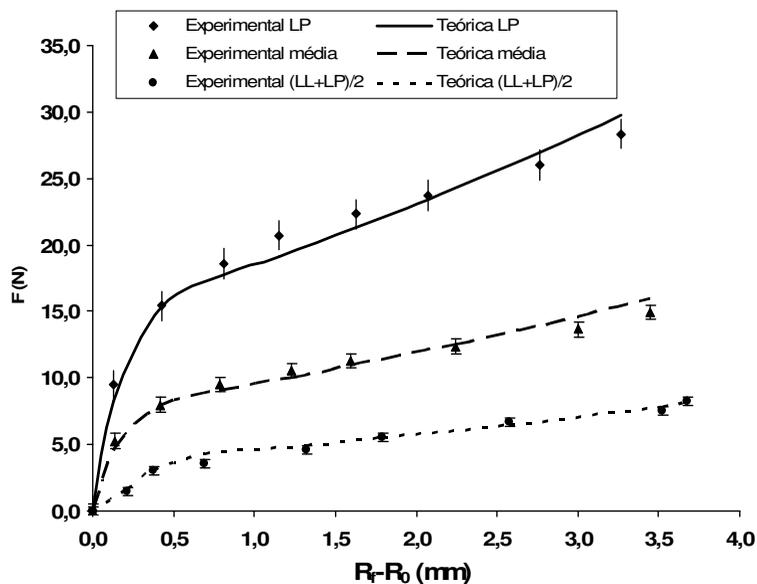


Figura 5.24 – Curvas teóricas e pontos experimentais do ensaio de compressão para argila A3.

Como foi visto na Figura 5.21 existe o efeito embarrilamento dos corpos de prova durante o ensaio de compressão. Isso se deve ao fato do atrito atuando entre o punção e a massa argilosa. Para minimizar o efeito desse embarrilamento, foram realizadas a medição do raio na superfície de contato entre o punção e o compacto e na altura média do corpo-de-prova. Posteriormente, foi calculada uma média entre esses valores. Ainda, como se observa na Figura 5.25, esse efeito é semelhante dentro dos valores de umidade selecionados, o que justifica a escolha do mesmo coeficiente de atrito para todas as argilas. Com auxílio do gráfico apresentado na Figura 5.26, é possível perceber que o melhor valor de coeficiente de atrito que se ajusta à curva foi 0,15.

Embora o coeficiente de atrito e a tensão efetiva estejam relacionadas pela equação, convencionou-se aqui deixar o primeiro constante. Em um exame da Figura 5.27, nota-se que deixando o valor de coeficiente de atrito escolhido como constante, e variando-se a tensão efetiva, os pontos experimentais se ajustam adequadamente ao valor de 27,0 kPa (inicialmente deixado como constante). Segundo Al-Qureshi (1991), essa condição satisfeita de compatibilidade nos dois casos demonstra que pode-se utilizar qualquer uma das variáveis como constante.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de compressão

Argila	Umidade (%)	Atterberg	Tensão efetiva de compressão (kPa)	Coefficiente de atrito (μ_{comp})
A1	43,3	LP	71,0	0,15
	48,4	média	42,0	0,15
	54,1	(LL+LP)/2	14,3	0,15
A2	32,4	LP	80,0	0,15
	35,3	média	44,0	0,15
	38,6	(LL+LP)/2	27,0	0,15
A3	42,9	LP	62,0	0,15
	48,9	média	32,0	0,15
	56,5	(LL+LP)/2	15,5	0,15

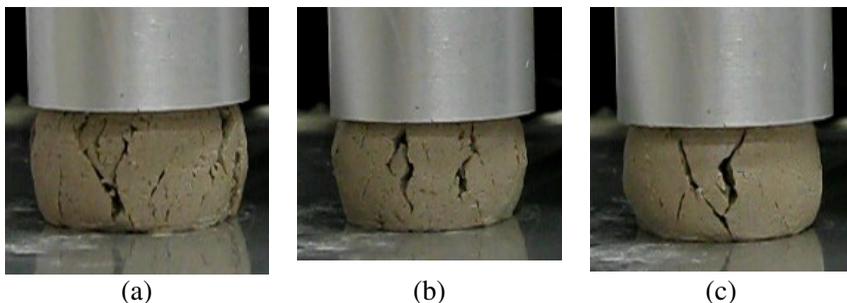


Figura 5.25 – Amostras da argila A3 ao término do ensaio, mostrando semelhança do efeito embarrilamento, com (a) 42,9 %, (b) 48,9 % e (c) 56,5 % de umidade.

