



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE  
PROCESSOS**

**TESE DE DOUTORADO**  
**PREDIÇÃO DO FLUXO DE BENTONITA EM SILOS VERTICAIS**

**MARINEIDE JUSSARA DINIZ**

**Campina Grande  
Setembro 2005**

**MARINEIDE JUSSARA DINIZ**

**PREDIÇÃO DO FLUXO DE BENTONITA EM SILOS VERTICAIS**

**CAMPINA GRANDE  
2005**

**MARINEIDE JUSSARA DINIZ**

**PREDIÇÃO DO FLUXO DE BENTONITA EM SILOS VERTICAIS**

**Orientador: Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento**

**CAMPINA GRANDE  
2005**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFSCG

D586p Diniz, Marineide Jussara  
2005 Predição do fluxo de bentonita em silos verticais / Marineide Jussara Diniz —  
Campina Grande, 2005.  
162f. : il.  
Inclui bibliografia.  
Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal de  
Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia.  
Orientador: José Wallace Barbosa do Nascimento.  
1— Silos 2— Fluxibilidade 3— Bentonita I— Título

CDU 631.24



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE DOUTORADO EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS

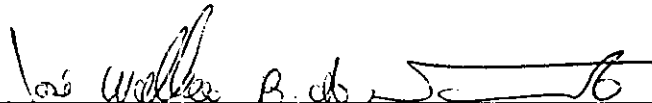
TERMO DE APROVAÇÃO

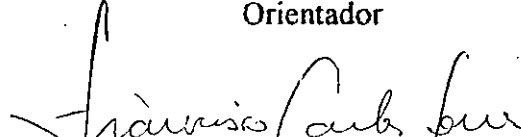
MARINEIDE JUSSARA DINIZ

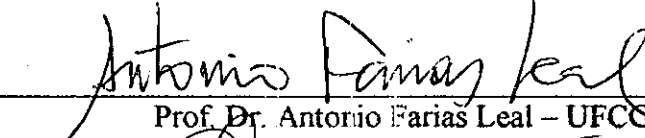
PREDIÇÃO DO FLUXO DE BENTONITA PARA PROJETO DE SILOS VERTICAIS

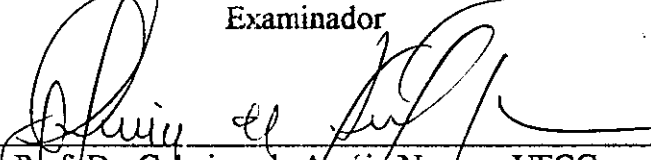
Aprovada em 28/09/2005

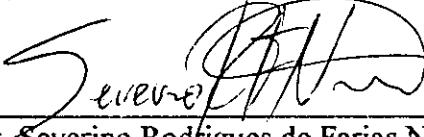
BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento – UFCG  
Orientador

  
Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes – UFLA  
Examinador

  
Prof. Dr. Antonio Farias Leal – UFCG  
Examinador

  
Prof. Dr. Gelmiros de Araújo Neves – UFCG  
Examinador

  
Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto – UFCG  
Examinador

## DEDICATÓRIA

A meus pais, João Diniz e Erminia,  
com muito amor **OFEREÇO**. Aos  
meus irmãos e amigos, **DEDICO**.

## AGRADECIMENTOS

Ao Divino Criador, DEUS MÃE PAI, que sabe sempre exatamente do que preciso e quando.

Ao Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento, pela orientação, sugestões, amizade e apoio na realização deste trabalho;

À Comissão Examinadora;

Aos Profs. da Coordenação de Engenharia de Processos e de Engenharia Agrícola pela amizade;

Aos grandes amigos Valneide, Marcilene, Marília, Rejane, Neto, Felipe, pelo apoio e incentivo;

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento Profissional Ensino Superior (CAPES), pela Bolsa de Estudos concedida;

E a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

*Áspero é o caminho do aprendizado. Muitas vezes, a única coisa que mantém o discípulo animado é a fé no mestre. Até onde o discípulo chegará é coisa que não preocupa o mestre. Ele apenas lhe ensina o caminho, deixando-o percorrê-lo por si mesmo. Afim de que o aluno supere a prova de solidão, o mestre separa-se dele, exortando-o cordialmente a prosseguir mais longe do que ele e a se "elevar acima dos ombros do Mestre". Para onde quer que o caminho escondido leve o discípulo, ele pode perder o mestre de vista, mas JAMAIS ESQUECÊ-LO(....)!!!!!!  
por Eugen Herrigel*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	i
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	x
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	04
2.1 Generalidades.....	04
2.2 Argila Bentonítica.....	06
2.2.1 Definições.....	06
2.2.2 Estrutura.....	08
2.2.3 Bentonitas da Paraíba.....	11
2.3 Silo e tipos de fluxos.....	14
2.4 Propriedades Físicas .....	18
2.4.1 Teor de umidade e efeito da umidade relativa na fluabilidade.....	18
2.4.2 Granulometria.....	20
2.5 Propriedades de Fluxo.....	21
2.5.1 Densidade em função da consolidação do produto.....	25
2.5.2 Ângulo de atrito interno .....	27
2.5.3 Efetivo ângulo de atrito interno.....	29
2.5.4 Ângulo de atrito do produto com a parede.....	30
2.5.5 Função fluxo.....	35
2.5.6 Fator fluxo.....	39
2.5.7 Tempo de consolidação.....	41
2.6 Orifício de descarga.....	42
2.7 Modelagem Matemática.....	45
2.7.1 Modelo Matemático.....	45
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	47
3.1 Local dos ensaios.....	47
3.2 Materiais utilizados nos ensaios.....	47



3.2.1 Produto utilizado.....	47
3.2.2 Máquina de ensaio (Translation Shear Test – TSG – 70-140).....	48
3.3 Determinação das propriedades físicas e de fluxo.....	49
3.3.1 Teor de umidade.....	49
3.3.2 Granulometria.....	50
3.3.3 Densidade em função da consolidação.....	50
3.4 Teste de cisalhamento.....	51
3.4.1 Metodologia para determinação do cisalhamento.....	51
3.4.2 Níveis de cargas normais.....	51
3.4.3 Número de rotações (twist).....	52
3.4.4 Metodologia para determinação das propriedades de fluxo.....	52
3.4.4.1 Enchimento da célula.....	52
3.4.4.2 Teste de cisalhamento.....	54
3.4.4.3 Pré-cisalhamento .....	54
3.4.4.4 Cisalhamento .....	55
3.4.4.5 Equações para determinação das tensões normais e de cisalhamento.....	55
3.4.4.6 Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ ), a tensão principal máxima( $\sigma_1$ ) e a resistência não confinada ( $f_c$ ).....	57
3.5 Teste de Cisalhamento com tempo de consolidação.....	58
3.5.1 Metodologia do teste de cisalhamento com tempo de consolidação.....	58
3.5.1.1 Preparação da amostra.....	58
3.5.1.2 Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ )...	59
3.6 Teste de Cisalhamento de atrito com a parede instantâneo.....	59
3.6.1 Metodologia do teste de cisalhamento de atrito com a parede.....	59
3.6.1.1 Escolha do material da parede.....	59
3.6.1.2 Escolha da célula de cisalhamento.....	59
3.6.1.3 Seleção dos níveis de cargas.....	59
3.6.1.4 Preparação da amostra do material da parede para o teste.....	60
3.6.1.5 Determinação das tensões normais e cisalhamento da parede.....	61
3.6.1.6 Determinação do ângulo de atrito da parede ( $\phi_w$ ).....	61
3.6.1.7 Função Fluxo.....	62
3.6.1.8 Fator Fluxo.....	62
3.7 Cálculo do orifício de descarga.....	62

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1 Teor de umidade.....	64
4.2 Granulometria.....	65
4.3 Densidade consolidada.....	66
4.4 Propriedades de Fluxo.....	68
4.4.1 Teor de umidade de 10% .....	68
4.4.2 Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.....	68
4.4.3 Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais .....	69
4.5 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo -TU – 10%.....	74
4.6 Teor de umidade de 12% .....	77
4.6.1 Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.....	77
4.6.2 Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais .....	77
4.7 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo.- TU 12%.....	83
4.8 Teor de umidade de 14% .....	86
4.8.1 Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.....	86
4.8.2 Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais .....	86
4.9 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo - TU 14%.....	92
4.10 Teor de umidade de 16% .....	95
4.10.1 Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.....	95
4.10.2 Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais .....	95
4.11 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo - TU 16%.....	101

4.12 Comparação das propriedades de fluxo entre os teores de umidade (10,12,14 e 16%).....	104
4.12.1 Ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno.....	104
4.13 Ângulos de atrito com a parede - fator fluxo e função fluxo.....	111
4.14 Análise do fluxo.....	113
4.14.1 Vazão de descarga.....	116
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>118</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>
<b>7.ANEXOS.....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 01 - Representação esquemática da (a)folha de silicato tetraédrica e da (b) folha central octaédrica da estrutura do argilomineral montmorilonita.....	08
Figura 02 - a: grupo tetraédrico; b: lâmina tetraédrica; c: grupo octaédrico; d: lâmina octaédrica.....	09
Figura 03 - Tipos de Fluxo que ocorrem no silo.....	16
Figura 04 - Carta de Benink.....	17
Figura 05 - Trajetos do fluxo.....	17
Figura 06 - Forças adesivas e coesivas numa areia de moldagem.....	18
Figura 07 - Efeitos da umidade nas forças adesivas e coesivas.....	19
Figura 08 - Representação gráfica de Mohr-Coulomb – Modelo usado para caracterizar parâmetros do fluxo de pó.....	28
Figura 09 - Resultados linearizados do lugar geométrico.....	28
Figura 10 - Lugares geométricos efetivos e o efetivo ângulo de atrito interno.....	30
Figura 11 - Ângulo de atrito do produto com a parede.....	30
Figura 12 - Ângulo de atrito da parede contra ângulo da tremonha cônica.....	32
Figura 13 - Equipamento para determinar o ângulo de atrito .....	32
Figura 14 - Lugar geométrico de deslizamento(YL) do produto com a parede.....	33
Figura 15 - Lugar geométrico de deslizamento da parede e ângulo de atrito com a parede.....	34
Figura 16 - Medida da tensão não consolidada.....	37
Figura 17 - Determinação da interseção da Função fluxo (FF) e fator fluxo (ff).....	38
Figura 18 – Determinação do tipo de fluabilidade do produto.....	38
Figura 19 - Funções fluxos típicas .....	38

Figura 20 - Condição de fluxo/não fluxo para projetos de fluxo de massa.....	39
Figura 21 - Avaliação da tensão máxima aplicada (CAS).....	43
Figura 22 - Tipos de obstrução de fluxo.....	44
Figura 23 - Produto utilizado – Bentonita beneficiada.....	47
Figura 24 – Aparelho de cisalhamento.....	48
Figura 25 - Aparelho registrador das forças de cisalhamento.....	48
Figura 26 - Bancada de Consolidação.....	49
Figura 27 - Peças da máquina de cisalhamento.....	52
Figura 28 - Célula preparada para o ensaio.....	53
Figura 29 - Célula após a consolidação.....	54
Figura 30 - Local de cisalhamento(Semicírculo de Mohr de Tensões).....	57
Figura 31 - Ensaio com tempo de consolidação.....	58
Figura 32 - Tipos das paredes utilizadas nos ensaios.....	59
Figura 33 – Amostra preparada para o ensaio de parede.....	60
Figura 34a – Protótipo do silo prismático.....	63
Figura 34b – Vista lateral da tremonha.....	63
Figura 35 - Curva granulométrica da bentonita.....	65
Figura 36 - Densidade consolidada em função do tempo.....	67
Figura 37 - Tensão normal máxima em função da densidade consolidada.....	67
Figura 38 - Tensão não confinada em função da densidade consolidada.....	68
Figura 39 - Ângulos de atrito interno inferior e superior para a bentonita.....	69
Figura 40 - Efetivos ângulos de atrito interno inferior e superior para a bentonita.....	70
Figura 41 - Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos.....	70
Figura 42 - Curvas das tensões não confinadas para a bentonita.....	72
Figura 43 - Curvas das tensões máxima crítica para a bentonita.....	72
Figura 44 - Curva da escoabilidade para o teor de 10%.....	73
Figura 45 - Curvas de coesão para teor de umidade de 10%.....	74
Figura 46 - Ângulo de atrito ( $\phi_w$ ) médio da bentonita com os materiais de parede estudados.....	75
Figura 47 - Curva da função fluxo para o teor de umidade de 10%.....	76
Figura 48 - Ângulos de atrito interno inferiores e superiores para a bentonita.....	78
Figura 49 - Efetivos ângulos de atrito interno inferiores e superiores para a bentonita	78

Figura 50 - Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos.....	79
Figura 51 - Curvas das tensões não confinadas para a bentonita.....	80
Figura 52 - Curvas das tensões máximas críticas para a bentonita.....	81
Figura 53 - Curva de escoabilidade para o teor de umidade de 12% .....	82
Figura 54 - Curvas de coesão para teor de umidade de 12%.....	83
Figura 55 - Ângulos de atrito do produto com a parede.....	84
Figura 56 - - Função fluxo para o teor de umidade de 12%.....	85
Figura 57 - Ângulos de atrito internos inferior e superior para bentonita.....	87
Figura 58 - Efetivos ângulos de atrito interno superior e inferior para bentonita.....	87
Figura 59 - - Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos .....	87
Figura 60 - Curvas das tensões não confinadas para a bentonita.....	89
Figura 61 - Curvas das tensões máximas críticas para a bentonita.....	90
Figura 62 - Curva de escoabilidade para o teor de umidade de 14% .....	91
Figura 63 - Curvas da coesão para o teor de umidade de 14% .....	92
Figura 64 - Ângulo de atrito com a parede o teor de umidade de 14% .....	93
Figura 65 - Função fluxo e fator fluxo para o teor de umidade de 14%.....	94
Figura 66 - Curvas dos ângulos de atrito interno superior e inferior para a bentonita..	96
Figura 67 - Curvas dos efetivos ângulos de atrito interno superior e inferior.....	96
Figura 68 - Ângulos de atrito interno e efetivo .....	96
Figura 69 - Curvas das tensões não confinada para a bentonita .....	98
Figura 70 - Curvas das tensões máxima crítica da bentonita.....	99
Figura 71 - Curva da escoabilidade para o teor de umidade de 16%.....	100
Figura 72 - Curvas da coesão para o teor de umidade de 16% .....	101
Figura 73 - Ângulos do atrito com a parede para o teor de umidade de 16% .....	102
Figura 74 - Função fluxo e fator fluxo para o teor de umidade de 16% .....	103
Figura 75 - Curvas comparativas entre os ângulos de atrito interno superiores .....	105
Figura 76 - Comparação entre os ângulos de atrito interno inferiores .....	105
Figura 77 - Comparação entre os efetivo ângulos de atrito interno superiores .....	106
Figura 78 - Comparação entre os efetivo ângulos de atrito interno inferiores .....	107
Figura 79 - Índice de fluxo para todos os teores de umidade estudados .....	108
Figura 80 - Curva da coesão para o tempo de 0 horas em função das cargas.....	109

Figura 81 - Curva da coesão para o tempo de 4horas em função das cargas.....	109
Figura 82 - Curva da coesão para o tempo de 8horas em função das cargas .....	110
Figura 83 - Curva da coesão para o tempo de 14horas em função das cargas.....	110
Figura 84 - Curva da coesão para o tempo de 18horas em função das cargas .....	110
Figura 85 - Curva da coesão para o tempo de 24horas em função das cargas .....	111
Figura 86 - Vista dos orifícios de descarga com o silo cheio.....	113
Figura 87 - Comportamento da bentonita durante a descarga com seção de descarga de 100cm <sup>2</sup> .....	114
Figura 88 - Vista da excentricidade para a seção de descarga de 100cm <sup>2</sup> .....	114
Figura 89 - Comportamento da bentonita durante a descarga com seção de 256cm <sup>2</sup> ...	115
Figura 90 - Vista da excentricidade para a seção de descarga de 256cm <sup>2</sup> .....	115
Figura 91- Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg.(t=0h)	131
Figura 92 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg. (t=0h)	131
Figura 93 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg (t=0h)	132
Figura 94 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10kg. (t=4h)	132
Figura 95 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0 kg (t=4h)	133
Figura 96 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg (t=4h)	133
Figura 97 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=8h)	134
Figura 98 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=8h).	134
Figura 99 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg (t=8h)	134
Figura 100 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10kg(t=14h)	135
Figura 101 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=14h)	135
Figura 102 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=14h)	136
Figura 103-Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=18h)	136
Figura 104 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=18h)	137
Figura 105 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=18h)	137
Figura 106 -Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=24h)	138
Figura 107 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=24h)	138
Figura 108-Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg.(t=24h)	138
Figura 109 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=0h)	139
Figura 110 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=0h)	139
Figura 111 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=0h)	140
Figura 112 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=4h)	140

Figura 113 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=4h)	141
Figura 114 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=4h)	141
Figura 115 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=8h)	142
Figura 116 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=8h)	142
Figura 117 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=8h)	142
Figura 118 -Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=14h)	143
Figura 119 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=14h)	143
Figura 120 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=14h)	144
Figura 121 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=18h)	144
Figura 122 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=18h)	145
Figura 123 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=18h)	145
Figura 124 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=24h)	146
Figura 125 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=24h)	146
Figura 126 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=24h)	146
Figura 127 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=0h)	147
Figura 128 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg.(t=0h)	147
Figura 129 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=0h)	148
Figura 130 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=4h)	148
Figura 131 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=4h)	149
Figura 132 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=4h)	149
Figura 133 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=8h)	150
Figura 134 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=8h)	150
Figura 135 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=8h)	150
Figura 136 -Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=14h)	151
Figura 137 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=14h)	151
Figura 138 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=14h)	152
Figura 139 -Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=18h)	152
Figura 140 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=18h)	153
Figura 141 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=18h)	153
Figura 142 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=24h)	154
Figura 143 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=24h)	154
Figura 144 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=24h)	154
Figura 145 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=0h)	155



Figura 146 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=0h)	155
Figura 147 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=0h)	156
Figura 148 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=4h)	156
Figura 149 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=4h).	157
Figura 150 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=4h)	157
Figura 151 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 10,0kg(t=8h)	158
Figura 152- Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=8h)	158
Figura 153 - Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=8h)	158
Figura 154 -Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=14h)	159
Figura 155 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=14h)	159
Figura 156 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=14h)	160
Figura 157 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=18h)	160
Figura 158 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=18h)	161
Figura 159 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=18h)	161
Figura 160 - Lugar geométrico de deslizamento para nível de carga de 10,0kg(t=24h)	162
Figura 161 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 7,0kg(t=24h)	162
Figura 162 -Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg(t=24h)	162

## LISTA DE TABELAS

	pág.
Tabela 01 - Superfícies específicas de minerais argilosos.....	7
Tabela 02 - Classificação sistemática das argilas cristalinas.....	10
Tabela 03 - Quantidade de argila bruta e beneficiada produzida na Paraíba em 2000.....	13
Tabela 04 - Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos...	25
Tabela 05 - Massa específica real das amostras de argilas naturais e industrializadas.....	27
Tabela 06 - Classificação de Jenike para a fluabilidade do pó pelo índice de fluxo.....	38
Tabela 07 - Níveis de cargas(kg) utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo e com tempo de consolidação.....	52
Tabela 08 - Resultados da análise granulométrica realizada.....	65
Tabela 09 - Valores médios da densidade ( $kN/m^3$ ) consolidada.....	67
Tabela 10 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo.....	69
Tabela 11 - Valores das tensões não confinadas e tensões máximas.....	71
Tabela 12 - Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 10%.....	75
Tabela 13 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo.....	78
Tabela 14 - Valores das tensões não confinadas e tensões máximas.....	80
Tabela 15 - Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 12%.....	84
Tabela 16 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo.....	86
Tabela 17 - Valores das tensões não confinadas e tensões máximas.....	89
Tabela 18 - Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 14%.....	93
Tabela 19 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo.....	95
Tabela 20 - Valores das tensões não confinadas e tensões máximas.....	98
Tabela 21 - Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 16%.....	102
Tabela 22 - Valores dos Ângulos de atrito interno (inferior e superior) para todos os teores de umidade estudados.....	104
Tabela 23 - Efetivo ângulos de atrito interno (inferior e superior) para todos os teores de umidade estudados.....	106

Tabela 24 - Ângulos de atrito do produto com a parede para todos os teores de umidade estudados.....	112
Tabela 25 - Variações dos fatores fluxos para todos os teores de umidade estudados.....	112
Tabela 26 - Tipo de fluxo ocorrido para relação H/L = 1,76.....	116
Tabela 27 - Tipo de fluxo ocorrido para relação H/L = 1,76.....	116
Tabela 28 - Vazão média de descarga(kg/s) para a relação H/L = 1,76 .....	117
Tabela 29 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 0hs (TU- 10%).....	131
Tabela 30 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 4hs.. (TU- 10%).....	132
Tabela 31 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs.. (TU- 10%).....	133
Tabela 32 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs. (TU- 10%).....	135
Tabela 33 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 18hs. (TU- 10%).....	136
Tabela 34 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 24hs. (TU- 10%).....	137
Tabela 35 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t= 0s. (TU- 12%).....	139
Tabela 36 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 4hs. (TU- 12%).....	140
Tabela 37 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs. (TU- 12%).....	141
Tabela 38 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs. (TU- 12%).....	143
Tabela 39 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 18hs. (TU- 12%).....	144
Tabela 40 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t= 24hs. (TU- 12%).....	145
Tabela 41 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 0hs. (TU- 14%).....	147
Tabela 42 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear	

para t = 4hs. (TU- 14%).....	148
Tabela 43 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs. (TU- 14%).....	149
Tabela 44 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs. (TU- 14%).....	151
Tabela 45 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 18hs. (TU- 14%).....	152
Tabela 46 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 24hs. (TU- 14%).....	153
Tabela 47 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 0hs. (TU- 16%).....	155
Tabela 48 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 4hs. (TU- 16%).....	156
Tabela 49 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs. (TU- 16%).....	157
Tabela 50 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs. (TU- 16%).....	159
Tabela 51 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 18hs. (TU- 16%).....	160
Tabela 52 - Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 24hs. (TU- 16%).....	161

## LISTA DE QUADROS

	pág.
Quadro 01 – Problemas mais comuns nas indústrias.....	05
Quadro 02 – Soluções encontradas para os problemas.....	05

## LISTA DE SÍMBOLOS

B – Orifício de descarga

C - Coesão

$D_p$ - diâmetro das partículas (mm);

$f_c$  – Tensão não confinada;

ff - fator fluxo

FF - função fluxo

$F_v$  - força vertical;

g - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

H - peso do pendural de cargas (kg);

$H(\alpha)$  - largura mínima da boca de descarga para uma tremonha retangular (m);

i - índice de fluxo;

IF - índice de fluxo;

K - Relação entre a pressão horizontal e vertical;

MCS - tensão principal máxima (kPa);

Ps - peso seco

Pu – peso úmido

UYS - resistência ao deslizamento inconfinado (resistência inconfinada);

$W_c$  - peso do pendural de pesos (kg);

$W_L$  - peso da tampa (kg);

$W_m$  - peso da amostra de material da parede (kg);

$W_p$  - carga sobre o pendural de pesos no pré-shear (kg);

$W_r$  - peso do anel de cisalhamento (kg);

$W_s$  - carga sobre o pendural de pesos no shear (kg);

$W_t$  - peso total da célula de cisalhamento com o produto (kg);

WYL - lugar geométrico de deslizamento com a parede;

YL - lugar geométrico de deslizamento;

- $\theta_c$  - ângulo da tremonha ( $^\circ$ );
- $\alpha$  - ângulo da tremonha ( $^\circ$ );
- $\phi_e$  - efetivo ângulo de atrito interno ( $^\circ$ );
- $\phi_i$  - ângulo de atrito interno ( $^\circ$ );
- $\phi_{ei}$  - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo inferior ( $^\circ$ );
- $\phi_{eu}$  - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo superior ( $^\circ$ );
- $\phi_i$  - ângulo de atrito interno ( $^\circ$ );
- $\phi_{il}$  - ângulo de atrito interno instantâneo inferior ( $^\circ$ );
- $\phi_{iu}$  - ângulo de atrito interno instantâneo superior ( $^\circ$ );
- $\phi_w$  - ângulo de atrito com a parede ( $^\circ$ );
- $\phi_{wl}$  - ângulo de atrito com a parede inferior ( $^\circ$ );
- $\phi_{wu}$  - ângulo de atrito com a parede superior ( $^\circ$ );
- $\gamma$  - peso específico do produto ou densidade solta ( $\text{kN/m}^3$ );
- $\gamma_a$  - densidade aerada ( $\text{kN/m}^3$ );
- $\gamma_u$  - densidade compacta ( $\text{kN/m}^3$ );
- $\mu$  - coeficiente de atrito do produto com a parede;
- $\sigma$  - tensão normal (kPa);
- $\sigma_c$  - tensão crítica (Pa);
- $\sigma_c$  - resistência ao deslizamento não confinado (resistência não confinada) (kPa);
- $\sigma_p$  - tensão normal de pré-cisalhamento (tensão normal de pré-shear) (kPa);
- $\sigma_s$  - tensão normal de cisalhamento (tensão normal de shear) (kPa);
- $\sigma_w$  - tensão normal da parede (kPa);
- $\sigma_1$  - tensão principal máxima (kPa);
- $\tau$  - tensão de cisalhamento (kPa);
- $\tau_p$  - tensão de pré-cisalhamento (pré-shear) (kPa);
- $\tau_s$  - tensão de cisalhamento (shear) (kPa);
- $\tau_w$  - tensão de cisalhamento da parede (kPa);

## RESUMO

DINIZ, Marineide Jussara. **Predição do fluxo de bentonita em silos verticais**. 2005. 167f. Doutorado (Tese de Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

O Brasil ocupa uma posição mundial dominante como detentor de grandes reservas mundiais, de uma diversificada gama de minerais metálicos e não-metálicos colocando-se seguramente entre os seis mais importantes países produtores de minerais do mundo. Minerais industriais, como a bentonita, representam uma importante contribuição no total de bens minerais produzidos no Brasil. Nos processos industriais, principalmente nas áreas de mineração e agroindústria, os silos têm um papel de fundamental importância, na armazenagem e manipulação nos processos de produção. As pesquisas realizadas em alguns países nesta área são feitas através de normas técnicas para cálculos de silos. O número de pesquisas nesta área ainda é muito limitado e como constatação deste fato, é que o Brasil não possui uma norma específica de “Ações e Fluxo em Silos”, que possa orientar os projetos e profissionais ligados a essa área, mesmo sendo um dos principais produtores de minérios do mundo, gerando assim inúmeros problemas com o projeto de silos nas fábricas de processamento de produtos minerais. O presente trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas e de fluxos da bentonita para serem empregadas no dimensionamento de silos. Os ensaios foram realizados utilizando-se a máquina TSG 70-140 conhecida como “Jenike Shear Cell” determinando as seguintes propriedades: teor de umidade, granulometria, densidade consolidada, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede, função fluxo e fator fluxo. De acordo com os resultados obtidos, fizeram-se ajustes obtendo-se equações que se adequaram aos resultados experimentais. Foi também analisado o tipo de fluxo ocorrido em silo prismático com descarga excêntrica para dois tipos de seções transversais de descarga e dois tempos de armazenamento. Por último foi determinada a vazão média de descarga. Os orifícios de descargas utilizados garantiram fluxo de massa sem a ocorrência de arcos coesivos. As propriedades determinadas podem ser inseridas na futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

Palavras-chave: Silo, bentonita, fluxibilidade.



## ABSTRACT

DINIZ, Marineide Jussara. **Prediction of the bentonite flow in vertical silos.** 2005. 167f. Doutorado (Tese de Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

Brazil is ranked as highest for its great world reserves of a diverse group of metallic and non-metallic minerals pointing out as one of the six most important mineral countries in the world. Industrial minerals such as bentonite represent a great deal in the sum of the mineral goods produced in Brazil. Storage silos play a very important role at industrial processes, especially in the areas of mineration and agrarian industry, serving as means of storage and manipulation at production processes. In some countries researches in this area are applied through technical norms for the calculation of silos. The number of researches in the area is still very limited and that is proved by the fact that Brazil does not have a specific norm for “ Actions and flow in silos” , which could guide projects and professionals connected to the field even though it is one of the principal producers of minerals in the world, thus causing several problems related to silo projects at mineral products processing industries. The present work had the objective to determine the physical and flowing properties of bentonite so they can be used for silos dimensioning. Tests were performed with the TSG 70-140 machine known as “ Jenike Shear Cell” presenting the following properties: humidity level, granulometry, consolidated density, angle of internal friction, effective angle of internal friction, wall friction angle, flow function and flow factor. Made adjustments being obtained define equations that were adequate for the experimental results. An analysis was also applied at the kind of flow occurred at prismatic silos with eccentric discharge for two kinds of discharge transversal sections and two kinds of storage time. Average runoff discharge was finally determined. The discharge holes used in the experiment were able to guarantee mass flow without the occurrence of cohesive arches. The properties determined in the experiment can be inserted at a future Brazilian norm actions and flow in silos.

Key words: Silo, bentonite, flowability

## 1.0 INTRODUÇÃO

Com a globalização, as indústrias para armazenamento de produtos pulverulentos estão sendo forçadas a serem mais eficientes. Visto que no passado pode ter sido aceitável dispor de um processo de nível inferior por causa de problemas de arqueamento ou abóbada em silos, agora exige-se que o processo se opere mais eficientemente. A eficiência está relacionada diretamente ao processo de projeto/fornecedor que têm uma completa compreensão de como os produtos fluem.

Como a variedade de pós que estão sendo produzidos em escala industrial é crescente, há uma grande necessidade por informação sobre a manipulação dos mesmos, por conta de sua complexidade.

Por isso uma completa compreensão do comportamento do fluxo de um pó é essencial para focalizar problemas de segregação e descarga. Torna-se então necessário caracterizar as propriedades de fluxo para se projetar um sistema seguro, usando princípios racionais.

A necessidade de se aumentar a capacidade de armazenamento e de atender às solicitações das empresas de processamento demonstra a importância do estudo da problemática de unidades armazenadoras, para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções dos problemas existentes.

Silos são usados extensamente na indústria com vantagens de utilização eficiente de espaço, conservação do estoque, abastecimento do processo de fabricação, mas são estruturas complexas de se projetar, pois freqüentemente ocorrem problemas operacionais, uma vez que existem diferentes tipos de produtos que podem ser armazenados, como produtos pulverulentos e granulares. Estes problemas ocorrem nos sistemas onde as estruturas foram projetadas sem conhecimento das características relevantes do fluxo do produto a ser armazenado.

Estes problemas podem ser evitados se forem as estruturas forem projetadas respeitando às propriedades de fluxo do produto que se vai trabalhar.

A determinação das propriedades de fluxo são importantes porque estas propriedades ajudam a caracterizar os produtos pulverulentos uma vez que, eles afetam seu comportamento durante o armazenamento, manipulação e processo.

Diversos testes tem sido usados para determinar as propriedades de fluxo. O aparelho de cisalhamento Jenike Shear Test é um equipamento adequado para medir essas propriedades em escala industrial. Este teste de cisalhamento é comum na tecnologia de produtos pulverulentos para caracterização da fluxibilidade dos pós, visto que é um método rápido para a determinação das propriedades de fluxo.

O objetivo geral deste trabalho foi o de caracterizar o produto mineral, bentonita, encontrada na região de Campina Grande –PB, para predição do fluxo e pressão em silos, determinando suas propriedades físicas, como a granulometria e as propriedades de fluxo, tais como: densidade consolidada; ângulo de atrito interno; efetivo ângulo de atrito interno; ângulo de atrito do produto com a parede; função fluxo; fator fluxo.

O objetivo específico foi apresentar resultados obtidos destas técnicas para: estudar a fluxibilidade do produto para vários de teores de umidade, que são os de 10, 12, 14 e 16%, nos tempos de cisalhamento instantâneo (0h) e tempo de consolidação (4, 8, 14, 18 e 24h); estudar a coesão do produto com os mesmo parâmetros da fluxibilidade; relacionar o tipo de fluxo com o orifício de descarga; verificar o fluxo do produto e determinar a taxa de fluxo. E utilizar modelagem matemática para se obter equações que possam auxiliar das predições das propriedades.

A partir dos resultados obtidos pode-se fornecer subsídios técnicos para projetistas e usuários de silos industriais destinados ao armazenamento de produtos pulverulentos, visando, projetos de silos que armazenem produtos na forma de pó empregados na indústria com vista a:

- redução de problemas de segregação;
- facilitar a descarga de materiais de elevada coesão;
- análise da influência exercida pela superfície do silo sobre o comportamento do material durante a descarga.

## JUSTIFICATIVA

O conhecimento das propriedades de fluxo do produto é a chave para resolução de problemas operacionais, como de segregação e de descarga, em unidades armazenadoras, utilizando-se equipamentos especializados no qual pode-se determinar as características dos materiais a serem armazenados.

Devido à ausência de dados normalizados, nas regulamentações brasileiras de armazenamento de produtos granulares, para predição das pressões que ocorrerão na estrutura, principalmente, nos tipos de fluxo (massa ou funil), e com o intuito de elaborar projetos de silos confiáveis, os dados determinados das propriedades de fluxo são de grande utilidade para projetistas e engenheiros que trabalhem com processamento e armazenagem, e ainda a possibilidade de, simultaneamente, aumentar a eficiência, racionalizar e agilizar o processo de planejamento de controle de produção.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades

A utilização de pós-coesivos em processamento industrial é extensa. A capacidade do pó coesivo de fluir uniformemente e consistentemente é fundamental para um processamento eficiente, pois, é notório que pós-coesivos têm comportamento imprevisível (KLAUSNER, 2000).

Uma definição simples de fluxibilidade do pó é a capacidade que ele tem para fluir. O comportamento do fluxo depende na realidade das características do pó. A fluxibilidade não é uma propriedade inerente do produto e sim o resultado da combinação das propriedades físicas do produto com os equipamentos usados para controlar, armazenar, ou processar o mesmo. Portanto, uma definição mais precisa de fluabilidade do pó é a habilidade de pó fluir de maneira desejada em uma parte específica do equipamento (PRESCOTT; BARNUM, 2000).

Para se estabelecer o fluxo característico de um produto armazenado, uma amostra do material é testado por meios de equipamento especialmente projetado. Na maioria dos países utiliza-se o equipamento projetado por Jenike e Johanson (1995), e os testes são realizados de acordo com os procedimentos e recomendações desenvolvidas por eles (The Structure design of steel bins and silos, 2001).

JENIKE & JOHANSON (1995), conduziram uma pesquisa com o objetivo de avaliar os problemas nas indústrias causados pelas propriedades de fluxo dos produtos armazenados. Os setores industriais que se submeteram ao levantamento foram: processamento químico, alimento, detergente, metais, minerais, farmacêutica e energia. A pesquisa consistiu em três partes: uma descrição geral dos produtos que estão sendo processados, as propriedades físicas dos produtos e práticas de seleção de equipamento.

Na primeira seção da pesquisa foi caracterizada a viabilidade de processamento dos produtos e seus principais problemas, conforme mostra o Quadro 01.

Pode-se observar que foram listados mais de um problema e que os de fluxo eram iguais em todas as indústrias.

Uma pergunta chave da pesquisa destes autores, aos entrevistados, foi se a companhia onde trabalham faz testes preliminares das propriedades de fluxo e 50% responderam afirmativamente. Entretanto, não identificaram que testes são realizados.

QUADRO 01 – Problemas mais comuns nas indústrias (Jenike & Johanson ,1995)

80%	Arqueamento/Fluxo
45%	Explosões
35%	Segregação
35%	Taxa de fluxo limitado
30%	Inundação
10%	Falta de estrutura e equipamento

O Quadro 02 mostra o resumo da segunda etapa da pesquisa que procurou identificar como os problemas geralmente são resolvidos.

QUADRO 02 – Soluções encontradas para os problemas (Jenike & Johanson ,1995)

60%	Equipamentos adaptados
45%	Sempre com problemas
30%	São trocados
30%	São reparados
25%	Pede ao vendedor para resolver o problema

JENIKE & JOHANSON (1995) chegaram à conclusão que problemas de fluxo são frequentemente resultado de uma atenção limitada dada as propriedades dos produtos antes da seleção do equipamento de descarga ou no projeto do silo por gravidade. Ao longo do tempo a instalação de equipamentos devidamente projetados é certamente menos dispendioso que viver com problemas devido a equipamentos mal projetados.

## 2.2 Argila Bentonítica

### 2.2.1 Definições

Retroagindo na história da humanidade, existem referências da utilização de argilas do tipo montmorilonita pelas civilizações egípcias, gregas e romanas. No limiar do século XVIII, nos Estados Unidos, foi descoberta uma nova variedade que possuía a capacidade de absorver grande quantidade de água, formando uma massa volumosa idêntica a uma gelatina. Essa propriedade passou a ser estudada com detalhes e em 1897, W.C. Knight publicou um estudo sobre este material, já denominado bentonita, pois a ocorrência localizava-se próxima a Fort Benton, na região de Rock Creed, estado de Wyoming, EUA. A vocação industrial impulsionada pelos investimentos em P & D, garantiram aos EUA a diversificação no uso e aplicações deste mineral, bem como, a posição de maior produtor mundial (REIS, 2001).

As argilas são materiais geológicos finamente divididos, uma vez que os constituintes dos seus minerais argilosos têm cristais de pequeníssimas dimensões, em regra com diâmetro esférico equivalente (d.e.e.)  $< 2 \mu\text{m}$ . A granulometria é uma das características mais importantes dos minerais argilosos e que condiciona muita das suas propriedades.

As argilas possuem elevada superfície específica, muito importante em certos usos industriais em que a interação sólida - fluido depende diretamente da superfície específica do sólido: catalise, cerâmica, branqueamento de óleos, etc. Também a elevada superfície específica da fração argilosa ou coloidal dos solos é muito importante em agricultura por ser responsável, aliada à capacidade de troca de íons, pela fixação reversível dos nutrientes minerais e dos fertilizantes, por exemplo do tipo NPK (N como NH, P como PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e K como K<sup>+</sup>). A superfície específica de uma argila é definida como a área da superfície externa mais a área da superfície interna, (caso esta exista) das partículas constituintes, por unidade de massa, expressa em m<sup>2</sup>/g. A Tabela 01 evidencia as superfícies específicas próprias de alguns minerais argilosos. A bentonita é uma argila residual proveniente da alteração de cinzas ou tufos vulcânicos ácidos, de granulometria muitíssimo fina, que geralmente aumenta de volume em meio aquoso

"swelling bentonite", com cor variada (branco, verde, azul, rosa ou creme) e baixa refrataridade. (U.T.L, 2002).

Tabela 01 – Superfícies específicas de minerais argilosos.

Caulinita de elevada cristalinidade	Até 15m <sup>2</sup> /g
Caulinita de baixa cristalinidade	Até 50m <sup>2</sup> /g
Haloisita 2H <sub>2</sub> O	Até 60m <sup>2</sup> /g
Ilita	50 – 100m <sup>2</sup> /g
Montmorilonita	150 – 800m <sup>2</sup> /g

A bentonita é uma rocha e o nome comercial para a montmorillonita, que é o mineral ativo em muitas argilas medicinais e que vem da cinza vulcânica resistida. Este nome deriva-se de Montmorillon, France, onde o mineral medicinal foi identificado pela primeira vez. Às vezes os mineralogistas usam o termo smectite que preferivelmente descreve a mesma substância (Cleanse Yourself Internally With Liquid Clay, 2002).

Por considerar-se um tipo de argila bastante nobre e na falta de produtos naturais idênticos ao norte-americano, outros países posteriormente passaram a extrair argilas diversas cujas propriedades se assemelhavam, chamando-as também de bentonitas. Isto provocou uma vulgarização no nome e fez com que até o momento o termo bentonita não defina nada em relação aos seus padrões qualitativos, pois ora é classificada por suas características mineralógicas, ora por suas propriedades tecnológicas, ora por sucedâneos na aplicação industrial (DEMATTÉ, 2000).

No Brasil, são utilizados os termos bentonita e bentonítico para materiais argilosos, sem qualquer informação quanto à origem geológica ou à composição mineralógica (SOUZA SANTOS, 1992).

DARLEY E GRAY (1988) relatam que bentonita também tem sido definida como uma argila de granulometria fina que contém um mínimo de 85,0% de montmorilonita.

O termo bentonita é definido, segundo a “Terminologia de Materiais Refratários da ABNT”, como argila montmorilonítica (esmetítico), muito plástica, proveniente de alteração de cinzas vulcânicas (SOUZA SANTOS, 1963).



### 2.2.2 Estrutura

Argilas são rochas encontradas na natureza predominantemente de argilominerais, podendo possuir outros constituintes: minerais não-argilosos, substâncias orgânicas e inorgânicas, cátions adsorvidos e sais solúveis (PORTO; ARANHA, 2004).

As esmectitas possuem como características principais o alto poder de inchamento, até 20 vezes seu volume inicial, atingindo espaços interplanares de até 100 Å, elevada área superficial (até 800 m<sup>2</sup>/g), capacidade de troca catiônica (CTC) na faixa de 60 a 170 meq/100g e tixotropia. Estas características conferem a bentonita propriedades bastante específicas que têm justificado um grande número de aplicações (PORTO; ARANHA, 2004).

A estrutura dos argilominerais é basicamente composta de camadas compreendidas de folhas tetraédricas e octaédricas unidas e empilhadas umas sobre as outras (LUCKAM; ROSSI, 1999)

A bentonita é formada por lamina muito finas com um diâmetro pouco maior que 0,05 microm. A montmorilonita é constituída por duas folhas de silicato tetraédricas, com uma folha central octaédrica unidas entre si por oxigênios comuns às folhas (DELGADO, 1990).

As Figuras 01a e 01b apresentam respectivamente, a folha de silicato tetraédrica e a folha central octaédrica da montmorilonita apresentadas por DIAZ (2003).

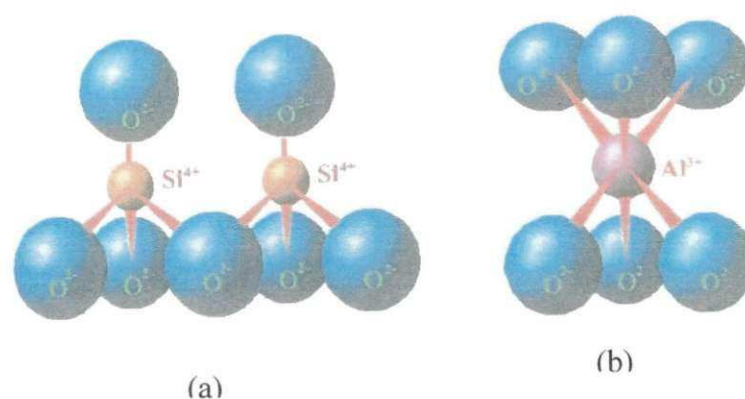


Figura 01 – Representação esquemática da (a) folha de silicato tetraédrica e da (b) folha central octaédrica da estrutura do argilomineral montmorilonita.

Fonte: DIAZ (2003)

Os grupos tetraédricos estão ligados entre si para formar camadas hexagonais contínuas (Figura 02a-b); os grupos octaédricos também estão ligados hexagonalmente em camadas octaédricas (Figura 02c-d); essas camadas são usualmente chamadas de folhas tetraédricas e folhas octaédricas, respectivamente (AGUIAR; NOVAES, 2002).

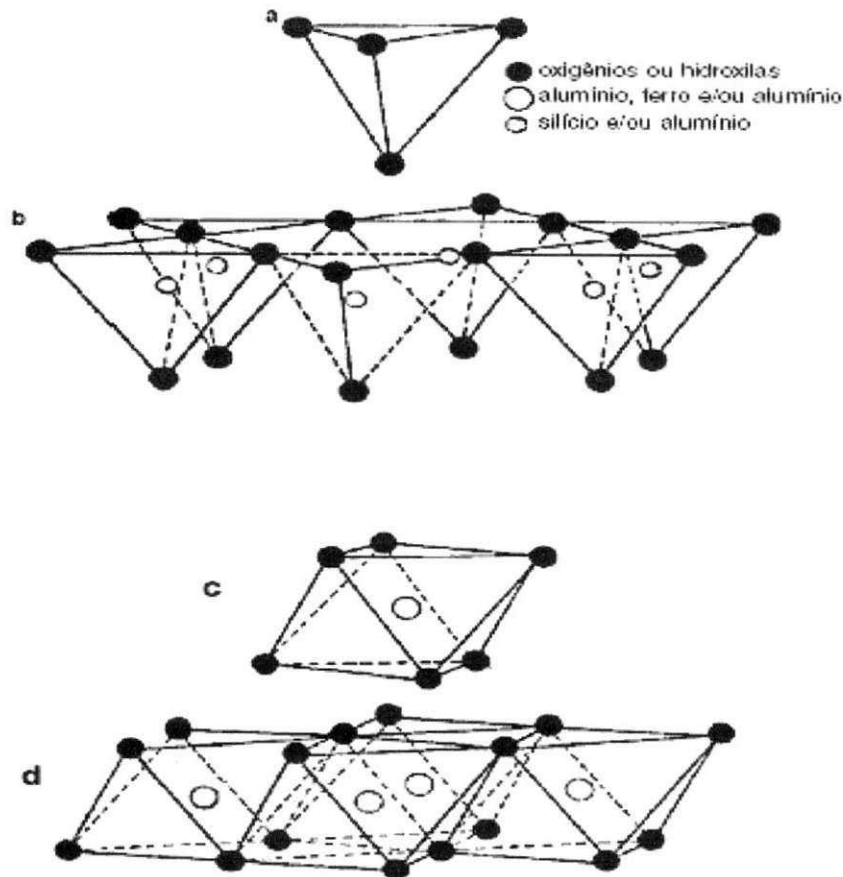


Figura 02 – a: grupo tetraédrico; b: lâmina tetraédrica; c: grupo octaédrico; d: lâmina octaédrica.  
Fonte: AGUIAR & NOVAES, 2002.

Atualmente, as argilas cristalinas são agrupadas em sete grupos sistemáticos, apresentados na Tabela 02. Os argilominerais do grupo 2:1 diferem entre si principalmente pelos cátions intercalados. Por exemplo, nas micas o cátion é o potássio, enquanto nas esmectitas existem diferentes cátions hidratados. Não é possível descrever uma argila por um número pequeno de propriedades. Os fatores que controlam as propriedades de uma determinada argila são: composição mineralógica; distribuição granulométrica das partículas; teor de eletrólitos, dos cátions trocáveis e dos sais

solúveis, qualitativa e quantitativamente; natureza e teor dos componentes orgânicos; características texturais dos depósitos argilosos, tais como forma dos grãos de quartzo, grau de orientação ou paralelismo das partículas dos argilominerais, silicificação e outros (AGUIAR; NOVAES, 2002).

Tabela 02 – Classificação sistemática das argilas cristalinas.

Arranjo das camadas e Grupo	Exemplos de espécies
2:1	talco: $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
Talco	pirofilita: $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
2:1	hectorita $E^{+}_{0,33}(Mg_{2,67}Li_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2nH_2O$
Esmectita	Montmorilonita $E^{+}_{0,33}(Al_{1,67}Mg_{0,37})Si_4O_{10}(OH)_2nH_2O$
2:1	vermiculita $K(Al, Li)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
Vermiculita	vermiculita $E^{+}_{0,86}(MgFe^{+2}, Fe^{+3} Al)_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2nH_2O$
2:1	lepidolita: $K(Al, Li)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
Mica	ilita: $K(Al, Li)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
1:1	
Caulinita	caulinita: $Al_2S_2O_5(OH)_4$

Fonte: AGUIAR; NOVAES (2002)

A bentonita ainda apresenta algumas propriedades interessantes, como comportamento tixotrópico, adsorvente e capacidade de floculação (PIETRACAPRINA *et al*, 1987).

Como a bentonita é constituída essencialmente por silicatos de alumínio hidratados, denominados argilo-mineral, que pode conter sílica livre e outras impurezas, e é o principal aglomerante da mistura na areia de moldagem é responsável pela coesão da areia quando em contato com a água. Sua utilização possibilita a obtenção de moldes uniformemente compactados, que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. Sua função coesiva permite que a resistência da caixa de moldagem seja suficiente durante o vazamento, não permitindo assim que a mesma se rompa durante o processo. Quando o vazamento ocorre a bentonita perde características físicas devido ao seu comportamento térmico e volumétrico de sua formação mineralógica. As moléculas da água são

mantidas nas camadas da argila e conseqüentemente pela elevação da temperatura são eliminadas. (BONIN et al, 1995).

A bentonita tem aplicativos específicos, mas as indústrias de fundição, pelletização de minério de ferro e petróleo irão garantir uma demanda se não crescente, pelo menos constante. No cenário mundial o Brasil possui 3% das reservas e produz 3% do consumo. Em 2000 o Brasil importou 84.600t e exportou 243t. O mercado é dominado pelos EUA e o grande fornecedor do Brasil é a Argentina (REIS, 2001).

### 2.2.3 Bentonitas da Paraíba

As bentonitas da Paraíba se constituem no maior e mais importante jazimento de argilas bentoníticas do Brasil. Sua produção atinge 96% da produção nacional. Hoje, estas argilas abastecem praticamente todo o mercado interno e parte é exportada para diversos países da América do Sul e ainda o México. Contudo, devido à exploração desordenada, seus depósitos começam a apresentar sinais de exaustão e queda na qualidade do minério. O volume atual disponível permitirá cerca de 30 anos de exploração se o consumo médio permanecer como está. Hoje, na Paraíba, a maior parte da produção de bentonita é destinada ao uso como areias de fundição, pelletização de minério de ferro, rejeito de dejetos animais e como agente viscosificante e tixotrópico para fluidos de perfuração de poços de água e de petróleo e para operações de sondagem (AMORIM; PEREIRA, 2004).

No Brasil, as principais aplicações da bentonita são como aglomerante em areias de fundição, com 45% do consumo total, na pelletização de minério de ferro com 30% do consumo e os outros 25% do consumo estão distribuídos entre a perfuração de poços de petróleo e para captação de água, terra higiênica para gatos, indústria química e farmacêutica, e clarificantes. A bentonita tem sido ainda empregada em catálise, na remoção de poluentes de água, e em cosméticos (PORTO; ARANHA, 2004; TRINDADE, 2001).

TRINDADE (2001), também afirma que os produtos industrializados são misturas de diversas espécies de argilas, em proporções variadas, que condicionam suas aplicações.

DEMATTE (2000), comprova que na rotina de moldagens especiais a nossa bentonita nacional supera na prática algumas das características tecnológicas da

bentonita sódica natural norte-americana, razão pela qual o uso simultâneo destas bentonitas traz ao consumidor vantagens técnicas face à grande compatibilidade entre ambas, uma suprimindo a debilidade da outra.

A bentonita que ocorre na Paraíba é encontrada numa variedade de cores que levou à denominação dos tipos conhecidos localmente como chocolate, bofe, chocobofe e verde lodo. Normalmente, ocorre interestratificação entre membros da família das esmectitas e outros filossilicatos (ilita, clorita e, eventualmente, caolinita) (PORTO; ARANHA, 2004).

Destaca-se o depósito de Boa Vista, localizada na Paraíba, como o que fornece as mais importantes bentonitas brasileiras comerciais, onde é bastante heterogêneo (GUESSER, 1982).

GOPINATH *ET AL* (2003), cita que as bentonitas são classificadas pelas cores conforme as empresas mineradoras e são denominadas de verde, chocolate, bofe, vermelho, amarelo, e branco. Ainda usam-se denominações de cores resultadas de uma combinação das cores principais citadas como, por exemplo, chocobofe, chocolate, verde lodo e outras. As cores servem como guia para definir a qualidade e as especificações da argila para as aplicações industriais tais como lama de perfuração de petróleo, pelletização, e outras, durante a lavra de argila nas minas.

CIMINELLI (2004), acredita que uma boa alternativa para dar início à proposta de regionalização da produção de minerais seria a macro-região de Campina Grande, na Paraíba. A região é a única produtora de bentonita (utilizada em inúmeros segmentos industriais) do país e fornecedora de outros minerais não metálicos igualmente importantes. Ainda assim, os estudos técnicos sobre os minérios locais são antigos (realizados nas décadas de 60 e 70). Vários dos minérios estudados estão exauridos e as misturas nos produtos, certamente alteradas.

Em estudos sobre a origem das argilas de Boa Vista – PB, GOPINATH *ET AL*. (1981), concluíram que as mesmas são resultantes da alteração de materiais piroplásticos, provenientes do vulcanismo local. Anos mais tarde, mostraram que estas argilas são compostas mineralogicamente por montmorilonita, ilita, caulinita, quartzo e feldspato. Desta forma, as argilas podem ser classificadas como bentonitas, estando de acordo com as definições.

Segundo o último levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, referente ao ano de 2000, as reservas de bentonita de Boa Vista, PB estão estimadas em 16 milhões de toneladas e a quantidade de bentonita bruta e beneficiada

(bentonita sódica) produzida na Paraíba representa 96% da produção nacional. Em 2000, a Paraíba produziu aproximadamente 300.000 toneladas de bentonita bruta e 150.000 toneladas de bentonita beneficiada (Tabela 03). A exportação da bentonita bruta aumentou de 16 para 216 toneladas entre os anos de 1998 e 2000. Os principais países de destino da bentonita bruta são México (38%), Chile (18%), Uruguai (15%), Argentina (11%) e Bolívia (1%) e para a bentonita beneficiada são Argentina (78%), Paraguai (14%), Chile (6%) e Uruguai (1%) (AMORIM; PEREIRA, 2004).

Tabela 03 -Quantidade de argila bruta e beneficiada produzida na Paraíba em 2000.

Produção	Bruta (toneladas)		Beneficiada (toneladas)	
	Destinos da Produção		Produção	Destinadas ao mercado
	Tratamento	Vendas		
299.155	139.208	159.947	149.587	157.448

Fonte: AMORIM; PEREIRA, 2004

Independentemente do processo geológico de formação e do tratamento industrial empregado de uma forma geral, existem simplificadaamente dois tipos de bentonitas, sódica (que incha) e cálcica (que não incha). A primeira tem a propriedade de aumentar várias vezes o seu volume inicial quando imersa em água e de formar soluções tixotrópicas bastante estáveis, por outro lado, a bentonita cálcica, devido à presença de cátions divalentes ou polivalentes, não consegue inchar ou dispersar em meio aquoso, precipitando-se e sedimentando-se neste meio.

AMORIM (2003), cita que desde a sua descoberta, as argilas bentoníticas de Boa Vista, PB vêm sendo estudadas visando seu uso industrial. Seus depósitos tornam o Brasil praticamente auto-suficiente em bentonita sódica para várias aplicações.

Atualmente, após 40 anos de exploração, muitas das variedades das argilas de Boa Vista, PB encontram-se esgotadas e outras começando a rarear, a exemplo da argila chocolate, considerada como de boa qualidade. Ainda em grande quantidade, podem ser encontradas as argilas denominadas de Bofe (argila de cor creme) e Verde-lodo (argila de cor verde escura) (AMORIM; PEREIRA, 2004).

O Brasil está entre os 10 maiores produtores da indústria de fundição do mundo. Os principais fatores que propiciam condições vantajosas à indústria de fundição brasileira são os custos com energia elétrica, matérias-primas e mão-de-obra. No Brasil, a ocorrência abundante de sucata e minerais, mormente minério de ferro, além da

disponibilidade energética e de insumos, como areia de fundição, bentonitas, resinas, catalisadores e coque de babaçu, contribuíram decisivamente para a definição do parque industrial de fundição nos moldes e dimensões atuais.