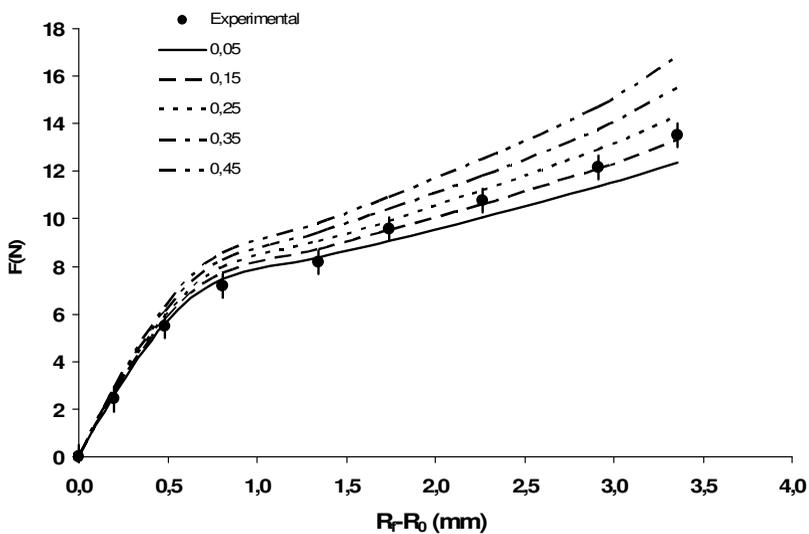


Figura 5.26 – Variação do coeficiente de atrito altera a forma das curvas de compressão. Argila A2 com 38,6 % de umidade. Tensão efetiva de compressão de 27,0 kPa.

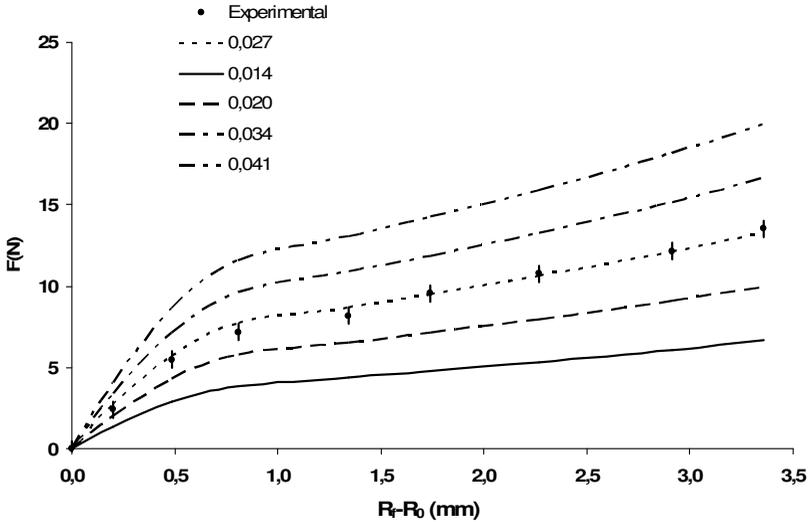


Figura 5.27 - Variação da tensão efetiva de compressão altera a forma das curvas de compressão. Argila A2 com 38,6 % de umidade. Coeficiente de atrito de 0,15.

Através dos resultados apresentados na Tabela 5.5, pode-se observar uma relação entre a tensão efetiva de compressão e a umidade. Na Figura 5.28 (a, b e c) nota-se que há uma boa correlação entre esses dois parâmetros, dentro do mesmo grupo de argilas. Não foi observado correlação entre esses parâmetros, quando se juntou os resultados de todas as argilas Figura 5.28 (d). Isso pode ser explicado pelas diferenças de constituição química e de fases das argilas, que desenvolvem diferentes plasticidades em função de umidades por vezes semelhantes.

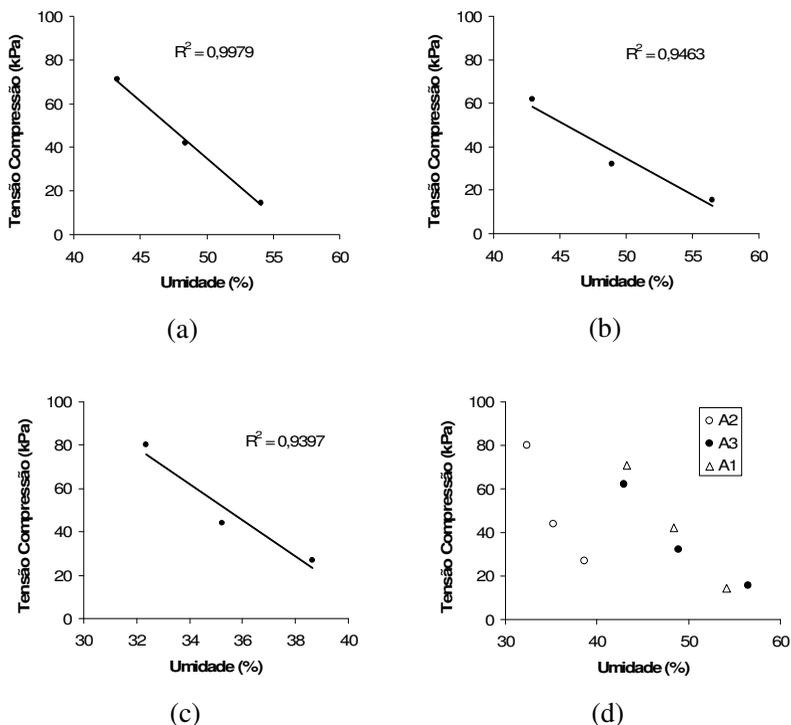


Figura 5.28 – Correlação entre a tensão efetiva de compressão e a umidade, para as argilas (a) A1, (b) A2 e (c) A3. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,48$.