A indústria de fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários e fornece seus produtos para indústrias de diversos segmentos. Entre estes, destacam-se as indústrias automobilísticas, de construção ferroviária e naval, de bens de capital (principalmente máquinas e implementos agrícolas) e de base, como a siderúrgica (lingoteiras e cilindros); outros importantes demandantes de fundidos são o setor de mineração e fabricação de cimento (corpos moedores e peças de desgaste) e ainda o de extração/refino de petróleo (válvulas e outras peças) (IBF, 2005).

### **2.3 Silo e tipos de fluxo**

Silo é o nome genérico para todos os tipos de construção para armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos; geralmente é equipado com dispositivos de descarga e capaz de ser esvaziado por gravidade, preferencialmente, ou através de meios mecânicos ou pneumáticos (FREITAS, 2001)

Os silos podem ser construídos com os mais variados materiais como concreto armado, fibra de vidro, chapas de aço lisas ou onduladas, madeira, alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto.

Segundo as normas estrangeiras, os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- geometria do silo
- tipo de fluxo durante o descarregamento
- comportamento do fluxo
- tipo de fundo

Quando o produto está dentro do silo e não ocorre o processo de descarga, se diz que não existe fluxo. À medida que o orifício de descarga é aberto e o produto passa a se movimentar, o fluxo passará a ocorrer. Com essa movimentação é necessário se conhecer os tipos de fluxos que existirão, uma vez que de acordo com CALIL JR.

(1990), esta análise implicará na determinação das características da descarga do produto, no tipo de segregação, na formação de arcos coesivos e tubos e também se o silo poderá ser esvaziado completamente ou não. O tipo de fluxo determina as características de descarga do produto armazenado, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente

Outro fator citado por CALIL JR. (1990) é que muitos pesquisadores dedicam pouca atenção ao tipo de fluxo do produto durante a descarga. Há uma evidência incontestável de que as pressões no descarregamento são fortemente influenciadas pelo tipo de fluxo e que as observações feitas em um silo apresentando um determinado tipo de fluxo não podem ser usadas no cálculo de silos com outro tipo de fluxo.

Um dos maiores problemas em pós-industriais é a obtenção de um fluxo consistente no corpo do silo. Estes problemas são usualmente associados com o fluxo padrão que ocorre no interior do silo. Na pior das hipóteses, não há fluxo. Isto pode ocorrer quando o pó forma arco coesivo na abertura. Fluxo de massa é o fluxo padrão ideal para todos os pós (FITZPATRICK *et al*, 2003).

O fluxo padrão em um silo é de grande interesse quando se armazena materiais que se degeneram com o tempo. Então é importante executar o princípio de armazenamento. Jenike fez a diferença entre o fluxo de massa e o de funil, além de uma teoria para predição do fluxo padrão do silo. E o resultado foi apresentado em uma famosa carta, e concluiu que o ângulo da tremonha e o ângulo de atrito da parede são os dois parâmetros mais importantes (KARLSSON *et al*, 1998).

O modo como um produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície (atrito com a parede) da tremonha. Em geral podem ser distinguidos dois tipos principais de fluxo: fluxo de massa e fluxo de funil (FREITAS, 2001).

O fluxo de massa (Figura 03b) é caracterizado pelo fato de todo o material se mover conjuntamente durante a operação de descarga. Particularmente, o material em contato com as paredes desliza sobre estas, fluindo junto com o resto. Desde o início da descarga nenhuma partícula ou aglomerado permanece em sua posição original, todas se movendo, impedindo a formação de zonas mortas. O material que entra primeiro é o primeiro a sair, o que tende a manter constante o tempo de residência ou permanência do material no silo em um processo contínuo (AMORÓS *et al*, 2002).



O fluxo de funil consiste na formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de saída do silo, rodeado por uma zona na qual o material permanece inicialmente estático (Figura 03a). Durante a descarga do silo, se o material é pouco coeso, a parte mais alta, em contato com as paredes, vai desmoronando, alimentando o canal central. Se o material é muito coeso, o esvaziamento do silo pode chegar a ser interrompido, com a formação de um canal central vazio, cercado por material estático (AMORÓS *et al*, 2002).

Há também um caso especial que seja uma combinação destes dois fluxos chamados fluxo expandido (Figura 03c). As características e as diferenças entre os fluxos são descritas em Figura 03.

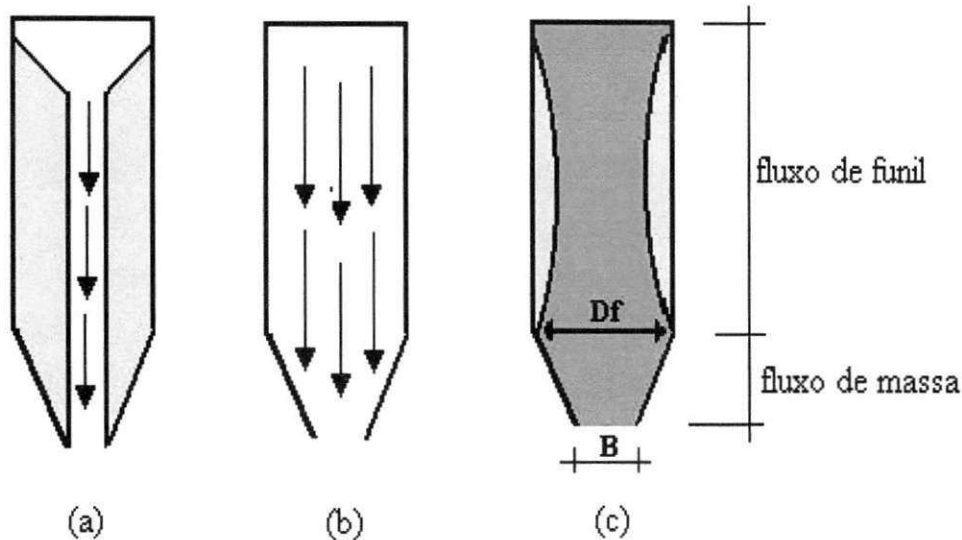


Figura 03- Tipos de fluxo que ocorrem no silo

Fonte: AMORÓS, 2002

Segundo MARINELLI E CARSON (2002), o fluxo de massa é conveniente para pós, materiais coesivos (sem fluxo livre), materiais que precisam ser armazenados por longos períodos de tempo, quando a segregação é importante.

BENINK (1989), apresentou outra teoria onde as regiões de fluxo de massa e o de funil são separados por uma zona de fluxo intermediário. Nesta zona, o fluxo padrão é o fluxo de massa se a altura do carregamento for alta, e é o fluxo de funil se o carregamento for baixo. A carta de Benink é apresentada na Figura 04 (KARLSSON *et al*, 1989).

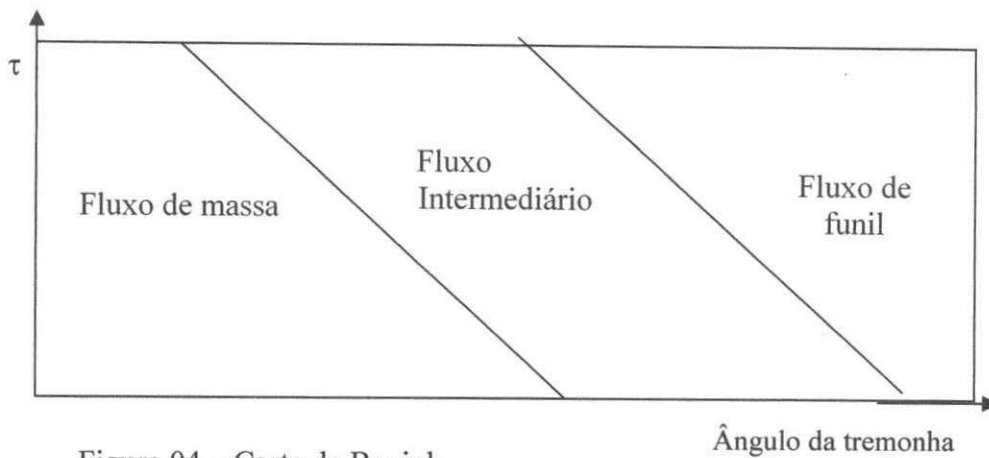


Figura 04 – Carta de Benink  
Fonte: KARLSSON, 1998

De acordo com ROBERTS (1987), o projeto de silo com fluxo de massa determina o ângulo da tremonha e a abertura da boca de descarga para prevenir a formação de arco coesivo estável. Quanto ao comportamento, o fluxo pode ter:

(a) Trajeto assimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (Figura 05(a)).

(b) Trajeto planar: É um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (Figura 05(b)).

(c) Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo (Figura 5(c)).

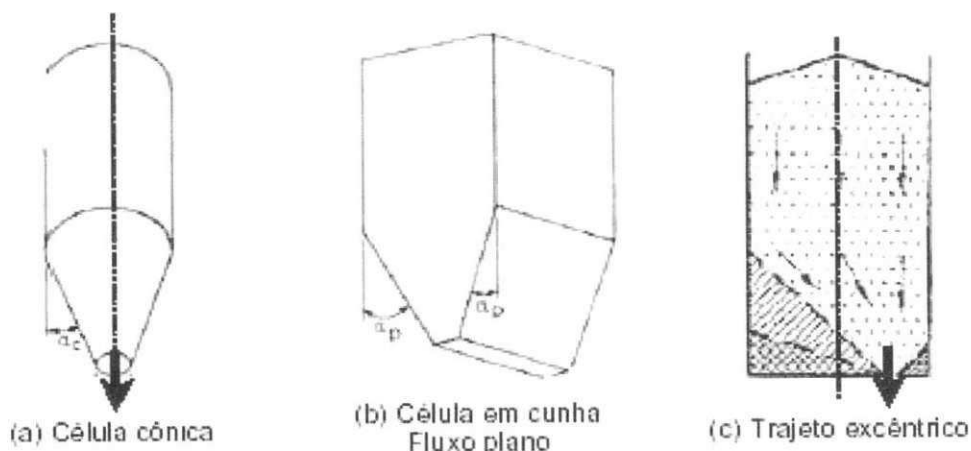


Figura 05 – Trajetos do fluxo  
Fonte: FREITAS, 2001

## 2.4 Propriedades Físicas

Os produtos armazenados nos silos possuem propriedades físicas que têm um importante papel no comportamento de pressões que o produto exerce sobre as paredes vertical e o fundo dos silos. Apesar disso, não há ainda consenso sobre suas formas de determinação, e seus valores variam significativamente entre as normas existentes.

A caracterização do produto a armazenar consiste em determinar suas propriedades físicas. Este é o primeiro passo para o projeto de fluxo do produto e cálculo estrutural dos silos, devendo ser realizado em condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo (FREITAS, 2001).

### 2.4.1 Teor de umidade e efeito da umidade relativa na fluxibilidade

Sabe-se que é determinante a participação da água em qualquer tipo de argila, e, em fundição, não poderia ser diferente o comportamento da bentonita. O teor de umidade no sistema de areias tem efeito direto sobre estas forças coesivas e adesivas, como se observa na Figura 06 e 07, onde a partir de 25% de umidade em relação a argila, há um efeito inverso – a coesão decresce e a adesão aumenta gradativamente. Existe um ponto no qual a adesão é igual a coesão, conhecido como ponto de aderência que, em bentonitas, é na ordem de 25% (DEMATTE, 2000).

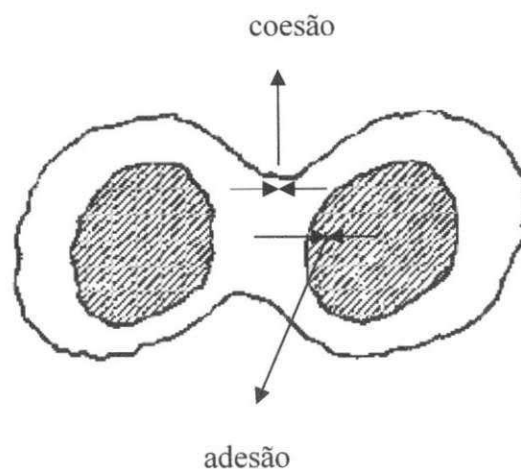


Figura 06 – Forças adesivas e coesivas numa areia de moldagem

Fonte : DEMATTE, 2000.

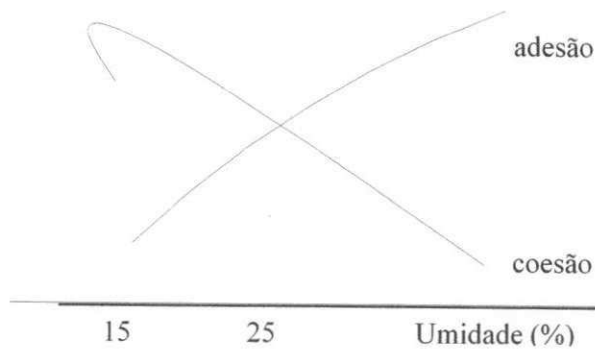


Figura 07 – Efeitos da umidade nas forças adesivas e coesivas.  
Fonte: DEMATTE, 2000

Segundo as especificações da PETROBRÁS (1998), o teor de umidade das argilas naturais e aditivadas não devem ultrapassar 14,0%.

A presença da água em um pó pode afetar significativamente sua fluxibilidade e propriedades de endurecimento. Em geral, quanto maior for o índice de água em um pó, mais coesivo ele se torna e mais difícil será sua fluxibilidade. Além disso, para muitos pós existe um valor de umidade relativa (umidade relativa crítica) em uma dada temperatura na qual o pó endurecerá, e isto geralmente é muito prejudicial a fluxibilidade. Os pós são muito complexos devido a sua composição, sua distribuição granulométrica e a presença das fases sólido-líquido-gás (TEUNOU *et al*, 1998).

Quando a umidade relativa do ar aumenta, os pós tendem a absorver água que podem formar pontes líquidas entre partículas de pó e o resultado é uma maior coesão de pó e redução na fluxibilidade. Quando a umidade relativa diminui, o pó não mais absorve água e as pontes líquidas desaparecem tornando os materiais insolúveis úmidos. Porém, para a maioria dos materiais solúveis as pontes podem permanecer causando um bolo (TEUNOU; VASSEUR, 1996).

De acordo com VINCENTZ (2002), o pó absorverá a umidade se o ar na área de armazenamento estiver acima de 60% de umidade relativa. Isto causará resistência a fluxibilidade. O recomendável é armazenar o pó em uma escala de UR em torno de 40 a 60%. Se pó for armazenado em um ambiente controlado dentro destes parâmetros, permanecerá normalmente estável pelo menos durante um ano. Para se evitar problemas com pó as áreas de armazenamento devem ser controladas como segue:

- Controle da temperatura a 80° F (27 ° C) ou menos.
- Controle da umidade relativa - entre 40 e 60%.

## 2.4.2 Granulometria

A granulometria é um método de classificação das partículas de uma amostra sólida pelos respectivos tamanhos. Como a granulometria é responsável por muitas propriedades dos argilominerais, a sua medida é de extrema importância para a caracterização desses materiais. O método mais usual de análise granulométrica é o peneiramento, que consiste na passagem do material sólido por uma série de peneiras padronizadas, em ordem crescente de malha. No caso das argilas, a análise granulométrica geralmente é feita pelo método da sedimentação. Este método baseia-se na lei de Stokes, que mede a velocidade com que uma esfera cai livremente sob a influência da gravidade, através de um meio viscoso (AGUIAR; NOVAES, 2002).

É fundamental realizar uma análise granulométrica dos produtos armazenáveis para facilitar o dimensionamento da boca de descarga de um silo, uma vez que isto influenciará no tipo de fluxo.

Segundo RAVENET (1981), é necessário efetuar uma classificação das partículas de acordo com o tamanho. As partículas podem ser classificadas da seguinte forma:

- partículas grossas com dimensão superior a 100 mm;
- partículas granulares com dimensão compreendida entre 30 e 5 mm;
- partículas finas com dimensão compreendida entre 5 mm e 100 $\mu$ ;

Dentro desse grupo pode existir a coesão.

- partículas extrafinas com dimensão inferior a 10 $\mu$ .

CALIL JR. (1984) classifica os produtos armazenados em função das dimensões do diâmetro ( $D_p$ ) das partículas.

- $D_p > 1$  mm – granulares;
- $0,297 \leq D_p < 1$  mm – pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos;
- $0,079 \leq D_p < 0,297$  mm – pulverulentos coesivos finos;
- $D_p < 0,079$  mm – pulverulentos coesivos extrafinos.

Segundo GUESSER (1982) a granulometria da bentonita indica características do beneficiamento através da aparelhagem com vibração, e a simples vibração não é efetiva em garantir probabilidade igual a todas as partículas de passar através da peneira pois, como a bentonita apresenta um teor de umidade em torno de 10%, ocorre

aderência das partículas às malhas e assim apenas as primeiras partículas que caem tem ocasião de passar pelas peneiras sucessivas.

De acordo com as especificações da PETROBRÁS (1998), o teor de resíduo das argilas naturais e aditivadas não devem ser superiores a 4,0%, ou seja, as argilas não podem apresentar teor de acessórios, ou materiais inertes acima de 4,0%. O limite de 4,0% é imposto para evitar que argilas com teores expressivos de minerais acessórios possam ser utilizadas (AMORIM, 2003)

## 2.5 Propriedades de Fluxo

A variabilidade dos pós é questionada de muitas maneiras em que suas propriedades do fluxo podem ser mudadas. Há um grande número de fatores e por conveniência, podem ser agrupados sob os seguintes títulos:

1. Propriedades físicas das partículas do pó tais como seu tamanho, escala do tamanho, forma, dureza, elasticidade, porosidade, massa, interações entre partículas, textura, angularidade e assim por diante.
2. Fatores ambientais que afetam as propriedades do volume do pó tais como o índice do ar ou de umidade, a pressão externa, a vibração, etc.. Estes fatores modificam a distribuição física e o arranjo das partículas na massa do pó.
3. Mudanças individuais da partícula causadas por fatores tais como o atrito, aglomeração, a carga eletrostática e mudanças químicas.

As propriedades de um pó dependerão dos efeitos combinados acima. Se processando um pó ou se meramente avaliando suas propriedades do fluxo, é necessário que se reduza a sua complexidade (FREEMAN TECHNOLOGY, 2002).

As propriedades de fluxo do pó devem ser estudadas dentro de condições de controle de qualidade das matérias-primas para se manter a uniformidade do produto e também evitar situações nas quais hajam colapso do processo (LEWIS; SIMPKIN, 1994).

PRESCOTT E BRANUM (2000), afirmam que os termos *fluxo do pó* e *propriedades do fluxo do pó* não devem ser usados como sinônimo. Fluxo do pó é uma observação e deve ser referir a descrição de como o material irá fluir em uma parte

específica do equipamento. Propriedades de fluxo de pó referem-se aos resultados dos testes do pó

Com considerações voltadas a expandir e melhorar sua teoria de fluxo de materiais coesivos, MOLERUS (1975), fez considerações a respeito de interações entre partículas. Para obter deslocamento entre partículas, o fluxo do produto, atrito e adesão devem ser conhecidos. Adesão é dependente da pressão previamente introduzida entre as partículas. É óbvio que a história da tensão em repouso para materiais coesivos tem influência no limite de deslizamento devido à coesão dos produtos se alterar com o tempo de armazenamento (MILANI, 1993).

JENIKE (1964) relata que quando um pó é exposto a uma tensão de compressão por algum tempo, ele tende a desenvolver problemas de fluxo devido ao ganho de resistência. Este comportamento depende das propriedades de fluxo do pó e das condições externas, tais como temperatura e compressão. O único caminho para considerar o efeito das propriedades físicas do pó e das condições externas nas propriedades de fluxo em função do tempo de consolidação é medindo a função fluxo depois do tempo de consolidação (TEUNOU *et al*, 1998).

CALIL JÚNIOR (1985), afirma que, para a previsão de fluxo em instalações armazenadoras, é necessário conhecer as características do produto. Normalmente esses valores são adotados ou estimados, por motivo das deficiências das regulamentações brasileiras.

Para projetar estruturas de armazenamento, algumas propriedades dos materiais são necessárias. Estas são:

- compressibilidade interna
- permeabilidade
- coeficiente de atrito da parede

Existem muitos fatores que afetam as propriedades do produto, tais como: teor de umidade, temperatura, vazão de carregamento e tempo de armazenamento. Estes fatores podem apresentar variações importantes dos valores calculados (CHASE, 2002; CLANCY; EBNER, 1994).

Os aparelhos apropriados para medir as propriedades de fluxo são os de cisalhamento, nos quais o produto é conduzido ao cisalhamento nele mesmo ou ao longo de uma parede sob condições especiais (MILANI, 1993).

Um dos mais importantes estudos na determinação das propriedades de fluxo dos produtos armazenados em silos foi desenvolvido por JENIKE (1964). Na busca de uma forma padronizada de medir as propriedades, o autor analisou inicialmente a aplicabilidade de equipamentos de teste utilizados em solos, concluindo que os resultados não eram satisfatórios. Dessa forma decidiu desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos armazenados. O aparelho denominado “Jenike Shear Cell” tem sido usado, desde então, por diversos pesquisadores. Um grupo de pesquisadores europeus (Working Party on the Engineering) iniciou em 1989 estudos na tentativa de padronizar métodos de medidas das propriedades de fluxo de produtos a serem armazenados, a partir de algumas limitações observadas durante os ensaios. Dessa forma estabeleceram técnicas de testes de forma detalhada (European Federation Of Chemical Engineering, 1989), o que resultou um documento denominado “Standart Shear Testing Technique” que fornece instruções detalhadas para a operação do equipamento (GOMES, 2000).

MILANI (1993), citando HAAKER (1990), relata que da maioria dos aparelhos de cisalhamento estudados por SCHWEDES (1996), o de Jenike é o que fornece as propriedades de fluxo através de uma metodologia bem descrita, levando em geral, a resultados seguros para projeto de silos.

Segundo ROTTER *ET AL.* (1998), uma descrição completa de todas as propriedades pertinentes a um produto granular é atualmente impossível, pois ainda não são conhecidos todos os parâmetros que deveriam ser medidos, nem como algumas das propriedades conhecidas deveriam ser medidas. Também segundo eles, os ensaios para a obtenção das propriedades físicas dos produtos com o objetivo de projeto de silos, não são iguais aos ensaios para caracterização do produto usado para pesquisa científica. Os ensaios com os produtos para objetivos de projeto devem identificar as piores condições que podem acontecer durante a vida operacional do silo e os ensaios para caracterização de produtos usados em pesquisa devem ser os mais representativos possíveis das condições reais (FREITAS, 2001).

Segundo GAYLORD E GAYLORD (1984), várias pesquisas estão em desenvolvimento, pois ainda existem lacunas no domínio das propriedades que variam conforme o produto e podem variar dentro de um mesmo produto, dito uniforme, sob condições diferenciadas de armazenamento. As propriedades podem variar com o grau de compactação, com o tempo de armazenamento e com variações de temperatura e umidade intergranular.



Os testes de propriedades de fluxo funcionam em uma amostra representativa do produto. Estes testes determinam as propriedades contínuas do fluxo e propriedades do fluxo após a época do armazenamento no descanso. Eles são feitos em vários índices de umidade, temperatura e em outras circunstâncias relevantes que simulem exatamente as condições reais do projeto (POWDER ENGINEERING SYSTEMS, 2000).

Testes de cisalhamento são comuns na tecnologia de pós porque caracterizar a fluabilidade de materiais granulares e de pós. KAMATH *ET AL.* (1994) discutem alguns testes no qual são amplamente aceitos para medir propriedades de fluxo de pós na indústria. Estes resultados indicam que nenhum teste é conveniente para todos os tipos de partículas sólidas (LADIPO; PURI, 1997).

Na hora de executar o projeto de um silo é muito importante realizar ensaios em laboratório com o produto e determinar fundamentalmente a densidade consolidada e o ângulo de atrito com a parede, já que as tabelas existentes dão diferenças de até 70% ao aplicar as expressões que determinam as pressões nas paredes (RAVENET, 1981).

As propriedades de fluxo do material determinam como este se comportará nos silos, e em outros equipamentos de manipulação. Conhecer estas propriedades é essencial no desenvolvimento de produto de modo que os problemas do fluxo possam ser evitados. As propriedades do fluxo são importantes também para o controle de qualidade. Verificando as propriedades relativas do fluxo antes que este seja colocado em seu sistema, pode-se rejeitar ou reciclar grupos insatisfatórios, impedindo desse modo problemas de manipulação ( JENIKE; JOHANSON, 2002).

Tendo em vista que as propriedades dos produtos armazenados em silos podem variar durante a vida útil do silo, CALIL JR (1997), propõe, de acordo com a norma australiana AS (1996), que, em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obterem-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso. Estes limites são o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerado durante a vida útil do silo. A Tabela 04 apresenta o emprego adequado dos limites das principais propriedades de acordo com o objetivo (FREITAS, 2001).

Tabela 04 – Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos.

Aplicação da propriedade	Peso específico do produto ( $\gamma$ )	Ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ )	Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ )	Relação entre a pressão horizontal e vertical (K)	
Tipo de fluxo	Funil	Inferior	Superior	Inferior	-
	Massa	Inferior	Inferior	Superior	-
Cálculo da máxima pressão horizontal na parede do silo	Superior	Inferior	Inferior	Superior	
Cálculo da pressão máxima vertical	Superior	Inferior	Superior	Inferior	
Cálculo da máxima pressão vertical, p	Superior	Inferior	Superior	Inferior	
Força máxima de atrito na parede do silo, $p_w$	Superior	Superior	Inferior	Superior	
Carga vertical máxima na tremonha	Superior	Inferior	Superior	Inferior	

Fonte: FREITAS, 2001.

CALIL JR (1997), também alerta que, para qualquer das propriedades físicas, se deve verificar a consistência dos resultados, como, por exemplo, o fato que o ângulo de atrito do produto com a parede,  $\phi_w$ , é menor ou igual ao ângulo de atrito interno,  $\phi_i$ , e o ângulo efetivo de atrito interno,  $\phi_e$ , é sempre maior que  $\phi_i$ .

As propriedades de fluxo que precisam ser analisadas no projeto de silos para armazenamento são as seguintes (JENIKE, 1964; RAVENET, 1981; ROBERT, 1987):

- Densidade do produto em função da consolidação -  $\gamma$
- Ângulo de Atrito Interno -  $\phi_i$
- Efetivo Ângulo de Atrito Interno -  $\phi_e$
- Ângulo de Atrito do Produto com a Parede -  $\phi_w$  (depende do tipo de material escolhido para a confecção do silo)
- Função Fluxo - FF (instantânea ou com o tempo)
- Fator Fluxo - ff

### 2.5.1 Densidade em função da consolidação do produto

A densidade de um produto necessita ser determinada, pois é um parâmetro importante para a determinação do fluxo e das pressões em silos (NASCIMENTO, 1996).

O volume e a densidade são somente dois valores de uma escala que varia em função da consolidação e a pressão. É a propriedade que fornece a força do corpo que faz com que um pó flua e é medida em função da pressão. de consolidação (POWDER ENGINEERING SYSTEMS, 2001).

São definidos basicamente três diferentes valores de densidade, chamadas, “solta”, “compacta” e “aerada”, para os quais são usados os seguintes símbolos  $\gamma$ ,  $\gamma_u$  e  $\gamma_a$ , respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento do aparelho de Jenike, corresponde à densidade compacta, ( $\gamma_u$ ). Quando só um valor ( $\gamma$ ) é disponível, então  $\gamma_a$  deverá ser tomado como  $0,75\gamma$  e  $\gamma_u$  como  $1,25\gamma$ . O valor inferior, isto é,  $\gamma$  ou  $\gamma_a$ , deve ser utilizada na estimativa da capacidade de armazenamento do silo (CALIL JR., 1990).

A determinação exata da densidade de um produto armazenado é um problema de difícil solução e é afetada fundamentalmente por dois fatores: impurezas que podem estar presentes no produto e que são muito difíceis de avaliar podendo fazer oscilar a densidade em até 10% e pela variação de densidade por efeito da compressão devido ao incremento da pressão vertical em função da altura do produto armazenado (RAVENET, 1981).

AMORIM (2004), determinou as massas específicas reais (Tabela 05) pelo método de picnometria de hélio de amostras de argilas bentoníticas naturais e constatou que os valores encontrados são típicos para argilas bentoníticas.

Tabela 05 – Massa específica real das amostras de argilas naturais e industrializadas.

Amostras	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )
Bofe	2,493
Chocolate	2,589
Verde-lodo	2,670
Dolomil	2,715
Fungel	2,627
Brasgel	2,716
Brasgel PA	2,731

Fonte: AMORIM, 2004.

### 2.5.2 Ângulo de atrito interno

O ângulo de atrito interno é o ângulo que o lugar geométrico de deslizamento instantâneo (YL) forma com a horizontal. Para uma forma do lugar geométrico de deslizamento instantâneo (YL) convexa, o ângulo de atrito interno diminui com o aumento da tensão de compressão (BANDEIRA, 1997).

Segundo GHELFI E ZUCHELLI (1999), este ângulo indica a tendência do material ao fluxo na presença de uma força da compressão aplicada perpendicular ao sentido da tensão, geralmente, é avaliado usando o teste de Cisalhamento de Jenike dependendo de vários fatores, como:

- pressão a que o material é sujeito;
- índice da umidade do material;
- temperatura: o fluxo de muitos materiais plásticos tende a ser reduzido quando aquecidos;
- tamanho e forma de partículas.

O modelo do círculo de Mohr (Coulomb) é a formulação mais usada para descrever o comportamento do fluxo do pó (Figura 08). O YLocus (YL), que é o lugar geométrico de deslizamento, é aproximado em uma linha reta. Os parâmetros usados para caracterizar o pó são:

- Coesão - a interceptação,
- Ângulo de atrito interno – Inclinação.

A coesão do pó mede a força com que as partículas se ligam. O ângulo de atrito interno mede como as partículas do pó se movem entre si, quanto mais elevado for o ângulo, maior é a força necessária para fazer com que as partículas do pó se movam. Durante o fluxo, o pó desliza ao longo dos planos inclinados com um ângulo de atrito interno. Se as superfícies forem imprópriamente inclinadas, como é comum nas tremonhas, o pó pode não fluir. Esta situação, combinada com as pressões de confinamento das paredes do armazenamento, pode fazer com que o pó tome a forma de um arco (PURI, 2002).

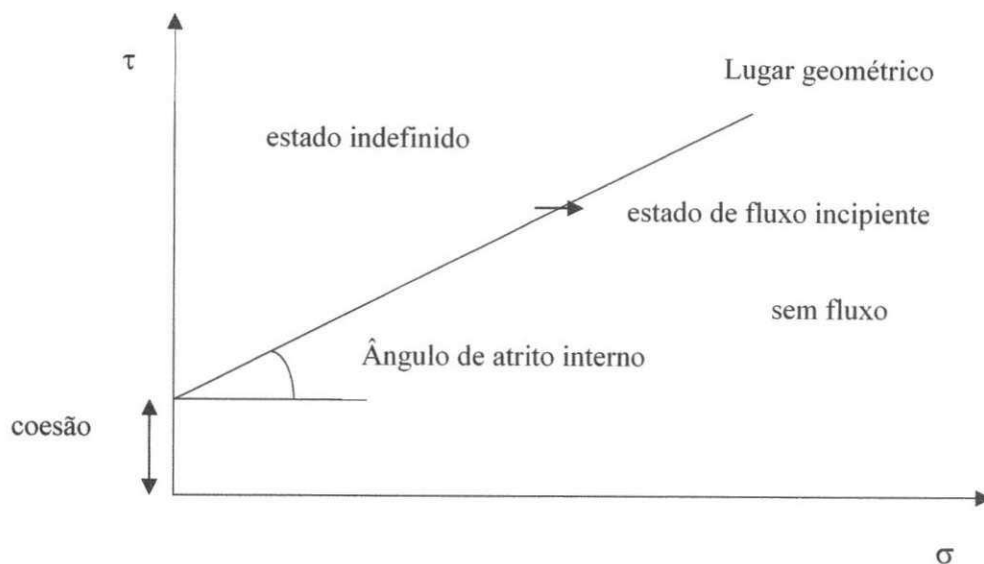


Figura 08 – Representação gráfica de Mohr (Coulomb) – Modelo usado para caracterizar parâmetros do fluxo de pó.

Fonte: PURI, 2002.

O ângulo de atrito interno,  $\varphi_i$  é definido como o ângulo local da inclinação do lugar geométrico linearizado (YL). Como o lugar geométrico de deslizamento (YL) é uma parábola, o ângulo de atrito interno varia ao longo do mesmo. É suficiente para a maioria das aplicações indicar um ângulo de atrito interno. Neste caso, o ângulo de atrito interno é definido por  $\varphi_{lin}$  da inclinação do linearização do YL. Os resultados linearizados da tangente do lugar geométrico com a tensão do círculo de Mohr são mostrados na Figura 09 (SCHULZE, 2001).

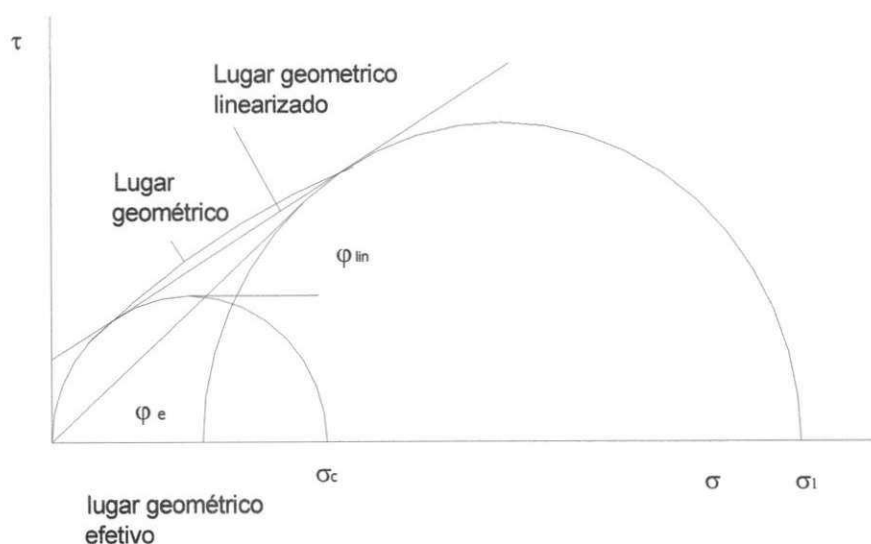


Figura 09 – Resultados linearizados do lugar geométrico  
Fonte: SCHULZE, 2001

O valor do atrito interno é importante quando se caracteriza as propriedades de fluxo do pó. Cada atrito é causado pelas partículas sólidas fluindo simultaneamente e é expresso como ângulo de atrito interno (PRESCOTT; BARNUM, 2000).

Em termos de propriedades, as normas européias ISO, ENV e a alemã DIN não apresentam nem o ângulo de atrito interno  $\phi_i$ , nem o ângulo de atrito com a parede  $\phi_w$ . Elas apresentam, em tabelas próprias, os valores da relação entre pressões,  $K$ , e do coeficiente de atrito com a parede  $\mu$ . Já as normas AS e BMHB apresentam os valores do ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede e os valores a serem adotados para o parâmetro  $K$ , como no caso da norma inglesa ou uma fórmula matemática, como no caso da norma australiana. O parâmetro  $\mu$  é considerado como igual a  $\text{tg}\phi_w$  (FREITAS, 2001).

### 2.5.3 Efetivo ângulo de atrito interno

A determinação das propriedades dos materiais armazenados depende do conhecimento do lugar geométrico (YL) de deslizamentos determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o produto armazenado (GOMES, 2000).

De acordo com JENIKE (1980) o efetivo ângulo de atrito têm sido medidos entre 30 e 70 graus para vários sólidos. Em geral, sólidos pouco úmidos tem valores inferiores, enquanto sólidos úmidos apresentam valores superiores.

O efetivo ângulo de atrito interno ( $\delta_e$ ) é definido como o ângulo formado com a horizontal de uma linha entre a origem e a tangente ao lugar geométrico de deslizamento (YL) (Figura 10), no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação. A variação desse parâmetro deve ser considerada, determinando-se o valor superior e o inferior, usando esses valores como indicados nas equações de fluxo e pressão. Desde que as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr tendem a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é, na prática, sempre construído com uma linha entre a origem e a tangente ao semi-círculo de Mohr de maior tensão de consolidação (NASCIMENTO, 1996).

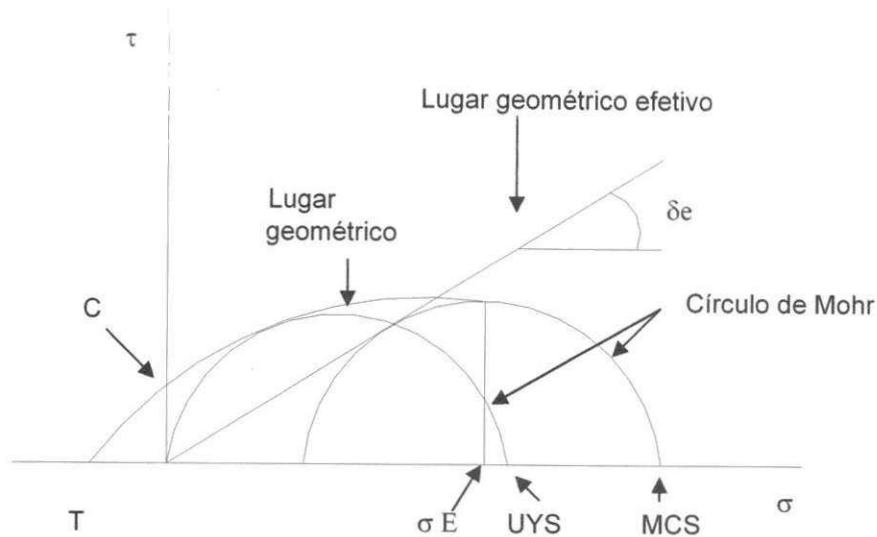


Figura 10 – Lugares geométricos efetivos e o efetivo ângulo de atrito interno.  
Fonte: FITZPATRICK, 2003.

#### 2.5.4 Ângulo de atrito do produto com a parede

A determinação do ângulo de atrito do produto com a parede é necessário, pois o tipo de fluxo que ocorrerá na célula durante a descarga depende dele.

O ângulo de atrito com a parede representa a resistência adesiva entre o pó e o material da parede do silo, um ângulo alto dificulta mais o movimento do pó ao longo da superfície da parede. É o ângulo entre a horizontal e a linha reta a partir da origem interceptando a medida do lugar geométrico da parede, como ilustrado na Figura 11. O lugar geométrico da parede frequentemente intercepta um  $y$  positivo, assim o ângulo de atrito com a parede variará com a tensão normal na tremonha, onde é superior em tensões mais baixas (FITZPATRICK *et al*, 2003).

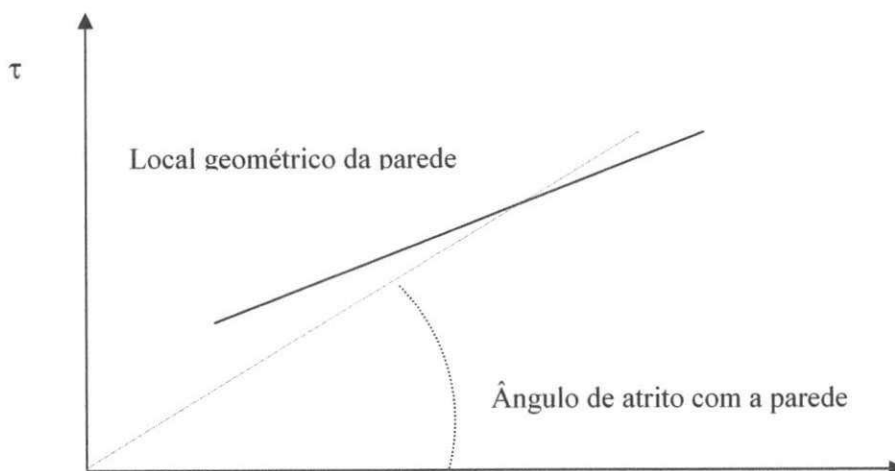


Figura 11 – Ângulo de atrito do produto com a parede.  
Fonte: FITZPATRICK, 2003

ROBERTS (1987) afirma que o ângulo de atrito do produto com a parede depende da interação entre três grupos de variáveis; características do produto; características da superfície da parede e carregamento e fatores ambientais. As propriedades relevantes de cada são as seguintes:

- i. Características do produto –
  - ♦ Tamanho da partícula
  - ♦ Forma da partícula
  - ♦ Dureza da partícula
  - ♦ Teor de umidade
  - ♦ Densidade da partícula
  - ♦ Densidade do produto
  - ♦ Características químicas da superfície
  - ♦ Temperatura
  - ♦ Tempo de armazenamento.
  
- ii. Características da superfície da parede –
  - ♦ Aspereza da superfície
  - ♦ Dureza
  - ♦ Composição química
  
- iii. Carregamento e fatores ambientais
  - ♦ Pressão normal entre produto e a superfície da parede
  - ♦ Velocidade do deslizamento
  - ♦ Temperatura e condições de teores de umidade
  - ♦ Vibrações da parede.

GHELFI E ZUCHELLI (1999) relatam que o ângulo de atrito do produto com a parede indica a tendência do material ao fluxo ao longo de uma parede na presença das forças da compressão aplicadas perpendicular ao sentido da tensão, é avaliado usando o teste de cisalhamento de Jenike e depende também de:

- índice da umidade do material;
- temperatura: o fluxo de muitos materiais plásticos tende a ser reduzido quando aquecidos;
- tamanho e forma de partículas;
- superfície da parede, principalmente nos termos do grau de aspereza



O ângulo de atrito com a parede pode ser usado para determinar os ângulos da tremonha para se obter fluxo de massa (PRESCOTT; BARNUM, 2000).

A Figura 12 é uma carta cônica típica da tremonha. Os valores do ângulo da tremonha e do ângulo de atrito da parede são traçados nas ordenadas X e Y, respectivamente. Observe que há uma região incerta entre o fluxo do funil e massa. O teste padrão do fluxo dentro desta região deve ser de fluxo de massa teórica; entretanto, as diferenças nas propriedades ou no ângulo da tremonha devido à fabricação, podem resultar em fluxo de funil (MARINELLI, 2002).

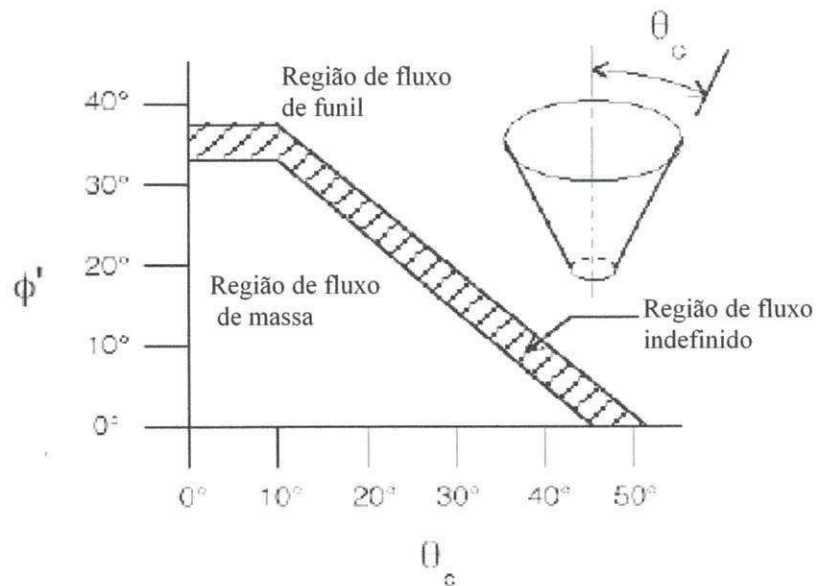


Figura 12 – Ângulo de atrito da parede contra ângulo da tremonha cônica.  
Fonte: MARINELLI, 2002

Para o material deslizar em uma superfície da parede, o atrito entre os dois deve ser superado. Este atrito pode ser medido por uso de um aparelho como por exemplo o mostrado na

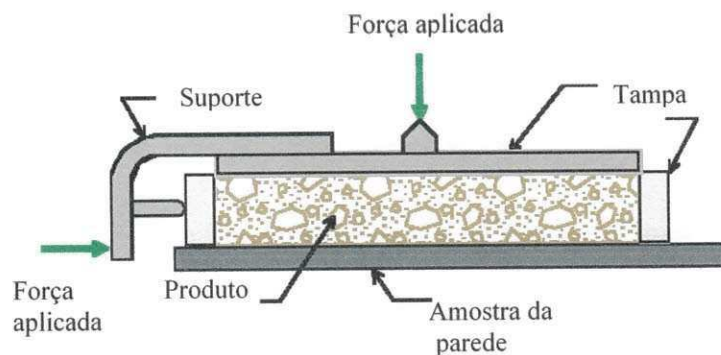


Figura 13 – Equipamento para determinar o ângulo de atrito.  
Fonte: MARINELLI, 2002.

Os valores de atrito da parede são expressados como um ângulo de atrito da parede ou um coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito inferior, com as paredes da tremonha mais ou menos íngreme, assegura o fluxo de massa. Os resultados de um teste típico de atrito da parede são mostrados na Figura 14. Observe que em pressões baixas de consolidação, o ângulo de atrito da parede é mais elevado do que em altas pressões. Isto resulta em valores mais baixos do atrito da parede, em consequência, ângulos mais baixos da tremonha são requeridos para o fluxo de massa (MARINELLI, 2002).

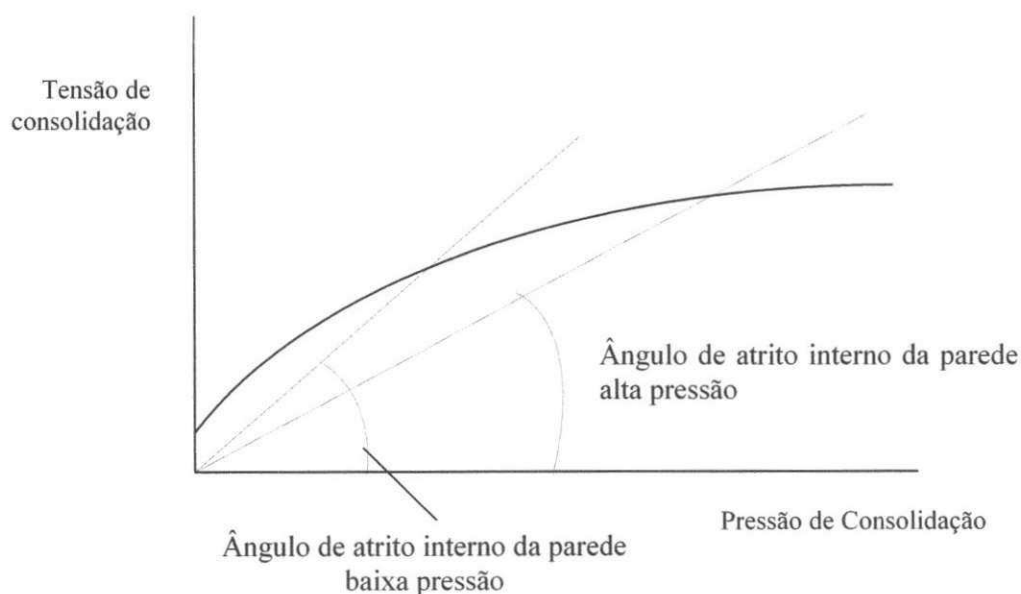


Figura 14 – Lugar geométrico de deslizamento(YL) do produto com a parede.  
Fonte: MARINELLI, 2002

O teste para determinação do ângulo de atrito com a parede consiste na substituição da célula anel base pelo material de parede a ser testado e define-se o lugar geométrico da parede para uma série de pressões de consolidação. O lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL) é então desenhado no mesmo diagrama do lugar geométrico de deslizamento (YL) e seu ponto de interseção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação, Figura 15. O ponto mais alto da interseção é escolhido. O ângulo da linha reta deste ponto, através da origem, é o ângulo de atrito com a parede  $\phi_w$  para esta particular tensão de consolidação. Os testes são repetidos para outras tensões de consolidação (GOMES, 2000).

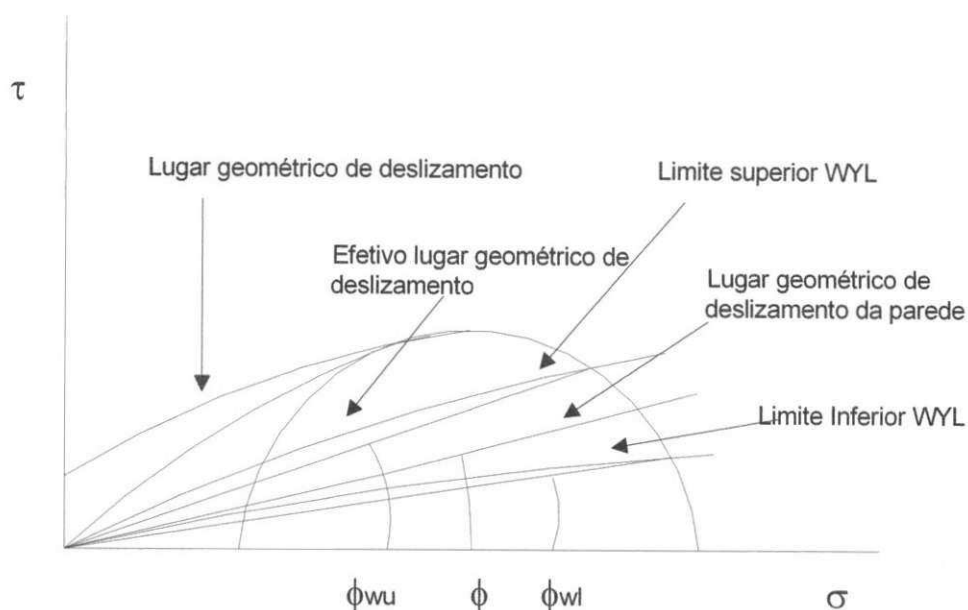


Figura 15 – Lugar geométrico de deslizamento da parede e ângulo de atrito com a parede.

Fonte: GOMES, 2000.

Em alguns casos é possível que, devido à coesão, o ângulo de atrito com a parede seja maior que o do ângulo de atrito interno  $\phi_i$ , como definido anteriormente. Isto acontece quando uma fina camada de material gruda na parede e o deslizamento acontece ao longo desta camada. Esta situação é chamada de superfície rugosa. Para estes casos, JENIKE (1970), citado por HAAKER (1998), sugere tomar o ângulo de atrito com a parede um pouco menor que o ângulo de atrito interno, devido ao alisamento da camada estática aderida. Isto implica que  $\tan\phi_w = \sin\phi_i$ , e a situação de tensão como determinada para o ponto de topo do círculo de Mohr é correspondente a um plano de deformação máxima (FREITAS, 2001).

Este parâmetro é de grande importância tanto para o fluxo como para o cálculo de pressões, devendo ser considerado para todas as condições desfavoráveis como umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície (SCHWEDES; SCHULZE, 1990).

A norma inglesa propõe que, se  $\phi_w \geq \phi_i - 3^\circ$ , então o valor a adotar para o coeficiente de atrito interno é  $\mu = \sin\phi_i$ , que é o valor proposto por JENIKE (1964).

A norma alemã DIN 1055, Parte 6 (1987), propõe três tipos de paredes distintos para a obtenção do coeficiente de atrito com a parede: lisas, intermediárias e rugosas, neste caso incluindo as paredes de chapa de aço corrugada. Nesta norma, os produtos listados têm um valor do coeficiente de atrito especificado para cada um dos três tipos de parede.

As normas européias ENV e ISO também propõem a realização de ensaios para obtenção das propriedades físicas dos produtos ou de parâmetros se o produto considerado não fizer parte das tabelas por elas fornecidas ou no caso do projeto necessitar de valores mais precisos. O método proposto é bastante semelhante ao da célula de Jenike e a norma inglesa propõe a obtenção das propriedades dos produtos exatamente pelo método de Jenike. A norma australiana não propõe nenhum método para determinação das propriedades, mas faz uma série de recomendações para o caso de serem realizados ensaios para produtos não listados na tabela fornecida pela norma. Já a norma DIN somente recomenda medir o atrito com a parede com, por exemplo, ensaios de cisalhamento pertinentes à combinação parede -produto, no caso de serem necessários valores mais precisos.(FREITAS, 2001).

#### 2.5.5 Função Fluxo

A relação entre a resistência e pressões de consolidação é chamada de função fluxo e é denotada por FF (CALIL JÚNIOR, 1990).

Um pó que flui em uma tremonha está sujeito a constantes mudanças de pressões. Para cada nível da pressão há um nível de força coesiva. O relacionamento entre a força e a pressão de consolidação é chamada de função do fluxo do pó (POWDER ENGINEERING SYSTEMS, 2000).

Esta propriedade determina o comportamento reológico de um material na forma de pó para diferentes pressões de compactação, o que faz com que seja considerada uma medida de fluidez. De fato, quanto maior é a ordenada na origem e a inclinação da curva representada, menor é a fluidez do pó (AMORÓS, 2002).

A relação experimental (Equação 01) obtida é uma característica intrínseca do pó apenas com sua densidade,  $\rho_B$  e seu ângulo de atrito interno. Na prática industrial, as

propriedades do pó e o ângulo de atrito da parede,  $\phi_w$ , são medidos em um dispositivo especial inventado por Jenike e chamado de célula de cisalhamento (TARDOS, 1999).

$$\sigma_c = FF(\sigma_1) \quad (01)$$

FF – Função Fluxo

$\sigma_c$  - tensão não consolidada;

$\sigma_1$  - tensão de consolidação (Tensão normal)

Como visto na correlação acima, a força tensão não consolidada,  $\sigma_c$ , do material é uma função direta da tensão de consolidação,  $\sigma_1$  (Figura 16). Este resultado tem uma implicação no projeto do silo com vista na variação da tensão de consolidação no silo (TARDOS, 1999).

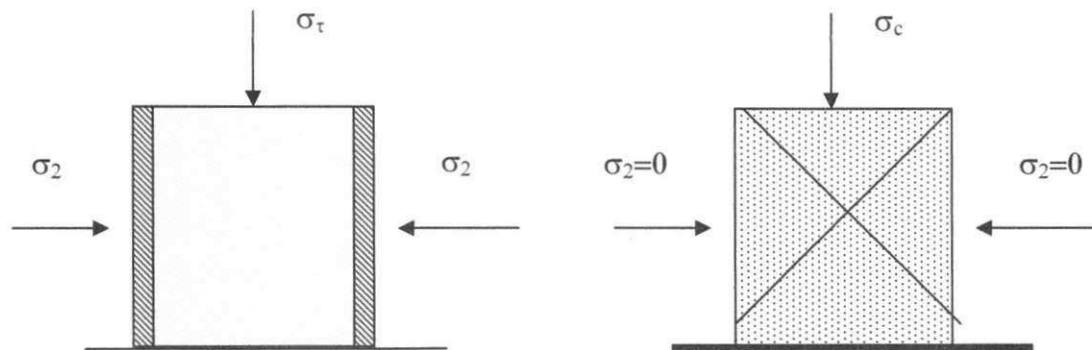


Figura 16 – Medida da tensão não consolidada.  
Fonte: TARDOS, 1999.

A função fluxo é determinada através do gráfico com os pontos de tensão máxima de consolidação, versus tensão não confinada de deslizamento. No caso atual de relação linear, JENIKE E CARSON (1985) também propuseram definir um índice de fluxo  $i$  como segue:

$$IF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (02)$$

A função fluxo é encontrada através do teste de cisalhamento de Jenike, que é o único teste aprovado pela Federação Européia de Engenheiros Químicos e da sociedade

americana para determinação das propriedades de fluxo. (POWDER ENGINEERING SYSTEMS, 2000).

A determinação da função fluxo (Figura 17), denotada por FF, é feita através do gráfico com os pontos de tensão máxima de consolidação, versus tensão não confinada de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos de deslizamento (BARRETO, 1997; JENIKE, 1987).

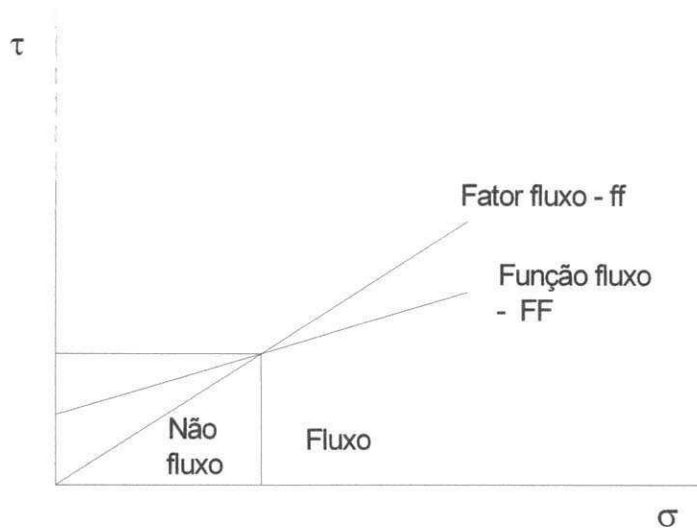


Figura 17 – Determinação da interseção da Função fluxo (FF) e fator fluxo ff).  
Fonte: JENIKE, 1987.

FITZPATRICK *ET AL* (2003), cita que a função fluxo (Figura 18) representa a resistência desenvolvida dentro do pó quando consolidado que deve ser superada na fluabilidade do pó. A função fluxo esboçada próximo ao eixo da tensão máxima representa o fluxo fácil e um fluxo mais difícil é representado pela função fluxo esboçada no sentido anti-horário próximo ao eixo da tensão não consolidada. O índice fluxo (IF) é definido como o inverso da inclinação da função fluxo. Jenike usou o índice de fluxo(IF) para classificar a fluabilidade do pó com valores superiores representando o fluxo fácil. Isto foi estendido por TOMAS E SCHUBERT (1979) e esta apresentada na Tabela 06.

Tabela 06 – Classificação de Jenike para a fluxibilidade do pó pelo índice de fluxo (IF).

Fluabilidade	Muito coesivo	Coesivo	Fácil fluidez	Fluxo livre
Índice de fluxo	$IF < 2$	$2 < IF < 4$	$4 < IF < 10$	$10 < IF$

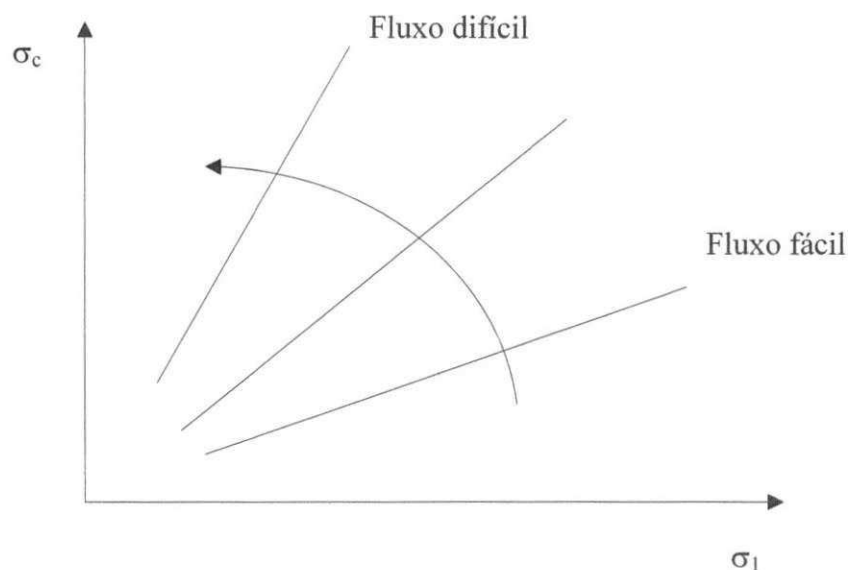


Figura 18 – Determinação do tipo de fluabilidade do produto  
Fonte: FITZPATRICK, *et al*, 2003.

Funções de fluxo típicas são ilustrados na Figura 19. Para maioria dos casos, a função fluxo de materiais sólidos coesivos devem ter formas convexas (a) e (b) ou linhas retas (c), sólidos de fluxo livre, sem coesão e sem tensão ( $\sigma_c = 0$ ), a curva coincide com o eixo horizontal (d), quando a tensão de alguns materiais aumenta rapidamente com a tensão de consolidação a função fluxo terá uma curva de forma côncava(e) (ROBERTS, 1987).

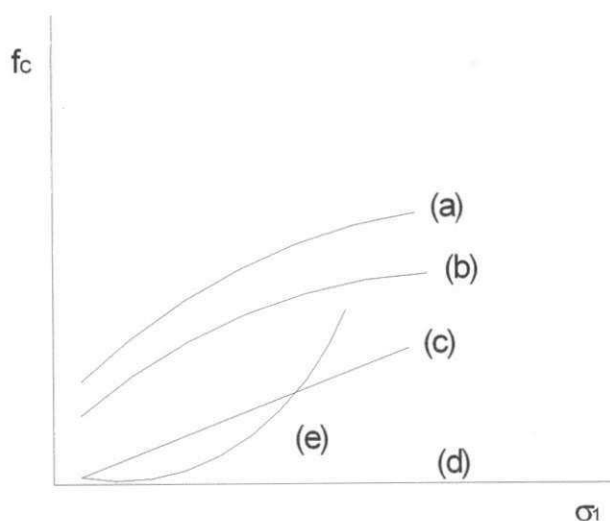


Figura 19 – Funções fluxos típicas.

Em geral, a função fluxo de um produto depende não somente da pressão de consolidação, mas também de fatores como o tempo, teor de umidade e temperatura. A expressão geral que relaciona a tensão não confinada com a função da tensão de consolidação é conhecida como tempo da função fluxo (ROBERTS, 1987).

$$\sigma_c = f(\sigma_1, t, H(t), T(t)) \quad (03)$$

onde

$\sigma_1$  – tensão de consolidação máxima

t – tempo

TU – teor de umidade

T – temperatura.

### 2.5.6 Fator Fluxo

Um projeto para fluxo de massa determina o ângulo da tremonha e a abertura da boca de descarga, de modo que arcos coesivo não se formem acima da boca de descarga. Dois parâmetros são importantes: o primeiro é a função fluxo, e o segundo é o fator fluxo que descreve a condição da tensão na tremonha durante o fluxo. O fator fluxo é dado por:

$$ff = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \quad (04)$$

O fator fluxo é uma função linear, e é mostrada juntamente com a função fluxo (Figura 20) (ROBERTS, 1987).

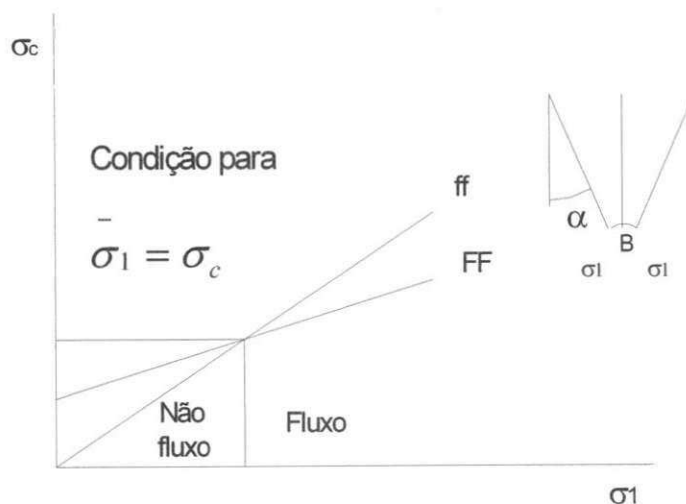


Figura 20 – Condição de fluxo/não fluxo para projetos de fluxo de massa.



No fluxo de massa, valores do fator fluxo são plotados em cartas (JENIKE, 1964) para canais cônicos. O fator fluxo é função do ângulo da tremonha, do ângulo de atrito com a parede e do efetivo ângulo de atrito interno (JENIKE, 1980)

É a relação entre a pressão principal crítica de consolidação e a pressão crítica irrestrita de escoamento, determinada experimentalmente.

De acordo com BARRETO (1997), o fator fluxo é usado para indicar a fluidez do produto. Quanto maior a tensão máxima de consolidação  $\sigma_m$  em um canal, menor a tensão máxima principal  $\sigma_1$  atuando na obstrução e menor será a fluabilidade do produto.

O cálculo do fator fluxo (ff) supõe a resolução das equações diferenciais representativas das tensões que surgem nos silos durante a descarga. Tais resoluções foram publicadas por Jenike, para silos de diferentes geometrias, na forma de gráficos denominados habitualmente de gráfico de fatores de fluxo. O fator fluxo, diferentemente da função fluxo, é uma propriedade do sistema silo-material, dependendo de algumas características de ambos (AMORÓS, 2002).

CHASE (2002), citando Jenike mostrou que para um elemento em toda a posição dentro de uma tremonha com fluxo de massa, a relação da tensão confinada e a tensão de cisalhamento tem um valor constante que chamou de fator do fluxo que é igual a tensão de cisalhamento aplicado a tensão confinada ff e depende de:

- o ângulo de atrito interno do pó,
- o ângulo da parede da tremonha relativo ao plano vertical,
- o ângulo de atrito entre o pó e a parede

A Equação. 05 pode ser usada diretamente para calcular o fator fluxo. Este, entretanto é somente uma de muitas equações dedicadas à predição desta variável. Os cálculos mais detalhados para o fator do fluxo foram feitos por Jenike (1964) que resolveu numericamente as equações diferenciais do equilíbrio de um material na tremonha e forneceu os resultados em cartas agora famosas que carregam seu nome. As expressões analíticas tais como essa dada na Equação 05 é usada somente dentro do possível quando concordam com os valores mais precisos calculados por Jenike (TARDOS, 1999).

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,a}} = \frac{KFm}{[\text{sen } 2\alpha(1 + mG)]} \quad (05)$$

O fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e, pode ser determinado com boa aproximação pela seguinte equação BMHB apud Nascimento (1996).

$$ff = \frac{Y(1 + \text{sen}\phi_{iu})}{2(X-1)F(\alpha)\cos(\alpha)} \quad (06)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos\alpha)]^m \theta^{1-m} \cos\theta + \text{sen}\beta (\text{sen}\theta)^{1+m}}{(1 - \text{sen}\alpha_{iu})(\text{sen}\theta)^{2+m}} \quad (07)$$

$$X = \frac{2^m \text{sen}\phi_{iu}}{1 - \text{sen}\phi_{iu}} \left( \frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos\alpha} + 1 \right) \quad (08)$$

$$\theta = \beta + 90 - \alpha \quad (09)$$

$$F(\alpha) = \left( \frac{65}{220 - \alpha} \right)^m \left( \frac{200}{290 - \alpha} \right)^{1-m} \quad (10)$$

$$2\beta = \phi_{iu} + \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen}\phi_{iu}}{\text{sen}\delta_{iu}} \right) \quad (11)$$

onde:

$m = 0$  para silo retangular com  $L \geq 3d$

$m = 1$  para silo eixo simétrico

Para silo retangular com  $L \leq 3d$ , o valor de “m” será encontrado por interpolação entre 0 e 1.

### 2.5.7 Tempo de Consolidação

Segundo MILANI (1993), alguns produtos armazenados, especialmente os coesivos, ganham resistência com o tempo quando armazenados sob carregamento. Para determinar este tempo de consolidação quantitativamente, é necessário grande número de medições separadas. Em princípio, todo aparelho é capaz de medir o efeito do tempo de consolidação. Para longos períodos de influência de tempo e o cuidado de manter o grande número de medidas separadas, somente o aparelho de cisalhamento de Jenike

pode ser avaliado como conveniente. A razão é a simples forma da célula de cisalhamento, da qual pode ser produzida em quantidades, sem altos custos.

A teoria usada para estabilizar o lugar geométrico é a teoria do Círculo de Mohr:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (12)$$

Onde  $\tau$  é tensão cisalhamento,  $c$  é a coesão do material,  $\sigma$  é tensão normal efetiva e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno. Em “Jenike Shear Test”,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento aplicada e  $\sigma$  é a tensão normal atuante na amostra (KAMATH ET AL, 1994).

JENIKE E LESER (1963), e STAINFORTH E ASHLEY, fazem uso de uma solução na qual as equações de equilíbrio são satisfeitas, considerando que outros autores utilizam o método diferencial de fatias. Em todos os casos a tensão de consolidação pode ser expressa por:

$$\sigma_1 = r f(\theta_w, \delta, \phi_w) \quad (13)$$

onde  $r$  é a distância radial do vértice da tremonha, e  $\theta_w$ , é o ângulo simétrico da tremonha. A solução de Stainforth e Ashley não depende de  $\phi_w$ . (DRESCHER *et al.* 1995)

## 2.6 Orifício de Descarga

O processo de armazenamento de produtos em silos não é tão simples. Problemas aparecem tanto devido ao carregamento, quanto ao descarregamento do produto. SCHULZE (1996), citou os problemas mais comuns que aparecem com o processo de armazenamento de produtos sólidos em silos. São eles: arqueamento, tubo, fluxo irregular, longo tempo de armazenagem e segregação. Mas se um projeto para silo impedir que ocorra o arqueamento e o efeito tubo, existirá fluxo satisfatório e tranqüilo (JENIKE, 1964).

O termo arqueamento é a formação espontânea de um arco no orifício de descarga do silo que resulta na obstrução do fluxo. A ocorrência do arqueamento, além de alguns fatores, é função do silo e da tremonha e em particular do tamanho do orifício de descarga (DRESCHER, *et al.*, 1995).

A metodologia matemática de JENIKE (1964) é a prática padrão para projetar tremonhas em termos de cálculo para ângulos da tremonha mínimos e medidas para abertura para fluxo de massa. O método consiste nos seguintes passos.

- Valores do efetivo ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito com a parede são usados para calcular o ângulo da tremonha ( $\theta$ ) e o fator fluxo ( $ff$ ).
- A tensão máxima aplicada (CAS) é também determinada da interseção da função fluxo e da linha fator fluxo, como ilustrado na Figura 21. A linha do fator fluxo é a linha reta a partir da origem com a inclinação igual à inversa de  $ff$ .

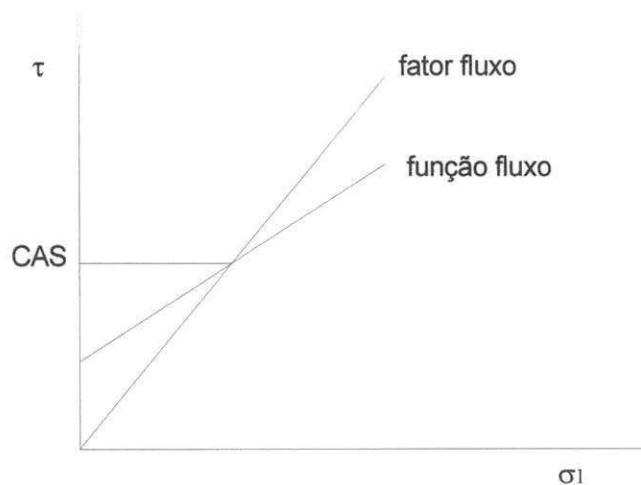


Figura 21 – Avaliação da tensão máxima aplicada ( $\sigma_c$ ).  
Fonte: JENIKE, 1964

- A medida da abertura da tremonha é também calculada usando valores de  $\sigma_c$ , o ângulo da tremonha e a densidade ( $\rho_B$ ). Por exemplo, o diâmetro  $D$  da abertura para tremonha cônica é dado por :

$$D = \frac{H(\theta) * \sigma_c}{\rho_B * g} \quad (14)$$

Onde  $H$  é uma função do ângulo da tremonha e  $g$  é a aceleração da gravidade. A densidade deve corresponder a tensão de consolidação existente em  $D$ .

- Este método requer alguns cálculos simultâneos, como o valor do ângulo de atrito com a parede que deve variar com a tensão normal existente no colapso do arco no diâmetro D (FITZPATRICK *et al*, 2003).

AMORÓS *ET AL*, (2002), baseado na teoria de Jenike, para projeto de silos para armazenamento de materiais na forma de pó, calculou do diâmetro mínimo para a boca de descarga através da equação:

$$D = \left(2 + \frac{\theta}{60}\right) * \frac{\sigma_c}{\rho g} \quad (15)$$

Onde:

D – diâmetro do orifício de saída (m)

$\theta$  - ângulo entre a vertical e a parede do silo na região de descarga (°)

$\sigma_c$  – tensão crítica (Pa)

$\rho$  - densidade do pó ( kg/m<sup>3</sup>).

Há dois tipos de obstrução do fluxo , Figura 22, que podem ocorrer com alguns materiais. A primeira é onde as partículas se fecham conjuntamente. O orifício de descarga mínimo requerido para prevenir esse tipo de obstrução é diretamente relacionado ao tamanho das partículas, que deve estar em torno de ¼ in, ou maior. Se as partículas são menores que ¼ in, a obstrução do fluxo ocorre através de arcos coesivos.

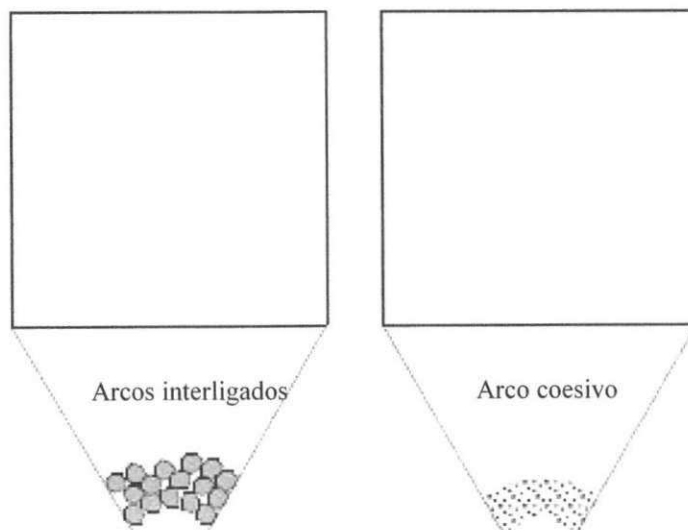


Figura 22 – Tipos de obstrução de fluxo

Dimensões mínimas para prevenir arcos são afetadas por alguns parâmetros, tais como:

- Dimensão das partículas
- Temperatura
- Umidade
- Tempo de armazenamento
- Umidade relativa.

JENIKE E JOHNSON (1995), em trabalhos mais recentes, sugerem as seguintes dimensões para boca de descarga em fluxo de massa, respectivamente para aberturas retangulares e circulares (NASCIMENTO, 1996);

$$b \geq \frac{1.3\sigma_c}{\gamma} \quad (16)$$

$$d \geq \frac{2.2\sigma_c}{\gamma} \quad (17)$$

onde o valor de  $\sigma_c$  é determinado através dos conceitos de fator fluxo (ff) e função fluxo (FF).

A taxa de fluxo, ou vazão de descarga, é considerado um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento do fluxo de massa. Os fatores que interferem na taxa de fluxo para produtos na forma de pó são os seguintes: o tamanho e a forma da partícula, o tamanho e a forma do orifício de descarga e tempo de armazenamento (MARINELLI; CARSON, 2002)

## 2.7 Modelagem Matemática

### 2.7.1 Modelo Matemático

O termo modelo foi introduzido na Matemática no último século com a descoberta das geometrias não euclidianas de Riemann e Lobachewski. Entretanto, antes disso, pode-se encontrar Modelos Matemáticos nos trabalhos que envolviam conceitos como função, números naturais, conjuntos, entre outros. Atualmente, o termo Modelo Matemático é amplamente utilizado no circuito acadêmico.

Segundo BIEMBENGUT (1997), um conjunto de símbolos e relações matemáticas que traduz, de alguma forma, um fenômeno em questão ou um problema de situação real, é denominado de Modelo Matemático.

A definição de Biembegut é a mais adequada para explicar o Modelo Matemático, pois no seu entender, esses modelos podem ser formulados em termos familiares, tais como, expressões numéricas ou fórmulas, diagramas, gráficos ou representações geométricas, equações algébricas tabelas, e outros. Também afirma que um modelo é proveniente de aproximações realizadas para se poder entender melhor um fenômeno e, nem sempre, tais aproximações condizem com a realidade. Seja como for, um Modelo Matemático retrata ainda em uma visão simplificada, aspectos da situação pesquisada.

Segundo KAPUR (1982), o interesse mundial em Modelagem Matemática tem sido crescente, devido principalmente, aos problemas de defesa e situações-problema das indústrias.

A Modelagem Matemática é o processo de escolher características que descrevem adequadamente um problema de origem não matemático, para chegar a colocá-lo numa linguagem matemática. A Modelagem é um processo interativo em que o estágio de validação freqüentemente leva a diferenças entre predições baseadas no modelo e na realidade (O'SHEA; BERRY, 1982 ).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Local dos ensaios

Os ensaios para determinação das propriedades de fluxo e dos teores de umidade foram desenvolvidos no laboratório de Construções Rurais e Ambiente – LaCRA, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Campus I.

Como a temperatura afeta na fluxibilidade do produto, os testes para determinação das propriedades foram realizados em sala climatizada, com temperatura constante de 20° C de umidade relativa de 48%.

#### 3.2 Materiais utilizados nos ensaios

##### 3.2.1 Produto utilizado

O produto utilizado foi a bentonita beneficiada sódica, da cor chocolate (Figura 23), proveniente do município de Boa Vista – PB, gentilmente cedida pela Dolomil.



Figura 23 - Produto utilizado – Bentonita beneficiada



### 3.2.2 Máquina de ensaio (Translation Shear Test – TSG – 70-140)

A máquina de ensaio utilizada foi a Translation Shear Cell – TSG 70-140, pertencente ao laboratório de Construções Rurais e Ambientais – LaCRA – UFCG, construída pela AVT Anlagen-und Verfahrenstechnik GmbH, também conhecida como Jenike Shear Cell. A máquina possui célula de cisalhamento, gancho de tração, transdutor de força e unidade de entrada. É constituída de três partes principais:

- aparelho de cisalhamento mostrado na Figura 24;
- aparelho registrador das forças de cisalhamento, mostrado na Figura 25;
- bancada de consolidação VFB-70 mostrada na Figura 26.



Figura 24 – Aparelho de cisalhamento



Figura 25 – Aparelho registrador das forças de cisalhamento



Figura 26 – Bancada de Consolidação

### 3.3 Determinação das propriedades físicas e de fluxo

#### 3.3.1 Teor de umidade

Como a bentonita apresenta um teor de umidade em torno de 14%, os teores de umidade fixados para os ensaios foram 10, 12, 14 e 16% b.u. O teor de umidade do produto foi determinado antes e durante os ensaios, onde coletou-se amostras com o objetivo de avaliar a influência da variação deste nas propriedades de fluxo dos produtos.

Os teores de umidade foram obtidos através da variação ambiental, ou seja, de acordo com a estação do ano. O teor de umidade mais baixo, 10%, foi obtido na estação mais seca (verão), os teores de umidade de 12 e 14%, foram intercalados nas estações de primavera e outono, enquanto que para o teor de umidade de 16% foi obtido na estação do inverno. A variação do teor de umidade do produto foi evitada mantendo-o em um recipiente fechado em sala climatizada. Durante os testes as amostras foram manuseadas rapidamente. Para haver um maior controle da umidade relativa, foi colocado na sala um desumidificador de ar.

Os testes foram efetuados com três repetições, utilizando-se aproximadamente 10 gramas de produto para cada repetição. As amostras foram colocadas em recipientes de alumínio, pesados em balança digital com precisão de 0,001g para se obter o peso úmido (Pu) do produto e levados a estufa, à temperatura de 105°C, com uma tolerância de  $\pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, e em seguida foram resfriados em um dessecador, obtendo-

se assim o peso seco (Ps). Os teores de umidade foram calculados com o uso da seguinte expressão:

$$U = \frac{P_u - P_s}{P_u} \cdot 100 \quad (18)$$

onde:

U – teor de umidade do produto;

P<sub>u</sub> – peso úmido da amostra do produto;

P<sub>s</sub> – peso seco da amostra do produto.

### 3.3.2 Granulometria

A composição granulométrica foi determinada no Laboratório do DEMa, Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG utilizando-se o a distribuição granulométrica - Cilas 1064 Líquido, faixa: 0,04μm - 500.00 μm / classes, ultrasom: 60s, concentração 132, diâmetro a 10%: 1.28 μm, diâmetro a 50%: 5.82 μm, diâmetro a 90%: 15.83 μm, diâmetro médio: 7.43 μm, medida/limp.: 60/60/3.

### 3.3.3 Densidade em função da consolidação

O método utilizado para medir a densidade foi o de pesar a célula (célula + produto) após o ensaio de cisalhamento, subtrair o próprio peso da célula e dividir por seu volume conforme proposta de NASCIMENTO (1996).

A densidade foi determinada pela seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{W_t - (W_b + W_r + W_l)}{V_t} \quad (19)$$

onde:

ρ<sub>b</sub> – densidade média do produto armazenado (KN/m<sup>3</sup>);

W<sub>t</sub> – peso total da célula com o produto (daN);

W<sub>b</sub> – peso da base do anel (daN);

$W_r$  – peso do anel de cisalhamento (daN);

$W_l$  – peso da tampa (daN);

$V_t$  – Volume total da célula de cisalhamento ( $\text{cm}^3$ );

Os testes de cisalhamento nem sempre alcançam a mesma consolidação. Portanto apenas os testes com a mesma carga de pré-cisalhamento, dentro de uma faixa de  $\pm 1\%$  da densidade média, podem ser usados na avaliação (FREITAS, 1998).

### 3.4 Teste de Cisalhamento

#### 3.4.1 Metodologia para determinação do cisalhamento

A metodologia utilizada no ensaio de cisalhamento foi a proposta pela BMHB combinada com a de Milani (1993). A partir dos resultados obtidos através dos ensaios utilizou-se o programa gráfico AutoCAD, para traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (semicírculo de Mohr) e com este determinar as seguintes propriedades de fluxo:

$\phi_i$  – ângulo de atrito interno;

$\phi_e$  – efetivo ângulo de atrito interno;

$\phi_w$  – ângulo de atrito do produto com a parede;

ff – função fluxo;

FF – fator fluxo.

Nos ensaios na máquina de "Jenike Shear Cell" o produto passa por dois estágios. O primeiro estágio, chamado de pré-cisalhamento, o segundo estágio, chamado de cisalhamento, uma camada do produto através da área total da célula de cisalhamento é forçada a deformar-se sob pressão e tensão cisalhante até que uma força de cisalhamento estável ou quase aproximada é alcançada.

#### 3.4.2 Níveis de cargas normais

Os níveis de cargas normais definidos para o teste de cisalhamento mostrados na Tabela 07, foram baseados em resultados obtidos por Milani (1993).

Tabela 07 - Níveis de cargas normais(N) utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo e com tempo de consolidação.

Pré- Cisalhamento	Cisalhamento	Pré- Cisalhamento	Cisalhamento	Pré- Cisalhamento	Cisalhamento
100	70	70	50	50	35
100	50	70	35	50	20
100	35	70	20	50	10

### 3.4.3 Número de rotações (twist)

O produto é rotacionado em células de cisalhamento sob pressão com a finalidade de preparar uma amostra uniforme. Os ensaios foram então realizados com número de 25 rotações(twist) com base em testes preliminares a partir de ensaios realizados na fase de otimização, em função da "consolidação crítica" do produto.

### 3.4.4 Metodologia para determinação das propriedades de fluxo

#### 3.4.4.1 Enchimento da célula

As determinações foram efetuadas na "Jenike Shear Cell", utilizando uma célula de cisalhamento de alumínio, constituída de dois anéis molde, uma base e uma tampa para operação de rotações, além dos pesos, espátula e do pendural (Figura 27).

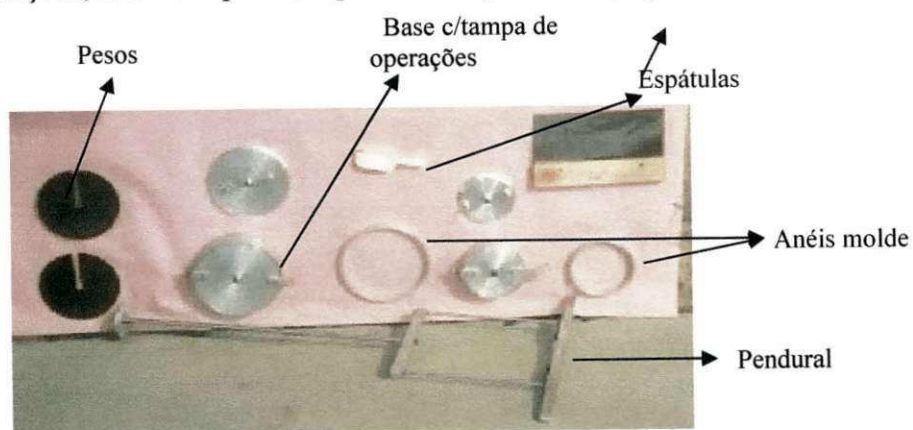


Figura 27 – Peças da máquina de cisalhamento

Os procedimentos para o enchimento da célula foram o seguinte:

- A célula foi preenchida em pequenas camadas com uma espátula sem aplicação de força vertical sobre superfície do produto até formar certa quantidade de produto acima do topo do anel molde (Figura 28). Retira-se o excesso do produto com cuidado, através de raspagem com espátula inclinada 45° em suaves movimentos de ziguezague, de modo que não modifique a posição do anel sobre a base.

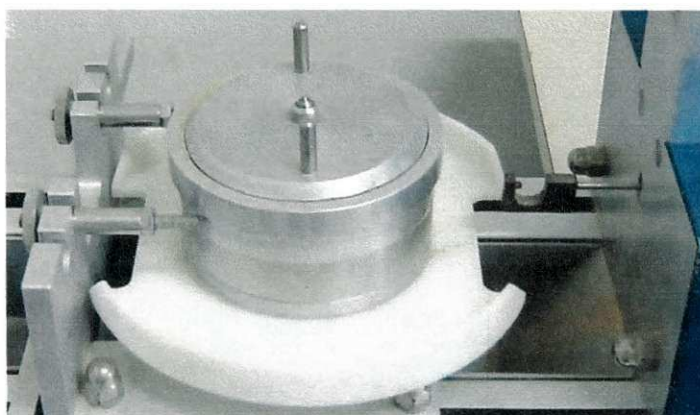


Figura 28 – Célula preparada para o ensaio

Feito isto, a consolidação da amostra foi procedida da seguinte forma:

- Colocou-se a tampa de operação de rotações cuidadosamente sobre a superfície nivelada do produto no anel molde com os seus pinos alinhados com o eixo longitudinal do aparelho;
- Colocou-se o pendural de pesos com as cargas normais de consolidação sobre o pino central da tampa de operação de rotações;
- verificou-se o adensamento de aproximadamente 2 mm ou mais, em seguida retirou-se o pendural de pesos e a tampa, preencheu o espaço vazio formado no anel molde, com o mesmo produto, conforme o procedimento de enchimento, descrito anteriormente.
- Encaixou-se o aparelho de operação de rotações nos pinos da tampa de operação de rotações;
- Realizou-se o movimento de rotação com a alavanca do aparelho de rotações de modo a não transmitir nenhuma força vertical formando

um ângulo de  $90^\circ$ , em intervalos iguais de aproximadamente 1 segundo, de forma suave e contínua, com número de 25 twist;

- Retirou-se então o aparelho de rotação, o pendural de pesos e o anel molde,
- Removeu-se a tampa de operação de rotações;
- Retirou-se o excesso de produto em pequenas quantidades, nivelando-o com o topo do anel de cisalhamento.(Figura 29).

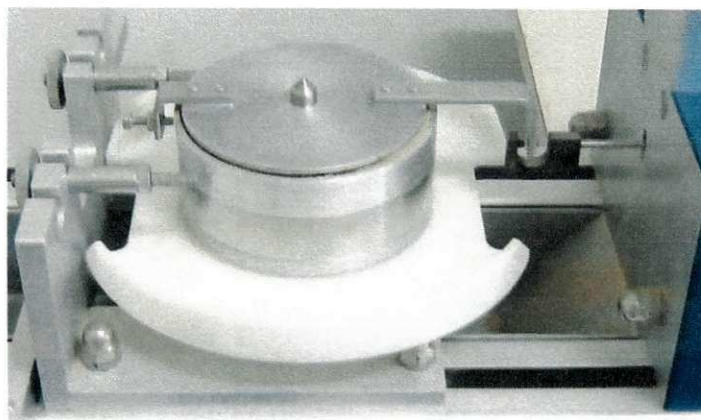


Figura 29 – Célula após a consolidação

Depois da preparação da amostra, antes dos testes de cisalhamento definitivos, foi feita uma otimização (testes preliminares) para verificar o nível de consolidação de modo que obtivesse a consolidação crítica.

#### 3.4.4.2 Teste de cisalhamento

Depois dos testes de otimização os testes de cisalhamento foram realizados em duas etapas: pré-cisalhamento e cisalhamento, utilizando-se os níveis de cargas indicados Tabela 07.

#### 3.4.4.3 Pré-cisalhamento

Esta fase conduz a amostra a uma deformação plástica, desenvolvendo dentro dela uma zona de cisalhamento até ocorrer fluxo de estado estável, com um valor da tensão

de normal de cisalhamento  $\sigma_p$ . Esta tensão de pré-cisalhamento é mantida na célula, embora à distância de cisalhamento seja relativamente curta.

A estabilidade dos valores da tensão normal de cisalhamento  $\sigma_p$ , obtidas em estado estável do pré-cisalhamento, é uma indicação da reprodutibilidade de consolidação.

#### 3.4.4.4 Cisalhamento

Após a operação de pré-cisalhamento, as cargas normais correspondentes a esta fase foram reduzidas conforme indicado da Tabela 07, iniciando-se a operação de cisalhamento pela partida do motor propulsor da haste de medida de força. A tensão de cisalhamento aumenta, passando por um máximo e reduzindo em seguida. O cisalhamento foi contínuo, até que toda distância sobreposta da célula tenha sido percorrida, na condição de desenvolver o plano de cisalhamento.

#### 3.4.4.5 Equações para determinação das tensões normais e de cisalhamento

A partir dos testes de cisalhamento foram calculadas as tensões normais e de cisalhamento. Para cada ponto medido (pontos válidos do teste de cisalhamento instantâneo), as tensões normais ( $\sigma$ ) e de cisalhamento ( $\tau$ ) em estado estável foram calculadas adotando as seguintes equações:

Equações para as tensões de cisalhamento de pré-shear ( $\tau_p$ ) e shear( $\tau_s$ );

$$\tau_p = \frac{S_p}{A} \cdot g \quad (20)$$

$$\tau_s = \tau \cdot \frac{\tau_p}{\tau_p} \quad (21)$$



$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_p}{n} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{S_s}{A} \cdot g \quad (23)$$

Equações para as tensões normais de pré-shear ( $\sigma_p$ ) e shear ( $\sigma_s$ );

$$\sigma_p = \left( \frac{H + W_p + W_r + W_L + \rho_b \cdot V_r}{A} \right) g \quad (24)$$

$$\sigma_s = \left( \frac{H + W_s + W_r + W_L + \rho_b \cdot V_r}{A} \right) g \quad (25)$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_p}{n} \quad (26)$$

Onde:

P - subscrito, indica a tensão no pré-cisalhamento;

S - subscrito, indica a tensão no cisalhamento;

$W_t$  - peso total da célula de cisalhamento com o produto (daN);

$W_t$  - peso total da célula de cisalhamento com o produto (daN);

$W_b$  - peso da base do anel (daN);

$W_r$  - peso do anel de cisalhamento (daN);

$W_L$  - peso da tampa (daN);

$V_t$  - volume total da célula de cisalhamento ( $\text{cm}^3$ );

$V_r$  - volume correspondente ao anel de cisalhamento ( $\text{cm}^3$ );

A - área de seção transversal do anel de cisalhamento ( $\text{m}^2$ );

g - aceleração da gravidade,  $9,81 \text{m/s}^2$  ( $\text{m/s}^2$ )

$S_p$  - Força de cisalhamento no pré-cisalhamento/estado de consolidação (daN);

- $S_s$ - força de cisalhamento/início de deslizamento (daN);  
 $W_p$  - peso no pendural durante o pré-cisalhamento (daN);  
 $W_s$  - peso no pendural durante o cisalhamento (daN);  
 $N$  - número de testes com uma carga de pré-cisalhamento;

3.4.4.6 Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ ), a tensão principal máxima ( $\sigma_1$ ) e a resistência não confinada ( $\sigma_c$ ).

Os pontos de cisalhamento obtidos no pré-cisalhamento e no cisalhamento são plotados no diagrama de coordenadas  $\sigma$  e  $\tau$ . Uma linha reta é desenhada através destes pontos, excluindo o ponto de pré-cisalhamento. Pode-se utilizar uma regressão. E o lugar geométrico é extrapolado para o mais alto e baixo valores da tensão normal  $\sigma_s$ . Através do lugar geométrico, definido pela linha reta, desenha-se dois círculos de Mohr. O primeiro passa pela origem e tangencia a reta do lugar geométrico. O ponto máximo de interseção do círculo de Mohr com o eixo  $\sigma$  determina a resistência não confinada  $f_c$  do produto. O segundo passa através do ponto P do pré-cisalhamento e tangencia ao lugar geométrico instantâneo. A tensão principal máxima  $\sigma_1$  foi definida pelo ponto maior de interseção do círculo de Mohr com o eixo  $\sigma$ . O ângulo entre o lugar geométrico e o eixo  $\sigma$  é o ângulo de atrito interno  $\phi$ . A linha reta desenhada passando através da origem e do ponto de tangência (B) do círculo de Mohr da tensão principal máxima  $\sigma_1$ , define o efetivo lugar geométrico (EYL). O ângulo de atrito entre o eixo e o efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito  $\phi_e$  (Figura 30).

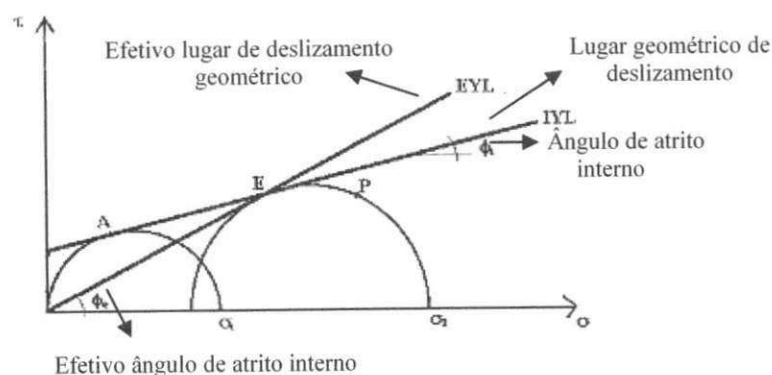


Figura 30 - Local de cisalhamento(Semicírculo de Mohr de Tensões)

### 3.5 Teste de Cisalhamento com tempo de consolidação

#### 3.5.1 Metodologia do teste de cisalhamento com tempo de consolidação

Os testes de cisalhamento com tempo de consolidação foram realizados utilizando uma célula de cisalhamento de aço inox, e uma bancada de consolidação de seis lugares especificadas por letras (A-F). Nos testes de tempo, as células de cisalhamento foram transferidas após a operação de pré-cisalhamento para uma bancada de consolidação (Figura 31), onde permaneceram durante 4, 8, 14, 18 e 24 horas, sob a ação de uma força vertical, aplicada através de um pendural de pesos com cargas, e depois foram retornadas ao aparelho para os testes de cisalhamento.



Figura 31 – Ensaio com tempo de consolidação

##### 3.5.1.1 Preparação da amostra

A preparação da amostra (enchimento) seguiu os mesmos procedimentos do teste de cisalhamento instantâneo. Os níveis de carga foram os mesmos utilizados nos ensaios do teste de cisalhamento. Foi adotado o mesmo procedimento do teste de cisalhamento instantâneo, repetindo o ensaio três vezes.

### 3.5.1.2 Determinação do ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ ).

Para cada ponto medido determinou-se as tensões ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) e a força de resistência não confinada seguindo os mesmos procedimentos do teste de cisalhamento. O lugar geométrico em função do tempo é plotado através dos pontos de valores ( $\sigma_t$ ,  $\tau_t$ ).

A determinação dos ângulos de atrito interno no tempo e o efetivo ângulo de atrito interno foi feita seguindo os mesmos procedimentos adotados nos testes de cisalhamento instantâneo.

## 3.6 Teste de Cisalhamento de atrito com a parede instantâneo

### 3.6.1 Metodologia do teste de cisalhamento de atrito com a parede

#### 3.6.1.1 Escolha do material da parede

Foram escolhidos quatro tipos de material de parede: aço rugoso, aço liso, alumínio e acrílico, (Figura 32).



Figura 32 – Tipos de paredes utilizadas nos ensaios

#### 3.6.1.2 Escolha da célula de cisalhamento

As células utilizadas para os testes de cisalhamento de atrito com a parede foram de aço inoxidável, identificadas por letras de A à F. São diferenciadas dos testes de

cisalhamento instantâneo pela substituição do anel base por uma amostra de material da parede.

### 3.6.1.3 Seleção dos níveis de cargas

Adotou-se como nível máximo de carga normal o valor de 5,0kg e, a partir desse valor, os outros níveis são obtidos através da remoção sucessiva de 1,0kg, até o pendural ficar com peso próprio.

### 3.6.1.4 Preparação da amostra do material da parede para o teste

Adotou-se três repetições para cada teste. A amostra da parede é colocada na máquina, o anel de cisalhamento é colocado sobre a amostra e ajustado de acordo com a posição do parafuso fixo (Figura 33). O anel molde é colocado sobre o anel de cisalhamento e preenchidos com o produto. Coloca-se a tampa de operação de rotação, o pendural de pesos com a carga máxima inicial realiza-se então a operação de rotação para homogeneizar e consolidar a amostra do produto. Depois da consolidação, retira-se o pendural com as cargas da tampa de operação de rotação e o anel molde, o produto é então raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento. Inicia-se então o teste de cisalhamento com a carga inicial máxima de 5,0kg. Quando a tensão inicial máxima atingiu um valor constante, reduziu-se então a carga inicial para o outro nível de carga pré-estabelecido. O procedimento foi contínuo até o fim dos níveis de cargas selecionados, até que o pendural de pesos ficasse sem cargas (só com o peso próprio do pendural). Depois de cada teste, a amostra do material da parede com o produto foi pesada.



Figura 33 – Amostra preparada para o ensaio de parede

### 3.6.1.5 Determinação das tensões normais e cisalhamento da parede

As tensões normal ( $\sigma_w$ ) e cisalhamento ( $\tau_w$ ) foram calculadas através das seguintes equações:

- Densidade do produto armazenado:

$$\rho_w = \frac{W_{wt} - (W_r + W_l + W_m)}{V_r} \quad (27)$$

- Tensão normal

$$\sigma_w = \frac{W_{wt} + W_w + W_m}{A} g \quad (28)$$

- Tensão de cisalhamento

$$\tau_w = \frac{S_w}{A} g \quad (29)$$

onde:

$W_{wt}$  – peso total da amostra de parede incluindo o anel de cisalhamento, tampa e produto armazenado (daN)

$W_m$  – peso da amostra de material da parede (daN)

$W_w$  – carga sobre o pendural de pesos do teste de atrito (daN)

$S_w$  – Força de cisalhamento registrada (daN/m<sup>2</sup>)

$V_r$  – Volume do anel de cisalhamento (m<sup>3</sup>)

$A$  – Área da seção transversal da célula (m<sup>2</sup>)

$W_t$  – peso do anel de cisalhamento (daN)

$W_l$  – peso da tampa de cisalhamento (daN)

### 3.6.1.6 Determinação do ângulo de atrito da parede ( $\phi_w$ )

Os ângulos de atrito com a parede foram obtidos através da seguinte equação:

$$\phi_w = \arctan g \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (30)$$

Foram também plotados os valores calculados de  $\sigma_{wi}$ ,  $\tau_{wi}$  em um eixo de coordenadas  $\sigma_w$ ,  $\tau_w$  e através de regressão linear dos pontos encontrou-se a inclinação da reta, determinando também o ângulo de atrito do produto com o material de parede.

### 3.6.1.7 Função Fluxo

Através dos valores determinados para a tensão máxima de consolidação  $\sigma_1$  e a resistência não confinada  $f_c$  obtidas com o círculo de Mohr de tensões (Figura 30), traçou-se uma curva de  $\sigma_1 \times \sigma_c$ , que define a função fluxo do produto.

### 3.6.1.8 Fator Fluxo

O fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e, foi determinado com boa aproximação pela Equação 06 .

## 3.7 Cálculo do orifício de descarga

Para a determinação do orifício de descarga utilizou-se um protótipo de silo (Figura 34a) com seção transversal prismática, confeccionada em acrílico com espessura 1,7mm. As paredes têm forma zig-zague com altura de  $h = 600$  mm, lado  $L = 340$  mm e inclinação de  $70^\circ$ . Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.

A tremonha é do tipo tronco-piramidal excêntrica, com orifício de descarga quadrado possuindo duas inclinações diferentes (Figura 34b):  $\alpha_1 = 21,5^\circ$  e  $\alpha_2 = 8,5^\circ$  e com 25% de excentricidade. É confeccionado com o mesmo material do corpo do silo. Foram utilizadas duas seções transversais de descarga ,  $SD1 = 100 \text{ cm}^2$  e  $SD2 = 256 \text{ cm}^2$

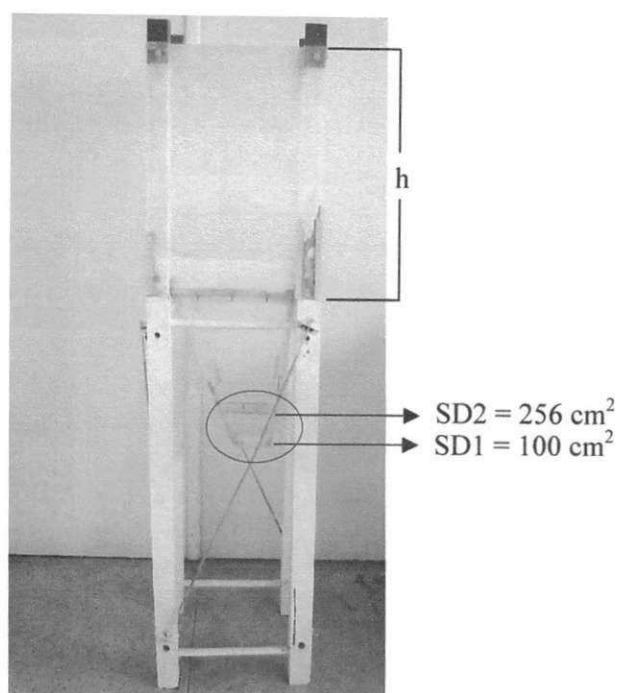


Figura 34a – Protótipo do silo prismático

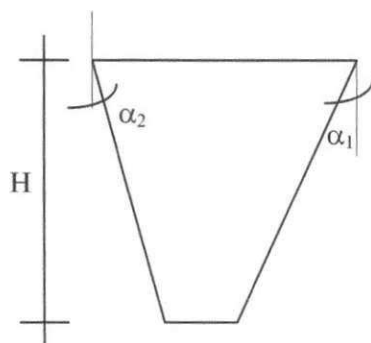


Figura 34b – Vista lateral da tremonha

Foram determinadas as vazões de descarga em função do tempo de consolidação (0h e 24h). A vazão foi medida instantaneamente, ou seja, ao se abrir o orifício de descarga acionava-se o cronômetro no mesmo instante. Dividiu-se o volume descarregado pelo tempo e determinou-se a vazão mássica. Essa vazão é a relação entre a massa (kg) e o tempo (s). Para se obter o valor líquido da massa, pesava-se o conjunto silo mais produto. Depois subtraía-se o peso do silo vazio do peso do conjunto. O teor de umidade da bentonita no ensaio no protótipo foi de 14%.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Teor de umidade

Os teores de umidade foram calculados antes, durante e depois dos ensaios e verificou-se que:

- O teor de umidade controlado em 10% apresentou uma variação de  $\pm 0,23\%$ , durante os ensaios realizados;
- O teor de umidade controlado em 12%, houve uma faixa de variação em torno de  $\pm 0,31\%$ , durante os ensaios realizados;
- Para o teor de umidade controlado em 14%, houve uma faixa de variação em torno de  $\pm 0,37\%$ , durante os ensaios realizados;
- Para o teor de umidade controlado em 16%, houve um acréscimo na faixa de variação em torno de  $\pm 0,69\%$ , durante os ensaios realizados;

Observando as taxas de variações nos teores, observou-se que quanto maior a umidade do produto maior é a taxa de variação. O teor de umidade de 14% foi o que apresentou maior estabilidade na sua variação.

Para evitar que houvesse grandes variações nos teores de umidade, os ensaios foram realizados de forma rápida e sempre nos mesmos horários e em sala climatizada. Como as variações foram pequenas, não influenciou nas propriedades de fluxo determinadas.

## 4.2 Granulometria

A granulometria é uma das mais importantes propriedades físicas que afetam a fluabilidade do pó. Geralmente considera-se que pós com granulometria superiores a  $200\mu\text{m}$  tenham fluxo livre, enquanto que pós mais finos são sujeitos a coesão e apresenta dificuldade em fluir.

Os resultados obtidos com os ensaios granulométricos encontram-se na Tabela 08 e Figura 35. De acordo com a distribuição granulométrica CILAS 1064 Líquido a bentonita apresenta características de argila de granulometria fina.

Tabela 08 - Resultados da análise granulométrica realizada

x diâmetro (mu)	Q3 Valor Cumulativo/(%)	q3 Histograma/%
0,04	0,06	0,02
0,25	1,05	0,08
1,00	7,00	0,77
4,00	34,76	2,69
20,00	95,70	95,70
50,00	100,00	100
100,00	100,00	100

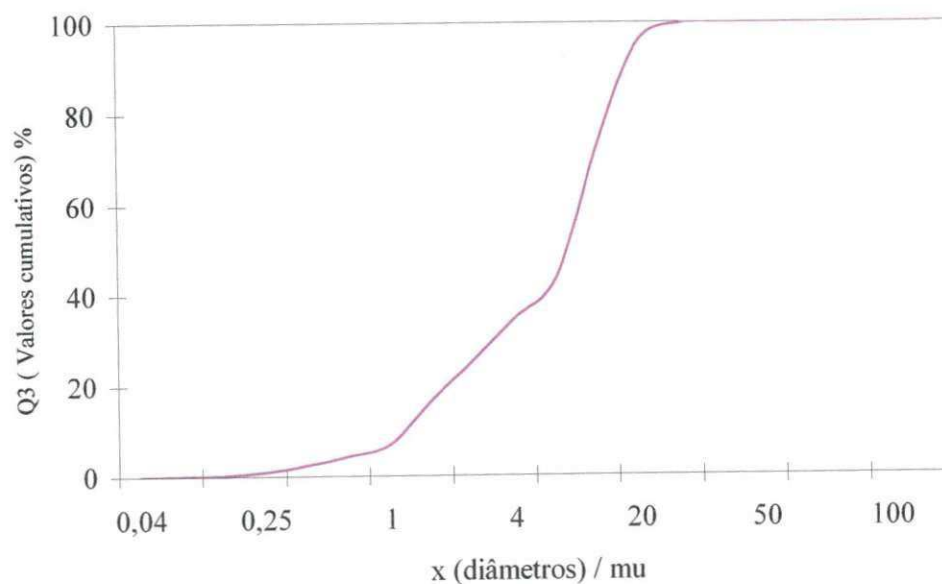


Figura 35 - Curva granulométrica da bentonita

### 4.3 Densidade consolidada

Os valores médios para a densidade consolidada são apresentados na Tabela 09. Observa-se que para o ensaio de cisalhamento instantâneo a densidade variou de 1,04 a 1,02, enquanto que para o tempo de consolidação a variação foi de 1,04 a 1,12. Constata-se então que os valores da densidade tiveram pequenas variações entre si, em relação aos níveis de carga e em relação aos tempos estudados. Percebe-se também que o nível de carga de 10,0 kN apresentou maiores valores médios e que quanto maior o tempo maior a densidade. A densidade consolidada representa a situação em que o produto está submetido dentro de um silo, ou seja, uma determinada amostra de sólido localizada na base do silo, sofrerá uma carga maior em relação àquela que se encontra localizado na altura intermediária e, esta por sua vez receberá uma carga maior que aquela do topo. Observando as Figuras 36 a 38, observou-se que todas obtiveram o mesmo comportamento, ou seja, quanto maior foi a carga maior foi a densidade consolidada, e a tensão máxima apresentou valores mais homogêneos do que a tensão não confinada. Na Figura 38 a tensão não confinada tende a diminuir com o aumento da densidade consolidada. Isto demonstra que tenderá a compactação, haja vista que a tensão não confinada é aquela que supostamente romperá a amostra quando esta não possuir paredes laterais para contê-las. Em relação ao modelo, observa-se que para a tensão máxima principal a carga de 10,0 kN obteve melhor regressão. Para a tensão não confinada as cargas de 7,0 e 5,0 kN obtiveram melhores regressões. A regressão foi polinomial de terceira ordem para a densidade consolidada em função do tempo, de segunda e terceira ordem para as tensões normais máximas e para as tensões não confinadas foi de segunda ordem. Os ajustes forneceram equações que descreveram o satisfatoriamente o relacionamento entre a densidade em função do tempo e das tensões normais máximas e tensão não confinada. Nota-se que não houve grandes diferenças entre os modelos quanto aos coeficientes de determinação. Para a densidade em função do tempo o maior valor do coeficiente de determinação foi de 0,98 e o menor valor foi de 0,93. Para a tensão máxima em função da densidade o maior valor do coeficiente foi de 0,90 e o menor foi de 0,88 e para a tensão não confinada o maior valor foi de 0,98 e o menor foi de 0,93. Isso sugere que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento da densidade em função do tempo, e das tensões em função da densidade consolidadas instantâneas.