5.3.5. Caracterização do comportamento da argila sob extrusão

Com os resultados de tensão efetiva e coeficiente de atrito obtidos nos ensaios de compressão, os mesmos foram inseridos na equação 5.40 para o cálculo da pressão de extrusão teórica. Na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7 são apresentados os resultados experimentais da pressão de extrusão para o bocal circular e retangular, respectivamente, para os mesmos pontos de umidades dos ensaios de compressão. Nota-se um grande acordo entre os pontos experimentais e os previstos pela equação. Convém observar que para o cálculo da pressão teórica de extrusão no caso do bocal retangular, foi usada a equivalência de área final entre a

área retangular do bocal e uma área circular, para inserir na equação 5.40.

Tabela 5.6 – Parâmetros da extrusão das argilas para bocal circular

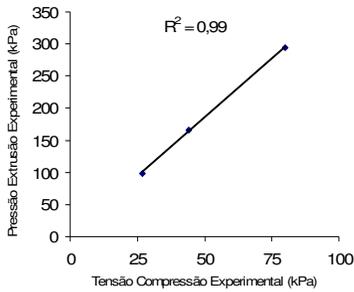
Argila	Umidade (%)	Pressão extrusão Teórica (kPa)	Pressão Extrusão Experimental (kPa)	Diferença Pressão Teórica e Experimental (%)	Coefficiente de atrito parede (μ_w)
A1	43,30	224,8	225,4	-0,28	0,56
	48,40	130,7	137,2	-4,77	0,55
	54,10	43,7	44,1	-0,87	0,54
A2	32,35	297,4	294,0	1,15	0,65
	35,25	160,6	166,6	-3,59	0,64
	38,63	96,8	98,0	-1,22	0,63
A3	42,90	239,0	235,2	1,62	0,67
	48,90	121,1	127,4	-4,92	0,66
	56,50	57,6	53,9	6,90	0,65

Nas Figura 5.29 e Figura 5.30 podem ser observadas a correlação entre a pressão experimental de extrusão circular e retangular, respectivamente, e a tensão efetiva de compressão, obtida do ensaio de compressão. Percebe-se que há uma ótima correlação para todas as argilas, bem como quando os resultados são agrupados para todas as argilas, com um grau de correspondência $R^2 = 0,97$ para o bocal circular e $R^2 = 0,94$ para o retangular. Conclui-se que o parâmetro tensão efetiva é um fator significativo na equação, e permite avaliar quantitativamente a pressão necessária durante a extrusão em função dos resultados obtidos nos ensaios de compressão.

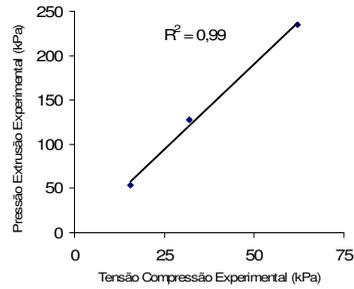
Tabela 5.7 – Parâmetros da extrusão das argilas para bocal retangular

Argila	Umidade (%)	Pressão extrusão Teórica (kPa)	Pressão Extrusão Experimental (kPa)	Diferença Pressão Teórica e Experimental (%)	Coefficiente de atrito parede (μ_w)
A1	43,30	288,2	274,4	5,03	0,56
	48,40	167,3	166,6	0,39	0,55
	54,10	55,9	58,8	-4,98	0,54
A2	32,35	387,2	406,7	4,79	0,65
	35,25	208,8	220,5	-5,32	0,64
	38,63	125,6	132,3	-5,06	0,63
A3	42,90	312,3	289,1	8,02	0,67
	48,90	158,0	147,0	7,48	0,66
	56,50	75,0	78,4	-4,31	0,65

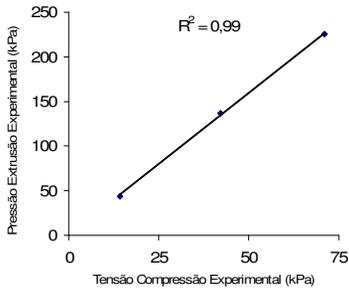
Uma análise da variação de pressão de extrusão em função do coeficiente de atrito do cilindro de compressão é mostrada na Figura 5.31. Percebe-se que para valores de umidade próximos ao limite plástico, a variação da pressão de extrusão é mais afetada pela variação deste coeficiente de atrito. Para valores mais elevados de umidade, a pressão praticamente não é afetada pela variação deste coeficiente de atrito. Os resultados apresentados para a argila A1 são semelhantes às outras argilas.