Tabela 09 – Valores médios da densidades consolidadas instantâneas (kN/m<sup>3</sup>) consolidada

Tempo (horas)	Carga (kN)		
	10,0	7,0	5,0
0	1,04	1,02	1,02
4	1,04	1,04	1,04
8	1,07	1,07	1,04
14	1,10	1,08	1,07
18	1,11	1,10	1,08
24	1,12	1,10	1,07

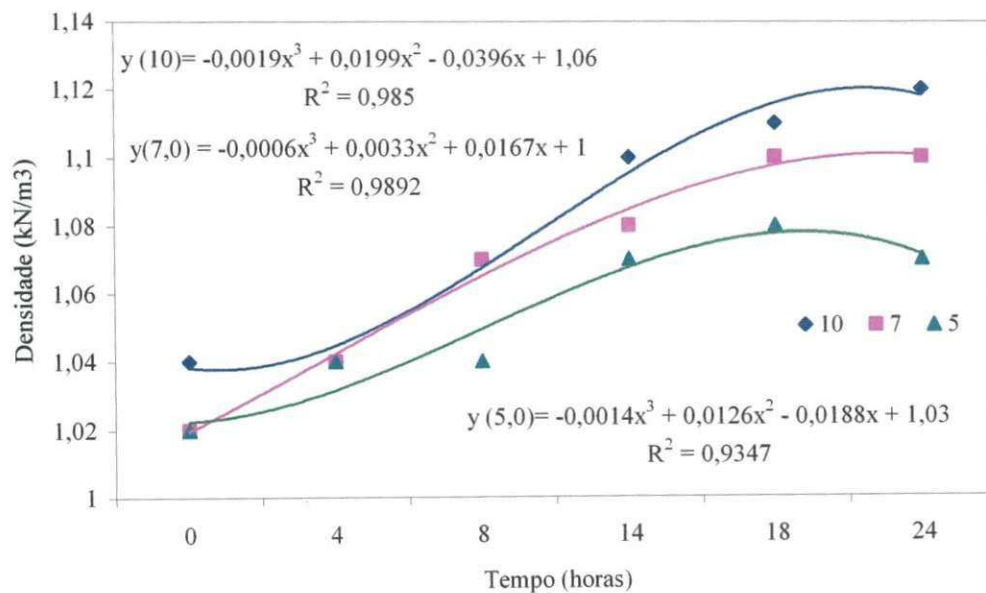


Figura 36 – Densidade consolidada em função do tempo

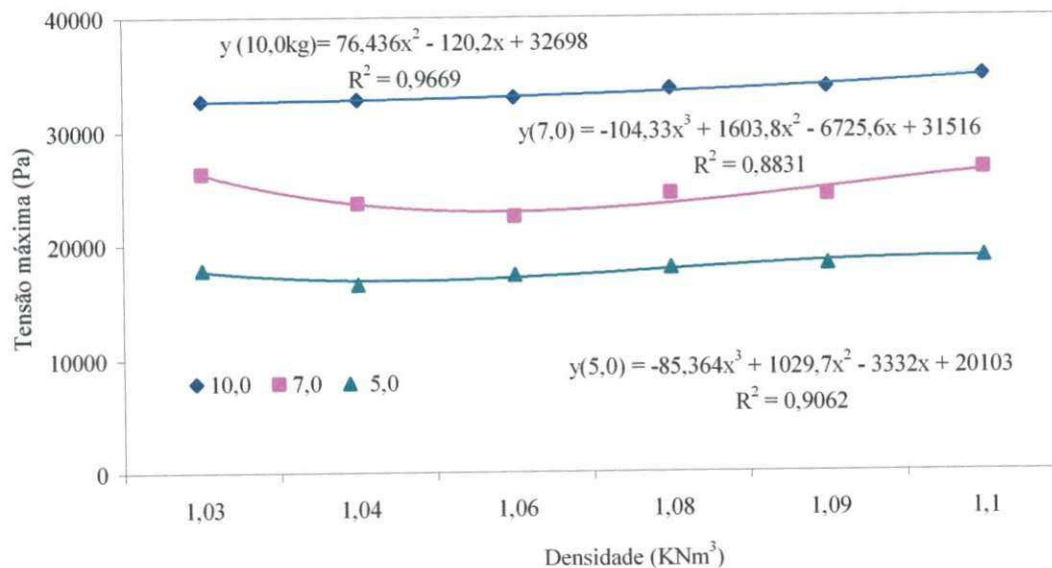


Figura 37 – Tensão normal máxima em função da densidade consolidada

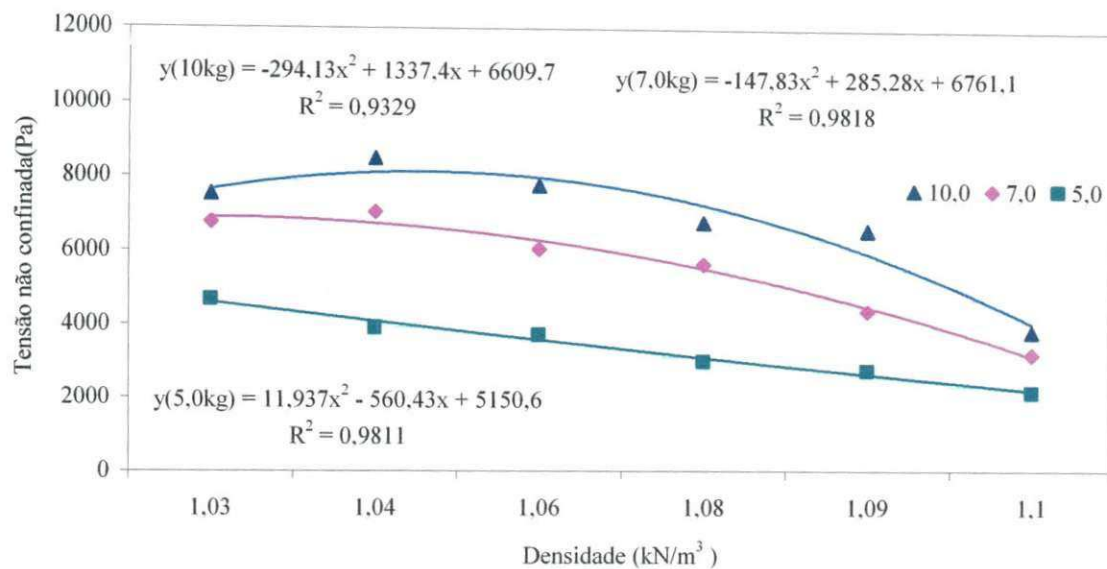


Figura 38 – Tensão não confinada em função da densidade consolidada

#### 4.4 Propriedades de Fluxo

##### 4.4.1 Teor de umidade de 10%

##### 4.4.2 – Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.

Os testes de cisalhamento para obtenção das tensões normais e de cisalhamento instantâneo e consolidados foram realizadas com três níveis de cargas, 10,0, 7,0 e 5,0 kN, com três repetições, cada carga. Nas Tabelas 29 a 34(anexo) estão especificados os valores médios para as tensões normais e de cisalhamento e o ponto de pré-cisalhamento. Os pontos foram plotados e através da regressão linear obtiveram-se as retas do lugar geométrico de deslizamento instantâneo (IYL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL), dispostos nas Figuras 91 a 108 (anexo). A regressão linear forneceu bons ajustes para a construção das retas, estes ajustes podem ser observados nas equações que estão dispostas, cada qual com seu respectivo valor de R-quadrado, nas Figuras 91 a 108.

#### 4.4.3 – Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais.

A partir das retas dos lugares geométricos de deslizamento (YL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL), determinou-se os ângulos de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), além das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ) e tensões máximas principais ( $\sigma_1$ ). Os valores dos ângulos de atrito interno e efetivo estão dispostos na Tabela 10 e nas Figuras 39 a 41.

Tabela 10 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo

Tempo (horas)	Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)	
	$\phi_{il}$	$\phi_{iu}$	$\phi_{el}$	$\phi_{eu}$
0	34,2°	39,5°	40,5°	41,2°
4	32,3°	38,4°	40,4°	41,5°
8	34,4°	37,1°	41,2°	42,3°
14	35,4°	39,2°	40,4°	41,3°
18	36,3°	38,7°	40,6°	41,4°
24	36,6°	37,6	39,5°	41,4°

$\phi_{iu}$  = ângulo de atrito superior  
 $\phi_{il}$  = ângulo de atrito inferior

$\phi_{eu}$  = efetivo ângulo de atrito superior  
 $\phi_{el}$  = efetivo ângulo de atrito inferior

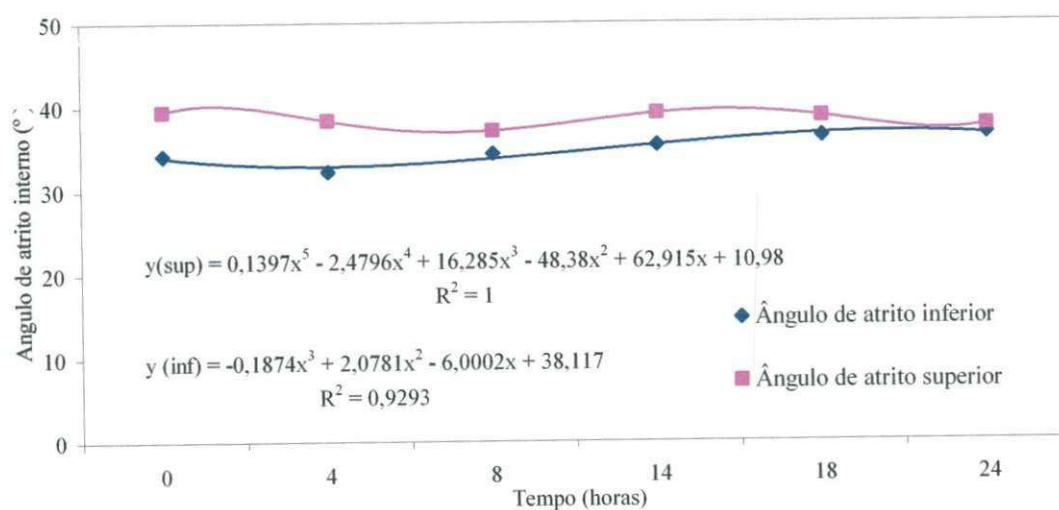


Figura 39 - Ângulos de atrito interno inferior e superior para a bentonita

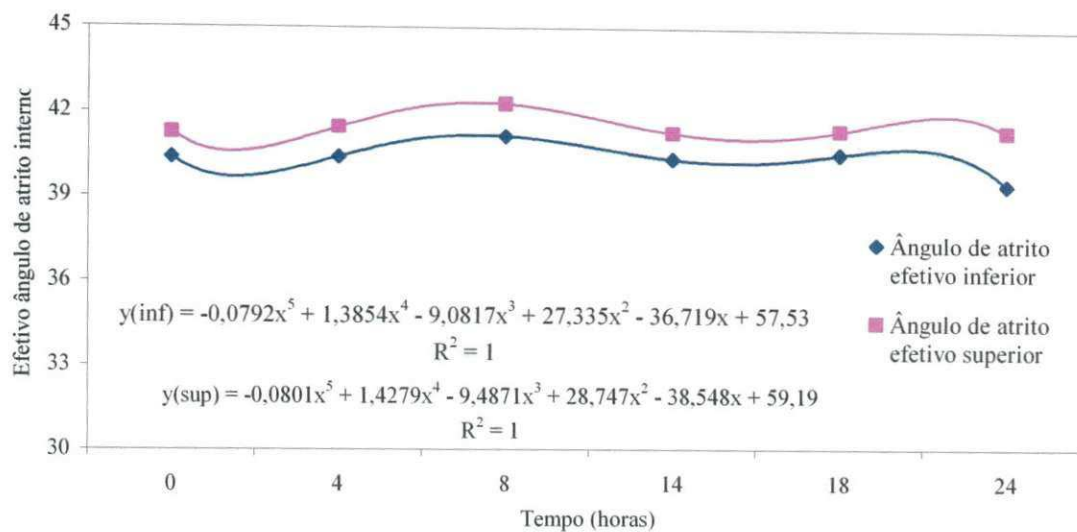


Figura 40- Efetivos ângulos de atrito interno inferior e superior para a bentonita

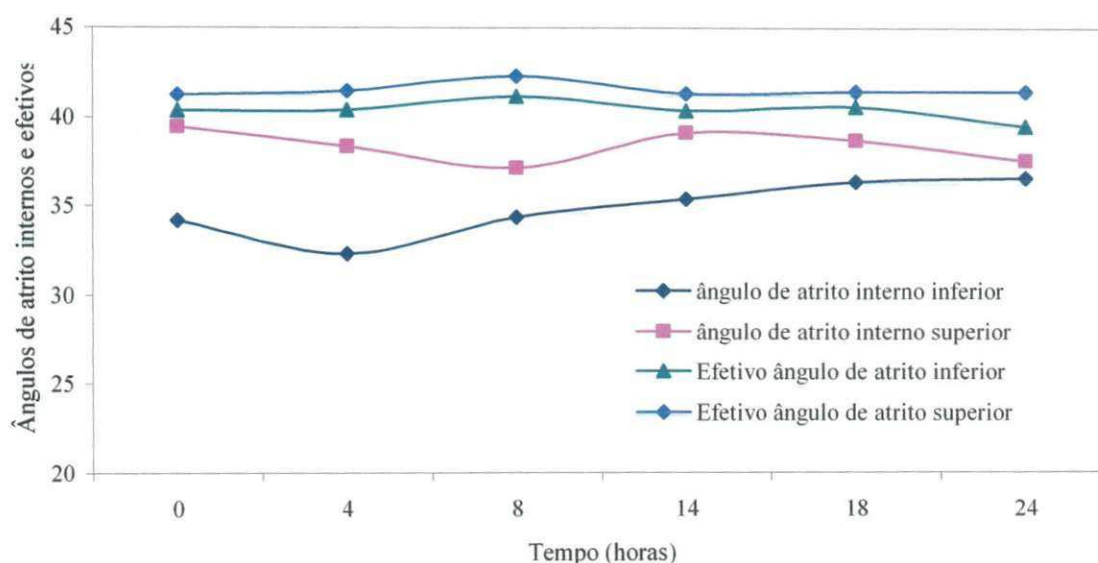


Figura 41- Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos

Observando a Tabela 10 e Figuras 39 a 41 de, percebe-se que os ângulos de atrito interno e os efetivos ângulos de atrito interno variaram num intervalo de 34,2° a 39,5° e 40,5° a 41,2°, respectivamente, para o tempo de cisalhamento instantâneo (0h) e de 32,3° a 39,2° e 39,5° a 42,3°, para os tempos de consolidação (4 a 24h). O ângulo de atrito interno apresentou uma variação não superior a 6° para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que para o tempo de consolidação a variação não ultrapassou 7,0°. O efetivo ângulo de atrito interno apresentou uma variação de 0,7°, para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que as variações entre os ângulos inferiores e superiores do efetivo ângulo de atrito interno do tempo de consolidação não

ultrapassaram  $2,00^\circ$ . Nota-se que a diferença entre os valores dos efetivos ângulos de atrito interno obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo em relação aos obtidos no tempo de consolidação foram pequenas, logo a influência do tempo teve pouca importância. Essas diferenças podem ter ocorrido devido as transferências das células à bancada de consolidação e de volta à máquina de cisalhamento. De acordo com CALIL JUNIOR (1990), essas variações não são representativas, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados.

Em relação ao modelo, os dados foram analisados por meio de regressão polinomial de terceira e quinta ordem para os ângulos de atrito interno e de quinta ordem para os efetivo ângulos de atrito interno. As equações ajustadas apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais apresentando bons resultados. Nota-se que para os ângulos de atrito interno o maior coeficiente de determinação foi de 1 e o menor de 0,92. Para os efetivos ângulos de atrito interno não houve diferenças entre o maior valor do coeficiente de determinação e o menor valor sendo ambos de 1. Isso sugere que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento dos ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno em função do tempo.

Os valores para as tensões não confinadas e tensões máximas principais estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores das tensões não confinadas e tensões máximas

Tempo (horas)	Tensão não confinada (kPa)			Tensão máxima crítica (kPa)		
	Cargas (kN)			Cargas (kN)		
	10	7	5	10	7	5
0	7,53	6,77	0,96	31,82	25,03	19,53
4	7,10	6,87	2,40	31,62	24,00	17,75
8	7,76	6,05	3,20	30,83	22,90	17,23
14	6,78	5,25	1,90	33,75	24,37	18,83
18	6,58	3,20	2,76	33,50	23,21	18,22
24	3,82	3,31	3,25	33,03	26,26	19,24



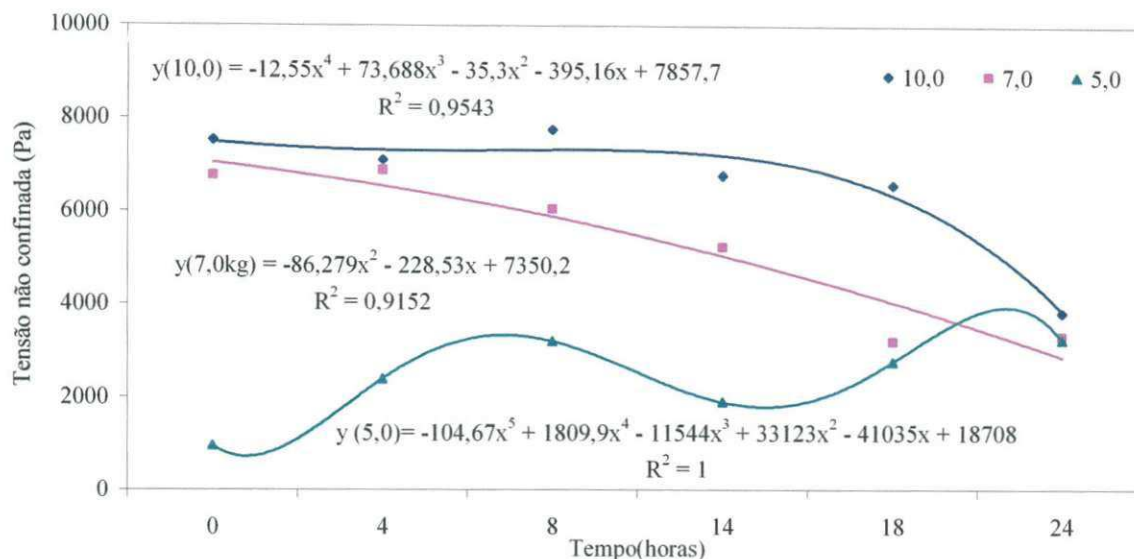


Figura 42 - Curvas das tensões não confinadas para a bentonita.

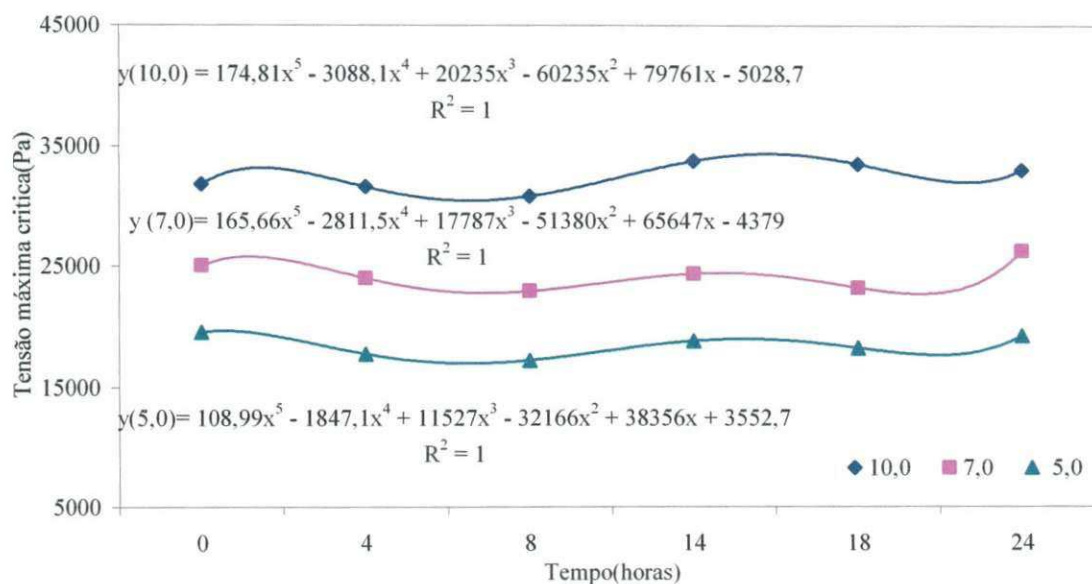


Figura 43 - Curvas das tensões máxima crítica para a bentonita

Observando os valores das tensões não confinadas e tensões normal máximas em função das cargas (Tabela 11 e Figuras 42 e 43 ), percebe-se que os valores das tensões não confinadas apresentaram maiores variações do que as tensões normais máximas isto pode ser explicado pelo fato de que as retas dos lugares geométricos de deslizamento foram linearizadas, afetando mais a determinação das tensões não confinadas do que as tensões máximas principais.

Os dados experimentais foram ajustados a uma equação polinomial de segunda e quarta ordem para a tensão não confinada e de quinta ordem para as tensões normais máximas. Os ajustes apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior coeficiente de determinação para as curvas das tensões não

confinadas foi 1 e o menor 0,91. Para as tensões máximas não houve diferenças entre o maior valor do coeficiente de determinação e o menor valor sendo todos 1. Isso sugere que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento das tensões não confinadas e tensões máximas em função do tempo, mas são específicos para as condições em que foram experimentados.

Com os resultados das tensões normal máximas de consolidação ( $\sigma_1$ ) e das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ), determinou-se o índice de fluxo, ou seja, o tipo de fluxibilidade que pode ocorrer no produto. De acordo com a classificação de JENIKE, (1964) verificou-se que os índices de fluxo (Figura 44) para todos os tempos estudados, tanto o de cisalhamento instantâneo quanto em função do tempo foi encontrado o intervalo de  $4 < IF < 10$ , sendo classificado como um produto de fácil fluidez, estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, que resulta na retenção do fluxo, e do efeito tubo, processo no qual se forma um tubo ao longo de todo corpo do silo originando zonas estáticas próximas às paredes do silo, portanto a bentonita não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente nas condições estudadas. Aqui o ajuste foi obtido através de uma função polinomial de terceira ordem, onde o índice de fluxo é a variável dependente e o tempo a variável independente. O valor do coeficiente de determinação foi de 0,92, logo a aproximação polinomial mostrou ser adequada, aceitando-se o modelo observando(Figura 44) a superfície de resposta representada pela linha de contorno.

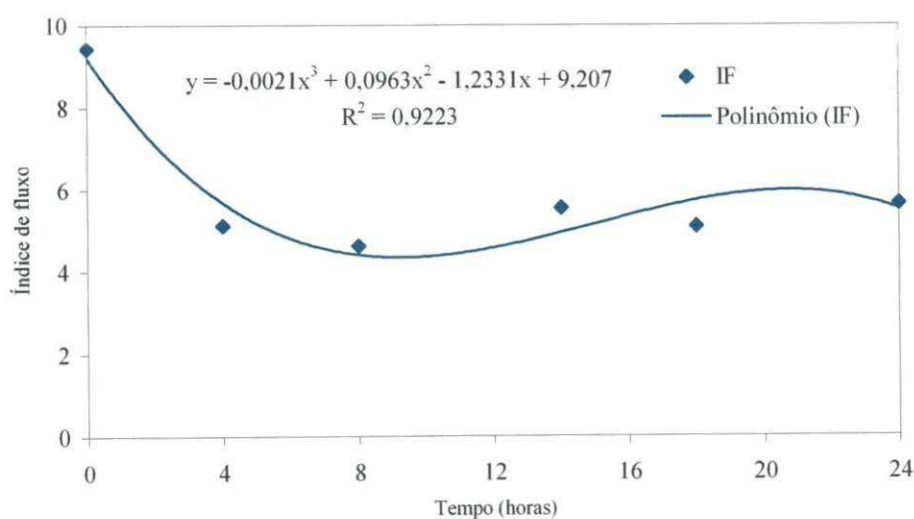


Figura 44 – Curva da escoabilidade para o teor de 10%

Os valores para coesão foram determinados e observa-se que quanto maior foi a tensão normal maior foi a coesão do produto. Observa-se na Figura 45, que no tempo de

4 horas, a coesão do nível de carga de 7,0 kN ficou bem próxima a do nível de carga de 10,0 kN, e no tempo de 24 horas a coesão nos três níveis de carga também foram bastante próximas, sendo que, enquanto a carga de 10,0 kN continuou com a maior coesão, a da carga de 7,0 kN e de 5,0 kN foram bem semelhantes este comportamento pode ter sido ocasionado pela linearização da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), uma vez que a coesão é a extrapolação da reta do lugar geométrico de deslizamento que intercepta o eixo da tensão de cisalhamento ( $\sigma_c$ ).

Os dados experimentais foram ajustados foi utilizado a função polinomial de terceira ordem, apresentando um valor do coeficiente de determinação igual a 0,98 e um menor valor de 0,90, nota-se que não houve grandes diferenças quanto aos coeficiente de determinação. Portanto os modelos aqui apresentados podem ser utilizados para predição do comportamento da coesão da bentonita, mas são específicos para as condições em que foram experimentados.

Apesar do produto ter característica coesiva e ser higroscópico pode-se afirmar que esta coesão não é suficiente para formação de arcos coesivos, haja vista que já foi classificado como de fluxo fácil de acordo com a proposta de Jenike.

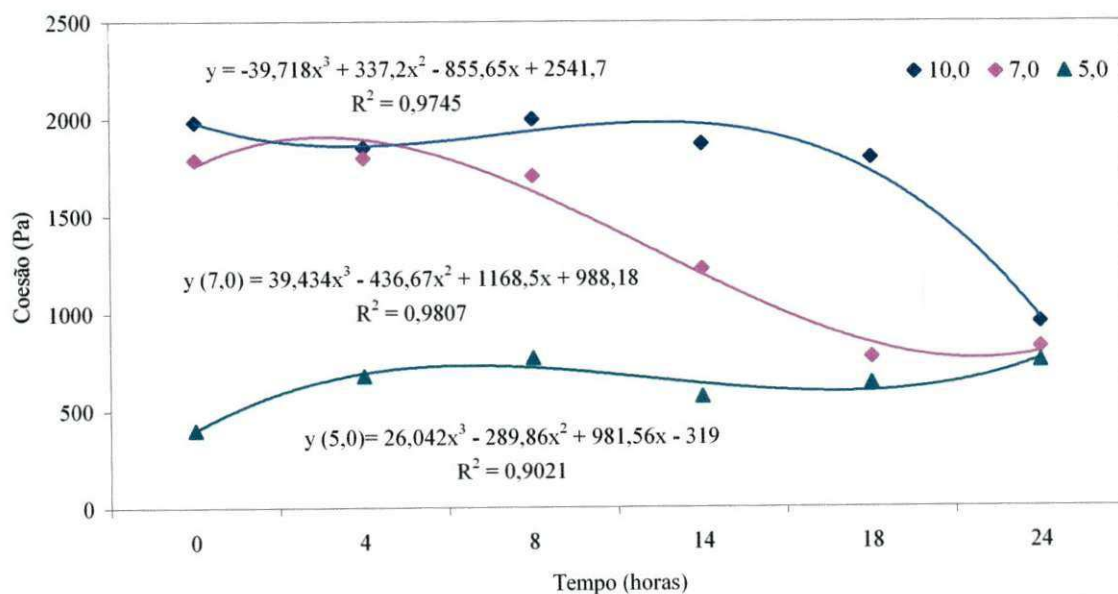


Figura 45 - Curvas de coesão para teor de umidade de 10%

#### 4.5 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo -TU – 10%

Os ângulos de atrito com a parede foram determinados, seguindo a metodologia de BMBH (1985). Os materiais de parede utilizados para os ensaios instantâneo ( $t = 0$ hs) são os apresentados Tabela 12 e Figura 46, com seus respectivos ângulos.

Tabela 12 – Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 10%.

Tipos de Paredes	Teor de Umidade 10 %	
	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$
Alumínio	23,6°	25°
Acrílico	22°	23°
Aço Liso	23,2°	24°
Aço Rugoso	30°	30°

$\phi_{wu}$  = ângulo de atrito com a parede superior

$\phi_{wl}$  = ângulo de atrito com a parede inferior

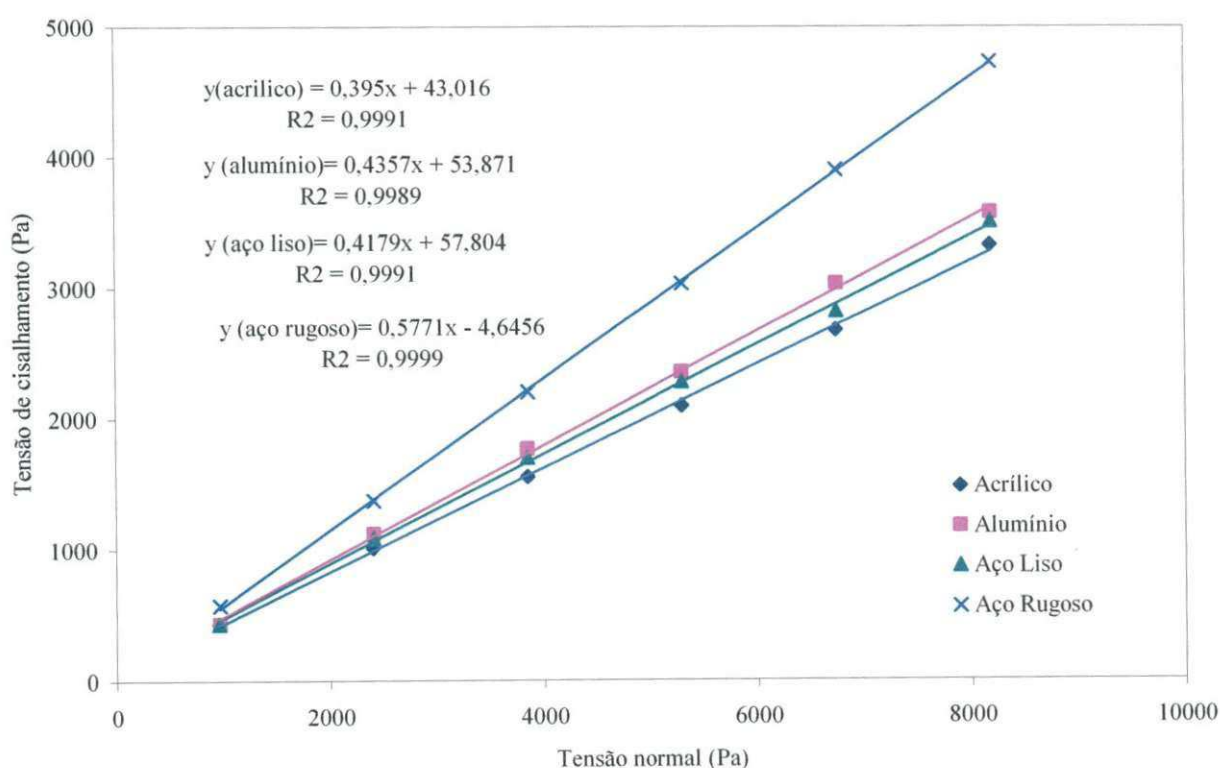


Figura 46 - Ângulo de atrito ( $\phi_w$ ) médio da bentonita com os materiais de parede estudados

Observando os valores e as curvas esboçadas na Figura 46 dos ângulos de atrito da parede percebe-se que para os materiais de parede lisa, como alumínio, acrílico e aço liso apresentaram pequenas diferenças, o mesmo ocorrendo para o material de parede

rugosa, aço rugoso. A diferença entre o limite inferior e superior, quando ocorreu, foi no máximo de  $1,4^\circ$  que em termos práticos pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a  $\arctg\phi_w$ .

O material de parede de aço rugoso apresentou valores de ângulos superiores aos materiais de parede lisa. Em virtude destes materiais serem mais ásperos ocorrerá maior força de compressão vertical nas paredes dos silos observando-se desta forma, que os ângulos de atrito do produto com a parede variam de acordo com o material de parede.

Empregou-se uma função linear para todos os tipos de paredes e todos os coeficientes de determinação não apresentaram grandes diferenças. Portanto as equações ajustadas mostraram serem adequados, logo podem ser utilizados.

A partir dos valores dos ângulos de atrito do produto com a parede encontrados e dos efetivos ângulos de atrito, determinou-se as funções fluxo e os fatores fluxo., utilizando o método de Jenike (1964). Observa-se na Figura 47, função fluxo da bentonita para o teor de umidade de 10%. A curva apresentou forma convexa que de acordo com Roberts(1987) para a maioria dos casos, as funções fluxo para produtos coesivos serão convexas. O fator fluxo da tremonha variou de 1,15 a 1,23. Com estes resultados pode-se dimensionar tremonhas para descarga com fluxo de massa.

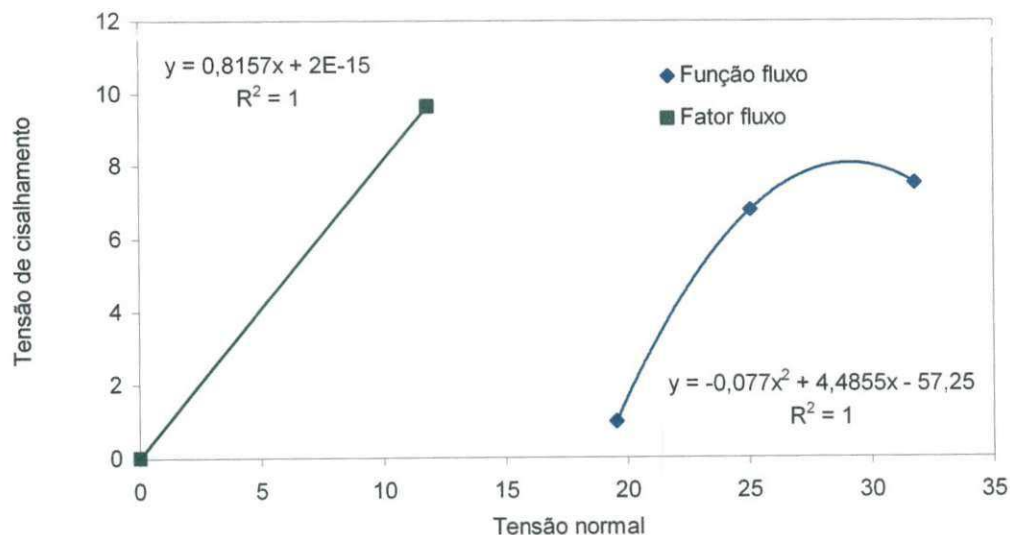


Figura 47 - Curva da função fluxo para o teor de umidade de 10%

A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha ( $\sigma_c$ ). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá valor mínimo que não permitirá a formação de arco coesivo, podendo assim, dimensionar o orifício de descarga para não ocorrer o “arqueamento ou formação de abóbada”. Com os valores do

fator fluxo da tremonha e da função fluxo é possível dimensionar orifício de descarga que permita escoamento do produto de forma contínua e sem apresentar possibilidade de obstrução.

Como não houve interceptação entre a função fluxo e o fator fluxo não foi possível determinar a dimensão do orifício de descarga. A literatura sugere nesses casos dimensionar o orifício de descarga através das dimensões das partículas.

#### 4.6 Teor de umidade de 12%

##### 4.6.1 – Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.

Nas Tabelas 35 a 40 do anexo constam os resultados dos testes de cisalhamento. Os lugares geométricos de deslizamentos foram traçados através da regressão linear os quais estão apresentados nas figuras 109 a 126 do anexo.

##### 4.6.2 – Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais.

A partir das retas dos lugares geométricos de deslizamento (YL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL), determinou-se os ângulos de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), além das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ) e tensões máximas principais ( $\sigma_1$ ). Os valores dos ângulos de atrito interno e efetivo estão dispostos na Tabela 13 e Figuras 48 a 50.

Tabela 13 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo

Tempo (horas)	Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)	
	$\phi_{iu}$	$\phi_{il}$	$\phi_{eu}$	$\phi_{el}$
0	35,4°	32,3°	42,6°	42,0°
4	38,2°	36,6°	42,5°	41,2°
8	38,5°	32,5°	43,1°	39,4°
14	39,3°	35,6°	43,2°	41,1°
18	36,4°	34,4°	41,8°	40,1°
24	40,4°	34,4°	43,1	41,2°

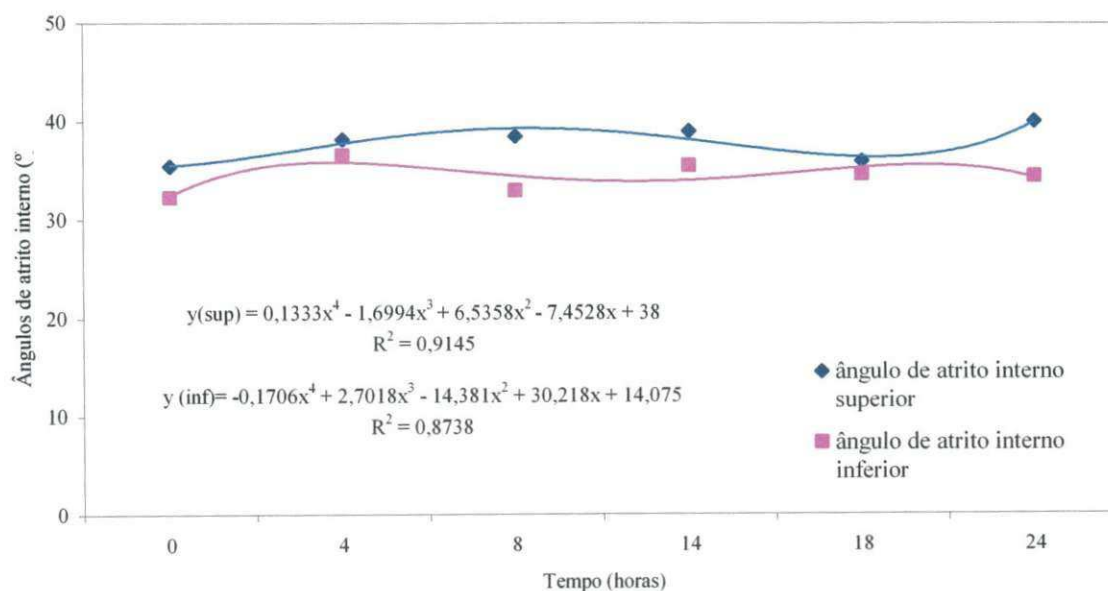
 $\phi_{iu}$  = ângulo de atrito superior $\phi_{eu}$  = efetivo ângulo de atrito superior $\phi_{il}$  = ângulo de atrito inferior $\phi_{el}$  = efetivo ângulo de atrito inferior

Figura 48 - Ângulos de atrito interno inferiores e superiores para a bentonita

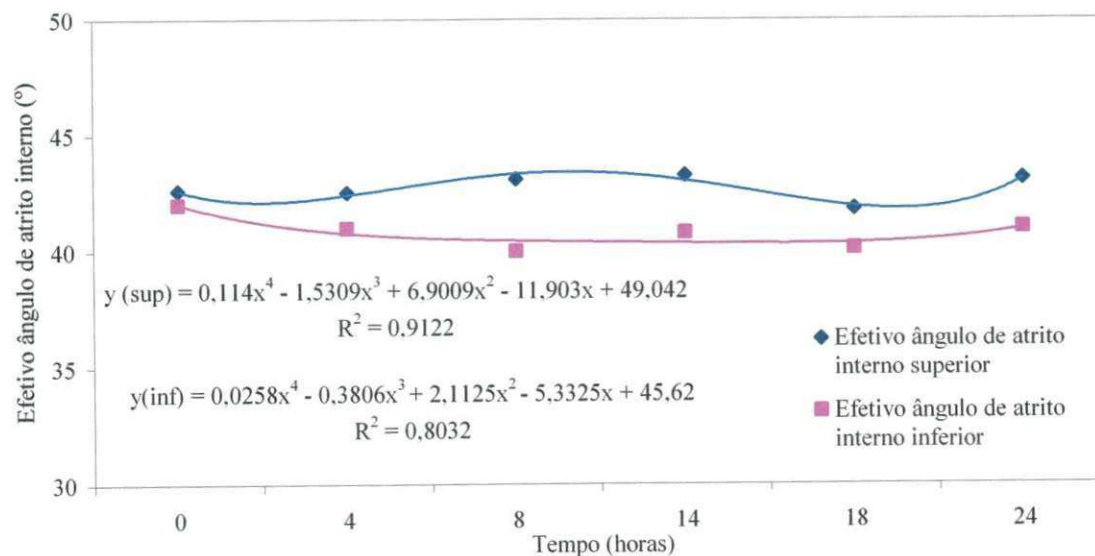


Figura 49 - Efetivos ângulos de atrito interno inferiores e superiores para a bentonita

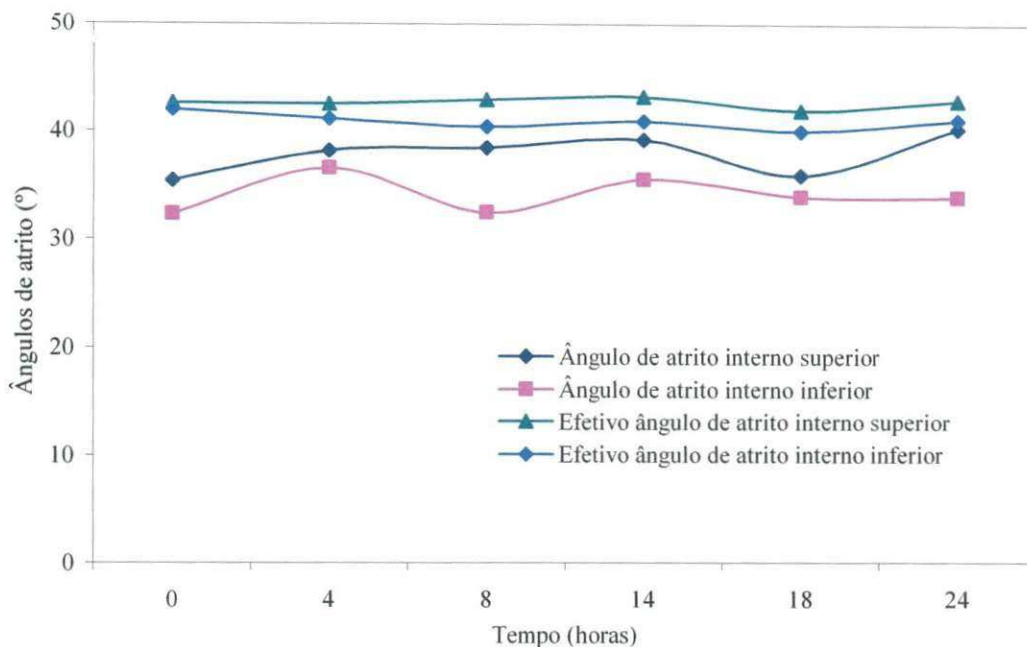


Figura 50- Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos

Observando a Tabela 13 e Figuras 48 a 50, percebe-se que os ângulos de atrito interno e efetivo ângulos de atrito interno variaram num intervalo de 35,4° a 32,3° e 42,6° a 42,00°, respectivamente, para o tempo de cisalhamento instantâneo(0h) e de 32,5° a 40,4° e 39,4° a 43,2°, para os tempos de consolidação (4 a 24h). Os ângulos de atrito interno apresentaram uma variação não superior 3,5° para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que para o tempo de consolidação a variação não ultrapassou 6°. O efetivo ângulo de atrito interno apresentou uma variação de 0,6°, para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que as variações entre os ângulos inferiores e superiores do efetivo ângulo de atrito interno do tempo de consolidação não ultrapassaram 4°. Nota-se que a diferença entre os valores dos efetivos ângulos de atrito interno obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo em relação aos obtidos no tempo de consolidação foram pequenas, logo a influência do tempo teve pouca importância. Como a máquina de Jenike apresenta desvantagem, com relação ao seu manuseio, pois se mostra sensível a interferência do operador no momento dos testes, então este fato poderá ter ocasionado estas diferenças De acordo com CALIL JUNIOR (1990), essas variações não são representativas, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados.

Os ajustes foram por meio de regressão polinomial de quarta ordem tanto para os ângulos de atrito interno quanto para os efetivo ângulos de atrito interno. As equações ajustadas apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. Nota-se



que para os ângulos de atrito interno o maior coeficiente de determinação foi de 0,91 e o menor de 0,87. Para os efetivos ângulos de atrito interno o maior valor do coeficiente de determinação foi de 0,91 e o menor valor 0,80. Como não houve grandes diferenças sugere-se que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento dos ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno em função do tempo.

Os valores para as tensões não confinadas e tensões máximas principais estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores das tensões não confinadas e tensões máximas

Tempo (horas)	Tensão não confinada (kPa)			Tensão máxima crítica (kPa)		
	Cargas (kN)			Cargas (kN)		
	10	7	5	10	7	5
0	11,54	7,21	4,67	32,66	24,73	17,82
4	4,13	3,70	3,91	32,75	23,67	16,55
8	8,41	4,10	3,71	32,93	22,50	17,31
14	6,62	5,65	3,00	33,68	27,11	17,94
18	7,16	4,37	4,20	33,80	24,30	18,23
24	9,02	4,54	2,16	34,79	26,53	18,84

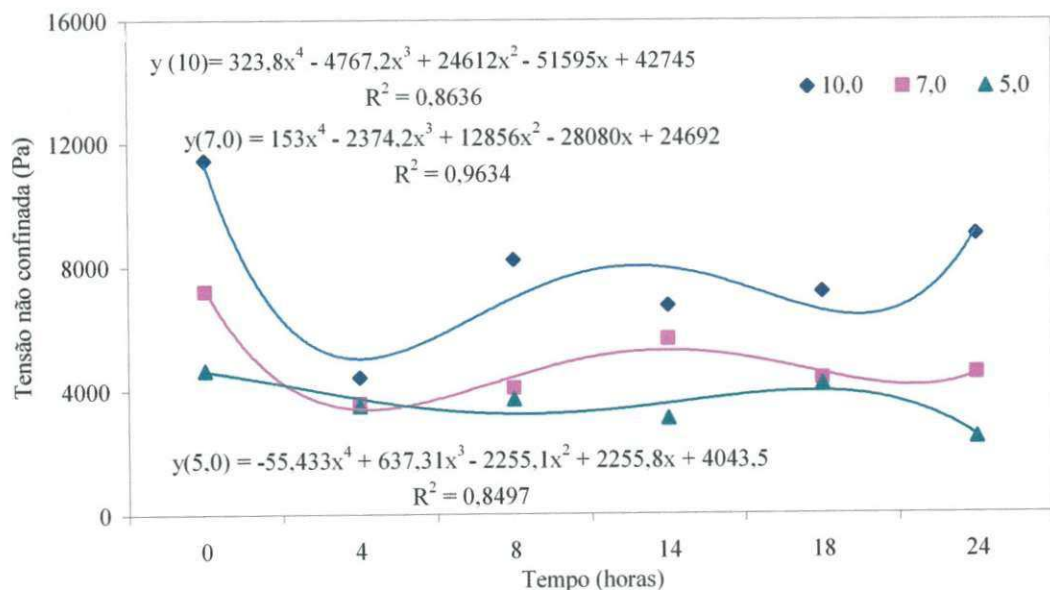


Figura 51- Curvas das tensões não confinadas para a bentonita

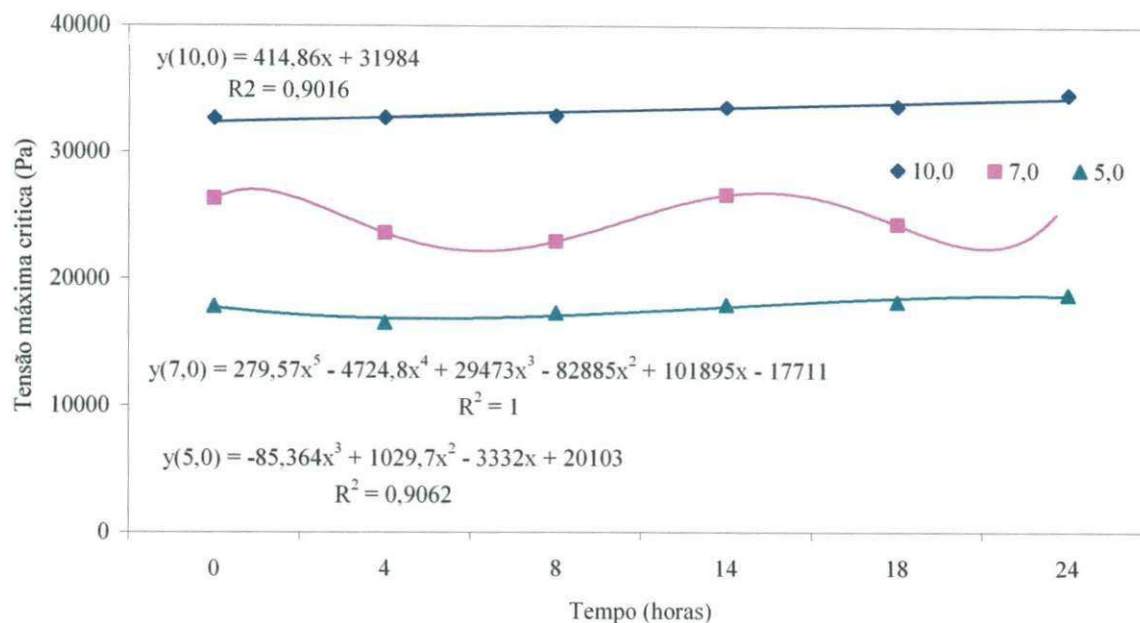


Figura 52- Curvas das tensões máximas críticas para a bentonita

Observando os valores das tensões não confinadas e tensões máximas em função das cargas (Tabela 14 e Figuras 51-52), observa-se que os valores das tensões não confinadas apresentaram maiores variações do que as tensões máximas. Apesar desta variação percebe-se que quanto maior foi a carga aplicada maior foram as tensões. Percebe-se também em relação ao tempo de consolidação (4 a 24hs) que as tensões aumentaram com o tempo, isto pode ser explicado pelo fato de que a bentonita ficou gradualmente mais compacta quando submetida a uma tensão de compressão durante tempo de armazenamento. Como ficou mais compacto, houve mais regiões de contato entre as partículas devido ao re-arranjo das partículas e da deformação plástica.

O ajuste foi obtido através de uma função polinomial de quarta ordem para a tensão não confinada e linear, terceira e quinta ordem para as tensões normais máximas. As equações matemáticas apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior coeficiente de determinação para as curvas das tensões não confinadas foi 0,96 e o menor 0,84. Para as tensões máximas o maior valor do coeficiente de determinação foi 1 e o menor valor 0,90. Como não houve diferenças discrepantes pode-se usar as equações para descrever o comportamento das tensões não confinadas e tensões máximas em função do tempo

Com os resultados das tensões máximas de consolidação ( $\sigma_1$ ) e das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ), determinou-se o índice de fluxo, ou seja, o tipo de escoabilidade do produto que pode ocorrer no silo. De acordo com a classificação de Jenike (1964),

verificou-se que os índices de fluxo (Figura 53) para o tempo de cisalhamento instantâneo (0 horas) se encontrou no intervalo de  $2 < IF < 4$ , sendo classificado como fluxo coesivo, enquanto para os tempos de consolidação o intervalo foi de  $4 < IF < 10$ , classificado como um produto de fácil fluidez. Estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, a bentonita para o teor de umidade de 12%, não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente.

O ajuste adotado foi de função polinomial de terceira ordem. A regressão forneceu uma equação que descreveu o relacionamento de duas variáveis, o índice de fluxo e o tempo. Sendo o índice de fluxo a variável dependente e o tempo a variável independente. O valor do coeficiente de determinação foi de 0,88, logo a aproximação polinomial mostrou ser adequada, aceitando-se o modelo observando (Figura 53) a superfície de resposta representada pela linha de contorno.

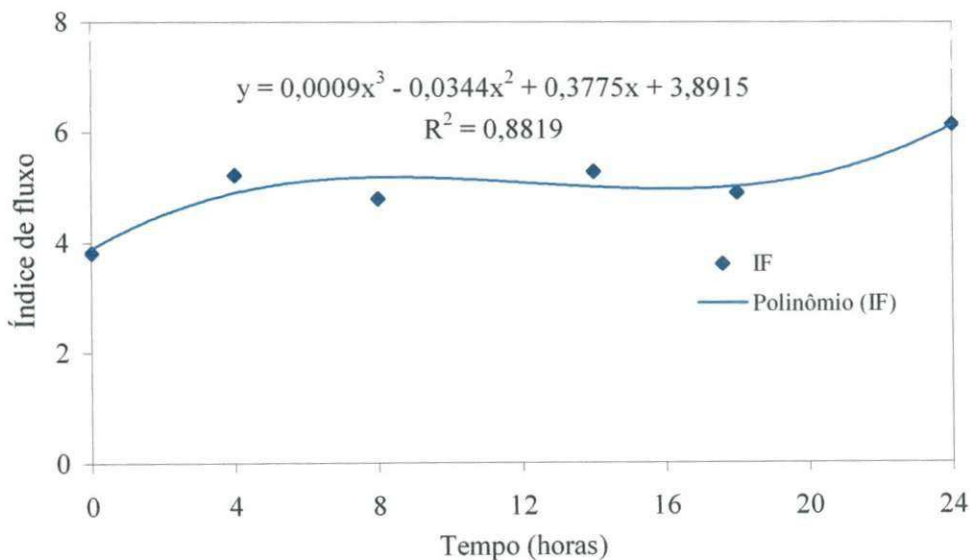
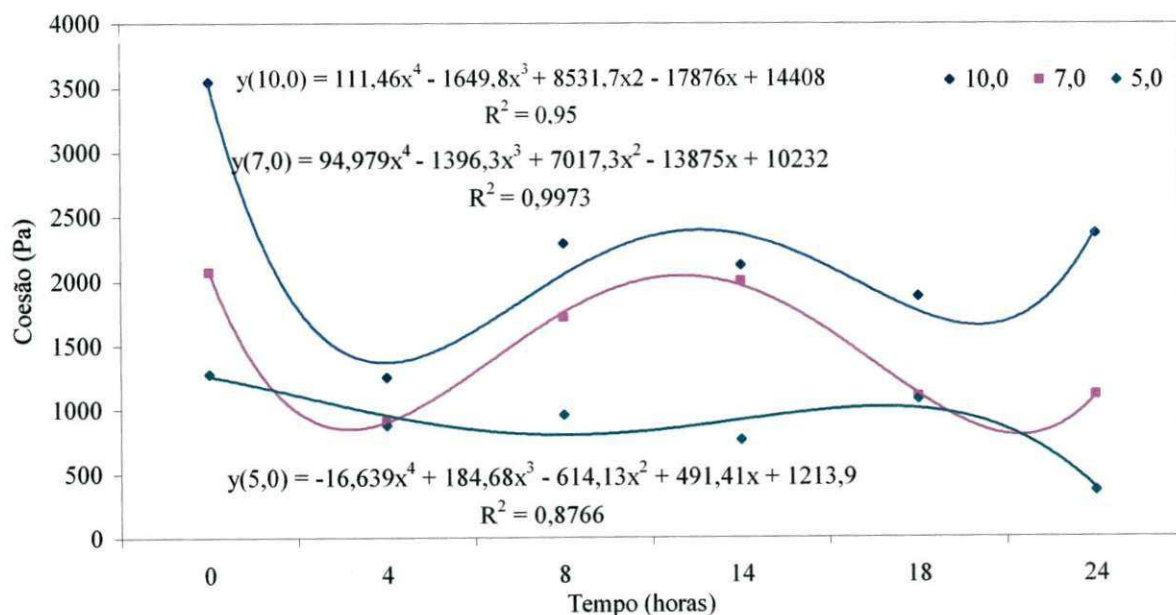


Figura 53 - Curva de escoabilidade para o teor de umidade de 12%

Os valores para coesão foram determinados e observa-se na Figura 54 que quanto maior foi a carga maior foi a coesão do produto. Percebe-se que no tempo de 4 horas, houve praticamente a mesma coesão em todos os níveis de carga, enquanto que no tempo de 18 horas a coesão do nível de carga de 7,0 e 5,0kN foram semelhantes, isto pode ter sido ocasionado pela linearização da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), pois a coesão é a extrapolação da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), que intercepta o eixo da tensão não confinada ( $\sigma_c$ ).

Os dados experimentais foram ajustados a uma função polinomial de quarta ordem, apresentando uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior valor do coeficiente de determinação igual a 0,99 e o menor valor de 0,87, nota-se que não houve grandes diferenças quanto aos coeficiente de determinação. Portanto os modelos aqui apresentados podem ser utilizados para predição do comportamento da coesão da bentonita, mas são específicos para as condições em que foram experimentados.

Apesar do produto ter característica coesiva e ser higroscópico pode-se afirmar que esta coesão não é suficiente para formação de arcos coesivos, haja vista que já foi classificado como de fluxo fácil de acordo com a proposta de Jenike.