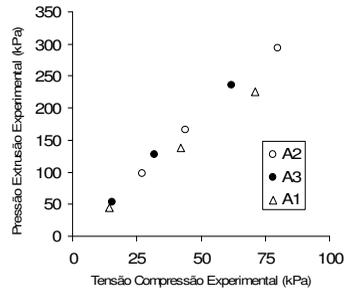
(a)



(b)

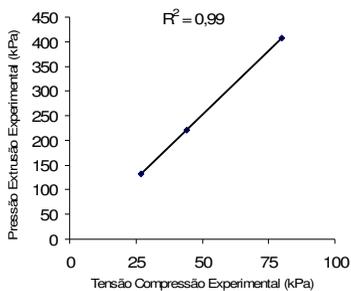


(c)

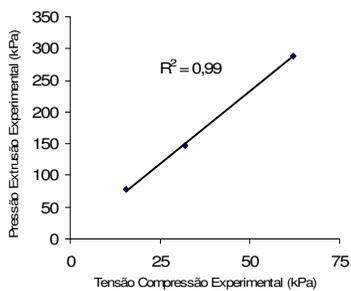


(d)

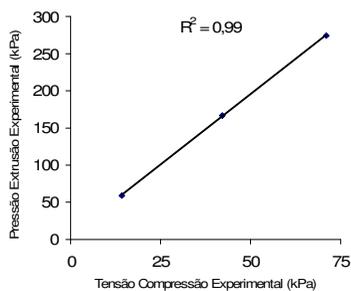
Figura 5.29 – Correlação entre a pressão experimental de extrusão para bocal circular e a tensão efetiva de compressão, para as argilas (a) A2, (b) A3 e (c) A1. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,97$.



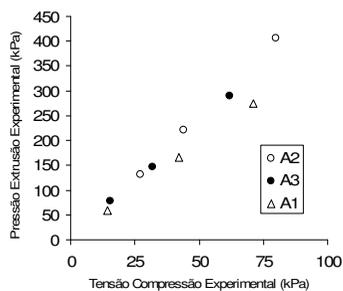
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.30 – Correlação entre a pressão experimental de extrusão para bocal retangular e a tensão efetiva de compressão, para as argilas (a) A2, (b) A3 e (c) A1. Em (d) os resultados agrupados para todas as argilas, com $R^2 = 0,94$.

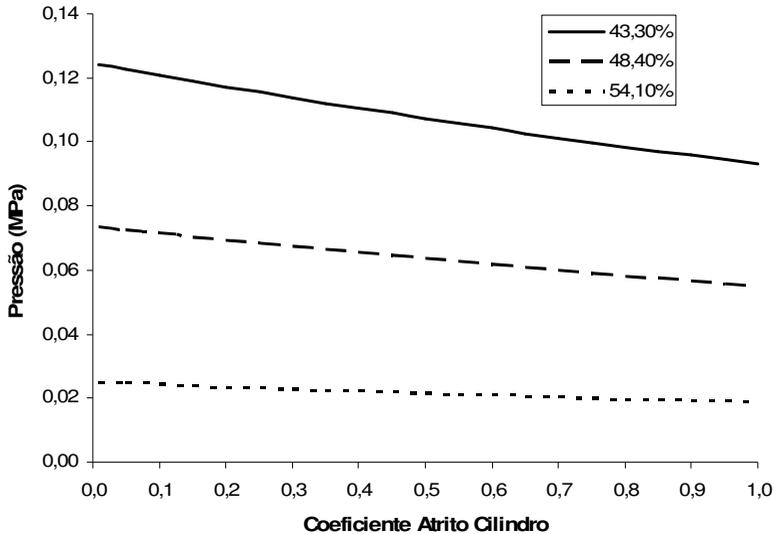


Figura 5.31 – Variação da pressão total em função do coeficiente de atrito do cilindro, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.

Entretanto, a variação do coeficiente de atrito entre a parede da extrusora e a massa é mais significativa para a alteração na pressão de extrusão, como apresenta a Figura 5.32. Percebe-se que a argila com umidade próxima ao limite plástico, e, portanto, mais seca, é bastante afetada pela variação deste coeficiente de atrito.

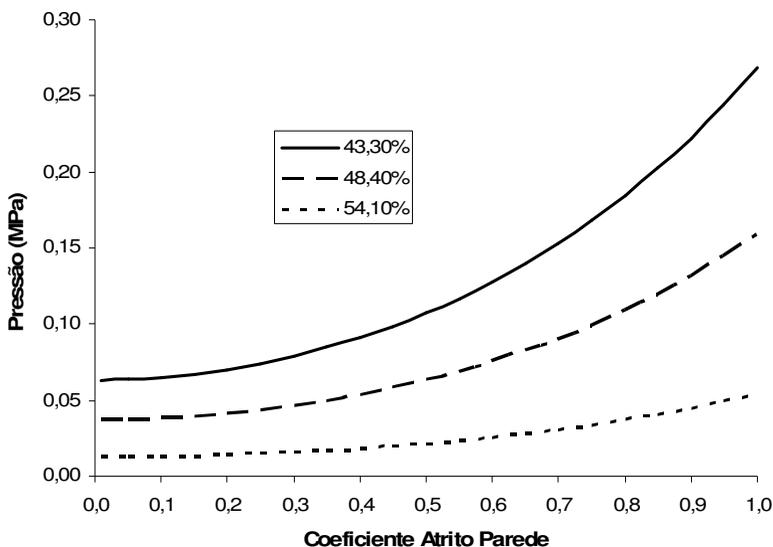


Figura 5.32 – Variação da pressão total em função do coeficiente de atrito entre parede e massa, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.

Uma análise do gráfico mostrado na Figura 5.33 mostra que o raio final utilizado no bocal da extrusora é um fator que influencia significativamente a pressão necessária à conformação das argilas. Através desse gráfico é possível determinar qual o diâmetro mínimo que poderia ser extrudado neste tipo de equipamento, levando-se em conta a pressão disponível no equipamento e a umidade da massa. Pode-se, portanto, com o ensaio de compressão, avaliar o possível comportamento da argila durante a extrusão, dependendo da sua umidade e se for o caso, indicar o melhor bocal para sua conformação. Pode-se avaliar também o comportamento descrito acima com auxílio das curvas mostradas na Figura 5.34, onde é apresentado o comportamento da pressão de extrusão em função da relação raio inicial sobre raio final.

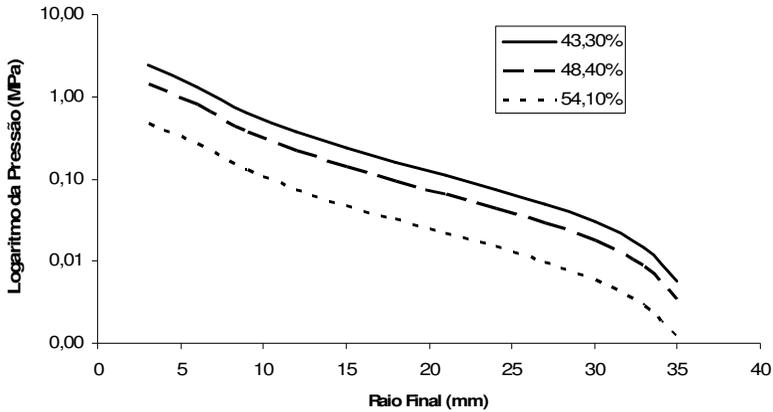


Figura 5.33 – Variação da pressão total em função do raio final, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico. Raio inicial: 38 mm.

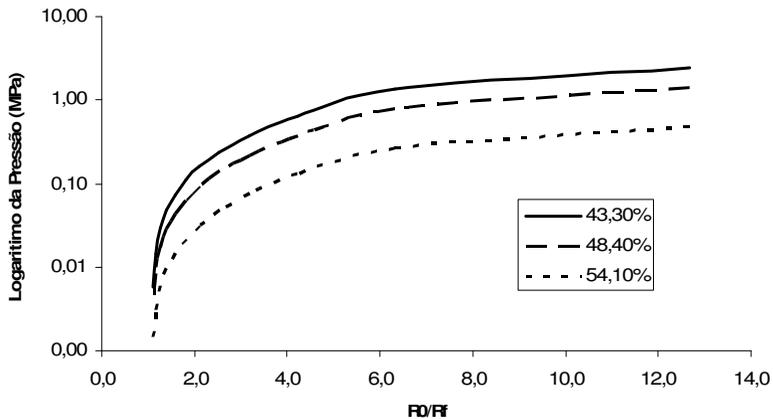


Figura 5.34 – Variação da pressão total em função da relação Raio Inicial / Raio Final, para diferentes níveis de umidade. Argila A1.

A Figura 5.35 apresenta como varia a pressão de extrusão em função de uma faixa de valores de ângulo de saída comumente utilizados na prática industrial. Nota-se que a partir de um ângulo de aproximadamente 20°, a pressão necessária à conformação aumenta

rapidamente. Ângulos mais baixos significam que menor pressão é necessária, porém, menor a compactação final do produto que sai da extrusora. Esses tipos de bocais, com menores ângulos, seriam indicados para trabalhar com a argila A2, que apresenta menor plasticidade.