Figuras 54 - Curvas de coesão para teor de umidade de 12%

#### 4.7 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo – TU 12%

Os ângulos de atrito com a parede foram determinados, seguindo a metodologia de Milani. Os materiais de parede disponíveis para os ensaios só permitem a utilização dos mesmos para os ensaios instantâneos ( $t = 0$ hs). Os resultados estão dispostos na Tabela 15 e Figura 55.

Tabela 15 – Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 12%.

Tipos de Paredes	Teor de Umidade 12 %	
	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$
Alumínio	22,0°	22,5°
Acrílico	24,2°	25,6°
Aço Liso	23,7°	24,4°
Aço Rugoso	28,5°	29,4°

$\phi_{wu}$  = ângulo de atrito com a parede superior

$\phi_{wl}$  = ângulo de atrito com a parede inferior

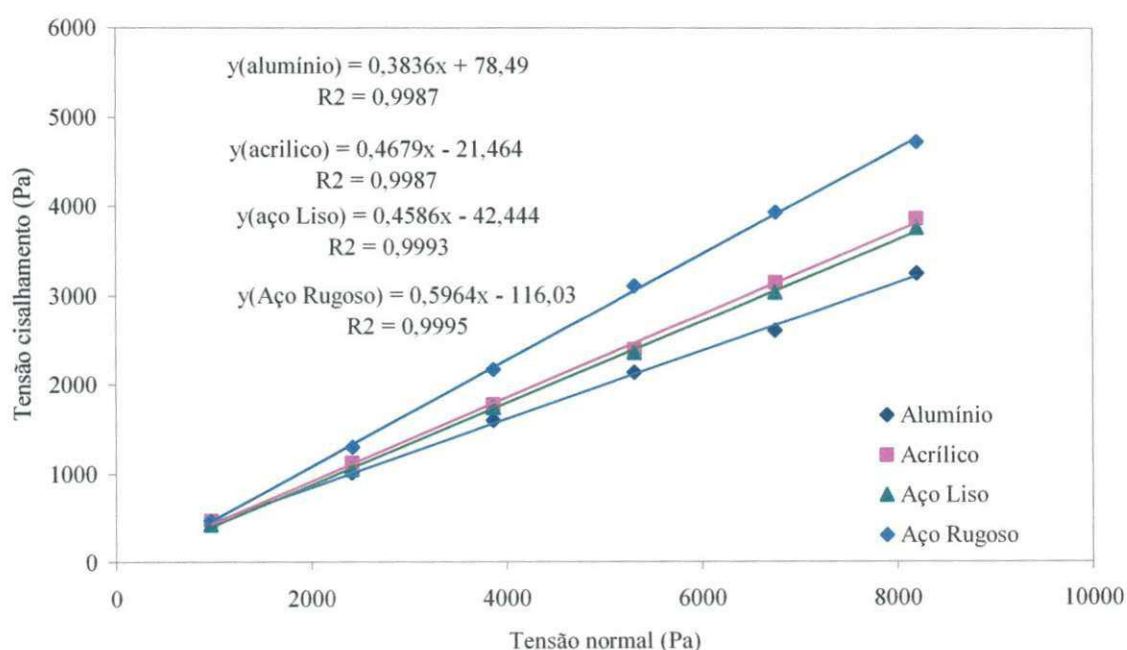


Figura 55 – Ângulos de atrito do produto com a parede

Observando os valores dos ângulos de atrito do produto com a parede na Figura 55 percebe-se que para os materiais de parede lisa, como alumínio, acrílico e aço liso as variações entre os limites inferiores e superiores apresentaram pequenas diferenças, o mesmo ocorrendo para o material de parede rugosa, aço rugoso. A diferença entre o limite inferior e superior, quando ocorreu, foi no máximo de 1,4° que em termos práticos pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a  $\arctg\phi_w$ .

Empregou-se uma função linear para todos os tipos de paredes e todos os coeficientes de determinação não apresentaram grandes diferenças. Portanto as equações ajustadas mostraram serem adequados, logo podem ser utilizados.

A partir dos valores dos ângulos de atrito do produto com a parede encontrados e dos efetivos ângulos de atrito, determinou-se as funções fluxo e os fatores fluxo., utilizando o método de Jenike (1964). Observa-se na Figura 56, a função fluxo da bentonita para o teor de umidade de 12%. A curva apresentou forma de linhas retas que de acordo com Roberts (1987) para a maioria dos casos, as funções fluxo para produtos coesivos serão convexas ou linhas retas. O fator fluxo da tremonha variou de 1,13 a 1,19. Com estes resultados pode-se dimensionar tremonhas para descarga com fluxo de massa.

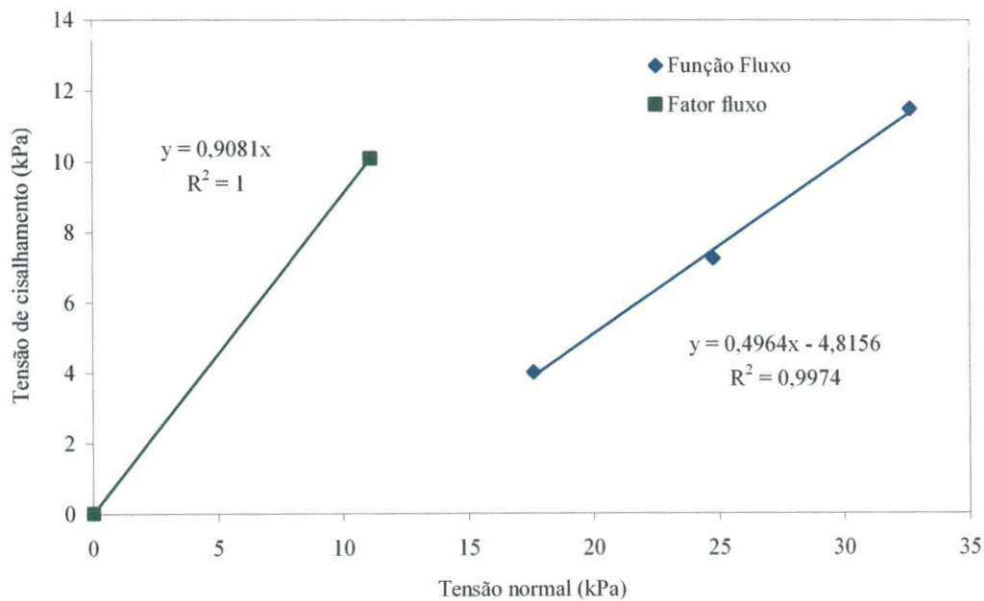


Figura 56 – Função fluxo para o teor de umidade de 12%

A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha ( $\sigma_c$ ). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco coesivo, podendo assim, dimensionar o orifício de descarga para não ocorrer o “arqueamento ou formação de abóbada”. Com os valores do fator fluxo da tremonha e da função fluxo é possível dimensionar orifício de descarga que permita escoamento do produto de forma contínua e sem apresentar possibilidade de formação de obstrução.

Como não houve interceptação entre a função fluxo e o fator fluxo não foi possível determinar a dimensão do orifício de descarga. A literatura sugere nesses casos dimensionar o orifício de descarga através das dimensões das partículas.

## 4.8 Teor de umidade de 14%

### 4.8.1 – Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.

Nas Tabelas 41 a 46 do anexo constam os resultados dos testes de cisalhamento. Os lugares geométricos de deslizamentos foram traçados através da regressão linear os quais estão apresentados nas figuras 127 a 144 do anexo.

### 4.8.2 – Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais.

A partir das retas dos lugares geométricos de deslizamento (YL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL), determinou-se os ângulos de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), além das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ) e tensões máximas principais ( $\sigma_1$ ). Os valores dos ângulos de atrito interno e efetivo estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo

Tempo (horas)	Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)	
	$\phi_{iu}$	$\phi_{il}$	$\phi_{eu}$	$\phi_{el}$
0	34,1°	29,6°	45,1°	42,3°
4	35,2°	32,3°	41,5°	41,2°
8	37,2°	33,1°	41,8°	40,5°
14	41,5°	38,3°	45,5°	43,3°
18	35,1°	33,4°	41,5°	42,3°
24	39,2°	38,4°	43,3°	44,7°

$\phi_{iu}$  = ângulo de atrito superior       $\phi_{eu}$  = efetivo ângulo de atrito superior  
 $\phi_{il}$  = ângulo de atrito inferior       $\phi_{el}$  = efetivo ângulo de atrito inferior

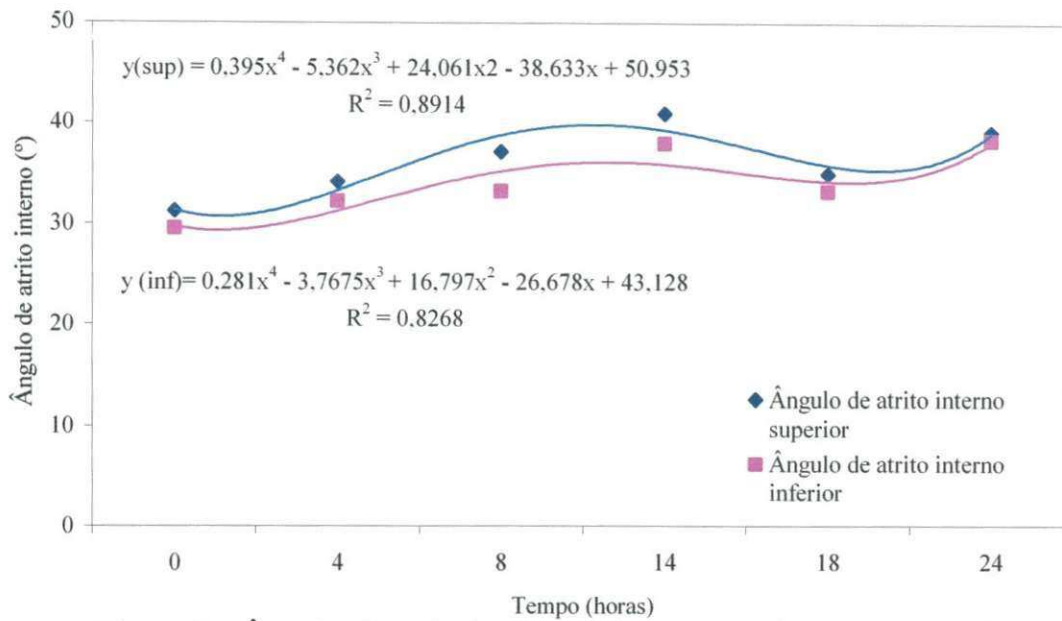


Figura 57- Ângulos de atrito internos inferior e superior para bentonita

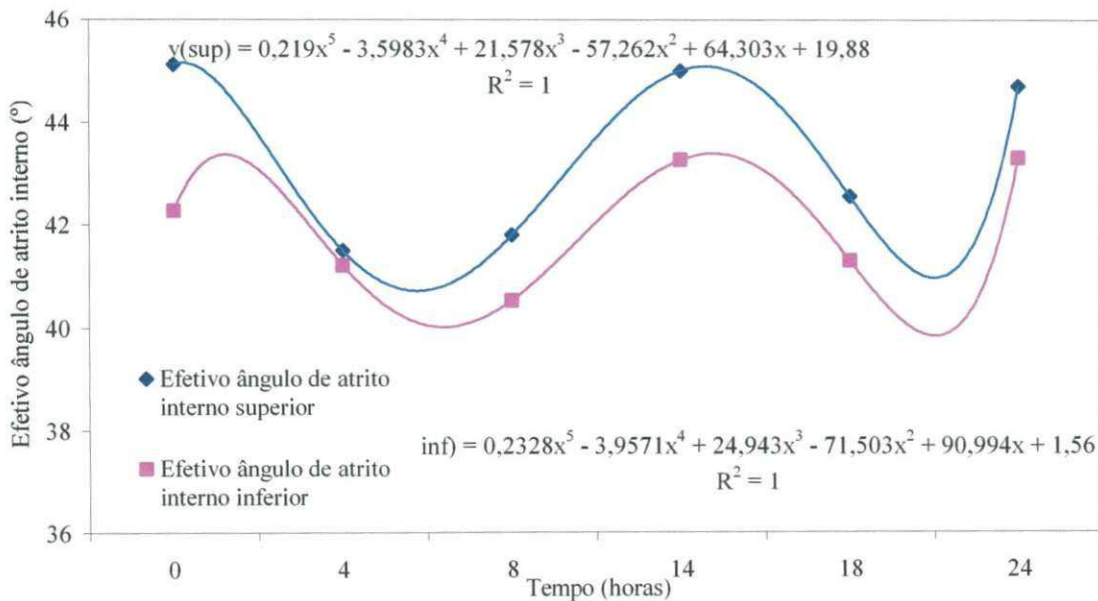


Figura 58 - Efetivos ângulos de atrito interno superior e inferior para bentonita

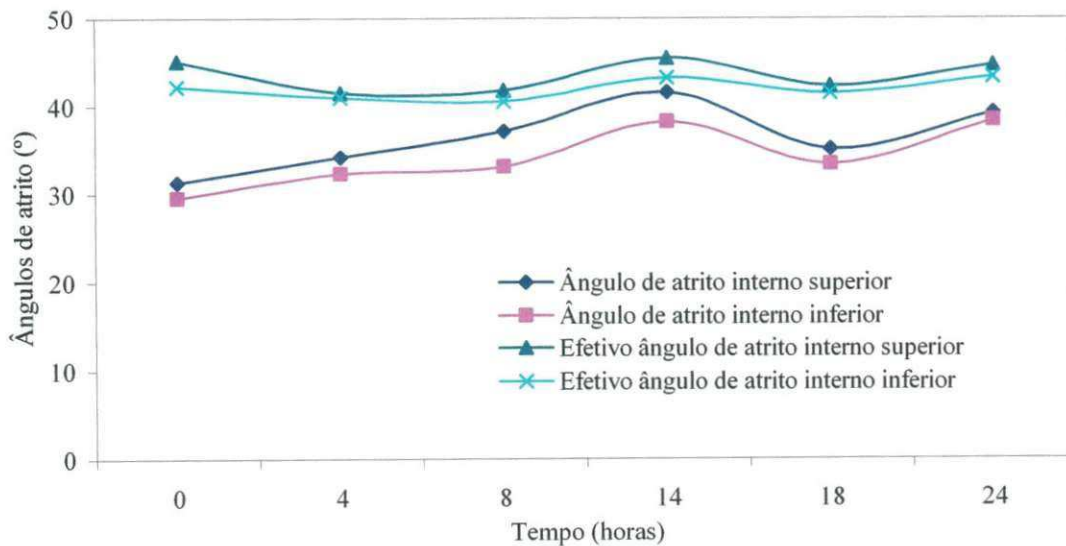


Figura 59- Curva comparativa dos ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito internos



Observando a Tabela 16 e as Figuras 57 a 59, percebe-se que os ângulos de atrito interno e efetivo variaram num intervalo de  $29,6^\circ$  a  $34,1^\circ$  e  $42,3^\circ$  a  $45,1^\circ$ , respectivamente, para o tempo de cisalhamento instantâneo (0h) e de  $32,3^\circ$  a  $41,5^\circ$  e  $40,5^\circ$  a  $45,5^\circ$ , para os tempos de consolidação (4 a 24h). O ângulo de atrito interno apresentou uma variação não superior a  $5^\circ$  para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que para o tempo de consolidação a variação não ultrapassou  $4,1^\circ$ . O efetivo ângulo de atrito interno apresentou uma variação não superior a  $3^\circ$ , para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que as variações entre os ângulos inferiores e superiores do efetivo ângulo de atrito interno do tempo de consolidação não ultrapassaram  $2,2^\circ$ . Nota-se que a diferença entre os valores dos efetivos ângulos de atrito interno obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo em relação aos obtidos no tempo de consolidação foram pequenas, logo a influência do tempo teve pouca importância. Como a máquina de Jenike apresenta desvantagem, com relação ao seu manuseio, pois se mostra sensível a interferência do operador no momento dos testes, então este fato poderá ter ocasionado estas diferenças. De acordo com CALIL JUNIOR (1990), essas variações não são representativas, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados.

Observa-se que os valores relativos aos ângulos são consistentes uma vez que tanto para o tempo de cisalhamento instantâneo (0h) quanto para o tempo de consolidação (4 a 24h), segundo CALIL JR. (1997), obedeceu-se a seguinte regra: os efetivos ângulos de atrito interno (inferiores e superiores) apresentaram valores superiores aos ângulos de atrito interno (inferiores e superiores), em todos os tempos estudados.

Os ajustes foram obtidos por meio de regressão polinomial de quarta ordem para os ângulos de atrito interno e de quinta ordem para os efetivos ângulos de atrito interno. As equações ajustadas apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. Nota-se que para os ângulos de atrito interno o maior coeficiente de determinação foi de 0,89 e o menor de 0,82. Para os efetivos ângulos de atrito interno o valor do coeficiente de determinação foi de 1. Como não houve grandes diferenças sugere-se que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento dos ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno em função do tempo.

Tal ajuste foi o que melhor representou o comportamento das propriedades estudadas para a bentonita com 14% de teor de umidade nas condições em que foram realizados os testes

Os valores para as tensões não confinadas e tensões máximas principais estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores das tensões não confinadas e tensões máximas

Tempo (horas)	Tensão não confinada (kPa)			Tensão máxima crítica (kPa)		
	Cargas (kN)			Cargas (kN)		
	10	7	5	10	7	5
0	11,47	9,53	6,71	30,73	22,73	17,00
4	8,50	7,05	4,25	31,67	21,71	17,53
8	9,09	3,68	3,81	31,68	23,44	16,10
14	3,34	6,44	2,81	33,14	24,07	18,18
18	8,53	6,16	4,24	30,60	23,01	16,71
24	6,56	6,07	3,18	33,47	24,76	18,12

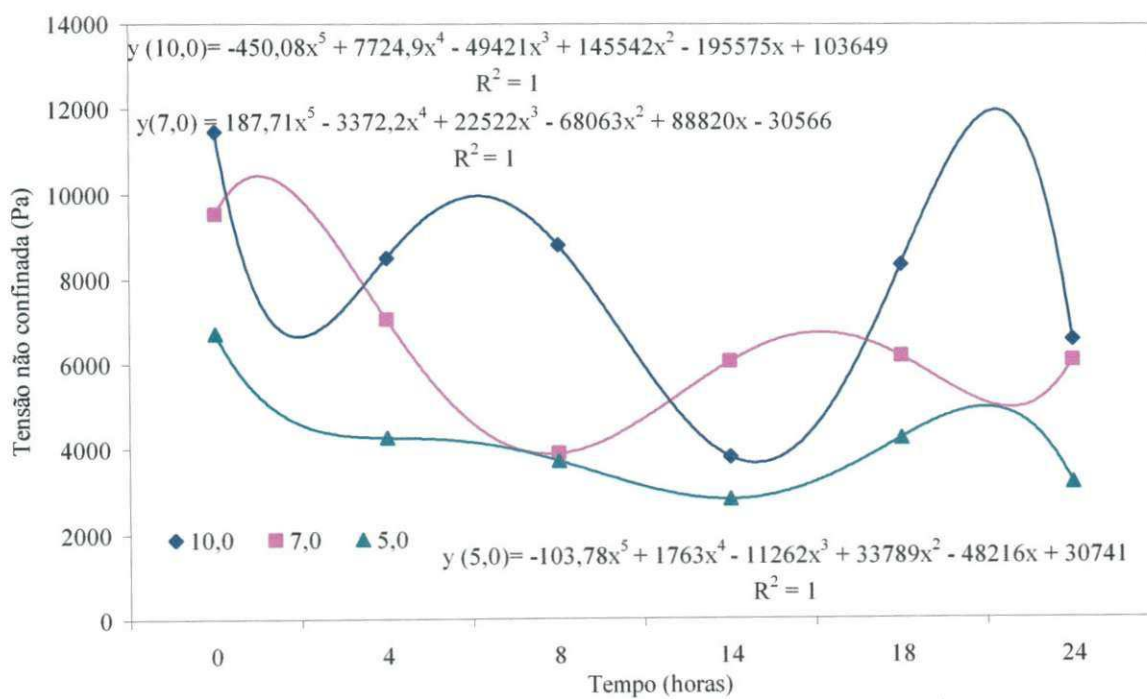


Figura 60 - Curvas das tensões não confinadas para a bentonita

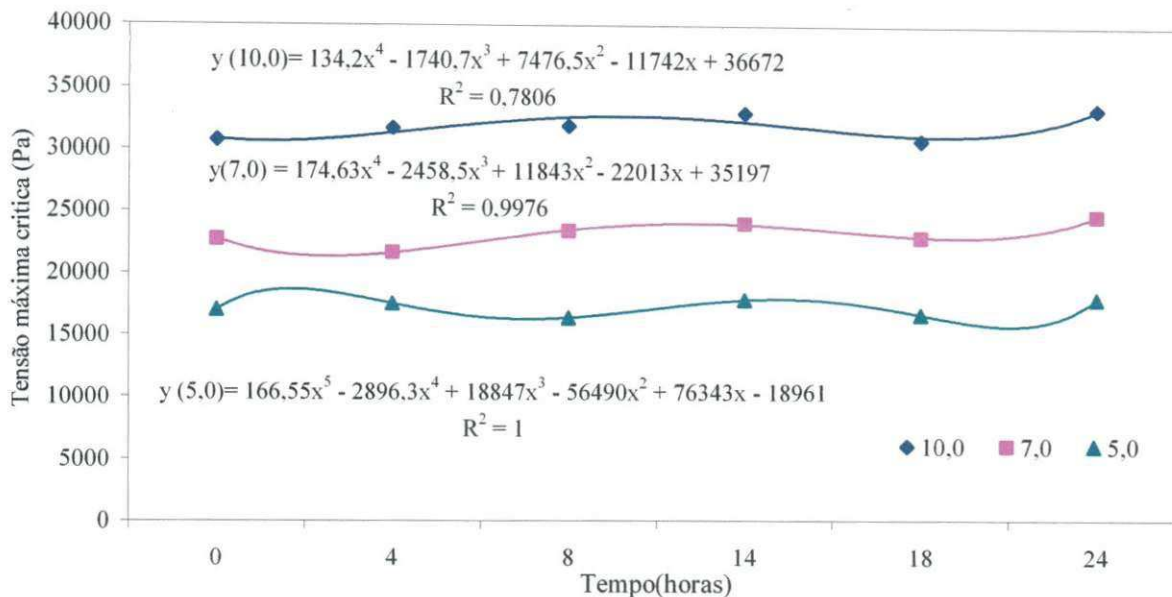


Figura 61-- Curvas das tensões máximas críticas para a bentonita

Observando os valores das tensões não confinadas e tensões normal máximas em função das cargas (Tabela 17 e Figura 60 e 61), percebe-se que os valores das tensões não confinadas apresentaram maiores variações do que as tensões normais máximas. Apesar desta variação percebe-se que quanto maior foi a carga aplicada maior foram as tensões. Percebe-se também em relação ao tempo de consolidação (4 a 24hs) que as tensões máximas aumentaram com o tempo, isto pode ser explicado pelo fato de que a bentonita ficou gradualmente mais compacta quando submetida a uma tensão de compressão durante tempo de armazenamento. Como ficou mais compacto, houve mais regiões de contato entre as partículas devido ao re-arranjo das partículas e da deformação plástica.

Os ajustes foram obtidos utilizando uma função polinomial de quinta ordem para as tensões não confinadas em função do tempo e de quarta e quinta ordem para as tensões máximas críticas em função do tempo. As equações apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. O coeficiente de determinação para as curvas das tensões não confinadas foi 1 para todas as equações. Para as tensões máximas o maior valor do coeficiente de determinação foi 1 e o menor valor 0,78. Como não houve diferenças discrepantes pode-se usar as equações para descrever o comportamento das tensões não confinadas e tensões máximas em função do tempo.

Com os resultados das tensões máximas de consolidação ( $\sigma_1$ ) e das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ), determinou-se o índice de fluxo, ou seja, o tipo de escoabilidade que pode ocorrer no produto. De acordo com a classificação de JENIKE (1964), verificou-se

que os índices de fluxo (Figura 62 ) para o tempo de cisalhamento instantâneo (0 horas) se encontrou no intervalo de  $2 < IF < 4$ , sendo classificado como fluxo coesivo, enquanto para os tempos de consolidação o intervalo encontrado foi de  $4 < IF < 10$ , classificado como um produto de fácil fluidez. Estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, a bentonita para o teor de umidade de 14%, não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente.

O ajuste obtido foi de uma função polinomial de terceira ordem, onde o índice de fluxo é a variável dependente e o tempo a variável independente. O valor do coeficiente de determinação foi de 0,99, logo a aproximação polinomial mostrou ser adequada, aceitando-se o modelo observando (Figura 53) a superfície de resposta representada pela linha de contorno.

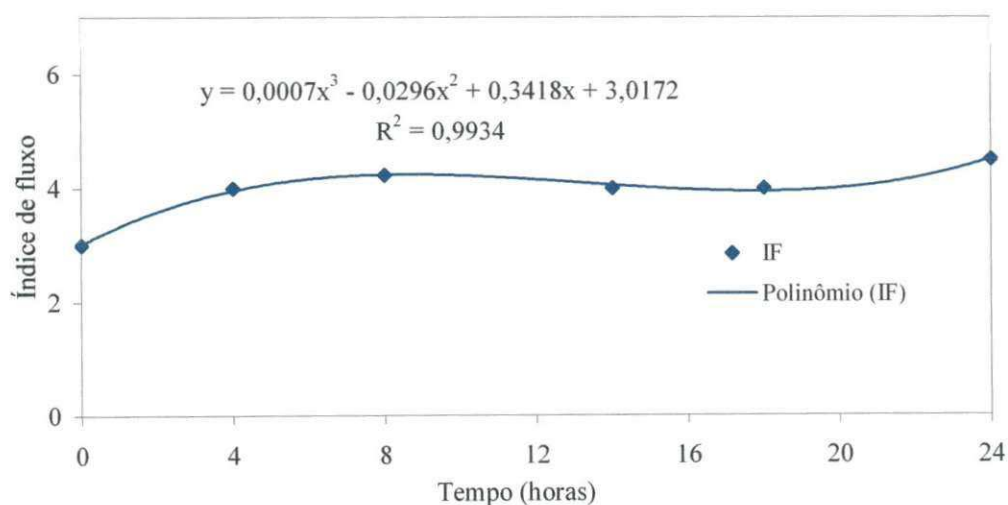


Figura 62 - Curva de escoabilidade para o teor de umidade de 14%

Os valores para coesão foram determinados e observa-se na Figura 63 que para a maior parte dos tempo estudados quanto maior foi a carga maior foi a coesão do produto. Percebe-se que no tempo de 8 horas, a coesão para o nível de carga de 7,0 e 5,0 kN foram bem semelhantes, enquanto que no tempo de 14 horas a coesão para o nível de carga de 7,0 foi superior a coesão do nível de carga de 10,0 kN, estas variações podem ter sido ocasionada pela linearização do lugar geométrico de deslizamento, pois a coesão é a extrapolação da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), que intercepta o eixo da tensão não confinada ( $\sigma_c$ ).

Os dados experimentais foram ajustados a polinomial de quarta e quinta ordem, apresentando uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior valor do coeficiente de determinação foi de 1 e o menor valor de 0,87, nota-se que não houve grandes diferenças quanto aos coeficiente de determinação. Portanto os modelos aqui apresentados podem ser utilizados para predição do comportamento da coesão da bentonita, mas são específicos para as condições em que foram experimentados.

Apesar do produto ter característica coesiva e ser higroscópico pode-se afirmar que esta coesão não é suficiente para formação de arcos coesivos, haja vista que já foi classificado como de fluxo fácil de acordo com a proposta de Jenike.

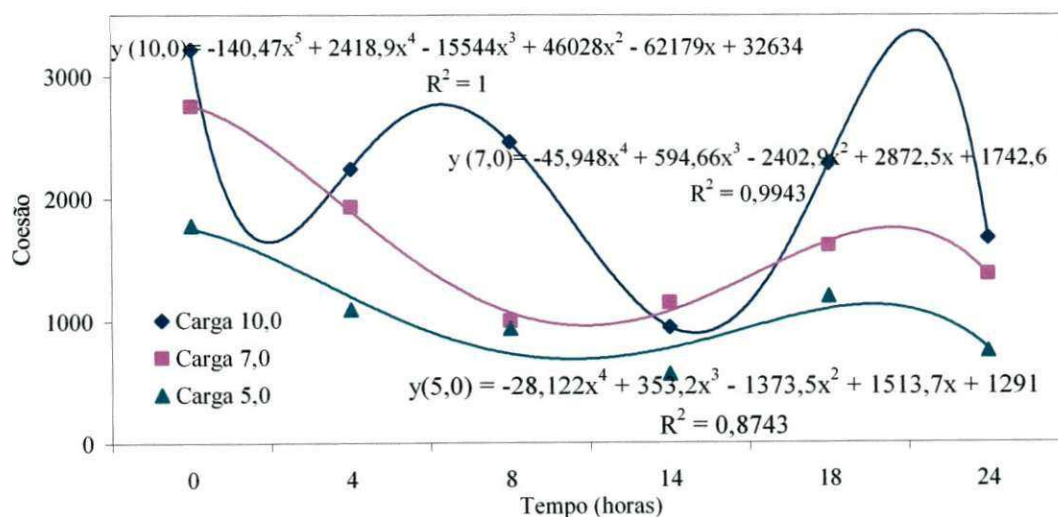


Figura 63 – Curvas da coesão para o teor de umidade de 14%

#### 4.9 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo – TU 14%

Os ângulos de atrito com a parede foram determinados, seguindo a metodologia de Milani. Os materiais de parede disponíveis para os ensaios só permitem a utilização dos mesmos para os ensaios instantâneos ( $t = 0$ hs). Os resultados estão dispostos na Tabela 18 e Figura 64.

Tabela 18 – Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 14%.

Tipos de Paredes	Teor de Umidade 14 %	
	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$
Alumínio	22,6°	22,8°
Acrílico	25,8°	26,5°
Aço Liso	21°	21,2°
Aço Rugoso	30,7°	30,8°

$\phi_{wu}$  = ângulo de atrito com a parede superior

$\phi_{wl}$  = ângulo de atrito com a parede inferior

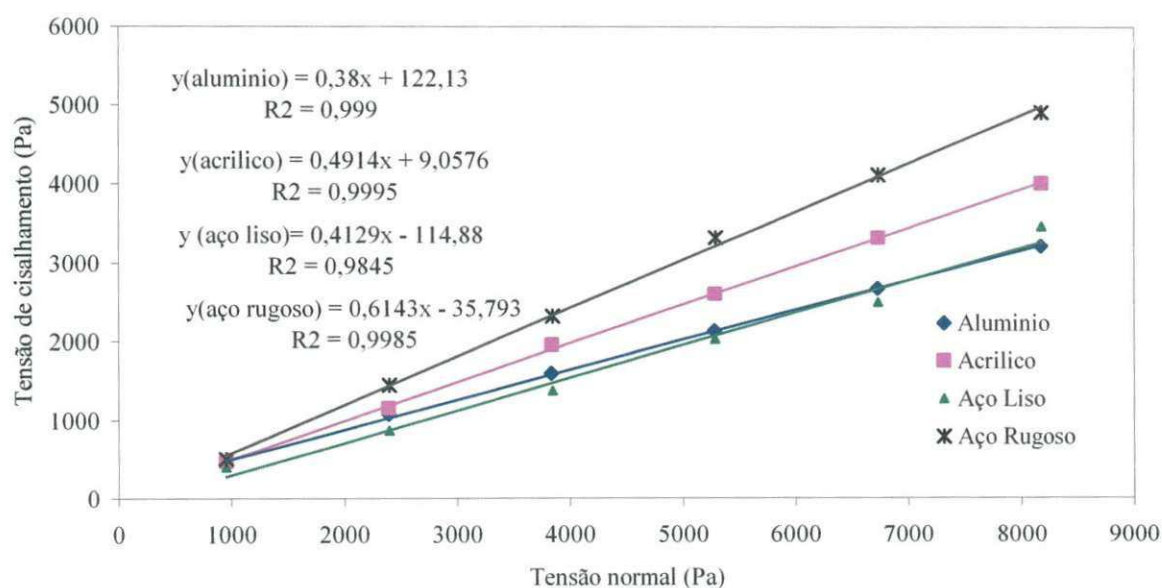


Figura 64 – Ângulo de atrito com a parede o teor de umidade de 14%

Observando os valores dos ângulos de atrito do produto com a parede e a Figura 64 percebe-se que para os materiais de parede lisa, como alumínio, acrílico e aço liso as variações entre os limites inferiores e superiores apresentaram pequenas diferenças, o mesmo ocorrendo para o material de parede rugosa, aço rugoso. A diferença entre o limite inferior e superior, quando ocorreu, foi no máximo de 1° que em termos práticos pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a  $\arctg\phi_w$ .

Empregou-se uma função linear para todos os tipos de paredes e todos os coeficientes de determinação não apresentaram grandes diferenças. Portanto as equações ajustadas mostraram serem adequados, logo podem ser utilizados.

A partir dos valores dos ângulos de atrito do produto com a parede encontrados e dos efetivos ângulos de atrito, determinou-se as funções fluxo e os fatores fluxo, utilizando o método de JENIKE (1964). Observa-se na Figura 65, função fluxo da bentonita para o teor de umidade de 14%. A curva apresentou forma convexa que de acordo com ROBERTS (1987) para a maioria dos casos, as funções fluxo para produtos coesivos serão convexas ou linhas retas. O fator fluxo da tremonha variou de 1,06 a 1,23. Com estes resultados pode-se dimensionar tremonhas para descarga com fluxo de massa.

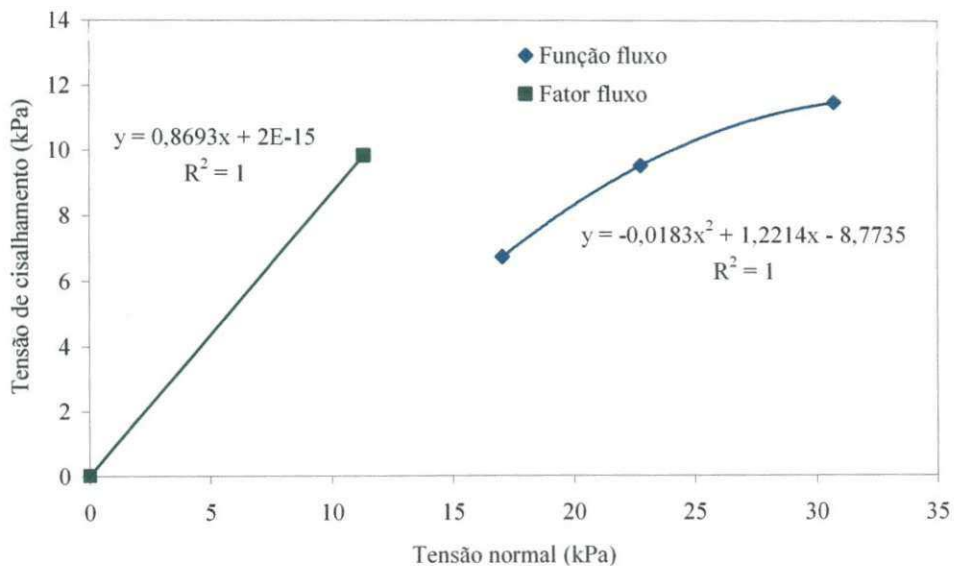


Figura 65 – Função fluxo e fator fluxo para o teor de umidade de 14%

A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha ( $\sigma_c$ ). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco coesivo, podendo assim, dimensionar o orifício de descarga para não ocorrer o “arqueamento ou formação de abóbada”. Com os valores do fator fluxo da tremonha e da função fluxo é possível dimensionar orifício de descarga que permita escoamento do produto de forma contínua e sem apresentar possibilidade de formação de obstrução.

Como não houve interceptação entre a função fluxo e o fator fluxo não foi possível determinar a dimensão do orifício de descarga. A literatura sugere nesses casos dimensionar o orifício de descarga através das dimensões das partículas

#### 4.10 Teor de umidade de 16%

4.10.1 – Determinação das tensões normais e de cisalhamento para a construção do lugar geométrico.

Nas Tabelas 47 a 52 do anexo constam os resultados dos testes de cisalhamento. Os lugares geométricos de deslizamentos foram traçados através da regressão linear os quais estão apresentados nas figuras nas Figuras 145 a 162.

4.10.2 – Determinação dos ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, tensões não confinadas e tensões máximas principais.

A partir das retas dos lugares geométricos de deslizamento (YL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL), determinou-se os ângulos de atrito interno ( $\phi_i$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), além das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ) e tensões máximas principais ( $\sigma_1$ ). Os valores dos ângulos de atrito interno e efetivo estão dispostos na Tabela 19 e Figura 66.

Tabela 19 - Valores dos ângulos de atrito interno e efetivo

Tempo (horas)	Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)	
	$\phi_{iu}$	$\phi_{il}$	$\phi_{eu}$	$\phi_{el}$
0	33,2°	31,0°	43,5°	42,5°
4	35,5°	31,3°	44,8°	41,2°
8	38,2°	32,5°	45,3°	42,5°
14	34,7°	29,4°	43,0°	41,4°
18	37,3°	32,4°	43,2°	40,3°
24	40,4°	34,5°	43,3°	42,2°

$\phi_{iu}$  = ângulo de atrito superior

$\phi_{il}$  = ângulo de atrito inferior

$\phi_{eu}$  = efetivo ângulo de atrito superior

$\phi_{el}$  = efetivo ângulo de atrito inferior



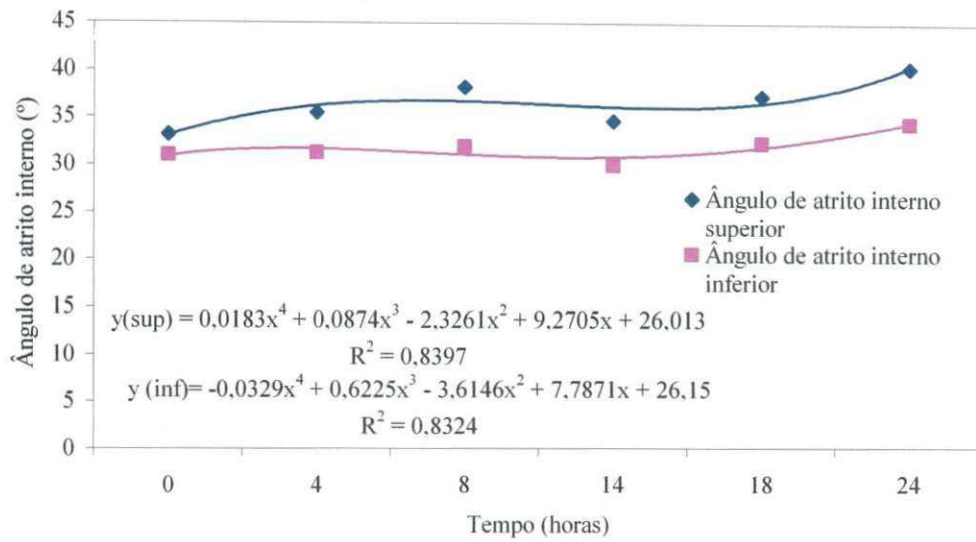


Figura 66 - Curvas dos ângulos de atrito interno superior e inferior para a bentonita

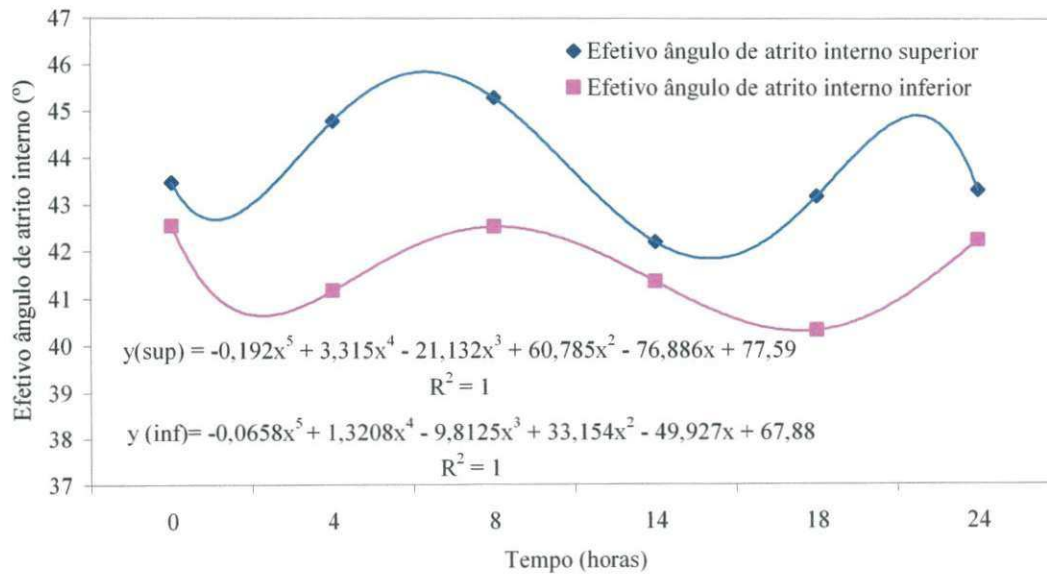


Figura 67 - Curvas dos efetivos ângulos de atrito interno superior e inferior

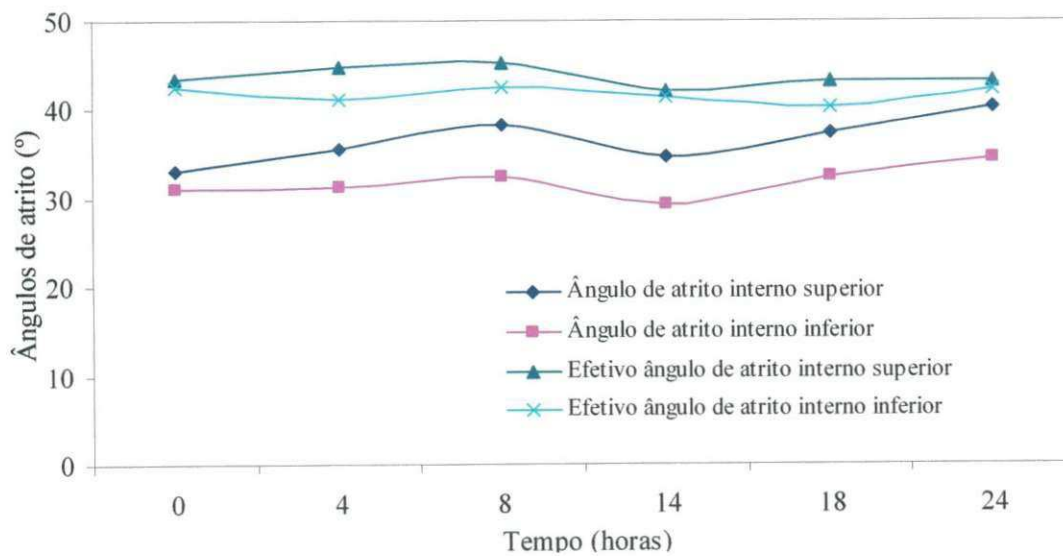


Figura 68 - Ângulos de atrito interno e efetivo

Observando a Tabela 19 e Figuras 66 a 68, percebe-se que os ângulos de atrito interno e efetivo variaram num intervalo de  $31,0^\circ$  a  $33,2^\circ$  e  $42,5^\circ$  a  $43,5^\circ$ , respectivamente, para o tempo de cisalhamento instantâneo (0h) e de  $29,4^\circ$  a  $40,4^\circ$  e  $40,3^\circ$  a  $45,3^\circ$ , para os tempos de consolidação (4 a 24h). O ângulo de atrito interno apresentou uma variação não superior a  $2,2^\circ$  para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que para o tempo de consolidação a variação não ultrapassou  $6^\circ$ . O efetivo ângulo de atrito interno apresentou uma variação de  $1^\circ$ , para o tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que as variações entre os ângulos inferiores e superiores do efetivo ângulo de atrito interno do tempo de consolidação não ultrapassaram  $4^\circ$ . Nota-se que a diferença entre os valores dos efetivos ângulos de atrito interno obtidos nos testes de cisalhamento instantâneo em relação aos obtidos no tempo de consolidação foram pequenas, logo a influência do tempo teve pouca importância. Como a máquina de Jenike apresenta desvantagem, com relação ao seu manuseio, pois se mostra sensível a interferência do operador no momento dos testes, então este fato poderá ter ocasionado estas diferenças. De acordo com Calil Junior (1990), essas variações não são representativas, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados

Observa-se que os valores relativos aos ângulos são consistentes uma vez que tanto para o tempo de cisalhamento instantâneo (0h) quanto para o tempo de consolidação (4 a 24h), segundo CALIL JR. (1997), obedeceu-se a seguinte regra: os efetivos ângulos de atrito interno (inferiores e superiores) apresentaram valores superiores aos ângulos de atrito interno (inferiores e superiores), em todos os tempos estudados.

Os ajustes foram obtidos por meio de uma polinomial de quarta ordem para os ângulos de atrito interno e de quinta ordem para os efetivos ângulos de atrito interno. As equações ajustadas apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. Nota-se que para os ângulos de atrito interno o maior coeficiente de determinação foi de 0,84 e o menor de 0,83. Para os efetivos ângulos de atrito interno o valor do coeficiente de determinação foi de 1. Como não houve grandes diferenças sugere-se que qualquer dos modelos pode ser usado para descrever o comportamento dos ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno em função do tempo.

Tal modelo foi o que melhor representou o comportamento das propriedades estudadas para a bentonita com 16% de teor de umidade nas condições em que foram realizados os testes

Os valores para as tensões não confinadas e tensões máximas principais estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20– Valores das tensões não confinadas e tensões máximas

Tempo (horas)	Tensão não confinada (kPa)			Tensão máxima crítica (kPa)		
	Cargas (kN)			Cargas (kN)		
	10	7	5	10	7	5
0	12,54	8,62	6,27	29,42	21,77	16,78
4	8,36	8,26	5,20	29,48	23,80	16,50
8	7,88	6,36	6,91	29,93	23,54	16,25
14	12,50	7,41	5,74	31,80	22,02	17,48
18	3,86	7,88	4,77	30,60	22,57	16,85
24	3,91	6,36	4,61	30,56	22,00	17,27

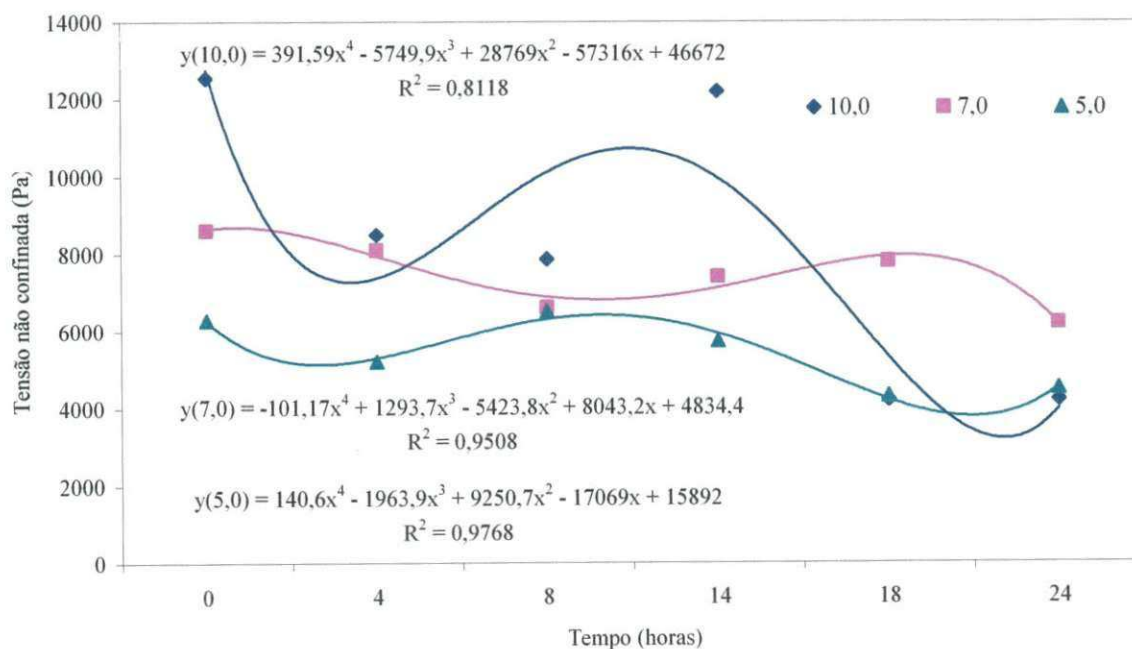


Figura 69 - Curvas das tensões não confinada para a bentonita

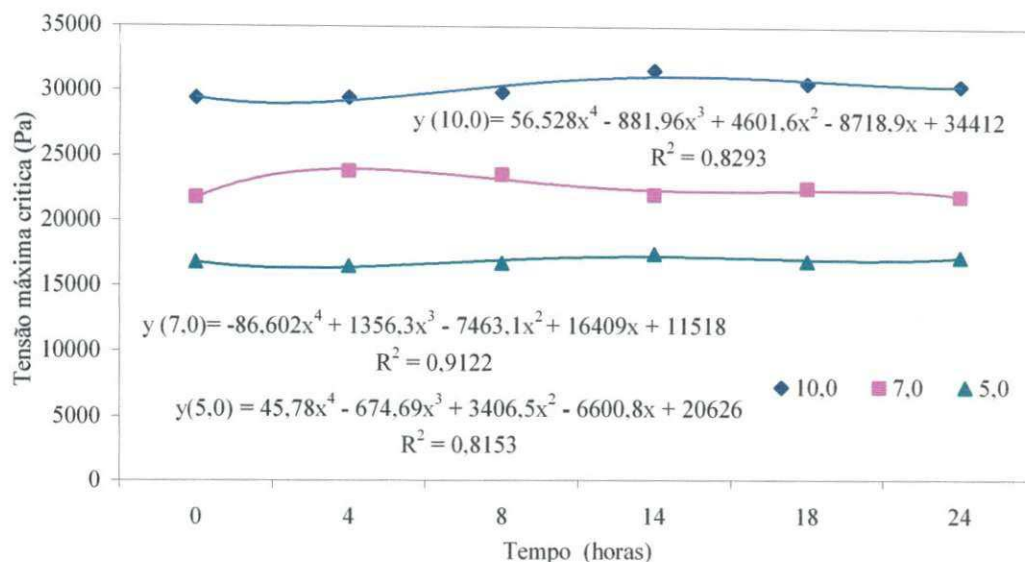


Figura 70- Curvas das tensões máxima crítica da bentonita

Observando os valores e Figuras das tensões não confinadas e tensões normal máximas em função das cargas (Tabela 20 e Figura 69-70), percebe-se que os valores das tensões não confinadas apresentaram maiores variações do que as tensões normais máximas. Apesar desta variação percebe-se que quanto maior foi a carga aplicada maior foram as tensões. Percebe-se também em relação ao tempo de consolidação (4 a 24hs) que as tensões máximas aumentaram com o tempo, isto pode ser explicado pelo fato de que a bentonita ficou gradualmente mais compacta quando submetida a uma tensão de compressão durante tempo de armazenamento. Como ficou mais compacto, houve mais regiões de contato entre as partículas devido ao re-arranjo das partículas e da deformação plástica.

Os dados experimentais foram ajustados a uma equação polinomial de quarta ordem para as tensões não confinadas em função do tempo e de quarta ordem para as tensões máximas críticas em função do tempo. As equações apresentaram uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior valor do coeficiente de determinação para as curvas das tensões não confinadas foi 0,97 e o menor de 0,81. Para as tensões máximas o maior valor do coeficiente de determinação foi 0,91 e o menor valor 0,81. Como não houve diferenças discrepantes pode-se usar as equações para descrever o comportamento das tensões não confinadas e tensões máximas em função do tempo.

Com os resultados das tensões máximas de consolidação ( $\sigma_1$ ) e das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ), determinou-se o índice de fluxo, ou seja, o tipo de escoabilidade que

pode ocorrer no produto. De acordo com a classificação de JENIKE, (1964) verificou-se que os índices de fluxo (Figura 71 ) para o tempo de cisalhamento instantâneo (0 horas) se encontrou no intervalo de  $2 < IF < 4$ , sendo classificado como fluxo coesivo, o mesmo ocorrendo para os tempos de consolidação de 4 a 24 horas. Estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, a bentonita para o teor de umidade de 16%, não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente. Pode-se afirmar que para armazenamento deste produto por 24 horas não haverá possibilidade de obstrução de escoamento durante a abertura do orifício de descarga. Este tempo de armazenamento é utilizado nos silos destinados ao empacotamento ou expedição a granel.

Aqui o ajuste foi obtido através de uma função polinomial de quarta ordem, onde o índice de fluxo é a variável dependente e o tempo a variável independente. O valor do coeficiente de determinação foi de 0,96, logo a aproximação polinomial mostrou ser adequada, aceitando-se o modelo observando (Figura 71) a superfície de resposta representada pela linha de contorno.

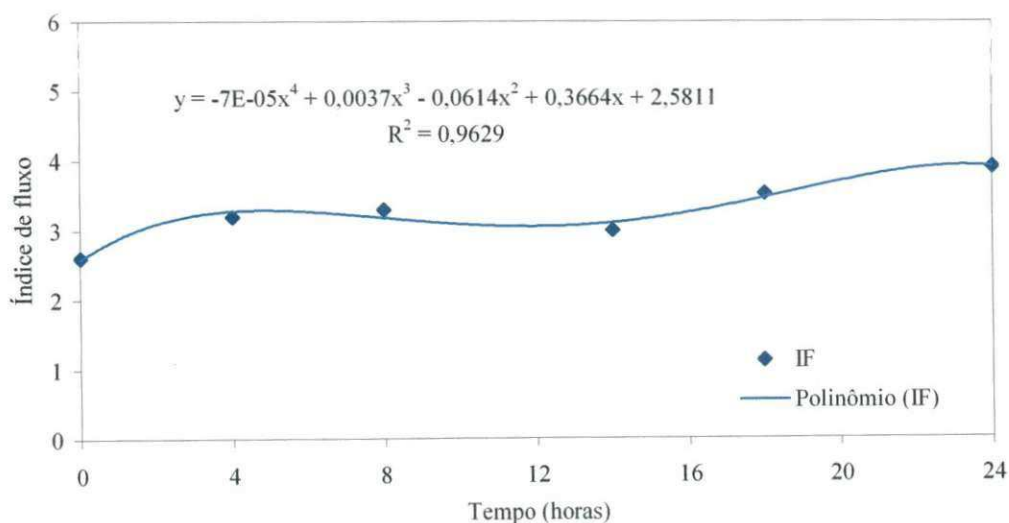


Figura 71 – Curva da fluxibilidade para o teor de umidade de 16%

Os valores para coesão foram determinados e observa-se na Figura 72, que quanto maior foi à carga maior foi a coesão do produto. Percebe-se que no tempo de 18 e 24 horas, a coesão para o nível de carga de 7,0 kN foi maior do que a do nível de carga de 10,0 kN e 5,0 kN, estas variações podem ter sido ocasionada pela linearização do lugar geométrico de deslizamento, pois a coesão é a extrapolação da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), que intercepta o eixo da tensão não confinada ( $\sigma_c$ ). Apesar do

produto ter característica coesiva e ser higroscópico pode-se afirmar que esta coesão não é suficiente para formação de arcos coesivos, haja vista que já foi classificado como de fluxo fácil de acordo com a proposta de Jenike.

O ajuste utilizado foi polinomial de quarta e quinta ordem, apresentando uma satisfatória representação dos dados experimentais. O maior valor do coeficiente de determinação foi de 1 e o menor valor foi de 0,76, nota-se que não houve grandes diferenças quanto aos coeficiente de determinação. Portanto os modelos aqui apresentados podem ser utilizados para predição do comportamento da coesão da bentonita, mas são específicos para as condições em que foram experimentados.

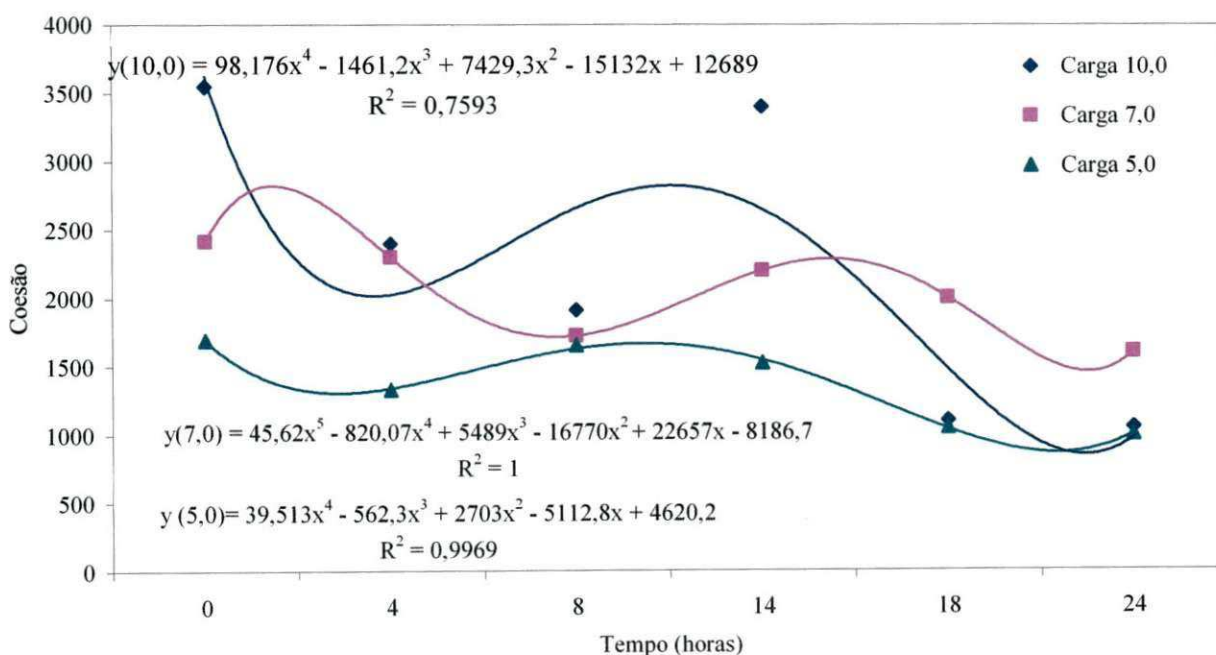


Figura 72– Curvas da coesão para o teor de umidade de 16%

#### 4.11 Determinação dos ângulos de atrito com a parede e do fator fluxo e função fluxo – TU 16%

Os ângulos de atrito com a parede foram determinados, seguindo a metodologia de Milani. Os materiais de parede disponíveis para os ensaios só permitem a utilização dos mesmos para os ensaios instantâneos ( $t = 0$ hs). Os resultados estão dispostos na Tabela 21 e Figura 73.

Tabela 21– Ângulos de atrito com a parede para o teor de umidade de 16%.

Tipos de Paredes	Teor de Umidade 16 %	
	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$
Alumínio	25,2°	26°
Acrílico	25°	25,2°
Aço Liso	23°	23,7°
Aço Rugoso	29,1°	30,7°

$\phi_{wu}$  = ângulo de atrito com a parede superior

$\phi_{wl}$  = ângulo de atrito com a parede inferior

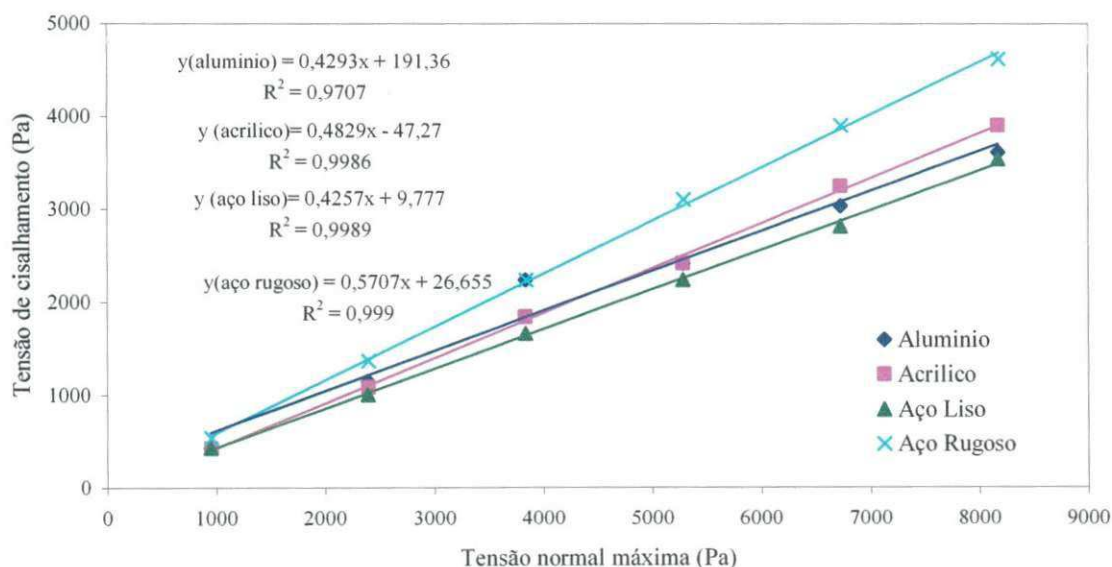


Figura 73 - Ângulos do atrito com a parede para o teor de umidade de 16%

Observando os valores e a Figura 73 dos ângulos de atrito do produto com a parede percebe-se que para os materiais de parede lisa, como alumínio, acrílico e aço liso as variações entre os limites inferiores e superiores apresentaram pequenas diferenças, o mesmo ocorrendo para o material de parede rugosa, aço rugoso. A diferença entre o limite inferior e superior, quando ocorreu, foi no máximo de 1,6° que em termos práticos pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a  $\arctg\phi_w$ .

Empregou-se uma função linear para todos os tipos de paredes e todos os coeficientes de determinação não apresentaram grandes diferenças. Portanto as equações ajustadas mostraram serem adequados, logo podem ser utilizados.

A partir dos valores dos ângulos de atrito do produto com a parede encontrados e dos efetivos ângulos de atrito, determinou-se as funções fluxo e os fatores fluxo, utilizando o método de JENIKE (1964). Observa-se na Figura 74, a função fluxo da bentonita para o teor de umidade de 16%. A curva apresentou forma de linha retas que de acordo com ROBERTS (1987) para a maioria dos casos, as funções fluxo para produtos coesivos serão convexas ou linhas retas.

O fator fluxo da tremonha variou de 1,09 a 1,19. Com estes resultados pode-se dimensionar tremonhas para descarga com fluxo de massa.

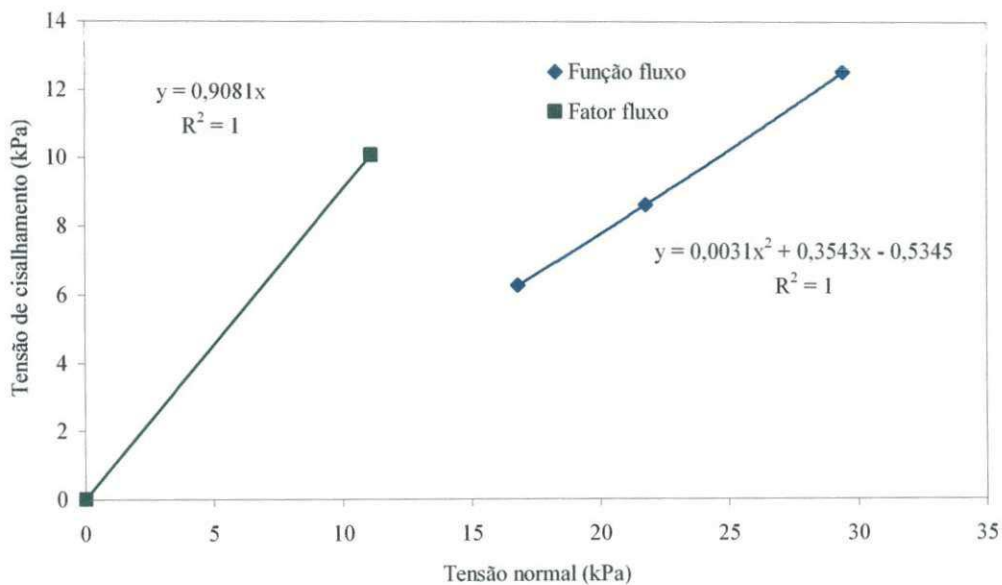


Figura 74— Função fluxo e fator fluxo para o teor de umidade de 16%

A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha ( $\sigma_c$ ). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco coesivo, podendo assim, dimensionar o orifício de descarga para não ocorrer o “ arqueamento ou formação de abóbada”. Com os valores do fator fluxo da tremonha e da função fluxo é possível dimensionar orifício de descarga que permita escoamento do produto de forma contínua e sem apresentar possibilidade de formação de obstrução.

Como não houve interceptação entre a função fluxo e o fator fluxo não foi possível determinar a dimensão do orifício de descarga. A literatura sugere nesses casos dimensionar o orifício de descarga através das dimensões das partículas



## 4.12 Comparação das propriedades de fluxo entre os teores de umidade (10, 12, 14 e 16%)

### 4.12.1 – Ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno

Os ângulos de atrito interno ( $\phi_i$ ) e os efetivos ângulos de atrito interno ( $\phi_e$ ), além das tensões não confinadas ( $\sigma_c$ ) e tensões máximas ( $\sigma_1$ ) principais foram determinados a partir das retas dos lugares geométricos de deslizamento (YL) e do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL). Os resultados dos ângulos de atrito interno em relação aos teores de umidade em função do tempo de cisalhamento instantâneo e dos tempos de consolidação estão dispostos na Tabela 22 e Figuras 75 e 76. Observa-se que em relação ao tempo de cisalhamento instantâneo (0h) os ângulos de atrito interno apresentaram um intervalo 29,6° a 39,5°, sendo que as menores variações entre os limites superiores e inferiores dos ângulos encontram-se no teor de umidade de 14%, e as maiores variações foram encontrados no teor de umidade de 10%. Em relação aos tempos de consolidação, verifica-se que os ângulos encontram-se num intervalo de 29,4° a 41,5°, e que as menores variações entres os limites superiores e inferiores encontram-se no teor de umidade de 14% e as maiores no teor de umidade de 16%. Constata-se então que o teor de umidade de 14% foi o que apresentou maior equilíbrio nos seus resultados, tanto para o tempo instantâneo como para o de consolidação.

Tabela 22 - Valores dos Ângulos de atrito interno (inferior e superior) para todos os teores de umidade estudados.

Tempo horas	Teor de Umidade			
	10%	12%	14%	16%
	$\phi_{il} - \phi_{iu}$	$\phi_{il} - \phi_{iu}$	$\phi_{il} - \phi_{iu}$	$\phi_{il} - \phi_{iu}$
0	34,2° – 39,5°	32,3° – 35,4°	29,6° - 31,2°	31,0° - 33,2°
4	32,3° – 38,4°	36,6° - 38,2°	32,3° - 34,2°	31,3° - 35,5°
8	34,4° – 37,1°	32,5° - 38,5°	33,1° - 37,2°	32,5° - 38,2°
12	35,4° – 39,2°	35,6° - 39,3°	38,3° - 41,5°	29,4° - 34,7°
18	36,3° – 38,7°	34,4° - 36,4°	33,4° - 35,1°	32,4° - 37,3°
24	36,6° - 37,6	34,4° - 40,4°	38,4° - 39,2°	34,5° - 40,4°

$\phi_{iu}$  = ângulo de atrito superior

$\phi_{il}$  = ângulo de atrito inferior

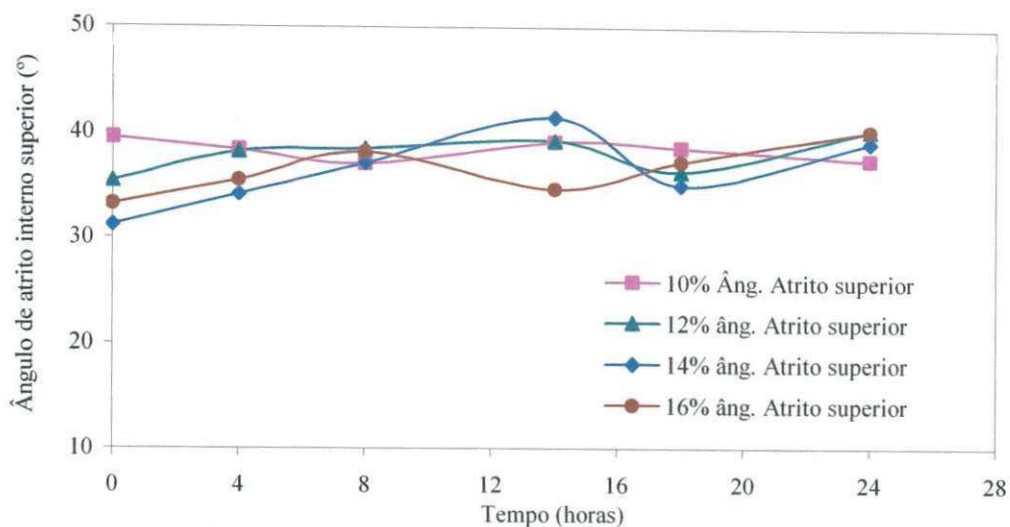


Figura 75 - Curvas comparativas entre os ângulos de atrito interno superiores

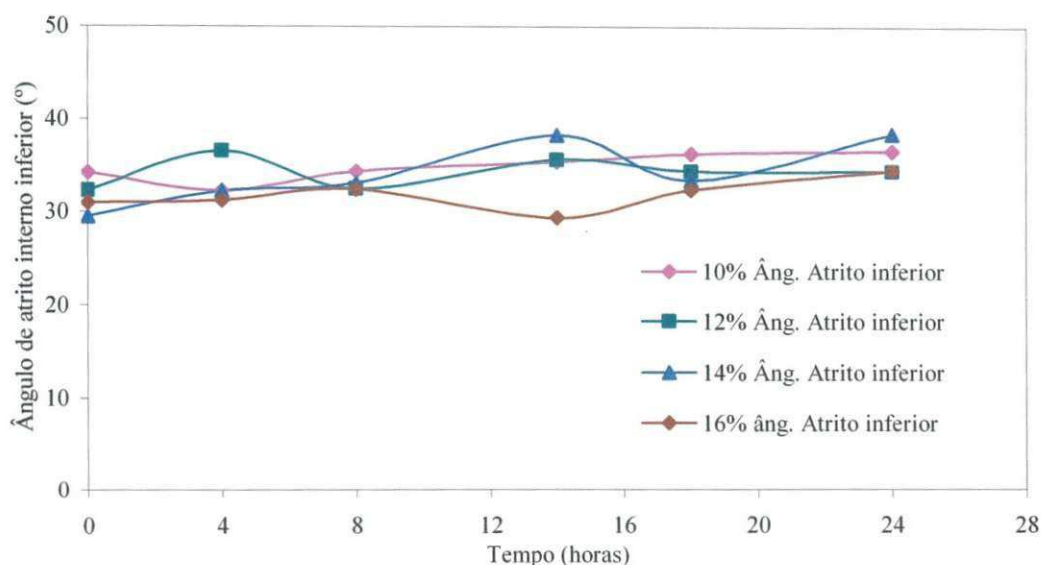


Figura 76 - Comparação entre os ângulos de atrito interno inferiores

Os resultados dos efetivos ângulos de atrito interno em relação aos teores de umidade em função do tempo de cisalhamento instantâneo e dos tempos de consolidação estão dispostos na Tabela 23 e Figura 77 e 78. Observa-se que em relação ao tempo de cisalhamento instantâneo (0h) os efetivos ângulos de atrito interno apresentaram um intervalo  $40,4^\circ$  a  $45,1^\circ$  sendo que as menores variações entre os limites superiores e inferiores dos ângulos encontram-se no teor de umidade de 12%, e as maiores variações foram encontrados no teor de umidade de 14%. Em relação aos tempos de consolidação (4 a 24h), verifica-se que os ângulos encontram-se num intervalo de  $39,5^\circ$  a  $45,5^\circ$  e que as menores variações entres os limites superiores e inferiores encontram-se no teor de umidade de 10%. No teor de umidade de 14% também pode-se verificar que houve pequenas variações, com exceção do tempo de

12h. As maiores variações entre os limites superiores e inferiores encontram-se no teor de umidade de 16%. Percebe-se que a variação entre os limites superiores e inferiores não ultrapassaram  $4^\circ$ , porém essa variação segundo CALIL JUNIOR (1990), não é representativa, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados, o mesmo autor, recomenda que em projetos de silos o efetivo ângulo de atrito interno poderá ser aumentado ou diminuído em  $10^\circ$ .

Constata-se a consistência dos resultados dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno pela seguinte regra: os efetivos ângulos de atrito interno são maiores do que os ângulos de atrito interno, ou seja,  $\phi_e > \phi_i$ . Fato este ocorrido em todos os teores de umidade, com seus respectivos tempos.

Tabela 23 - Efetivo ângulos de atrito interno (inferior e superior) para todos os teores de umidade estudados

Tempo horas	Teor de Umidade			
	10%	12%	14%	16%
	$\phi_{el} - \phi_{eu}$	$\phi_{el} - \phi_{eu}$	$\phi_{el} - \phi_{eu}$	$\phi_{el} - \phi_{eu}$
0	$40,4^\circ - 41,2^\circ$	$42,0 - 42,6^\circ$	$42,3^\circ - 45,1^\circ$	$42,5^\circ - 43,5^\circ$
4	$40,4^\circ - 41,5^\circ$	$41,2^\circ - 42,5^\circ$	$41,2^\circ - 41,5^\circ$	$41,2^\circ - 44,8^\circ$
8	$41,2^\circ - 42,3^\circ$	$40,4^\circ - 43,1^\circ$	$40,5^\circ - 41,8^\circ$	$42,5^\circ - 45,3^\circ$
12	$40,4^\circ - 41,3^\circ$	$41,1^\circ - 43,2^\circ$	$43,3^\circ - 45,5^\circ$	$41,4^\circ - 42,2^\circ$
18	$40,6^\circ - 41,4^\circ$	$40,1^\circ - 41,8^\circ$	$41,5^\circ - 42,3^\circ$	$40,3^\circ - 43,2^\circ$
24	$39,5^\circ - 41,4^\circ$	$41,2^\circ - 43,1$	$43,3^\circ - 44,7$	$42,2^\circ - 43,3$

$\phi_{eu}$  = efetivo ângulo de atrito superior

$\phi_{el}$  = efetivo ângulo de atrito inferior

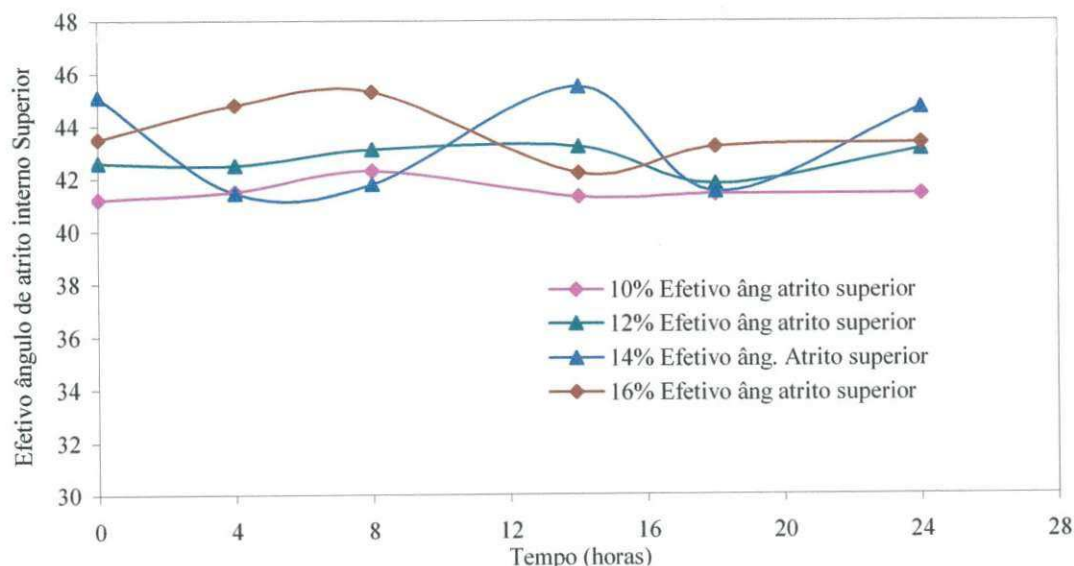


Figura 77 - Comparação entre os efetivos ângulos de atrito interno superiores

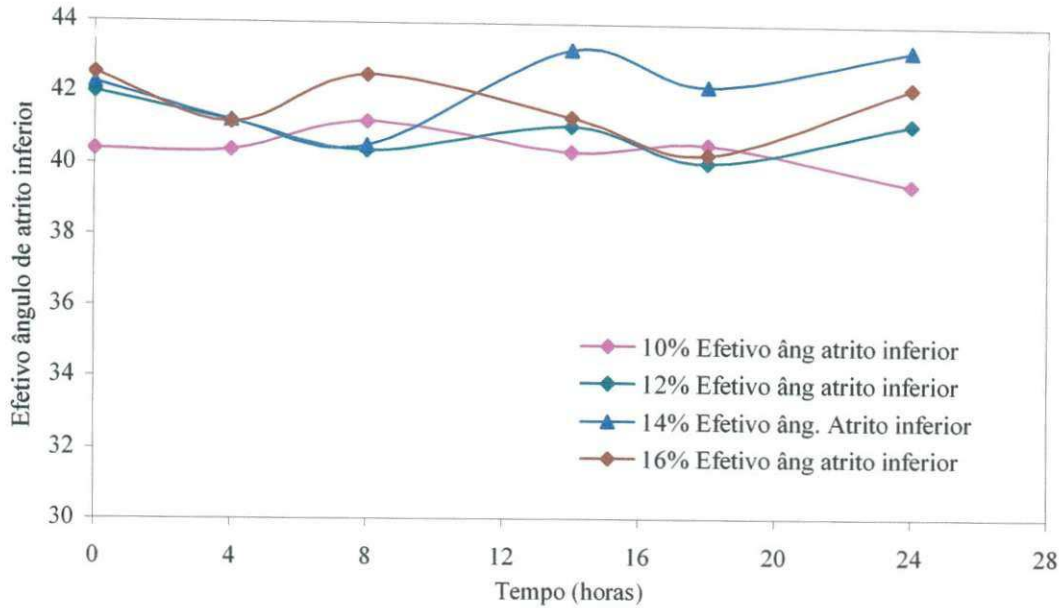


Figura 78 - Comparação entre os efetivos ângulos de atrito interno inferiores

Com os resultados das tensões não confinadas e tensões máximas principais foram determinados os índices de fluxo (IF). Observa-se na Figura 79, que em relação ao teor de umidade de 10 %, no cisalhamento instantâneo (0h) e no de consolidação (4 a 24h) a bentonita pode ser classificada como de fácil fluidez. No tempo de 0h para os teores de umidade de 12, 14 e 16% tiveram classificação de fluxo coesivo. Em relação aos tempos de consolidação, o teor de umidade de 12%, apresentou classificação de fácil fluidez. O teor de umidade de 14% também apresentou classificação de fácil fluidez e o teor de umidade de 16% apresentou classificação de fluxo coesivo. Como o índice de fluxo é função das tensões não confinadas e tensões máximas, esta variação na classificação do produto, pode ter sido ocasionada pela linearização do lugar geométrico de deslizamento (YL). Este fato deve-se também a característica higroscópica da bentonita. Quanto maior o teor de umidade, mais coesivo o produto.

Estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, a bentonita para todos os teores de umidade estudados não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente. Pode-se afirmar que para armazenamento deste produto por 24 horas não haverá possibilidade de obstrução de escoamento durante a abertura do orifício de descarga. Este tempo de armazenamento são utilizados nos silos destinados ao empacotamento ou expedição a granel.

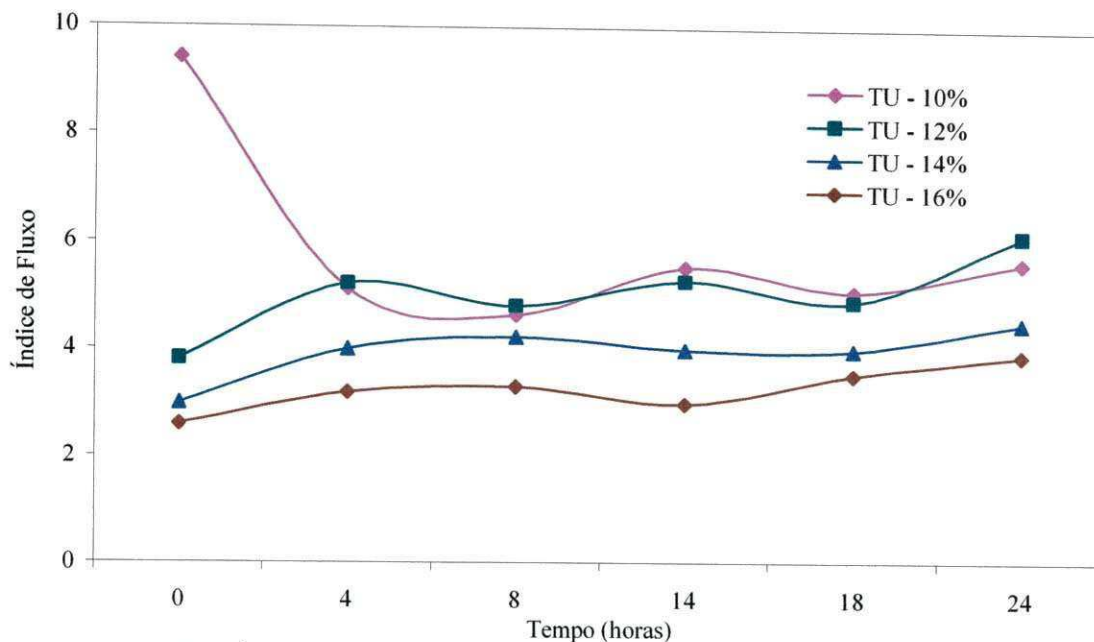


Figura 79 - Índice de fluxo para todos os teores de umidade estudados.

A coesão é a extrapolação da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL) que intercepta o eixo da tensão não confinada. Observa-se nas Figuras 80 a 81 em relação ao tempo de cisalhamento instantâneo (0hs) que quanto maior foi a carga maior foi a coesão do produto, em todos os teores de umidade estudados. Para o tempo de consolidação de 4 hs (Figura 81), observa-se o mesmo comportamento de que quanto maior a carga maior a coesão, ocorrendo apenas uma pequena diferença no teor de umidade de 12%, em que valores para a coesão no nível de carga de 7,0 kN e 5,0 kN foram bem próximas. No tempo de 8 hs (Figura 82), também se observou o mesmo comportamento, quanto maior o nível de carga maior foi a coesão. Observa-se que no teor de umidade de 14% um decréscimo na coesão da carga de 70,0 kN. E no teor de umidade de 16% também observou-se o mesmo comportamento para a carga de 10,0 kN. Para o tempo de 14 hs (Figura 83), o mesmo comportamento foi observado, quanto maior a carga maior a coesão. Ocorrendo diferença apenas no teor de umidade de 14%, onde a carga de 7,0 kN apresentou maior coesão do que a carga de 10,0 kN. No tempo de 18 hs (Figura 84), o nível de carga de 10,0 kN obteve maiores valores para coesões nos teores de umidade de 10, 12 e 14%, havendo um decréscimo no teor de umidade de 16%, onde coesão foi inferior a da carga de 7,0 kN. E o nível de carga de 5,0 kN apresentou as menores coesões em todos os teores de umidade estudados. O mesmo comportamento do tempo de 18 hs ocorreu no tempo de 24 hs (Figura 85), sendo que para a carga de 10,0 kN o decréscimo da coesão ocorreu nos teores de umidade de 14 e 16%.

Como a coesão depende da linearização da reta do lugar geométrico de deslizamento (YL), observa-se que nos tempos de consolidação de 4, 8, 14 e 18 e 24h as variações ocorridas foram ocasionadas por este fato pois os maiores ajustes para a reta do YL ocorreram principalmente nos teores de 14 e 16%. Percebe-se no geral que quanto maiores foram as cargas e teor de umidade maior foi a coesão. Em geral, a tensão não confinada aumenta com teor de umidade, percebeu-se este fato no tempo de cisalhamento instantâneo, enquanto que no tempo de consolidação houve variações que devem ter sido afetadas pela variação da umidade.

Apesar do produto ter característica coesiva e ser higroscópico pode-se afirmar que esta coesão não foi suficiente para formação de arcos coesivos, haja vista que já foi classificado como de fluxo fácil de acordo com a proposta de Jenike.

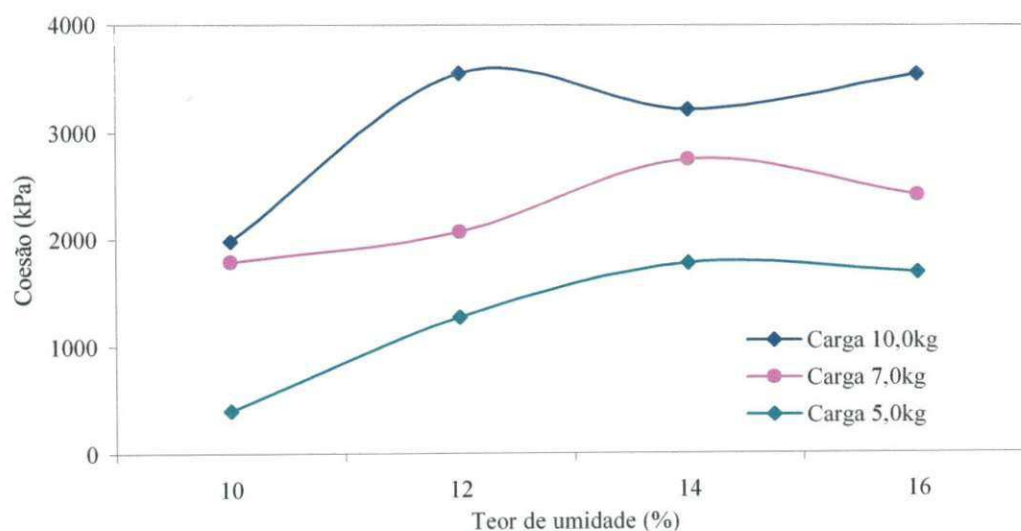


Figura 80– Curva da coesão para o tempo de 0 horas em função das cargas

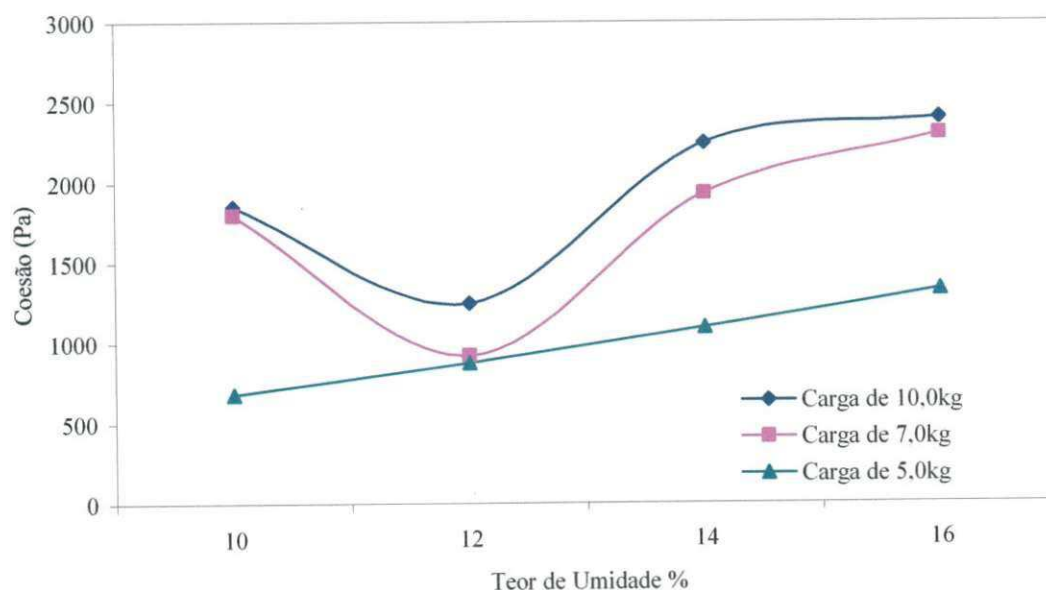


Figura 81 – Curva da coesão para o tempo de 4 horas em função das cargas

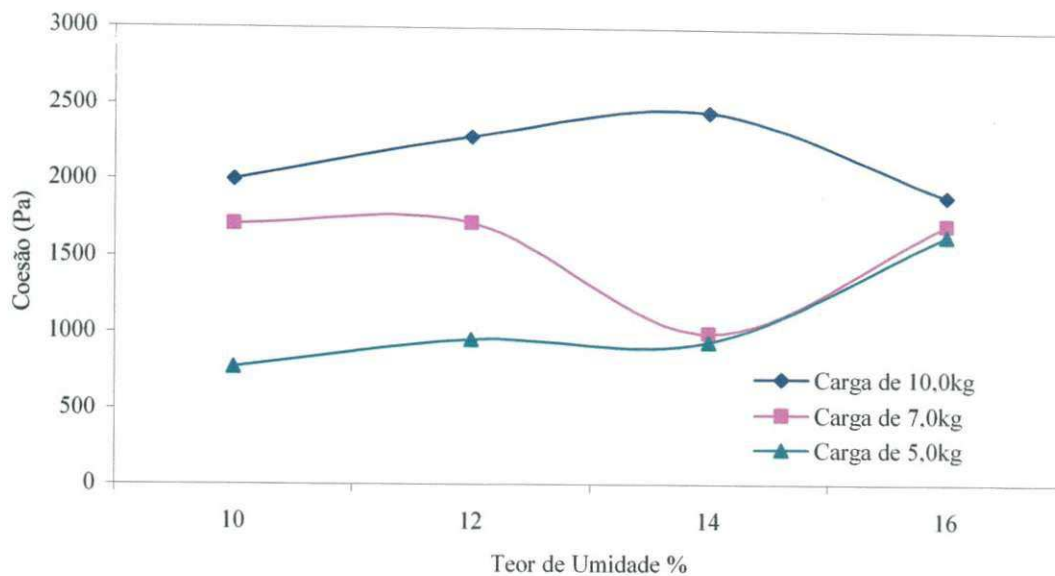


Figura 82– Curva da coesão para o tempo de 8 horas em função das cargas

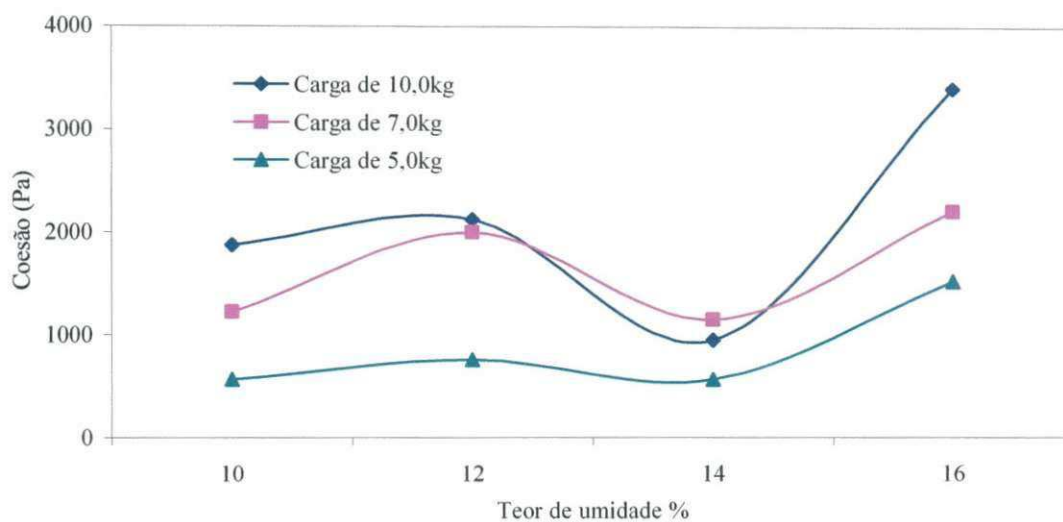


Figura 83– Curva da coesão para o tempo de 14 horas em função das cargas

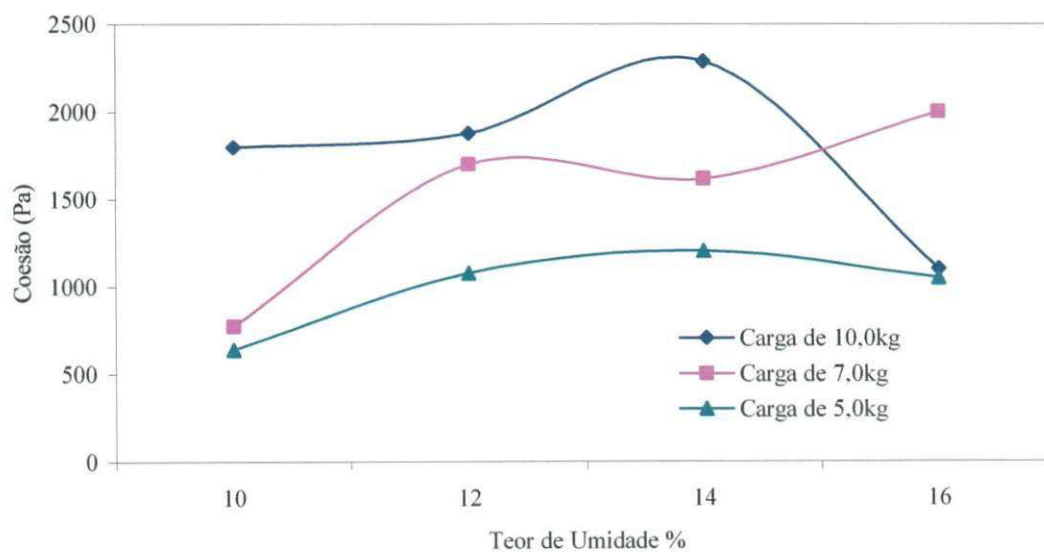


Figura 84 – Curva da coesão para o tempo de 18 horas em função das cargas

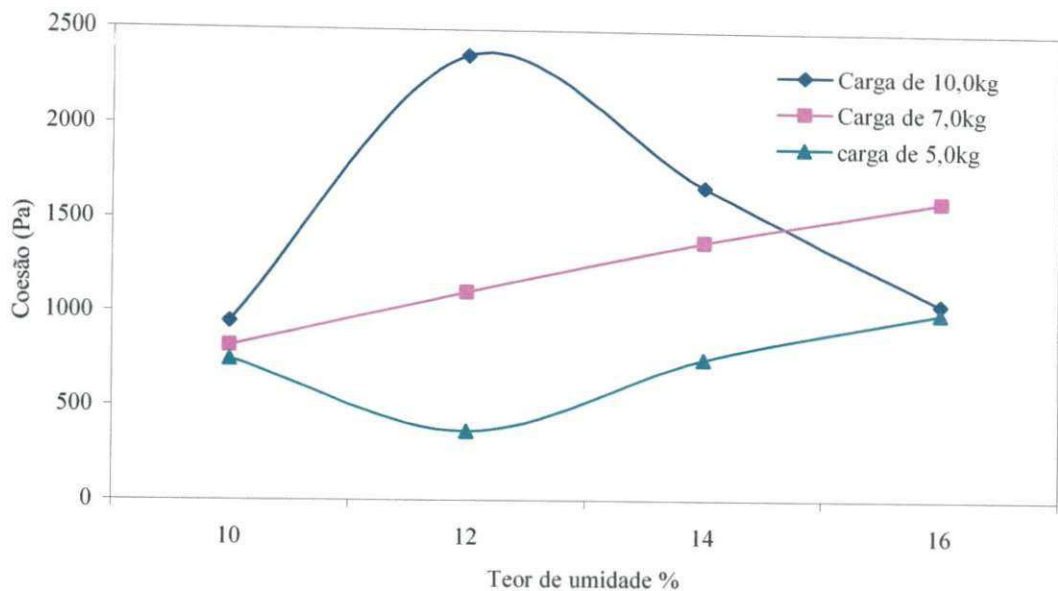


Figura 85 – Curva da coesão para o tempo de 24 horas em função das cargas

#### 4.13 Ângulos de atrito com a parede - Fator fluxo e função fluxo

Os materiais de parede estudados são ou poderão ser utilizados nas construções de silos verticais cilíndrico ou prismáticos, tanto em níveis de fazenda como de indústria, para que se possa oferecer aos projetistas dados para os cálculos de pressões atuantes no corpo e na tremonha dos silos, como também na predição de tipos de fluxo.

Os valores para todos os tipos de parede em função dos teores de umidade estão dispostos na Tabela 24.

Os valores dos ângulos obtidos em relação ao material de parede lisa, como alumínio, acrílico e aço liso tiveram pequenas diferenças, quanto ao material de parede rugoso, como o aço rugoso, também tiveram diferenças mínimas. A diferença entre o limite inferior e superior foi no máximo  $1,7^\circ$  para material de parede rugoso, e de  $1,4^\circ$  para o material de parede lisa, que em termos práticos, esta diferença pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a  $\arctg\phi_w$ . Observa-se que o material da parede interfere mais nos resultados dos testes do que o teor de umidade, ou seja, os ângulos de atrito do produto com a parede variam com o material da parede, quanto mais ásperos o material, maior será o ângulo de atrito.



Tabela 24 – Ângulos de atrito do produto com a parede para todos os teores de umidade estudados

Teor de Umidade %	Tipos de Paredes			
	Alumínio	Acrílico	Aço Liso	Aço Rugoso
	$\phi_{wl} - \phi_{wu}$	$\phi_{wl} - \phi_{wu}$	$\phi_{wl} - \phi_{wu}$	$\phi_{wl} - \phi_{wu}$
10	23,6°-25°	22°-23°	23,2°-24°	30°-30°
12	22°-22,5°	25,6°-24,2°	23,7°-24,4°	28,5°-29,4°
14	22,6°-23°	25,8°-26,7°	21°-21,2°	30,7°-30,8°
16	25,2°-25,8°	25°-25,1	22,9°-23,7°	29,1°-30,8°

$\phi_{wl}$  - Ângulo de atrito do produto com a parede superior

$\phi_{wu}$  - Ângulo de atrito do produto com a parede inferior.

Dois parâmetros são importantes para a análise do fluxo e dimensionamento do orifício de descarga: primeiro, a função fluxo, FF representando a resistência do produto e segundo, o fator fluxo, ff que descreve a condição da tensão na tremonha durante o fluxo. As variações encontradas para o fator fluxo – FF, estão dispostas na Tabela 25. Percebe-se que não houve muita diferença em relação aos teores de umidade, este fato pode ter sido ocasionado devido as pequenas diferenças entre os efetivos ângulos de atrito internos.

Como não foi possível dimensionar os orifícios de descarga pois os fatores fluxos não interceptaram as funções fluxo, em nenhum dos teores estudados, não foi possível determinar a tensão crítica na descarga.

Tabela 25 – Variações dos fatores fluxos para todos os teores de umidade estudados

Teor de umidade (%)	Fator fluxo – FF
10	1,15 - 1,23
12	1,13 - 1,19
14	1,06 - 1,23
16	1,05 - 1,19

#### 4.14 Análise do fluxo

Um das aplicações da informação da fluxibilidade da bentonita é aplicação deste nos projetos silos com fluxo de massa. Este consiste na predição das dimensões do seu orifício de descarga (Figura 86) que ocasionem fluxo de massa. As áreas dos orifícios de descarga foram determinados em testes preliminares, onde se verificou que estes dois orifícios são os que proporcionaram fluxo de massa na maioria das situações testadas, desta forma optou-se em trabalhar com as referidas seções transversais.

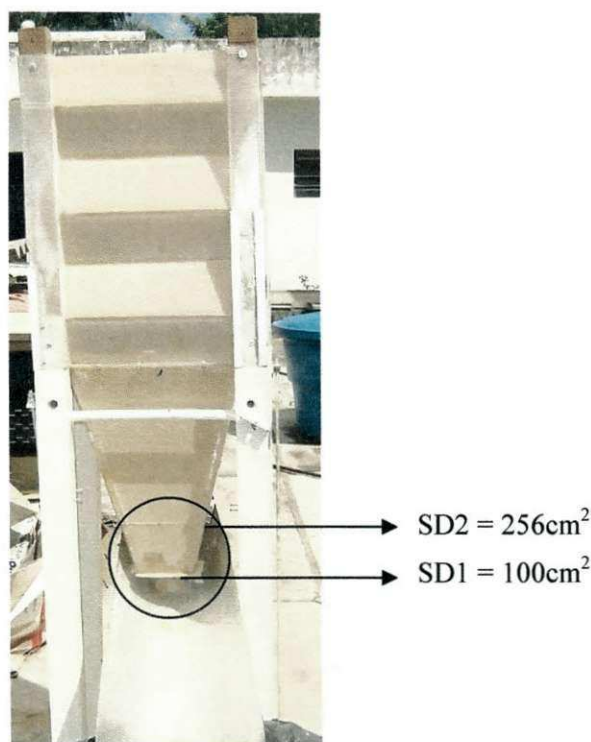


Figura 86– Vista dos orifícios de descarga com o silo cheio

As análises do comportamento do fluxo foram realizadas no modelo reduzido de silo prismático por meio de observações visuais, conforme observado na Figura 87.

Foi observado que na seção transversal de descarga de  $SD1 = 100\text{cm}^2$  ocorreu fluxo de massa para o tempo igual a 0 hora (condição instantâneo), ou seja, ao abrir o orifício a descarga imediatamente todo produto movimentou-se, sem paradas, o que caracteriza-se como fluxo de massa. Na Figura 87 encontra-se a seqüência fotográfica do comportamento do produto durante a descarga, relatado.



Figura 87– Comportamento da bentonita durante a descarga com seção de descarga de  $100\text{cm}^2$

Observa-se na Figura 88 a excentricidade do orifício de descarga e a ocorrência do fluxo de massa. Esta situação contrapõe alguns autores que afirmaram que tremonhas em forma de tronco piramidal e com excentricidade de descarga não proporciona fluxo de massa. NÓBREGA (2004) em trabalho realizado com ração avícola, no mesmo modelo reduzido, também observou a ocorrência de fluxo de massa. O que se pode concluir que para a inclinação de  $70^\circ$  da tremonha associado ao ângulo de atrito do produto com a parede influência preponderante para o tipo de fluxo observado

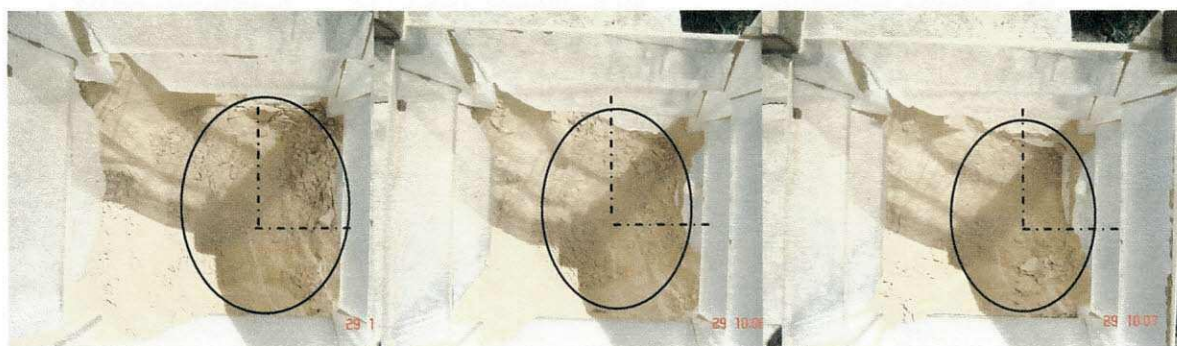


Figura 88– Vista da excentricidade para a seção de descarga de  $100\text{cm}^2$

Observou-se nos ensaios com a seção transversal de descarga de  $SD2 = 256\text{cm}^2$  ocorreu fluxo de massa para o tempo igual a 0 hora (condição instantâneo), ou seja, ao abrir o orifício a descarga imediatamente todo produto movimentou-se, sem paradas, o

que caracteriza-se como fluxo de massa. Na Figura 89 encontra-se a seqüência fotográfica do comportamento do produto durante a descarga, relatado.



Figura 89– Comportamento da bentonita durante a descarga com seção de 256 cm<sup>2</sup>

Na Figura 90 pode-se observar a excentricidade na descarga pelo comportamento do fluxo do produto para a seção do orifício de descarga de 256 cm<sup>2</sup>. Observou-se, ainda, que a bentonita estocada no modelo reduzido de silo, com a seção SD2 se pôs em movimento mais rapidamente do que a SD1. E o comportamento de descarga do produto foi semelhante em ambos os casos, o que vem confirmar que no caso estudado não houve influência da excentricidade relacionada com o orifício de descarga

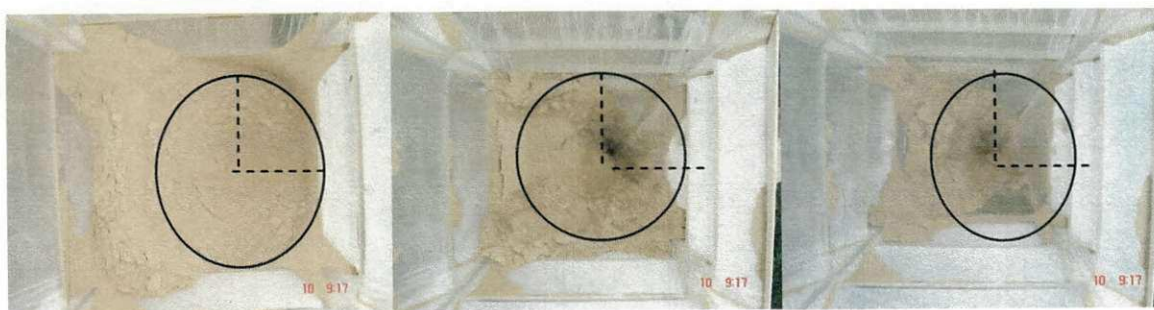


Figura 90– Vista da excentricidade para a seção de descarga de 256 cm<sup>2</sup>

As análises do comportamento do fluxo estão dispostos nas Tabelas 26 e 27. Foram utilizadas duas seções transversais da boca de descarga de seção quadrada e os ensaios foram realizados com tempo instantâneo e com tempo de consolidação de 24h.

Tabela 26- Tipo de fluxo ocorrido para relação H/L = 1,76

Tempo de armazenamento - 0 h		
Repetições	SD1 – 100 cm <sup>2</sup>	SD2 – 256 cm <sup>2</sup>
1	Fluxo de massa	Fluxo de massa
2	Fluxo de massa	Fluxo de massa
3	Fluxo de massa	Fluxo de massa

Tabela 27- Tipo de fluxo ocorrido para relação H/L = 1,76

Tempo de armazenamento - 24 h		
Repetições	SD1 – 100 cm <sup>2</sup>	SD2 – 256 cm <sup>2</sup>
1	Fluxo de massa	Fluxo de massa
2	Fluxo de massa	Fluxo de massa
3	Fluxo de massa	Fluxo de massa

Observa-se que o produto obteve fluxo de massa com o tempo instantâneo (0 h) e com tempo de consolidação (24 h) para os dois orifícios de descarga. Não ocorreu a formação de arcos coesivos. Observou-se que com a seção de 100 cm<sup>2</sup> há uma tendência de formação de arco coesivo, com 24 horas de armazenamento. O que leva a crer que este fenômeno poderá ter ocorrido pelo fato do protótipo ter ficado exposto a alta umidade relativa do ar, durante o período noturno, associado com a propriedade higroscópica e a classificação da bentonita, segundo proposta de Jenike, como produto coesivo.

#### 4.14.1 Vazão de descarga

Os resultados encontrados para a vazão de descarga encontram-se dispostos na Tabela 28. Verificou-se que com o aumento do tempo de armazenamento ocorreu um decréscimo da taxa de vazão, nas duas seções transversais estudadas.

Tabela 28 – Vazão média de descarga(kg/s) para a relação H/L = 1,76

Seção de descarga (cm <sup>2</sup> )	Tempo de Armazenamento	
	T = 0horas	T = 24horas
100	0,84	0,64
256	1,81	1,37

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, observa-se que em relação ao tempo de armazenamento houve variação de 0,20 e de 0,44 para a seção de 100 cm<sup>2</sup> e de 256 cm<sup>2</sup>, respectivamente. E em relação às seções no mesmo tempo de armazenamento verifica-se que a diferença foi de 0,97 para o tempo de 0hs e de 0,73 para o tempo de 24 h. Como esperado, o que interferiu mais na taxa de vazão foi à seção transversal do orifício de descarga. Verificou-se também que com o aumento do tempo de armazenamento ocorreu um decréscimo da taxa de vazão.

## 5 CONCLUSÕES

A fluxibilidade da bentonita foi caracterizada usando o aparelho de cisalhamento “Jenike Shear Cell” para medir as funções fluxos sob condições definidas dos teores de umidade, temperatura e umidade relativa. As propriedades físicas também foram determinadas porque ajudaram a definir as características da bentonita e auxiliaram no entendimento do comportamento do fluxo do produto pulverulento.

De acordo com as condições em que foi realizado o trabalho conclui-se que:

A bentonita possui granulometria extrafina, é um material pulverulento coesivo e higroscópico. Como a temperatura e umidade relativa do ar foram controladas em 20°C e 48% UR, pôde-se evitar grandes variações nos teores de umidade do material.

A fluxibilidade da bentonita, caracterizada pelo índice de fluxo, variou de fluxo fácil para fluxo coesivo. Sendo no geral classificada como fluxo fácil.

O teor de umidade de 14% foi o que se manteve mais estável. A bentonita apresentou-se mais coesa no teor de umidade de 16% e menos no teor de umidade de 10%, sendo a medida ideal em relação ao teor de umidade de 10%.

A análise comparativa realizada mostrou a existência de diferenças entre os teores de umidades estudados, considerando a combinação mais desfavorável das propriedades dos produtos, constatou-se que para teor de umidade de 14% apresentou as menores variações nas propriedades estudadas e para o teor de umidade de 16% apresentou maiores variações.

Não houve variações significativas entre os ângulos de atrito da parede em relação aos teores de umidade e com os tipos de materiais da parede, indicando que as forças de adesão entre as partículas de pó e a parede é dominante.

O orifício de descarga não pode ser determinado pelos cálculos porque dependem fortemente dos valores dos efetivos ângulos de interno e dos ângulos de atrito com a parede, como os valores dos ângulos foram relativamente altos a metodologia para determinação do orifício de descarga não pode ser aplicada. Além de não ter havido a interceptação das curvas dos fatores fluxo com as funções fluxo.

As duas seções transversais dos orifícios de descargas do silo protótipo forneceram fluxo de massa, sem a formação de arcos coesivos.