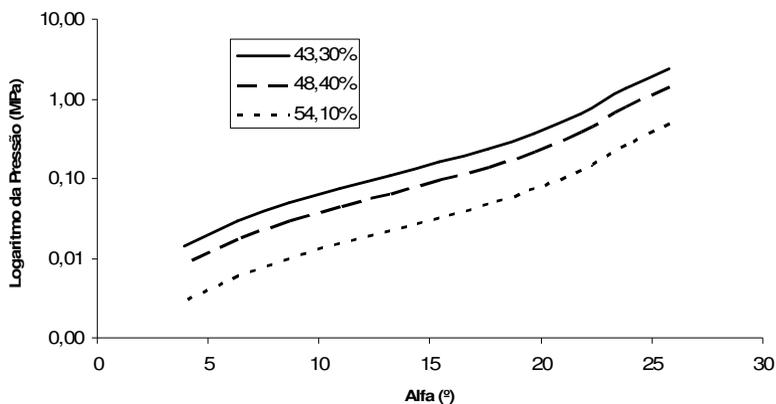


Figura 5.35 – Variação da pressão total em função do ângulo de saída da extrusora, para diferentes níveis de umidade. Extrusão da argila A1 em bocal cilíndrico.

6. Considerações finais

O sucesso para a produção de materiais tanto em escala laboratorial quanto na industrial requer além do conhecimento acerca da matéria-prima e suas propriedades ou características, um domínio sobre o tipo de processamento aplicado ao material. Neste intuito, modelos teóricos que possam prever o comportamento do material antes do seu processamento são ferramentas úteis dentro do campo da engenharia de materiais. A correlação das propriedades do material com a sua devida processabilidade é um dos pilares dessa ciência.

Neste trabalho conseguiu-se aplicar um modelo matemático à caracterização da plasticidade de sistemas argila-água com diferentes níveis de umidade. Os resultados mostraram que este tipo de ensaio pode ser aplicado para argilas com variada gama de plasticidade, e as informações obtidas com este tipo de ensaio são mais precisas, confiáveis e menos dependente da habilidade do operador em reproduzir os ensaios.

Cabe ressaltar que deve ser cuidadosamente avaliado o equipamento a ser usado nos ensaios de compressão. As células de carga normalmente usadas para ensaios em corpos de prova metálicos podem mascarar erros dentro da faixa esperada para a força máxima em corpos de prova argilosos.

Conseguiu-se correlacionar a umidade presente na argila a ser processada com a sua tensão efetiva de compressão. Sendo assim, a partir da umidade de cada argila, é possível prever qual a tensão efetiva e com isso, prever qual a pressão média necessária ao seu processamento via extrusão. Essa condição mostrou-se válida somente dentro de cada grupo de argila, sendo que umidades iguais podem produzir resultados diferentes em argilas com composições diferentes.

Dos resultados analisados, foi possível averiguar que a tensão efetiva de compressão é um fator predominante na estimativa da pressão de extrusão, sendo encontrado uma ótima correlação entre esses parâmetros.

A estimativa dos coeficientes de atrito por ajuste das curvas teóricas com os pontos experimentais é uma limitação do modelo teórico desenvolvido. Dados referentes às condições de atrito entre uma massa cerâmica e a parede de equipamentos, sejam extrusoras, injetoras

ou prensas não são disponíveis facilmente na literatura e refletem sobretudo as condições operacionais próprias do equipamento ao qual está sendo processada a massa, bem como as características da própria massa. Foi verificado que o coeficiente de atrito entre massa argilosa e o punção da máquina de ensaio de compressão é um fator menos significativo do que o coeficiente de atrito entre massa e parede da extrusora, quando da modelagem do processo de extrusão.

7. Sugestões de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros nessa área, sugere-se que seja investigada a relação entre as fases presentes nas argilas e quantificar a influência das mesmas no modelo teórico para plasticidade pelo método da compressão. Uma sugestão seria isolar grupos de argilominerais comumente presentes nas argilas e/ou produtos a base de argila, e quantificar sua influência na tensão efetiva de compressão e coeficiente de atrito.

Posteriormente, modelos mais aprimorados poderiam ser desenvolvidos relacionando não só o teor de umidade, mas também as fases presentes nas argilas, com o coeficiente de atrito entre massa e parede da extrusora.

Modelos mais acurados para a extrusão de massas argilosas em perfis retangulares podem ser ainda investigados. Aqui neste trabalho se utilizou da equivalência de áreas para chegar a um resultado satisfatório quando se trabalhou com o perfil retangular. A utilização de um perfil com $\alpha = 90^\circ$ também poderia ser testada experimentalmente, a fim de validar o modelo desenvolvido não apenas com resultados de outros autores.

Os resultados dos ensaios de compressão de argilas podem ser ainda testados para avaliação e otimização de massas cerâmicas em outras rotas de processamento, não somente a extrusão.

8. Publicações

Artigos publicados em anais de congressos:

ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Theoretical analysis of rectangular clay paste extrusion. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 53, 2009, Guarujá.

ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Theoretical analysis of rectangular clay paste extrusion. In: International Conference on Advanced Materials, 11, 2009, Rio de Janeiro.

Artigos enviados para publicação:

ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Methods For Evaluating The Plasticity of Clays: A Review. Applied Clay Science.

FLORES, O.J.U.; ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Mathematical modelling of compression test for evaluation of clay plasticity. Brazilian Journal of Chemical Engineering.

9. Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6457. Amostras de solo Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6459. Solo Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 7180. Solo Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

AL-QURESHI, H.A. Processos e Mecanismos de Conformação dos Metais. São José dos Campos: ITA, 1991.

AL-QURESHI, H.A.; FLORES, O. J. U.; HOTZA D. On the mechanics of clay paste extrusion process. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 52, 2008, Florianópolis.

AMARASINGHE, S.; WILSON, I. Interpretation of paste extrusion data. Trans IChemE, v. 76, Part A, p. 3-8, 1998.

AMARASINGHE, S.; WILSON, I. On-Line Monitoring of Ceramic Paste Extrusion. J. Am. Ceram. Soc., v. 82, n.9, p. 2305–12, 1999.

ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: A review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 142, n. 1-3, p. 4-35, 2007.

ANDRADE, F. A., AL-QURESHI, H.A, HOTZA, D. Theoretical analysis of rectangular clay paste extrusion. In: Internacional Conference on Advanced Materials, 11, 2009, Rio de Janeiro.

AYDIN, I.; BIGLARI, F.R.; BRISCOE, B.J.; LAWRENCE, C.J.; ADAMS, M.J. Physical and numerical modelling of ram extrusion of paste materials: conical die entry case. *Computational Materials Science*, v. 18, n.2, p. 141-155, 2000.

AVITZUR, B. *Metal Forming: Process and Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1968.

AVITZUR, B. *Handbook of Metal-Forming Process*. John Wiley & Sons, 1983.

AVITZUR, B. Analysis of wire drawing and extrusion through dies of large cone angle. *Eng. for Ind., Trans. ASME, ser. B*, vol. 86, p 305-316, 1964.

AVITZUR, B.; FUEYO J.; THOMPSON, J. R. Analysis of plastic flow through inclined planes in plane strain. *J. of Eng. For Ind., Trans. ASME, Ser. B*, vol. 89, n. 2, p 361-375, 1967.

BARAN, B.; ERTURK, T.; SARIKAYA, Y.; ALEMDALOGLU, T. Workability test method for metals applied to examine a workability measure (plastic limit) for clays. *Applied Clay Science*, v. 20, n. 1-2, p. 53–63, 2001.

BARBA, A.; FELIU, C.; GARCIA, J.; GINÉS, F.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Castellón: ITC, 1997.

BENBOW, J.; BRIDGWATER, J. *Paste Flow and Extrusion*. Oxford, 1993. 153p.

BERGAYA, F.; THENG, B.; LAGALY, G. (ed.). *Handbook of Clay Science*. Elsevier Science, 2006. v. 1. 1246p.

BERTAN, F. M. *Extrusão de material vitrocerâmico do sistema LZSA reforçado com partículas de ZrSiO₄*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2006.

BURBIDGE, A. S.; BRIDGWATER, J. The single screw extrusion of pastes. *Chemical Engineering Science*, v. 50, n. 16, p. 2531-2543, 1995.

BUTTON, S. T. *Conformação Plástica dos Metais*. Campinas: UEC, 2001.

CALLISTER Jr., W. *Materials Science and Engineering: An Introduction*; 7. ed. Ed. New York: J. Wiley, 2007.

CAMPOS, L.F.A., MACEDO, R.S., KIYOHARA, P.K., FERREIRA, H.C., Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. *Cerâmica*, v. 45, n. 295, p. 140-145, 1999.

CARMAN, P.C., *Clays*. In: *Chemical constitution and properties of engineering materials*. London: Edward Arnold, 1949.

CARTER, C.; NORTON, M. *Ceramic Materials – Science and Engineering*. Springer, 2007. 716p.

CASAGRANDE, A. Notes on the design of the Liquid Limit Device, *Geotechnique*, v. 8, n. 2, p. 84-91, 1958.

CHITKARA, N.R.; ALEEM, A. Extrusion of axi-symmetric tubes from hollow and solid circular billets: a generalised slab method of analysis and some experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 43, n.7, p. 1661-1684, 2001.

COELHO, C.; ROQUEIRO, N.; HOTZA, D. Rational mineralogical analysis of ceramics. *Materials Letters*, v.52, n. 6, p. 394–398, 2002.

CRUZ, T. B.; DANTAS, J.; MACEDO, R.S.; MENEZES, R.R. Influência da qualidade da água utilizada nos ensaios de plasticidade de argila vermelha. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 53, 2009, Guarujá.

DAL BÓ, M. Utilização de rejeitos da indústria de revestimentos cerâmicos no processamento de refratários triaxiais obtidos por delineamento de misturas. 2007. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2007.

DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. London: McGraw-Hill, 1988. 751p.

DONDI, M. Caracterização Tecnológica dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais e Interpretação dos Dados. Cerâmica Industrial, v. 11, n. 3, p. 36 – 40, 2006.