Considerando o dimensionamento da estrutura do silo pelo método dos estados limites, as propriedades de fluxo deverão ser obtidas através da combinação mais desfavorável (limite superior) e da menos desfavorável (limite inferior) do produto a ser armazenado no silo.

Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente, a formulação proposta por MILANI (1993) utilizando o método de Jenike para determinação das propriedades de fluxo mostrou ser adequada, pois os valores obtidos experimentalmente foram todos consistentes.

Constatou-se que os ajustes forneceram equações que se mostraram adequadas, uma vez que os valores dos coeficientes de determinação foram na maioria superiores a 0,9.

Na inexistência de uma norma brasileira para cálculos de pressões e fluxos em silos e ainda das propriedades de fluxo para bentonita nas principais normas internacionais vigentes, os ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede determinados, poderão ser utilizados na predição das pressões horizontal, vertical e no fundo dos silos.

#### Sugestões para trabalhos futuros

- Diminuir os níveis de cargas para os mesmos teores de umidade.
- Comparar os dados experimentais com os resultados numéricos obtidos ao se utilizar o método dos elementos finitos.
- Validar através de elementos finitos os resultados obtidos experimentalmente.
- Analisar o comportamento do fluxo da bentonita utilizando tremonhas concêntricas e carregamento excêntrico.



- Determinar as tensões nas paredes.
- Definir uma correlação matemática entre o ângulo de atrito com a parede e a rugosidade.

## 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. R. M. P. & NOVAES. A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*. Vol.25 N.6B. 1145-1154.2002.

AMORIM. L.V. Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluido hidro-argilosos para uso na perfuração de poços de petróleo. Campina Grande – Paraíba. Tese de doutorado.2003.

AMORIM. L.V. PEREIRA. E. Bentonitas da Paraíba: a exaustão de uma riqueza brasileira. [www.perfuradores.com](http://www.perfuradores.com). 08.2004.

AMORÓS *et al.* Projeto de silos para o armazenamento de materiais na forma de pó. Problemas associados à etapa de descarga. Instituto de tecnologia Cerâmica – Association de Investigation de las Industrias Cerâmicas(ATCE) – Universitat - 2002.

AUSTRALIAN STANDARD AS 3774. Loads on bulk containers. Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1997). Loads on bulk containers – Commentary. Sydney. 1996.

BANDEIRA, I.S.A. Análise de fluxo de ração e ferelo de trigo em silos prismáticos industriais. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 71p.Tese de Mestrado

BARRETO, R.L. Determinação das propriedades Físicas do colorau e dos grãos do urucum(*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.84p.Tese de Mestrado.

BENINK, E.J. Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes. 162p. Tese (Doutorado). Universiteit Twente. The Netherlands. 1989.

BERRY, J., O'SHEA, T. Assessing Mathematical Modelling. In: International Journal of Mathematical Education Science and Tecnology. V13, n.6, 1982.

BIEMBENGUT, M. S. Qualidade de Ensino de Matemática na Engenharia: uma proposta metodológica e curricular. Florianópolis: UFESC, Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. 1997.

BMBH - British Materials Handling Board. Drafcade of practice for design of silos, bins, bunkers and hoppers. Inglaterra. 101p 1985.

CALIL Jr., C.; NASCIMENTO, J.W.B.; ARAÚJO, E.C. Silos metálicos multicelulares. Serviço Gráfico – EESC/USP – São Carlos-SP. 175p. 1997.

CALIL Jr., C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 198 p. 1990.

CALIL JÚNIOR, C. Determinações das propriedades Físicas de materiais granulares pulverulentos para o projeto estrutural de silos – Revista Brasileira de Armazenamento. Viçosa, v.9-10, n.1-2, p.3-6, 1985.

CALIL JÚNIOR, C. Sobrepressiones en las paredes de los silos para almacenamiento produtos pulverulentos cohesivos. Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona-UPB. 1984.184p. Tese de Doutorado.

CHASE, G. G. Solids Notes 10, The University of Akron [www.ecgf.uakron.edu/~chem/fclty/chase/SolidsNotes10%20Hopper%20Design.pdf](http://www.ecgf.uakron.edu/~chem/fclty/chase/SolidsNotes10%20Hopper%20Design.pdf) .2002.

CIMINELLI, R. Estudo de Mercado dos minerais industriais. [www.cgee.org.br/arquivos/estudo\\_008\\_02.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo_008_02.pdf). 08/2004.

CLANCY, M.B. EBNER,P.B. Silos. Tecnologia para la fabricacion de alimentos balanceados. Kansas State, cap.04: American Feed Industry Association, Inc.1994.

Cleanse Yourself Internally With Liquid Clay. The Bentonite Cure - <http://www.curezone.com/cleanse/bowel/bentonite.asp>. 06/2002.

DARLEY, H. C.H. & GRAY, G.R. Composition and Propertiers of drilling and completion fluids. Fifth edition. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 1988.

DELGADO M. Análisis químico de arcillas. Tesis de bachiller en Ciencias Químicas de la Pontificia Universidad Católica. 1990.

DEMATTE, C.L. Caracterização de bentonitas para fundição. Edição – Junho de 2000. Dolomil Industrial Ltda. Campina Grande-PB. 2000.

DÍAZ. V. F. R. Zeólitas e argilas na indústria do petróleo. Curso promovido pela Pós-Graduação em Engenharia Química /CCT/UFGC. Campina Grande. 03/2003)

DIN 1055. Lastannahmen fur bauter. Blatt 6. Lasten in silozellen. Alemanha. 12p. 1987

DRESCHER, A., A.J. WATERS, and C.A. RHOADES - "Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties and II. Arching theories and critical outlet size", *Powder Technology* 84: 165-183 .1995.

EUROCODE 1 (1995). ENV 1991-4 Part 4: Actions on silos and tanks. Bruxelas.

FREEMAN TECHNOLOGY. Methodology. [www.freemantech.co.uk/pages/method/method.html](http://www.freemantech.co.uk/pages/method/method.html) 06/2002.

FITZPATRICK, J.J. BARRINGER, S.A., IQBAL. T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. Department of Process Engineering, University College, Cork, Ireland. Department of Food Science and Technology, Ohio State University, Columbus, OH 43210-1097, USA. Received 30 October 2002; accepted 27 April 2003.

- FREITAS E. G. A. Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. São Carlos. 2001. Tese de Doutorado
- GAYLORD, JR. E.H. GAYLORD, C.N. Design of steel bins for storage of bulk solids. Prentice-Hall, INC. New Jersey. 359p. 1984.
- GOMES, F.C. Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais. São Carlos, 205p. Tese(Doutorado). EESC – USP – Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior. 2000.
- GHELFI., S. ZUCHELLI., A. Characterization of powders and granular materials. University of Bologna Faculty of Engineering Mechanical, Nuclear and Aerospace Department (DIEM). [http://www.wamgroup.com/basic/act/ts\\_pow.htm](http://www.wamgroup.com/basic/act/ts_pow.htm) 06/2002. 1999.
- GOPINATH T.R.; CRUZ, V.C.A. FRERE. J.A. Estudo comparativo da composição química e as variedades de argilas bentoníticas da Região de Boa Vista, Paraíba. Revista de Geologia, Vol. 16, nº 1, 35-48, 2003. [www.revistadegeologia.ufc.br](http://www.revistadegeologia.ufc.br)
- GOPINATH T.R. SCHUSTER. H.D. SCHUCKMANN. W.K. Modelo de ocorrência e gênese da argila bentonítica de Boa Vista. Campina Grande. Paraíba. Revista brasileira de Geociências 11(3) 185-192. 1981.
- GUESSER, W.L. Estudo sobre bentonitas brasileiras em areia de moldagem. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (Dissertação). 1982.
- IBF. Indústria Brasileira de Fundição. Segmento de peças para o setor automotivo. [www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/fund1.pdf](http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/fund1.pdf) . 01.2005
- HAAKER, G. Progress in measuring bulk solid properties. In. Chisa Conferataion 115. Prague. 10p. 1990.
- INTERNATIONAL STANDART (1995). ISO – 11697. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials.

KAPUR, J. N. The Art of Teaching, the Art of Mathematical Modelling. In: I. J. M. G. S. T. v13. n12. 1982.

JENIKE E JOHANSON. Inc. Bulk Solids: Cience/Engineering/Design  
[www.jenike.com/pages/services/test equip/rst.html](http://www.jenike.com/pages/services/test equip/rst.html) 06/2002.

JENIKE, A W. JOHANSON, J.R. Bulk Solids Handling Survey. Flow of solids newsletter. East Coast, USA: v.XV, n.1, aug.1995.

JENIKE, A.W. Storage and flow of solids. Utah, University of Utah. 197p. 1980.

JENIKE, A W. Storage and flow of silos. Bolletin 123. Utah Engineering Experiment Station . University of Utah. Sat Lake City. Estados Unidos, 197p, 1964.

KAMATH. S. PURI, V.M. MANBECK. H.B. Flow property measurement using the Jenike cell for wheat flour at various moisture contents and consolidation times. Powder Technology. 1994.

KARLSSON. T. KLISINSKI. M. RUNESSON. K. Finite element simulation of granular material flow in plane silos with complicated geometry. Powder Technology. 1998.

KLAUSNER, J. F. CHEN, D. MEI. R. Experimental investigation of cohesive powder rheology. Powder Technology. [www.elsevier.com/locate/powtec](http://www.elsevier.com/locate/powtec). 2000.

LADIPO, D.D. PURI. V.M. Computer controlled shear cell for measurement of flow properties of particulate materials. Department of Agricultural an Biological Engineering, 229 Agricultural Engineering Building. The Pensylvania State University Park. Elsevier. Powder Technology. 1997.

LEWIS, A., SIMPKIN, G. Tableting — an industrial viewpoint (part 2). In: Deleuil, M., Chulia, D., Pourcelot, Y(Eds.), Handbook of Powder Technology and Pharmaceutical Processes, vol.9. Elsevier Science B.V, pp.473– 492 (Chapter 13). 1994.

LUCKAM, P.F. & ROSSI, S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspension. *Advances in colloid and interface science* 82. 43 – 92. 1999.

MARINELLI, J. CARSON. J. W. Solve solids flow problems in bins, hoppers, and feeders. [www.jenike.com](http://www.jenike.com). 2002.

MARINELLI, J. How Wall Friction Effects Hopper Angles [http://www.powderandbulk.com/pb\\_services/ask\\_joe\\_archive/wall\\_friction\\_effects\\_hopper\\_angles.htm](http://www.powderandbulk.com/pb_services/ask_joe_archive/wall_friction_effects_hopper_angles.htm). 06/2002. 2002.

MARINELLI, J. Wall Friction Effects. [http://www.powderandbulk.com/pb\\_services/ask\\_joe\\_archive/wall\\_friction\\_effects.htm](http://www.powderandbulk.com/pb_services/ask_joe_archive/wall_friction_effects.htm) 06/2002.

MILANI, A P. Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para o Projeto de Pressões e Fluxo em Silos. São Carlos, 272p. Tese (Doutorado). EESC – USP – Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior. 1993

MOLERUS . O. Theory of yield of cohesive powders. *Powder Technology*.12. 259-275. 1975.

NASCIMENTO, J.W.B. Estudo dos Silos Metálicos Prismáticos para Fábricas de Ração. São Carlos, Tese (Doutorado) – EESC – USP. 152p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior . 1996.

PETROBRÁS. Viscosificante para fluido de perfuração à base de água na exploração e produção de petróleo. Especificação. N-2604.1998.

PIETRACAPRINA.A., NOVELLI, G., RINALDI, A. A new bentonite deposit in Sardinia. *Appl. Clay Sci.*, 2, 167-174. 1987.

PORTO. J.P.P. ARANHA.I.B. Caracterização cristaloquímica preliminar de bentonitas brasileiras. UFRJ. 2004.

POWDER ENGINEERING SYSTEMS, Carrington Business Park. Manchester. M31. 4YR. UK. [www.powderengineering.com/engineer.htm](http://www.powderengineering.com/engineer.htm) , 06/2002. 2000.

PRESCOTT, J. K & BARNUM. R.A. On Powder flowability. Pharmaceutical Technology. October 2000. [www.pharmaportal.com](http://www.pharmaportal.com). 2000.

PURI V M. Powder Problems. Improved devices help keep particulates flowing. <http://www.asae.org/imis/staticcontent/3/mar02/powder.html> .06/2002.

RAVENET,J. Problemas em silos (I). Manutencion y Almacenaje. V.45, p.590-594.1981.

REIS, E. Levantamento da Situação e das Carências Tecnológicas dos Minerais Industriais Brasileiros Com enfoque na mineração de: Argila para cerâmica, Barita, Bentonita, Caulim para carga, Talco / Agalmatolito e Vermiculita Relatório Preparado para o Ministério de Ciência e Tecnologia PNUD – Contrato 2001/002915 Contribuições: Salomão Badi, Marcos Maia, Pedro Pino Veliz e Eduardo Melo. 2001.

ROBERTS, A. W. Storage, flow and handling of bulk solids. Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle. 612p. 1987.

ROBERTS, A. W. I - Introduction and basic concepts. Fundamental principles of storage bin and discharge system design for bulk solids handling. Paper 2. 1987.

ROBERTS, A. W. II – Flow properties of bulk solids basic material properties. Paper 4. 1987.

ROTTER, J.M. *et al.* Properties of the stored granular material. In: BROWN C. J. & NELSEN J. Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design. p. 650-664. 1998.

SCHULZE, D.. Fundamentals of Bulk Solids Mechanics. [www.dietmar-schulze.de/grdle1.html](http://www.dietmar-schulze.de/grdle1.html) .. 2001



SCHULZE, D.. Design variants and special types. Trans tech publications - part IV. P.127-134. 1996

SCHULZE, D.. Measurement of flow properties of bulk solids. Powder Technology.1990.

SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. Powder Technology, 88, 285–290. (1996).

SOUZA SANTOS, P., Ciência e tecnologia de argilas. Vol.2. editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo. 1992.

SOUZA SANTOS, P.; Contribuição Para o Conhecimento de Argilas usadas como Aglomerantes de areias de Moldagem Utilizadas no Estado de São Paulo. Engenharia, Mineração e Metalurgia, 37(219):115-8, 1963.

SUN,R. VI.2. Arcillas. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, e-mail: msun@pucp.edu.pe.

TARDOS, G. I. Stresses in Bins and Hoppers (Use of Jenike's method for hopper design) Department of Chemical Engineering. The City College of the City University of New York. <<http://www.erpt.org/992Q/tard-00.htm>> .06/2002. .1999.

TEUNOU, E. FITZPATRICK, J.J. SYNNOTT, E.C.. Characterisation of food powder flowability. Department of food Engineering. University College. Cork. Ireland. Journal of food Engineering 39 (1999) 31-37. 1998.

TEUNOU, E., & VASSEUR, J. Time flow function: means to estimate water effect on dissoluble bulk materials flow. Powder Handling and Processing, 8(2), 111-116. (1996).

TOMAS, J., & SCHUBERT, H. Particle characterisation. Partec 79 (pp. 301–319), Nurnberg, Germany. 1979.

The Structure design of steel bins and silos. Cap.02 e 03. August 2001.

TRINDADE, M.H.A. Bentonita. Disponível: [www. Dnrm.org.br](http://www.Dnrm.org.br). 11/2004. 2001

U.T.L -Universidade Técnica De Lisboa – Faculdade de Arquitetura. 2002. Classificação e Tipos de Argilas, 2002. <http://www.fa.utl.pt/materiais/ceramicos/1/ARGILAS/classificacao%20tipos%20argilas.html>. 06/2002.

VINCENTZ, C. R. Powder Coater's Manual 1/98 - Powder Storage - <http://www.coatings.de/manual/kap1-5.pdf> 2002. Publishing, Hannover, Germany

**7 ANEXOS**

## Teor de umidade de 10% - t=0 hs

Tabela 29 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 0hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de Pré Shear	
Pré-Shear	Shear	Normal – $\sigma_s$	Cisalhamento – $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.104,87	9.554,76		
10	5,0	8.214,39	7.573,89	15.439,71	11.943,45
10	3,5	6.050,66	6.110,60		
7	5,0	8.216,16	7.148,61		
7	3,5	6.047,75	6.903,87	11.105,53	9.150,22
7	2,0	3.882,58	4.289,17		
5	3,5	6.048,10	5.238,07		
5	2,0	3.881,74	3.492,04	8.215,64	6.838,59
5	1,0	2.437,67	2.279,53		

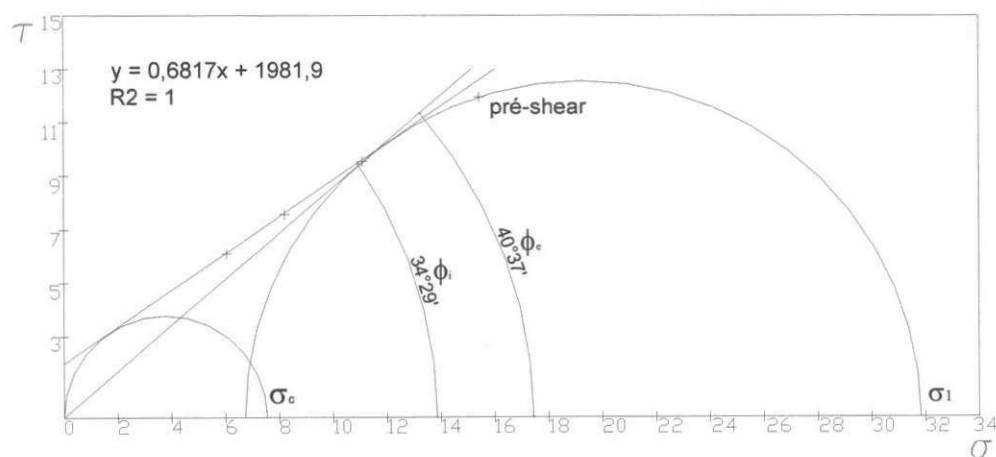


Figura 91 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

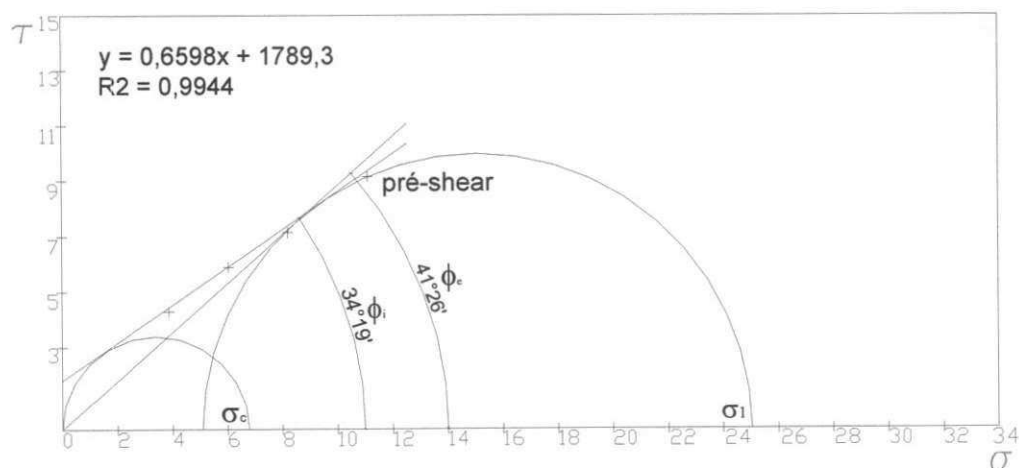


Figura 92 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

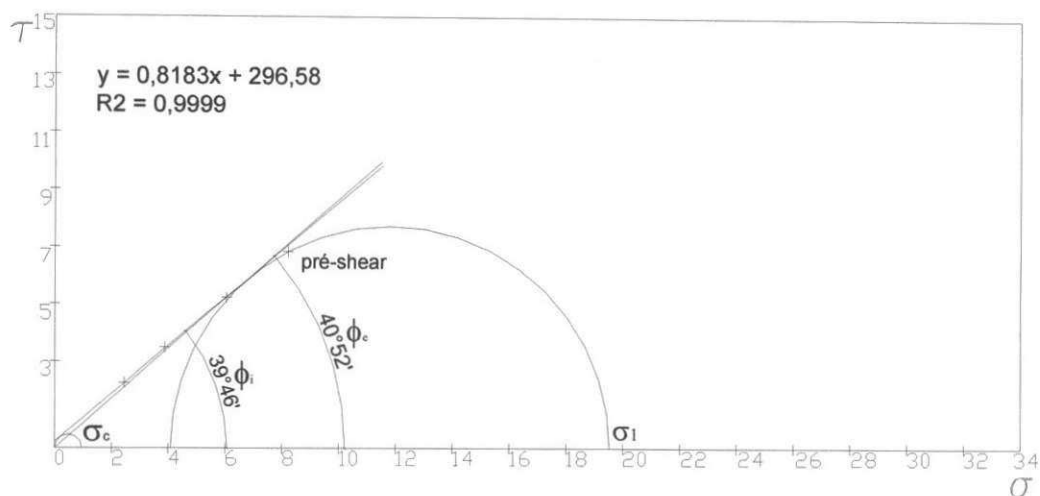


Figura 93 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 30 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 4\text{hs}$

Cargas (kg)		Tensão Normal - $\sigma_s$ (Pa)	Tensão de cisalhamento- $\tau_s$ Pa	Ponto de Pré-shear	
Pré-shear	Shear			$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.336,19	9.917,41		
10	5,0	8.453,53	7.726,59	15.673,61	12.184,24
10	3,5	6.281,93	6.307,14		
7	5,0	8.431,94	7.185,02		
7	3,5	6.273,02	6.134,36	11.326,44	8.909,43
7	2,0	4.104,26	4.598,41		
5	3,5	6.280,21	5.423,13		
5	2,0	4.112,01	3.932,99	8.444,73	6.742,27
5	1,0	2.661,42	2.638,28		

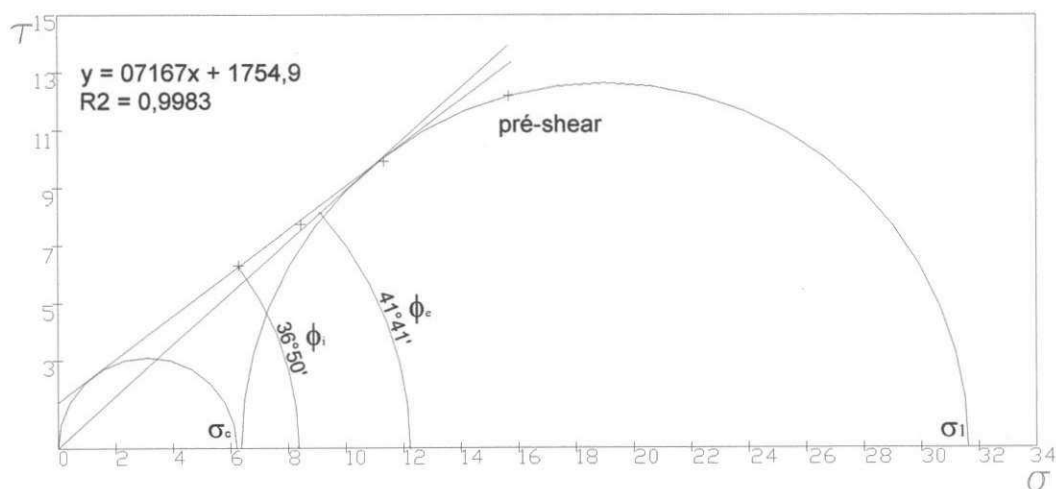


Figura 94 – Lugar geométrico de deslizamento para a carga de 10kg

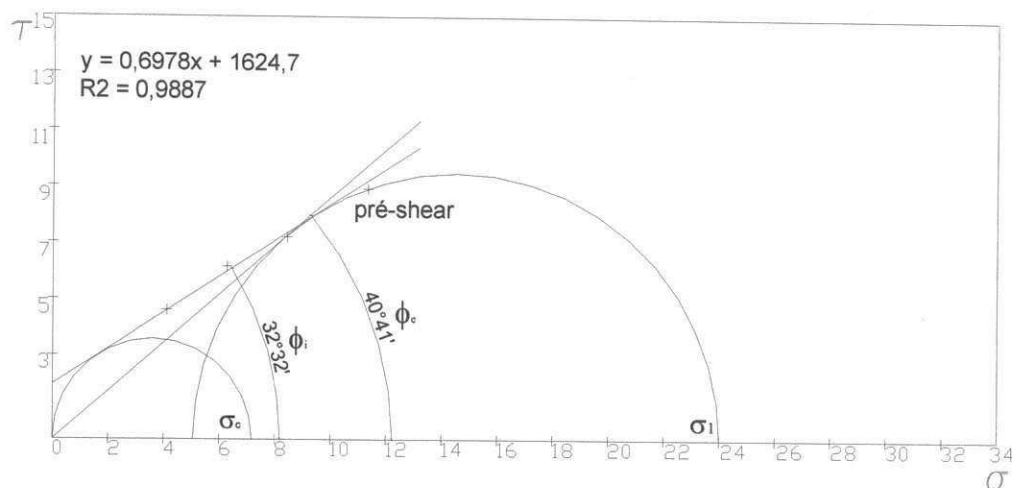


Figura 95 – Lugar geométrico de deslizamento para a carga de 7,0 kg

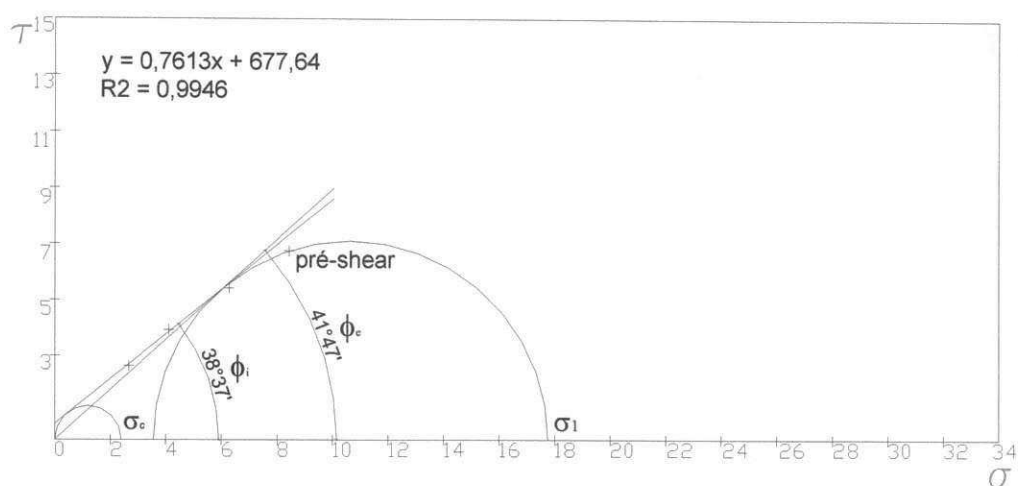


Figura 96 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 31 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 8$ hs.

Pré-Shear	Cargas (kg)	Tensão Normal $-\sigma_s$ Pa	Tensão de cisalhamento $-\tau_s$ Pa	Ponto de Pré-Shear	
				$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
	10	7,0	11.333,79	9.679,97	
	10	5,0	8.449,03	7.996,81	15.670,99
	10	3,5	6.280,98	6.205,64	
	7	5,0	8.445,21	7.160,65	
	7	3,5	6.276,73	6.273,74	11.330,84
	7	2,0	4.100,48	4.259,67	
	5	3,5	6.276,24	5.634,61	
	5	2,0	4.107,74	4.045,36	8.441,29
	5	1,0	2.659,32	2.889,54	

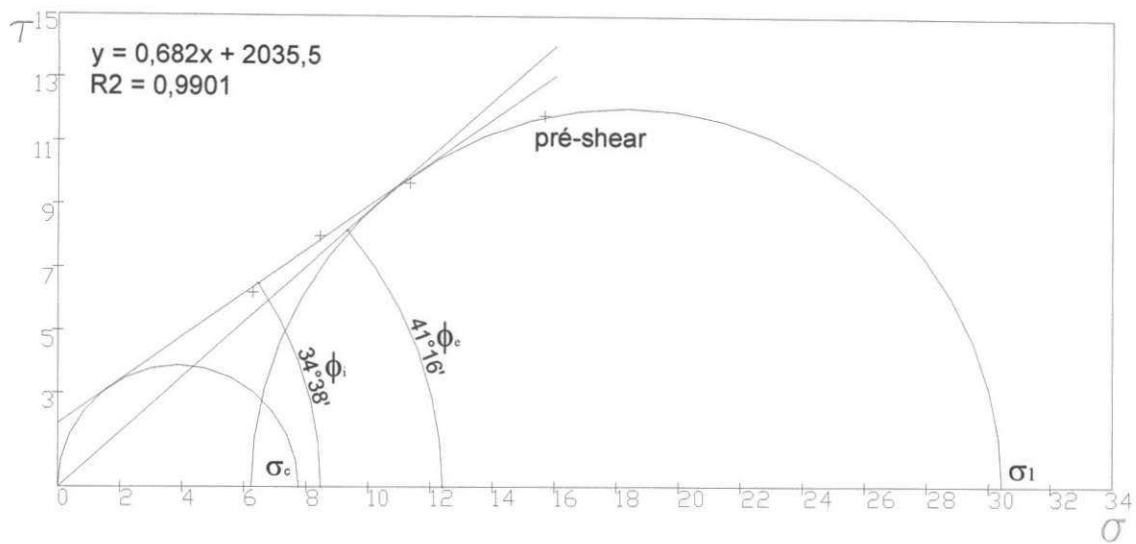


Figura 97– Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

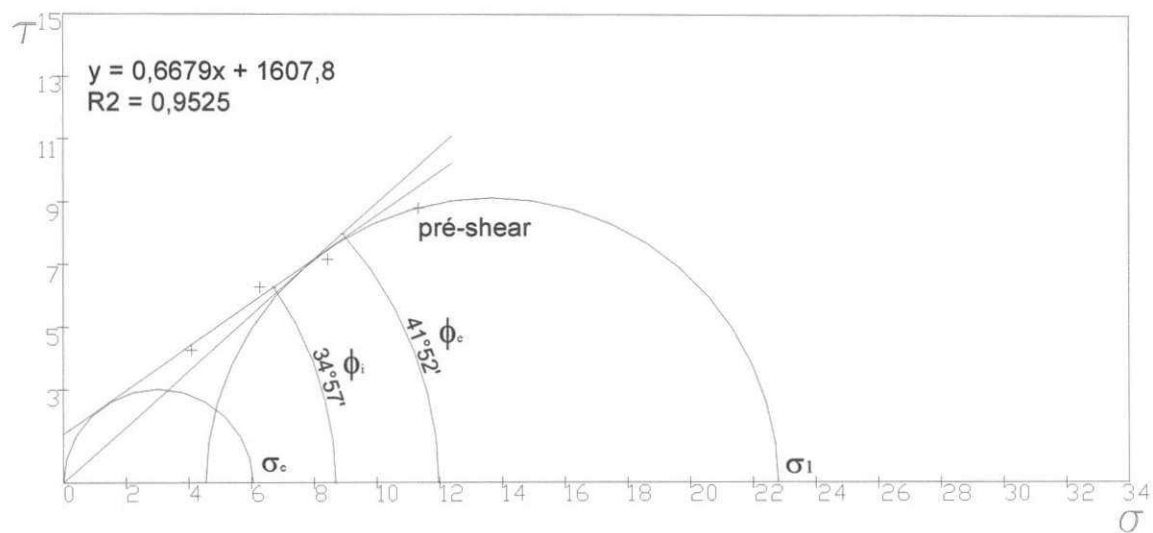


Figura 98 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

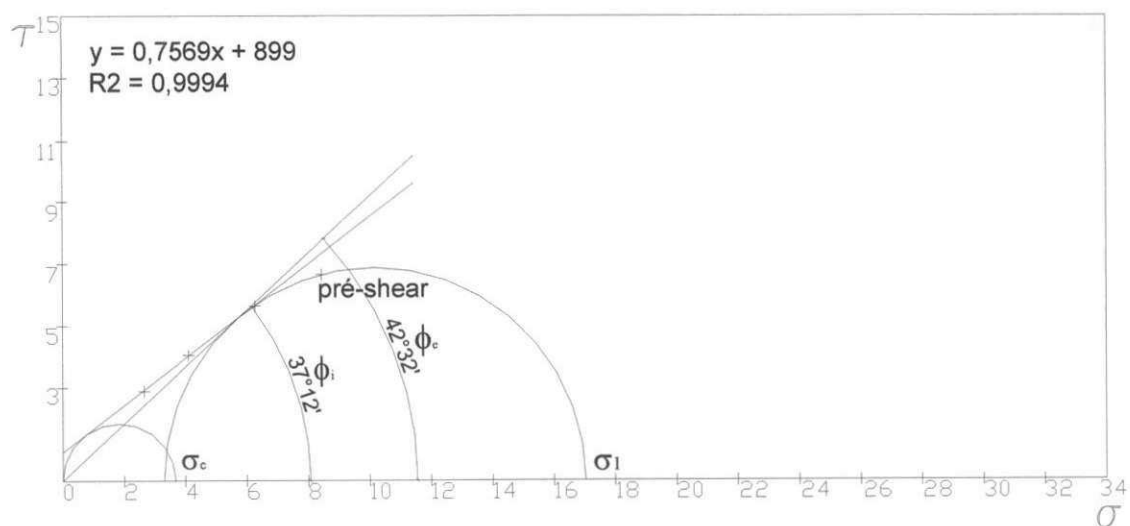


Figura 99 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 32 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no pré-shear e shear para  $t = 14$ hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de Pré-shear	
Pré-Shear	Shear	Normal - $\sigma_s$ Pa	cisalhamento - $\tau_s$ Pa	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.328,98	9.831,81		
10	5,0	8.449,10	7.686,97	15.669,10	12.473,20
10	3,5	6.280,03	6.236,60		
7	5,0	8.423,79	7.434,55		
7	3,5	6.279,94	5.718,89	11.327,50	9.150,22
7	2,0	4.108,66	4.279,94		
5	3,5	6.277,81	5.419,90		
5	2,0	4.110,77	3.515,61	7.031,22	8.444,45
5	1,0	2.664,22	2.636,71		

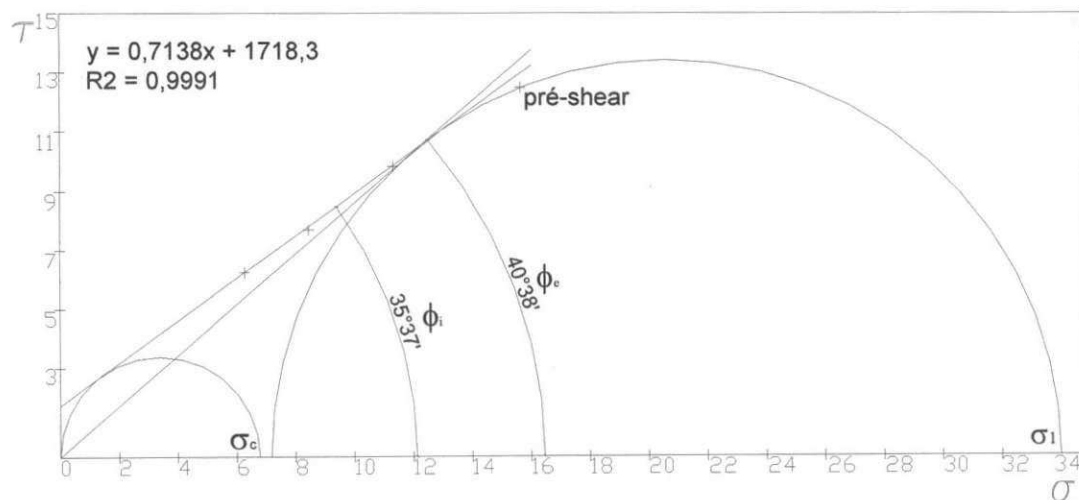


Figura 100- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

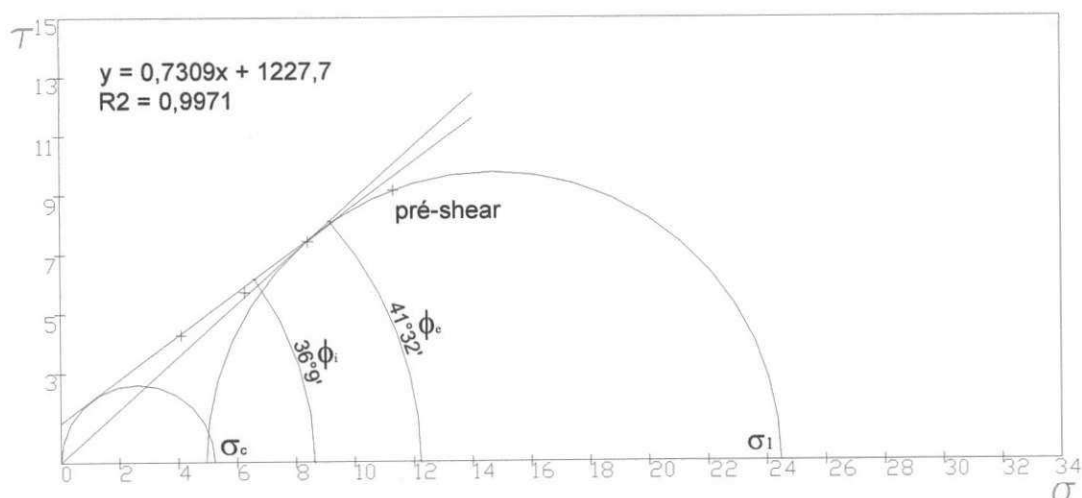


Figura 101- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg



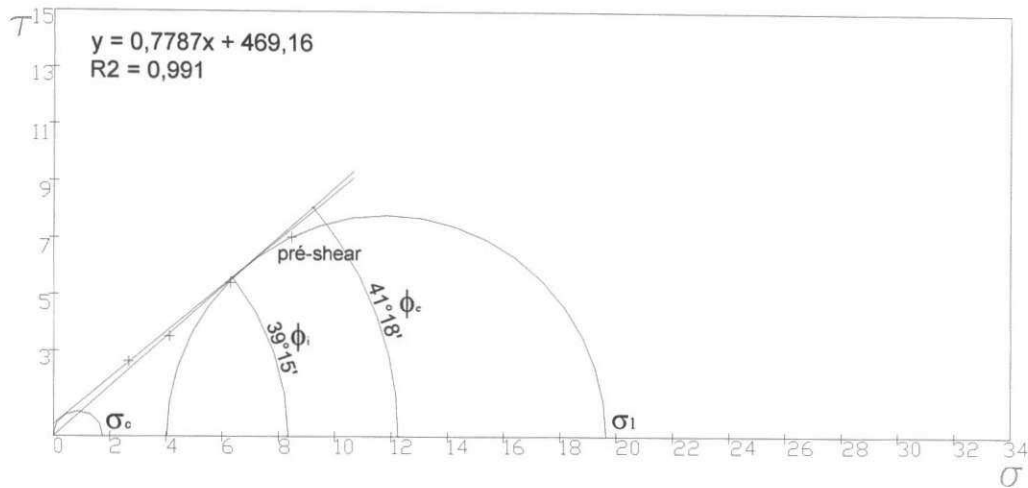


Figura 102- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 33 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para o tempo de 18hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Pré -Shear	Shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento- $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.337,27	9.886,13		
10	5,0	8.454,02	7.892,49	15.674,66	12.569,51
10	3,5	6.283,51	6.284,76		
7	5,0	8.445,95	7.351,25		
7	3,5	6.277,72	5.742,55	11.333,89	8.764,95
7	2,0	4.107,89	3.958,36		
5	3,5	6.278,62	5.556,35		
5	2,0	4.111,53	4.989,18	8.442,29	6.838,59
5	1,0	2.656,16	2.675,97		

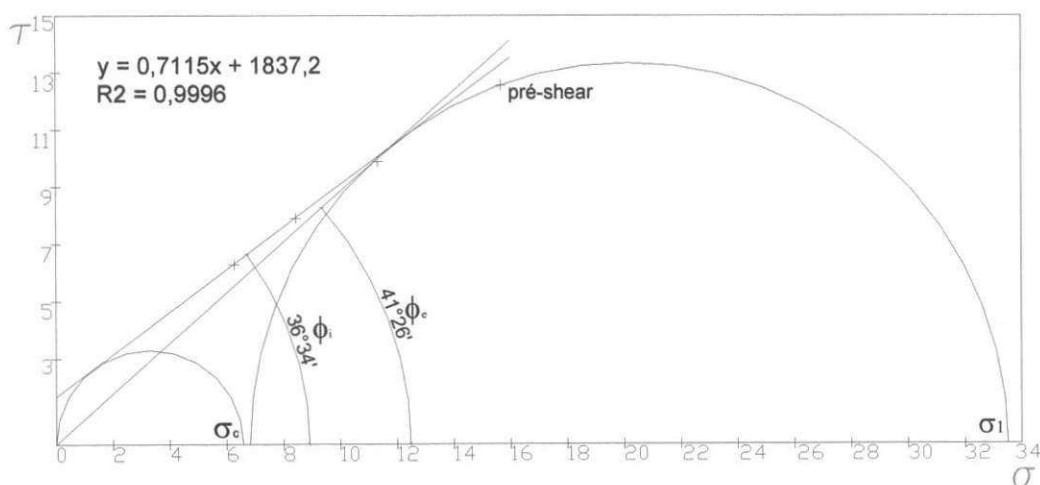


Figura 103- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

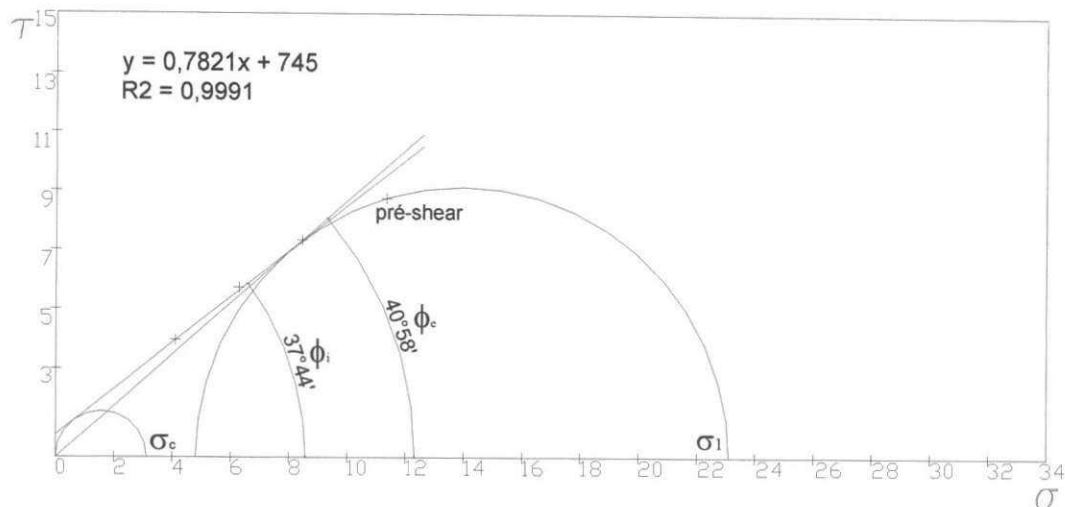


Figura 104- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

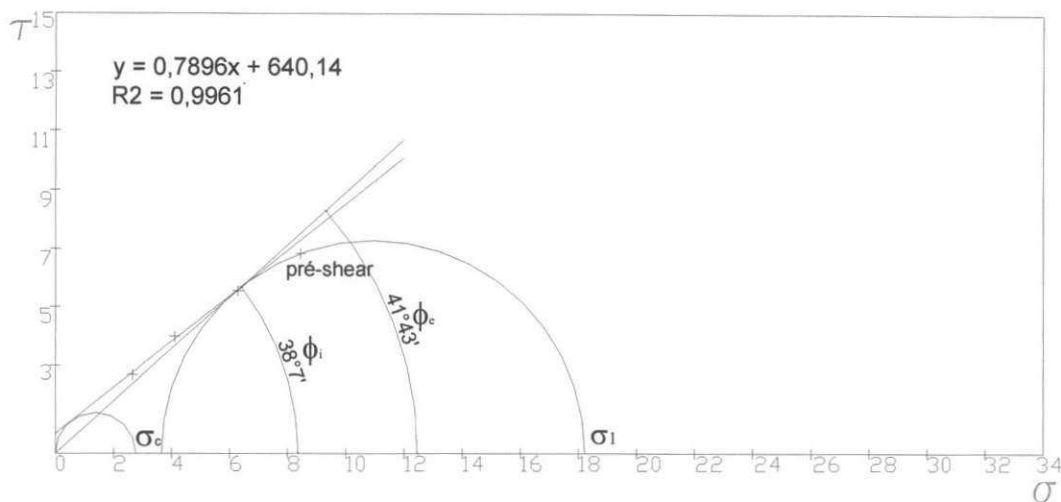


Figura 105- Lugar geométrico de deslizamento para o nível de carga de 5,0kg

Tabela 34– Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 24$ hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Pré-Shear	Shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento- $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.327,83	9.535,49		
10	5,0	8.447,38	7.711,05	15.667,19	12.280,56
10	3,5	6.277,16	5.555,49		
7	5,0	8.441,59	7.005,64		
7	3,5	6.278,61	5.165,45	11.333,20	9.150,22
7	2,0	4.109,31	3.574,31		
5	3,5	6.278,38	5.309,29		
5	2,0	4.110,99	4.017,84	8.443,50	7.031,22
5	1,0	2.660,56	2.636,71		

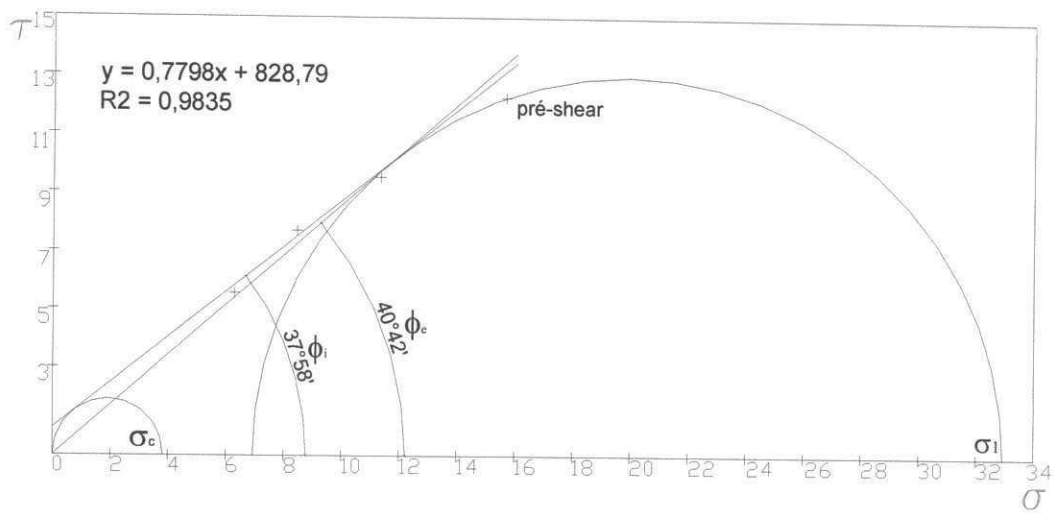


Figura 106- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

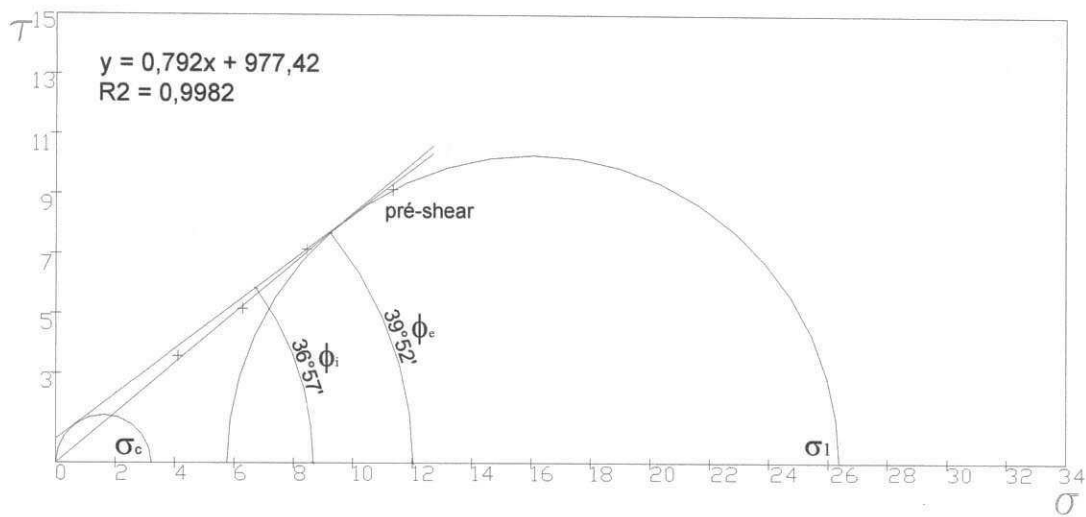


Figura 107- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

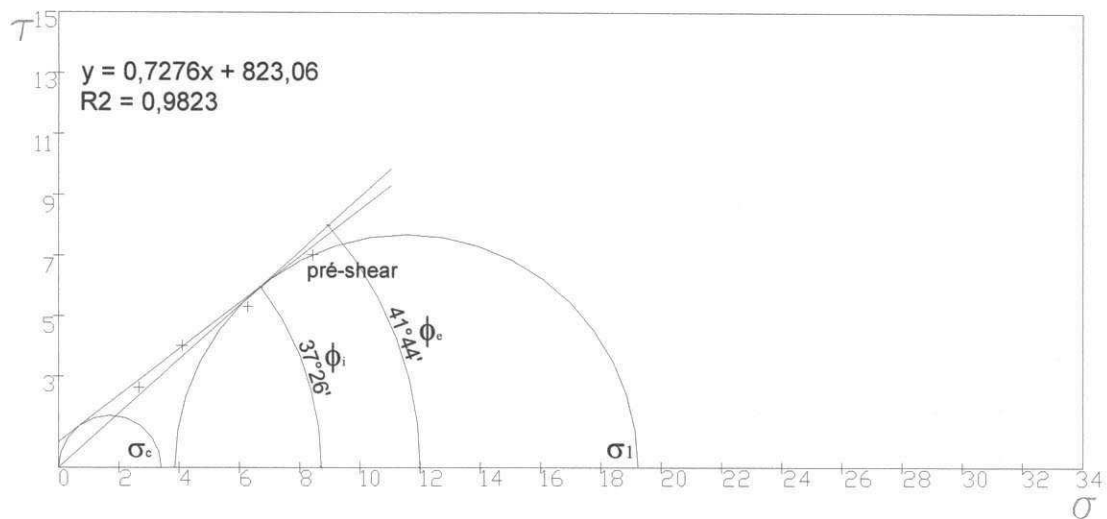


Figura 108- Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

## Teor de umidade de 12%

Tabela 35 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 0$ hs

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de Pré-shear	
Pré-Shear	shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$-\tau$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.106,41	9.883,55		
10	5,0	8.216,48	8.185,91	15.441,66	12.425,04
10	3,5	6.052,91	7.016,49		
7	5,0	8.215,33	7.532,38		
7	3,5	6.049,96	6.180,41	11.106,34	9.270,62
7	2,0	3.883,63	4.635,31		
5	3,5	6.046,20	5.470,66		
5	2,0	3.881,74	4.219,87	8.215,70	6.766,35
5	1,0	2.438,59	2.879,30		

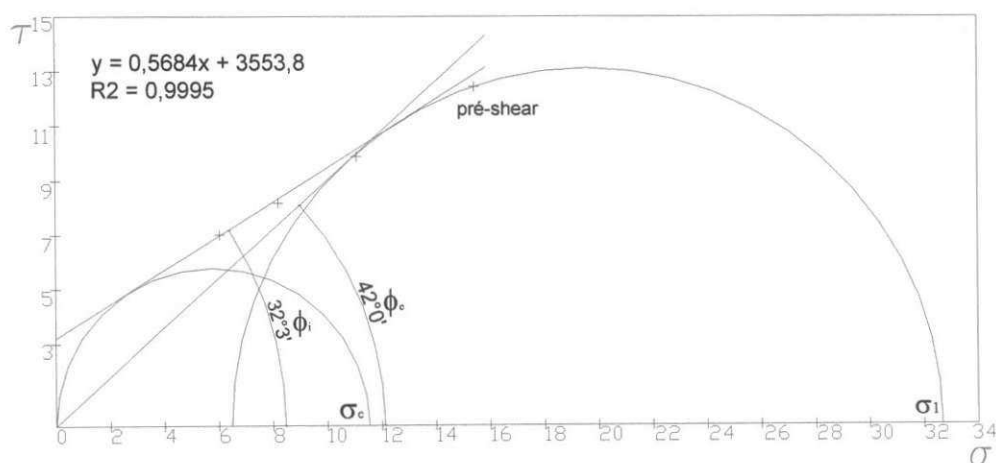


Figura 109 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10kg

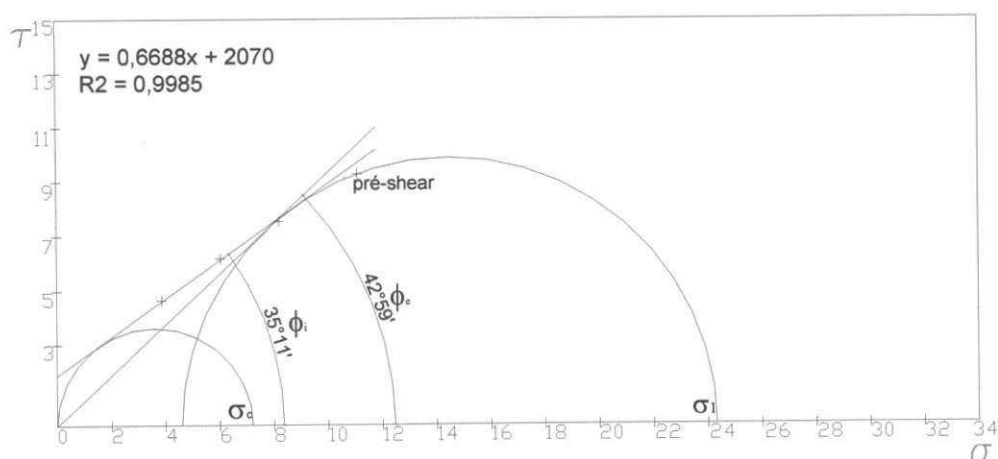


Figura 110 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) a carga de 7kg

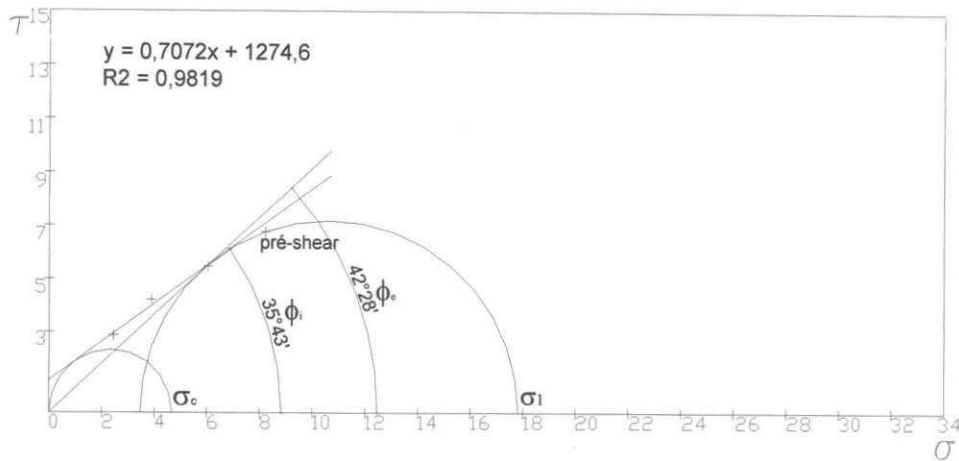


Figura 111 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5kg

Tabela 36 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para o  $t = 4$ hs