DONDI, M. Clay materials for ceramic tiles from the Sassuolo District (Northern Apennines, Italy). Geology, composition and technological properties. Applied Clay Science, v. 15, n. 3-4, p. 337-366, 1999.

E. J. PAYNE LTD. Disponível em: <<http://www.ejpayne.com>> . Acesso em 23 de maio de 2009.

FLORES, O. J. U.; MENDES, L.; PRETTE, A. L. G.; FREDEL, M. C.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA D. Modelagem matemática da plasticidade de argilas com diferentes teores de umidade. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51, 2007, Salvador.

FLORES, O. J. U.; OLIVEIRA, A. P. N.; FREDEL, M. C.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA D. Experimental Analysis of cylindrical clay bodies subjected to compressive axial loading. In: Brazilian MRS Meeting 2006, 2006, Florianópolis.

FLORES, O. J. U.; OLIVEIRA, A. P. N.; FREDEL, M. C.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA D. Mathematical model applied for evaluation of plasticity in clays with different moisture contents. In: Proceedings of the 50th. Brazilian Ceramics Conference, 2006, Blumenau.

GELENSKI INDÚSTRIA DE MAROMBAS LTDA. Disponível em: <www.gelenski.com.br> . Acesso em 02 de março de 2009.

HÄNDLE, F. (ed.). Extrusion in Ceramics. Berlin: Springer, 2007. 478p.

HOTZA, D. Etimologia e Uso em Diferentes Línguas de Alguns Termos Técnicos Empregados na Fabricação Cerâmica Tradicional. *Cerâmica Industrial*, v. 12, n. 4, p. 17-21, 2007.

IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura, Padrões e Apresentação dos Resultados em Análises Térmicas. *Cerâmica*, v. 26, p. 17 – 24, 1980.

JEFFERSON, I.; ROGERS, C.D.F. Liquid limit and the temperature sensitivity of clays. *Engineering Geology*, v. 49, n. 2, p. 95-109, 1998.

JOHNSON, W.; MELLOR, P. B. *Engineering Plasticity*. 2ª ed. London: Van Nostrand Reinhold Co., 1973.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 54, n. 332, p. 411-417, 2008.

MALKAWI, A.I.H.; ALAWNEH, A.S.; ABU-SAFAQAH, O.T. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay Science*, v. 14, n. 5–6, p. 257–278, 1999.

MODESTO, C. O.; BERNARDIN, A. M. Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method. *Applied Clay Science*, v. 40, n. 1-4, p. 15–19, 2008.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JR, M.; TANNO, L. C.; CUCHIERATO, G. As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins. *Cerâmica Industrial*, v. 9, n. 2, p. 33 - 46, 2004.

RAMACHANDRAN, V.; PAROLI, R.; BEAUDOIN, J.; DELGADO, A. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. New York: Noyes Publications, 2002. 691p.

REDDY, N.V.; DIXIT, P.M.; LAL, G.K. Die design for axisymmetric extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 55, n. 3-4, p. 331-339, 1995.

REED, J. S. Principles of Ceramic Processing. 2^a ed. New York: Wiley & Sons, Inc., 1995. 658p.

RIBEIRO, C.G.; CORREIA, M.G.; FERREIRA, L.G.; GONÇALVES, A.M.; RIBEIRO, M.J.; FERREIRA, A.A.L. Estudo sobre a Influência da Matéria Orgânica na Plasticidade e no Comportamento Térmico de uma Argila. *Cerâmica Industrial*, v. 9, n. 3, p. 1-4, 2004.

RIBEIRO, M. J; FERREIRA, A. A. L.; LABRINCHA, J. A. Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelha. *Cerâmica Industrial*, vol. 8, n. 1, p 37 – 42, 2003.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, J. M.; LABRINCHA, J. A. Plastic behaviour of different ceramic pastes processed by extrusion. *Ceramics International*, v. 31, n. 4, p. 515–519, 2005.

SACHS, G; HOFFMAN, O. Introduction to the theory of plasticity for engineers. McGraw-Hill Inc.,1953.

SHAKELFORD, J.; DOREMUS, R. Ceramic and Glass Materials – Structure, Properties and Processing. Springer, 2008. 201p.

SILVEIRA, L. C. O cone de penetração como ensaio alternativo na determinação da plasticidade de solos. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2001, Porto Alegre.

SOUZA SANTOS, P. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2^a ed. São Paulo: Blusher, 1992. v. 1.

VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E.; HOTZA, D.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F. Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais. *Cerâmica*, v. 51, n. 320, p. 387-391, 2005.

YUKSELEN-AKSOY, Y.; KAYA, A.; ÖRENSEAWATER, A. H. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering Geology*, v. 102, n. 1-2, p. 54-61, 2008.

ZENTAR, R.; ABRIAK, N.E.; DUBOIS, V. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. *Applied Clay Science*, v. 42, n. 3-4, p. 391-397, 2009.