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de Pré-shear	
Pré-Shear	shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.329,76	9.786,37		
10	5,0	8.448,76	7.862,96	15.668,64	12.376,88
10	3,5	6.278,21	5.756,69		
7	5,0	8.442,45	7.553,20		
7	3,5	6.279,88	5.628,59	11.333,61	9.005,74
7	2,0	4.108,39	4.133,78		
5	3,5	6.274,50	5.552,95		
5	2,0	4.104,79	4.167,95	8.439,81	6.549,63
5	1,0	2.659,58	2.847,67		

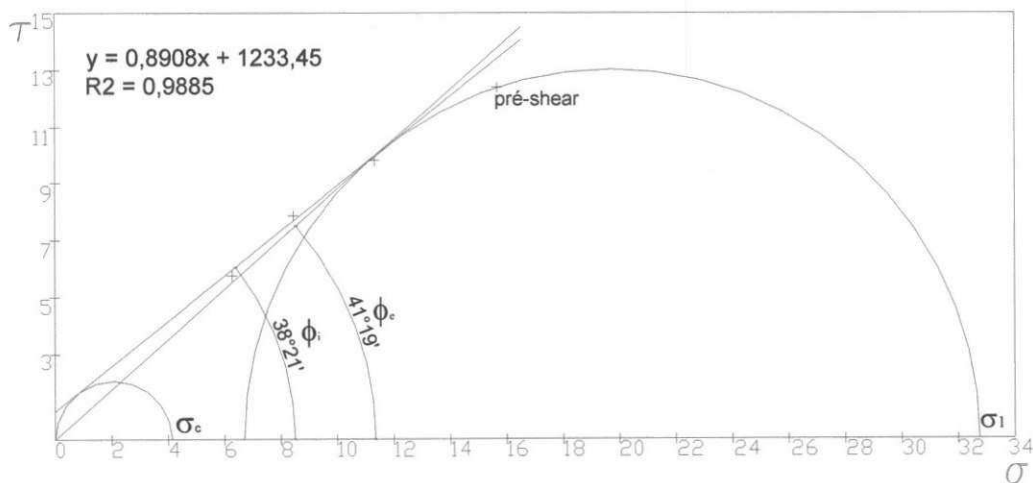


Figura 112 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10kg

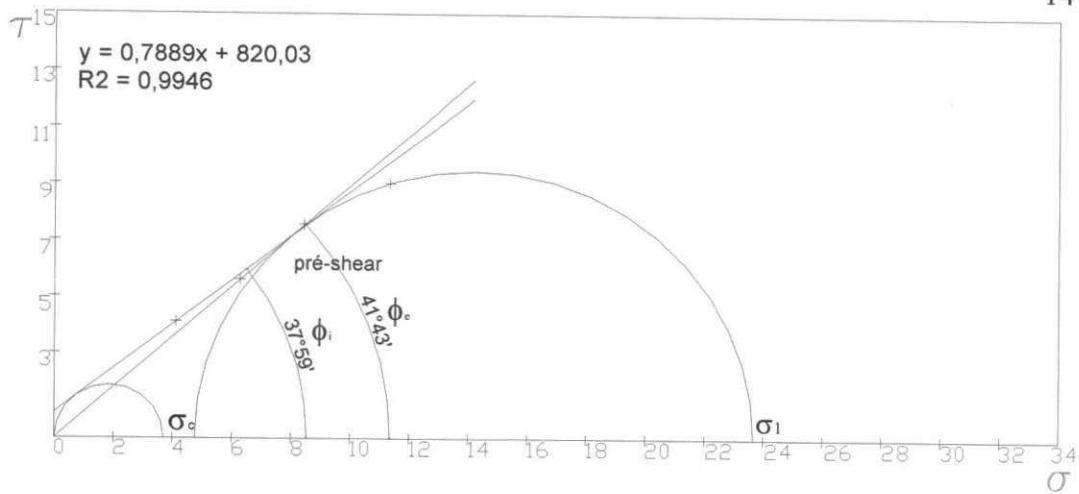


Figura 113 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

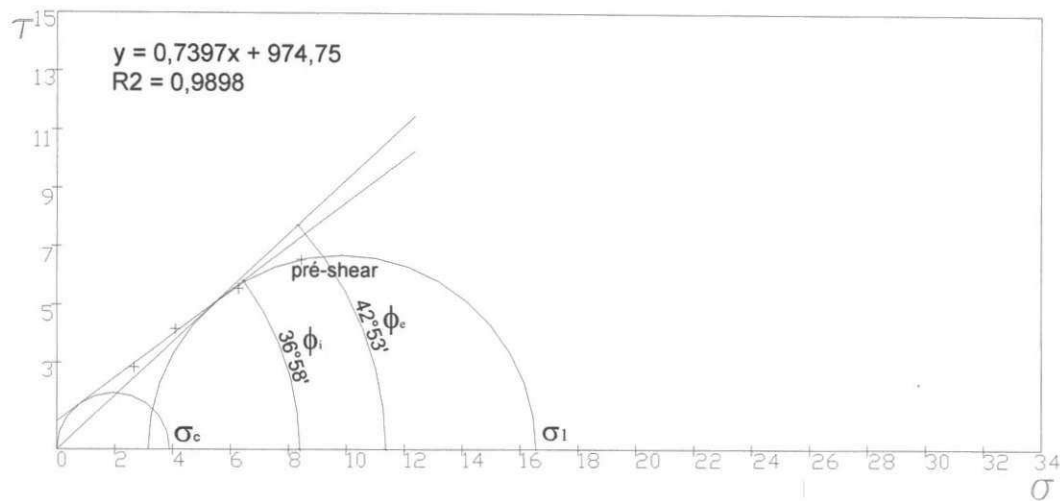


Figura 114 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 37 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para o t = 8hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de Pré-shear	
Pré-Shear	shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento- $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.328,94	9.543,72		
10	5,0	8.447,70	7.739,85	15.667,14	12.039,76
10	3,5	6.275,60	6.306,54		
7	5,0	8.439,31	7.472,42		
7	3,5	6.276,27	6.342,30	11.330,33	8.909,43
7	2,0	4.105,32	4.454,71		
5	3,5	6.276,35	5.490,13		
5	2,0	4.106,12	3.900,88	8.440,90	6.645,95
5	1,0	2.659,66	2.889,54		

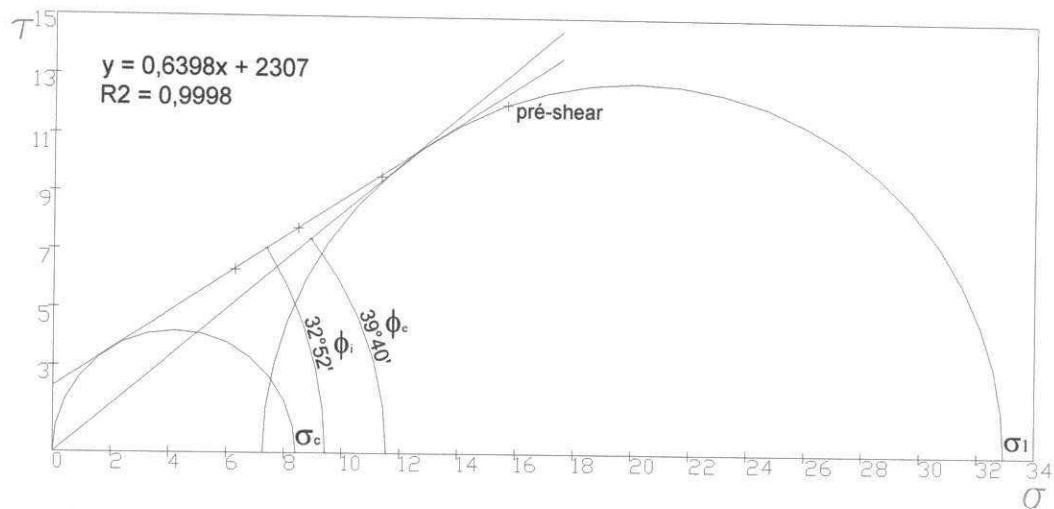


Figura 115 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10kg

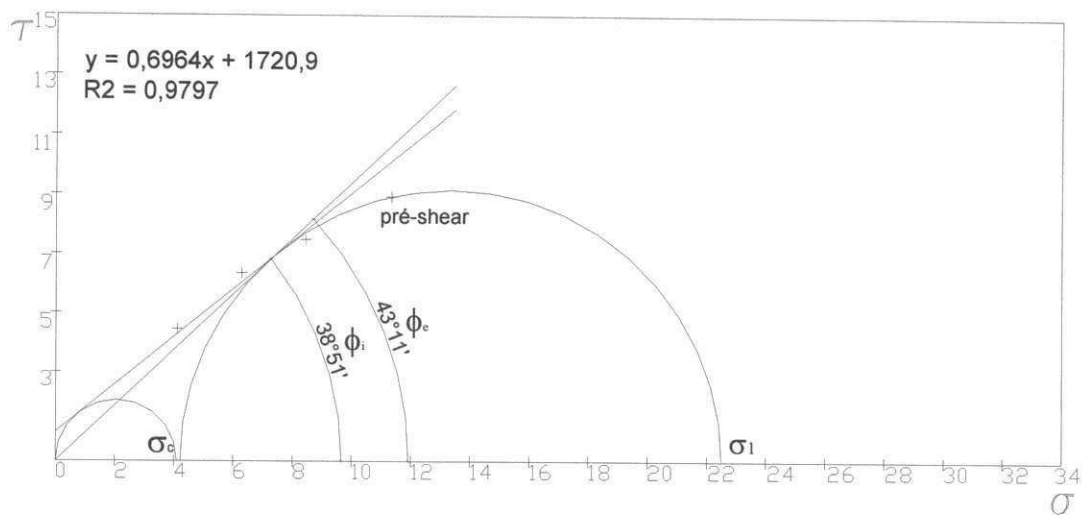


Figura 116 – Lugar geométrico de deslizamento(YL) para a carga de 7,0kgf

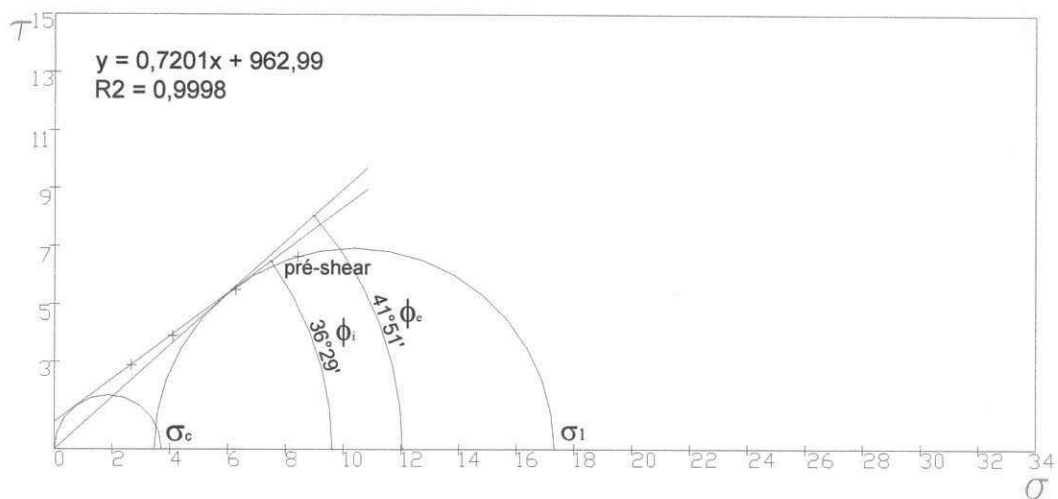


Figura 117 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 38 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $0 t = 14$ hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Pontos de pré-shear	
Pré-Shear	shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\tau}$
		Pa	Pa		
10	7,0	11.335,98	10.200,76		
10	5,0	8.456,17	7.769,66	15.675,57	12.713,99
10	3,5	6.285,38	6.645,95		
7	5,0	8.446,03	7.223,86		
7	3,5	6.290,26	5.779,09	11.341,11	9.535,49
7	2,0	4.116,92	4.623,27		
5	3,5	6.281,56	5.794,46		
5	2,0	4.119,65	3.910,52	8.449,76	6.983,06
5	1,0	2.667,52	3.909,61		

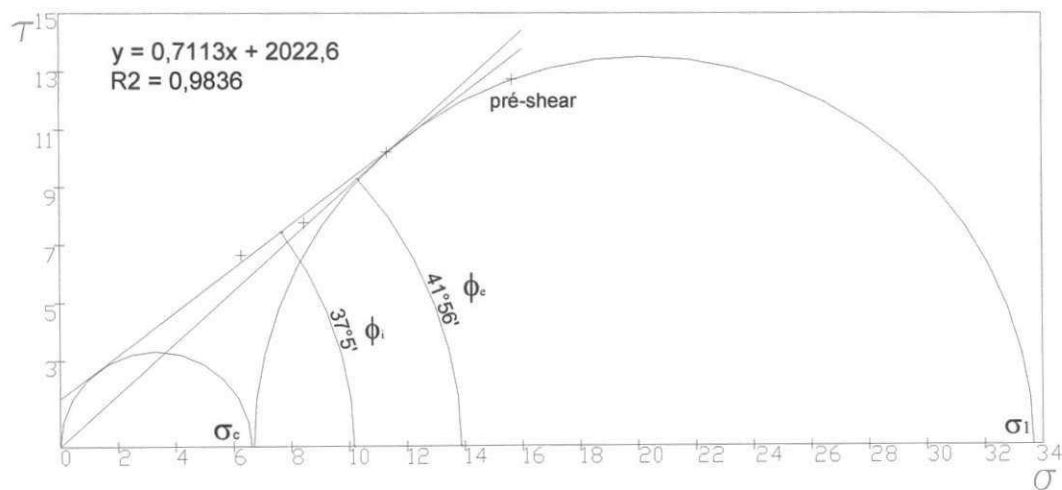


Figura 118 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10kg

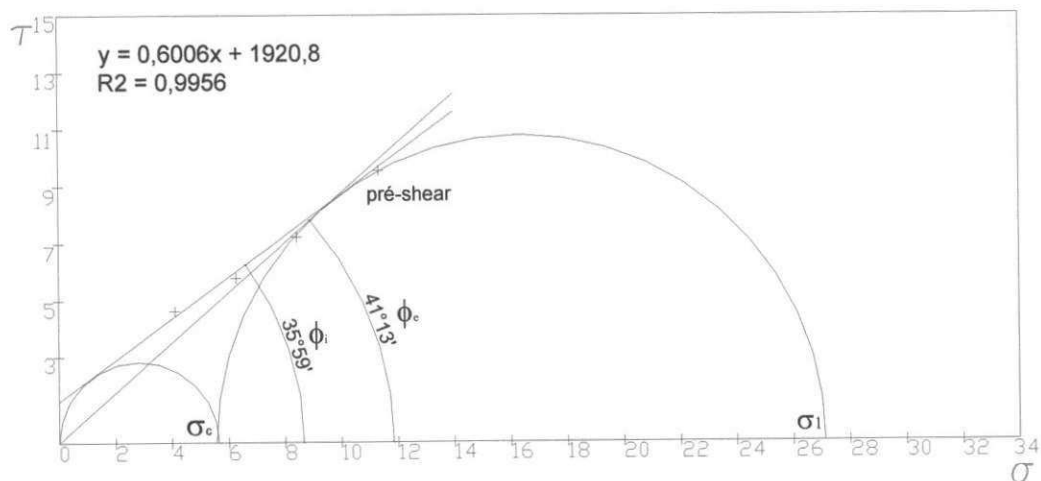


Figura 119 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg



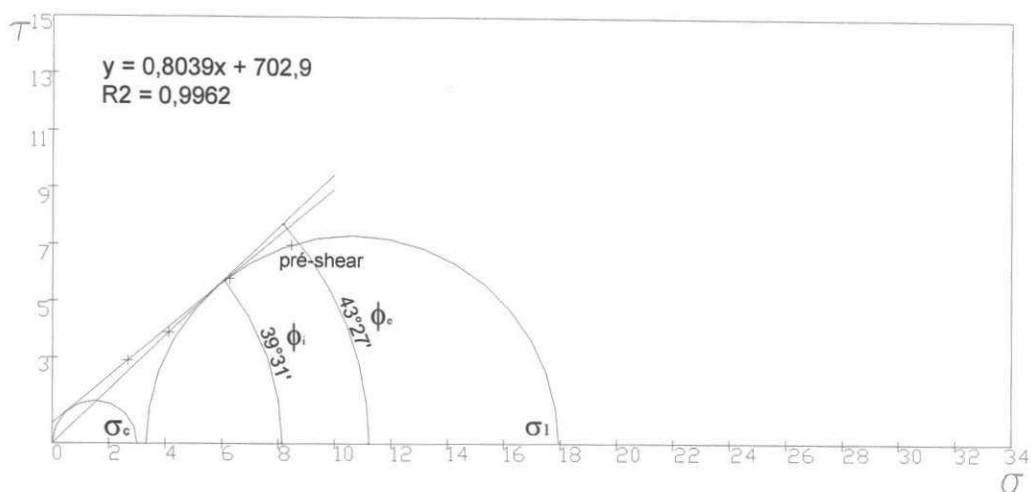


Figura 120 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 39 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para o t=18hs

Cargas (kgf)		Tensão	Tensão de	Pontos de pré-shear	
Pré-Shear	shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\tau}$
		Pa	Pa		
10	7,0	11.329,33	9.686,85		
10	5,0	8.448,67	7.845,55	15.667,43	12.328,72
10	3,5	6.275,10	6.164,36		
7	5,0	8.436,69	7.301,53		
7	3,5	6.279,45	5.870,89	11.331,25	9.053,90
7	2,0	4.107,49	4.088,86		
5	3,5	6.274,75	5.490,13		
5	2,0	4.108,09	3.961,08	8.440,05	6.790,43
5	1,0	2.656,75	2.952,36		

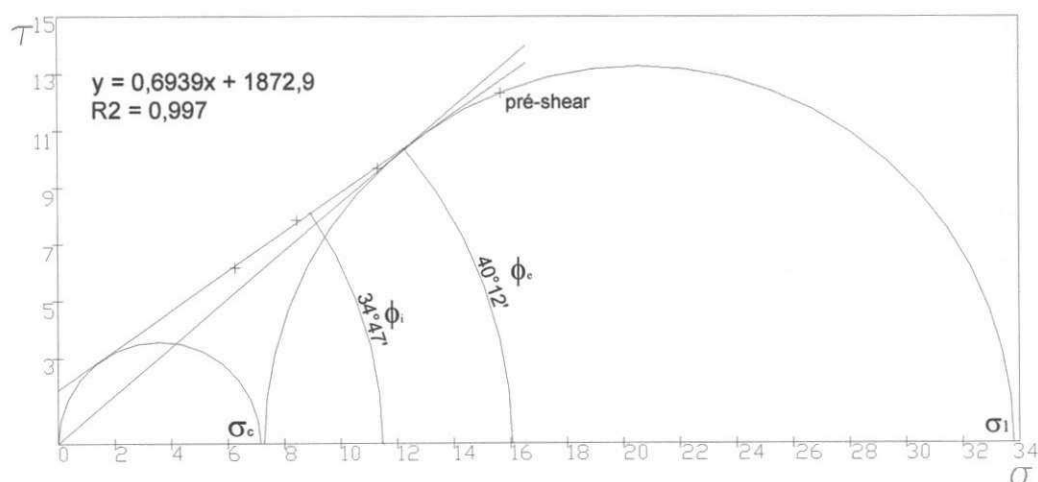


Figura 121 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

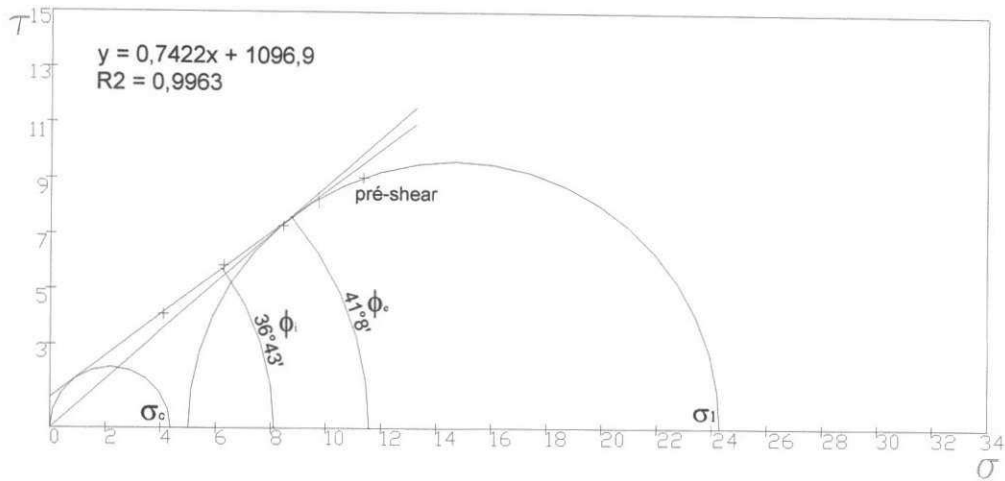


Figura 122 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

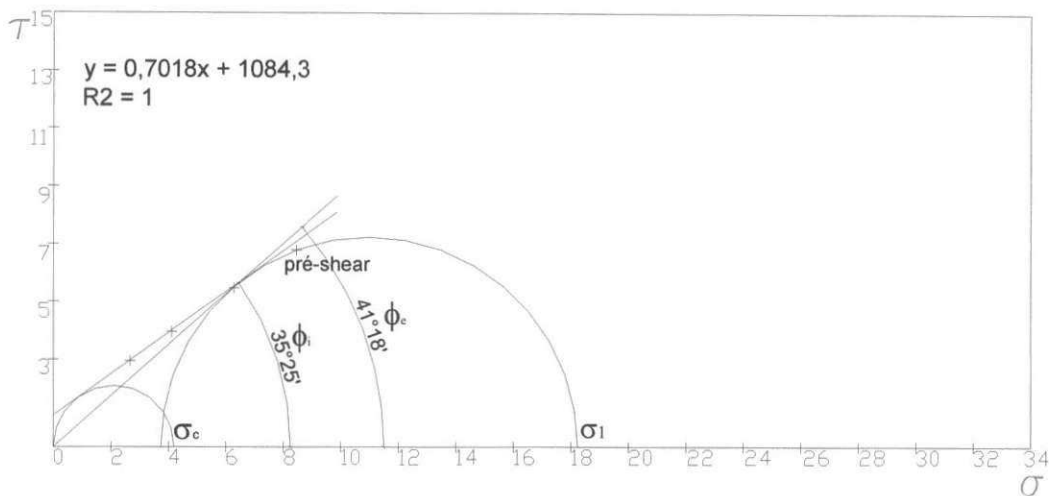


Figura 123 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 40 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 24$ hs.

Cargas (kgf)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.337,80	9.963,57		
10	5,0	8.456,57	8.152,01	15.677,35	12.810,31
10	3,5	6.288,47	6.550,73		
7	5,0	8.449,99	7.817,12		
7	3,5	6.279,93	5.691,52	11.336,35	9.631,81
7	2,0	4.109,02	4.445,45		
5	3,5	6.288,03	5.818,40		
5	2,0	4.119,10	4.072,88	8.452,66	7.127,54
5	1,0	2.670,29	2.565,91		

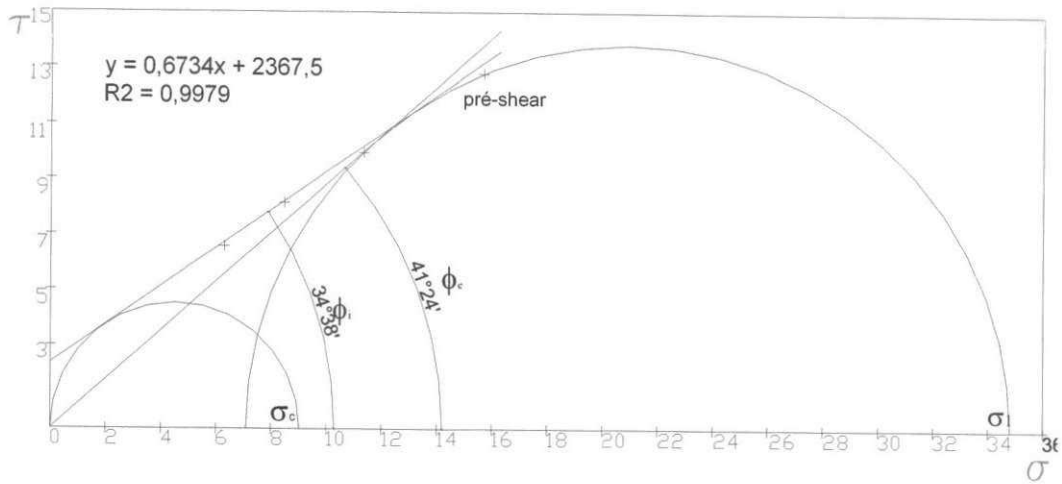


Figura 124 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10kg

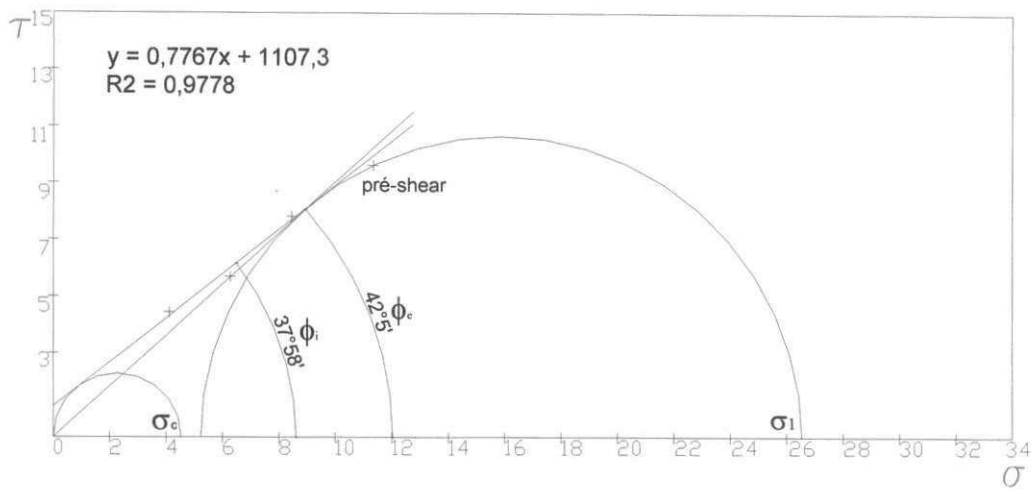


Figura 125 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7kg

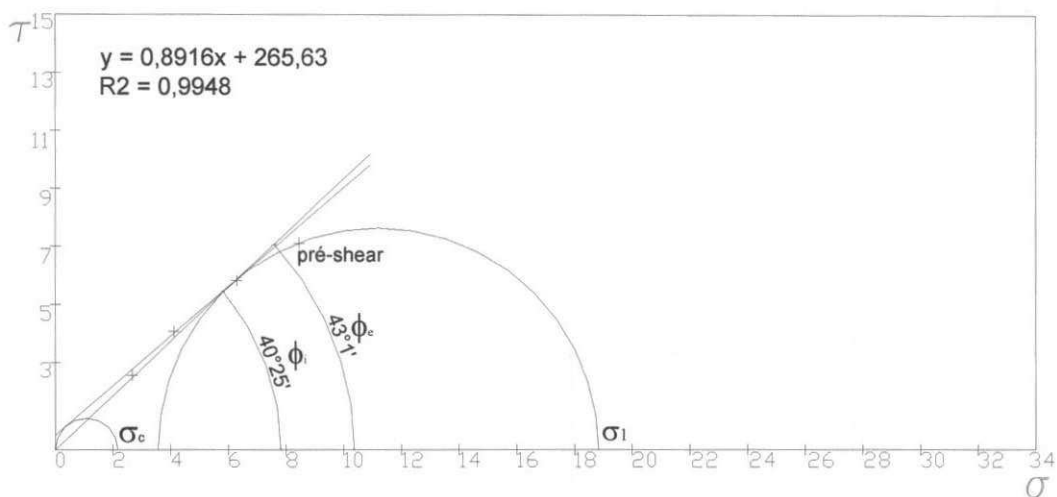


Figura 126 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5kg

## Teor de umidade de 14%

Tabela 41 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 0$ hs.

Cargas (kgf)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.092,25	9.913,93		
10	5,0	8.200,78	8.172,94	15.425,62	11.967,53
10	3,5	6.034,62	6.859,44		
7	5,0	8.200,50	7.249,49		
7	3,5	6.032,96	6.273,74	11.090,28	8.813,11
7	2,0	3.867,28	4.832,99		
5	3,5	6.030,94	5.797,93		
5	2,0	3.865,93	4.274,12	8.199,38	6.838,59
5	1,0	2.420,72	3.419,29		

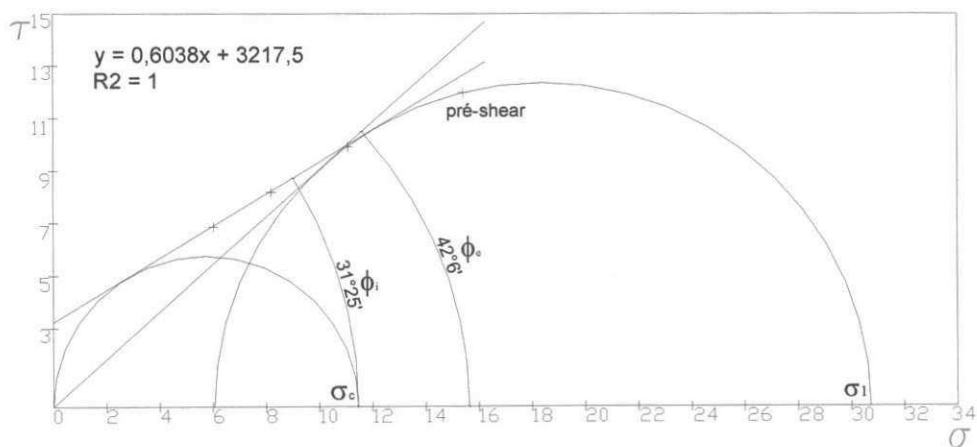


Figura 127 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

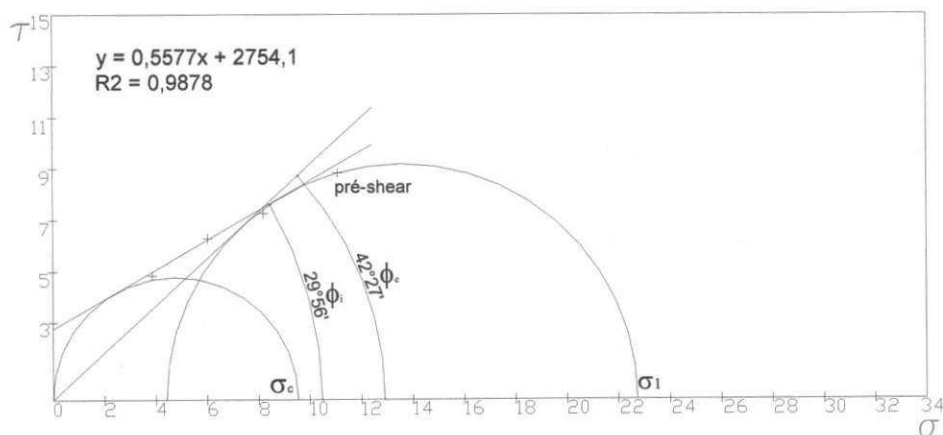


Figura 128 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

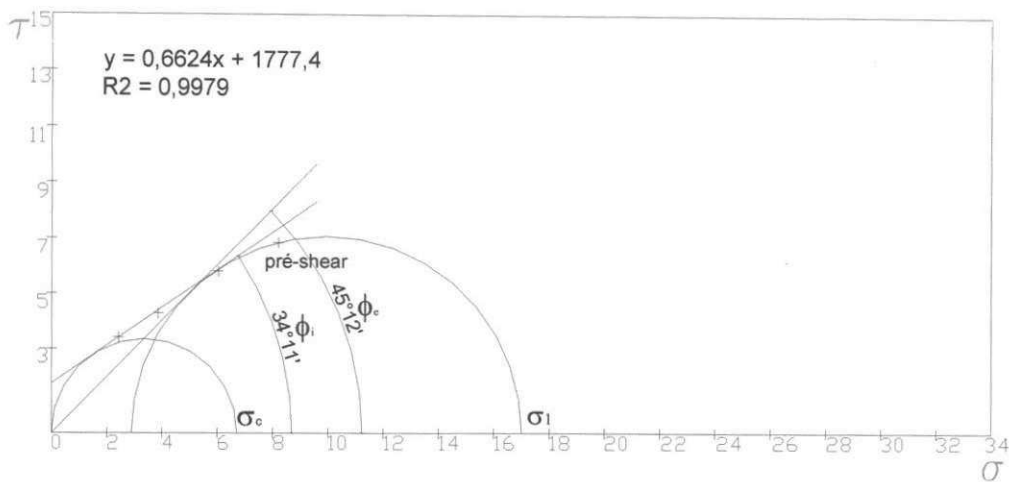


Figura 129 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 42 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 4$ hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.322,42	9.968,92		
10	5,0	8.441,78	8.090,72	15.661,81	12.136,08
10	3,5	6.272,06	6.501,47		
7	5,0	8.428,60	7.063,33		
7	3,5	6.270,69	5.991,65	11.323,60	8.475,99
7	2,0	4.101,40	4.384,13		
5	3,5	6.269,54	5.504,05		
5	2,0	4.102,40	4.074,68	8.435,31	6.694,11
5	1,0	2.653,43	2.928,67		

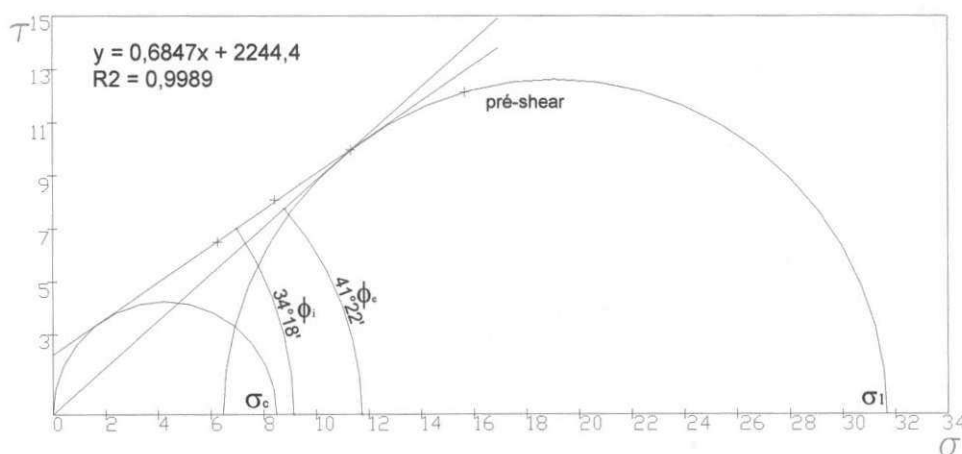


Figura 130 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

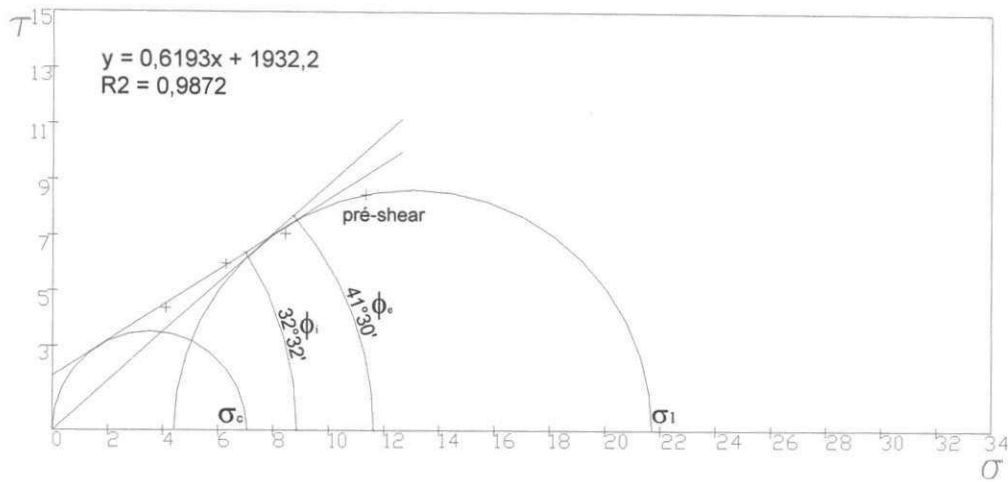


Figura 131 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

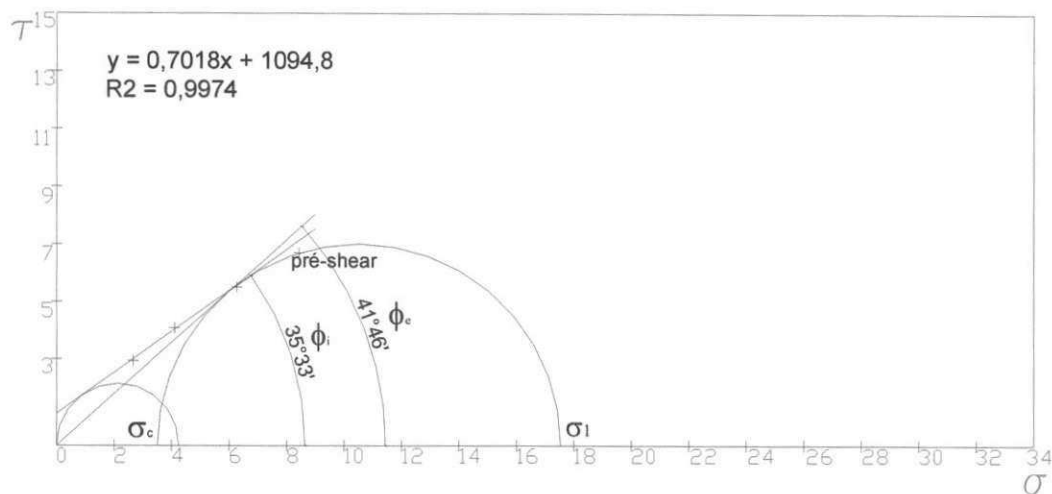


Figura 132 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 43 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.326,58	9.746,48		
10	5,0	8.442,81	8.075,45	15.664,40	12.039,76
10	3,5	6.274,62	6.449,87		
7	5,0	8.437,41	7.384,39		
7	3,5	6.279,75	5.716,95	11.332,74	8.861,27
7	2,0	4.110,95	3.858,94		
5	3,5	6.270,25	5.366,29		
5	2,0	4.102,35	3.841,78	8.435,30	6.260,68
5	1,0	2.652,75	2.845,76		

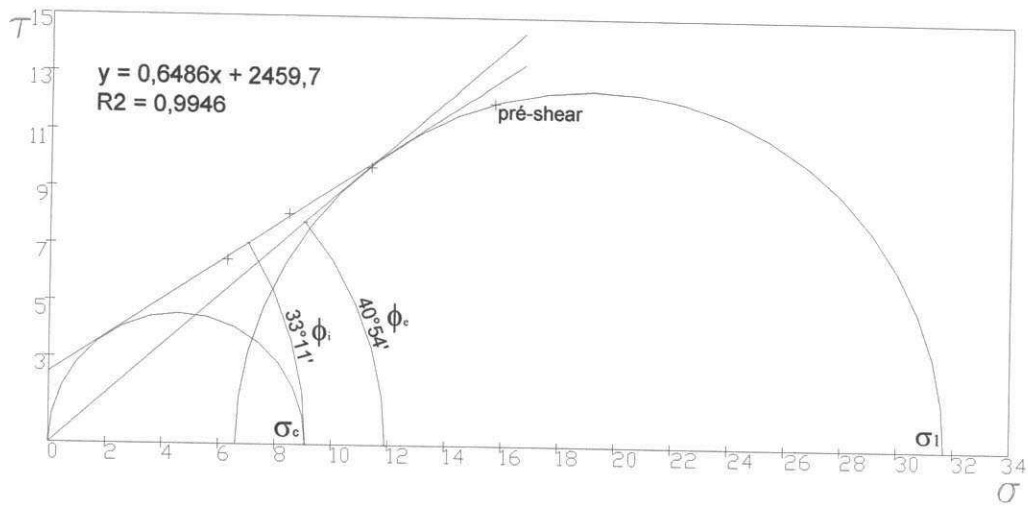


Figura 133 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

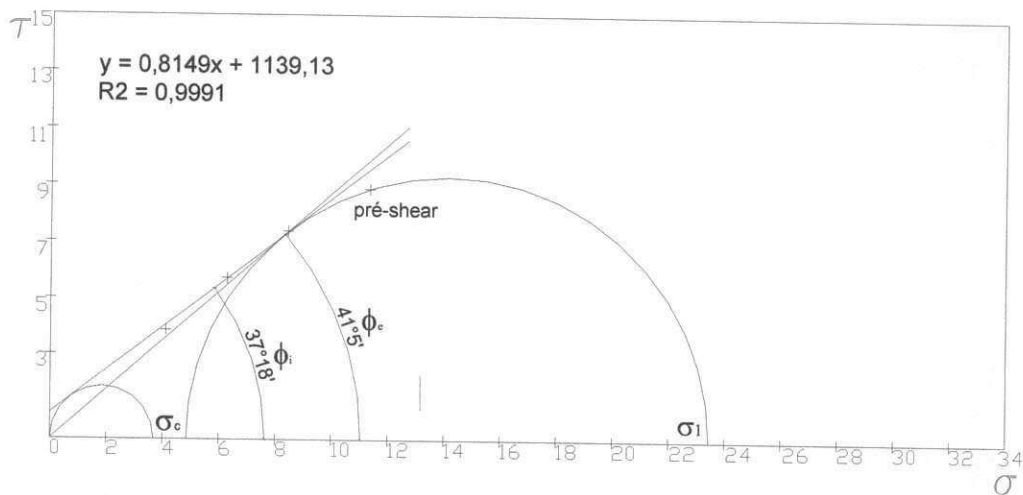


Figura 134 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

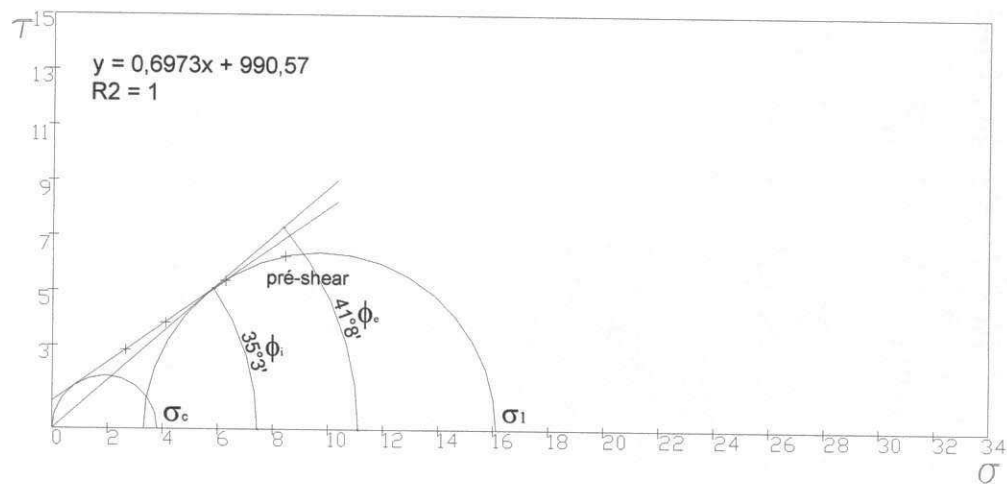


Figura 135 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 44– Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs

Cargas (kgf)		Tensão Normal - $\sigma_s$ Pa	Tensão de cisalhamento $\tau_s$ Pa	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear			$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.333,19	10.678,18		
10	5,0	8.446,75	8.750,17	15.669,21	13.051,10
10	3,5	6.278,49	6.044,72		
7	5,0	8.432,46	8.256,69		
7	3,5	6.273,28	6.293,74	11.326,76	9.583,65
7	2,0	4.104,45	4.863,35		
5	3,5	6.271,81	5.739,77		
5	2,0	4.103,73	4.304,83	8.437,52	7.031,22
5	1,0	2.656,47	2.636,71		

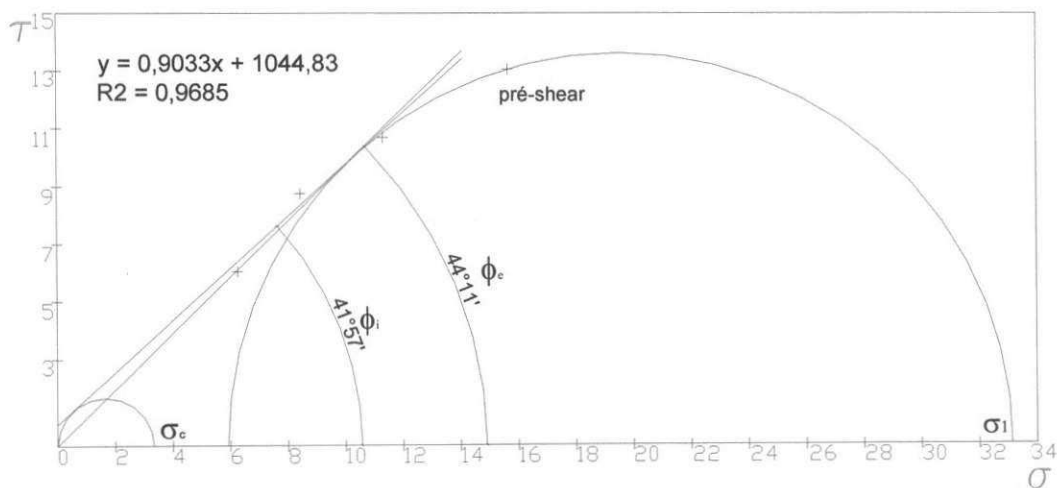


Figura 136 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

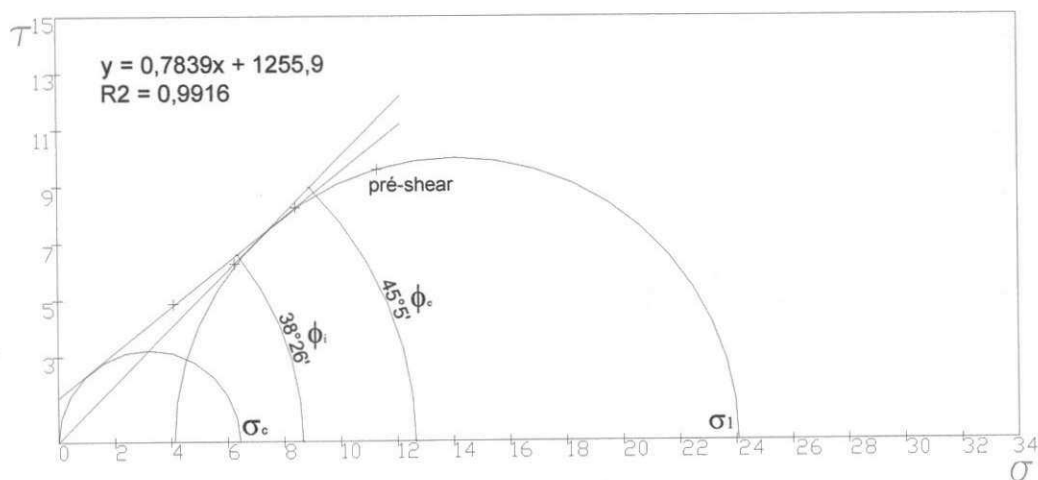


Figura 137 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg



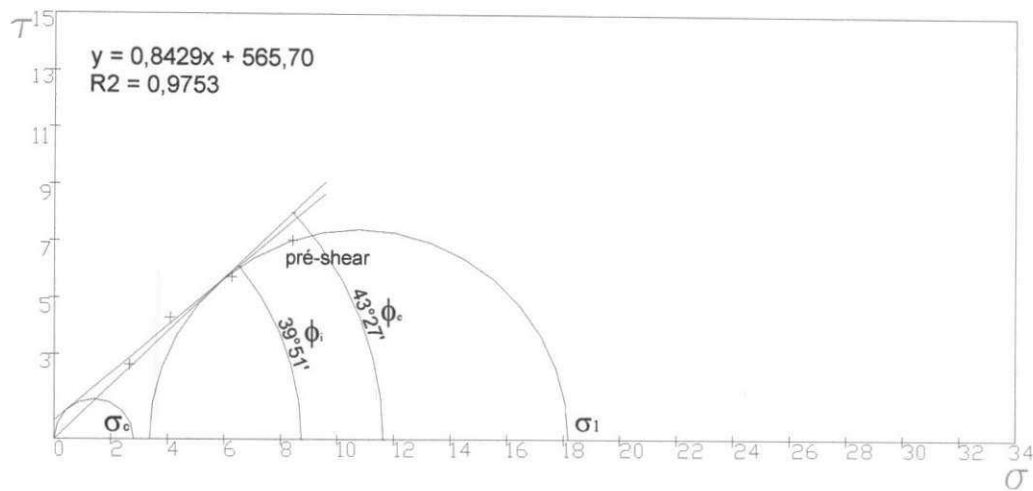


Figura 138 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 45 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 18\text{hs}$

Cargas (kgf)		Tensão Normal - $\sigma_s$ Pa	Tensão de cisalhamento $\tau_s$ Pa	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear			$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.327,10	9.666,63		
10	5,0	8.444,13	7.964,30	15.665,28	11.798,97
10	3,5	6.275,42	6.331,15		
7	5,0	8.440,44	7.432,03		
7	3,5	6.274,22	6.002,79	11.329,51	8.861,27
7	2,0	4.103,77	4.430,63		
5	3,5	6.271,12	5.656,50		
5	2,0	4.105,00	3.986,73	8.437,33	6.549,63
5	1,0	2.655,32	3.132,43		

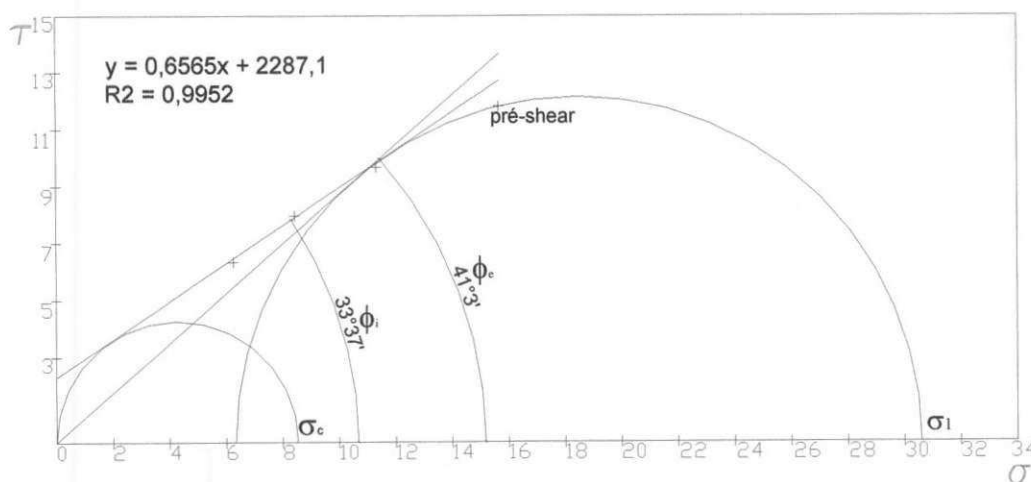


Figura 139 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

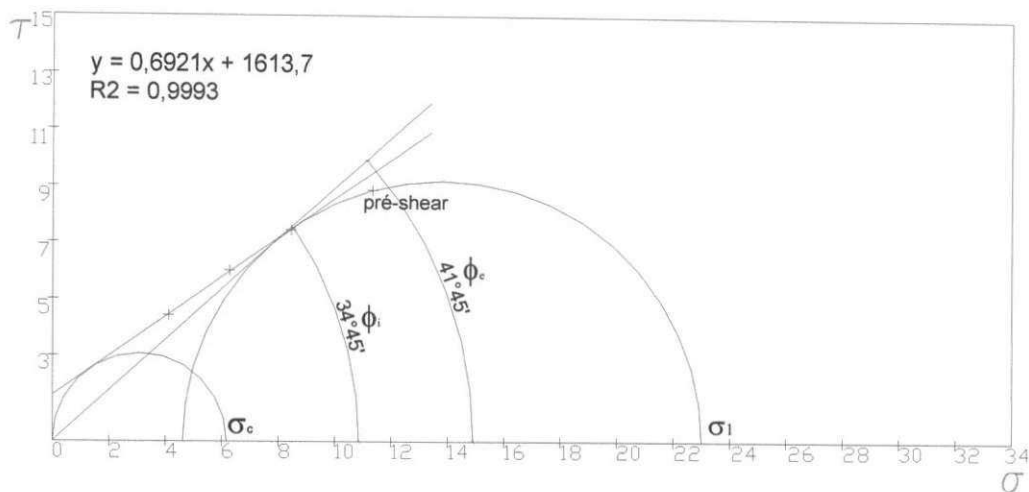


Figura 140 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

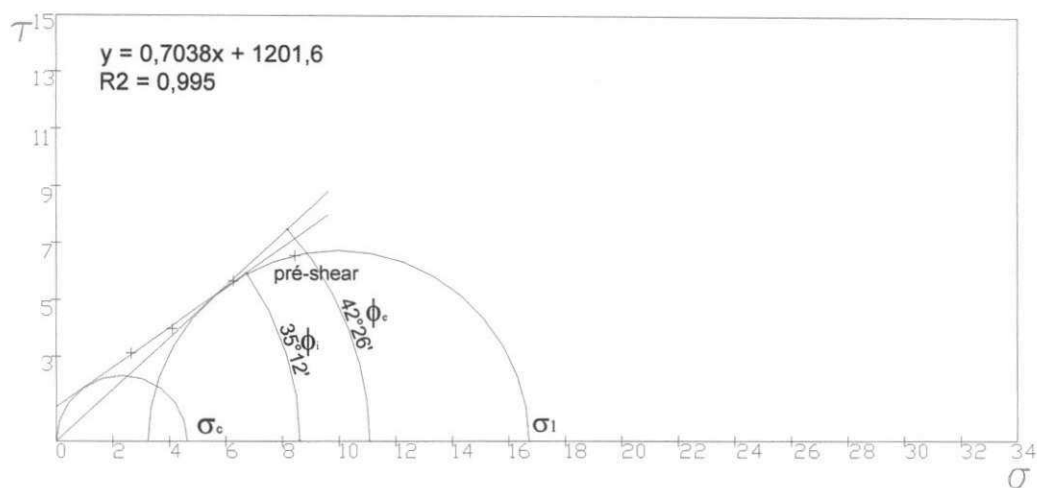


Figura 141 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 46 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 24\text{hs}$ .

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.329,63	10.402,36		
10	5,0	8.449,73	8.570,12	15.668,27	13.002,95
10	3,5	6.275,95	6.360,14		
7	5,0	8.436,57	7.880,57		
7	3,5	6.279,10	6.567,14	11.329,84	9.631,81
7	2,0	4.103,75	4.532,62		
5	3,5	6.271,30	5.859,35		
5	2,0	4.104,86	4.101,55	8.438,70	7.031,22
5	1,0	2.659,38	2.812,49		

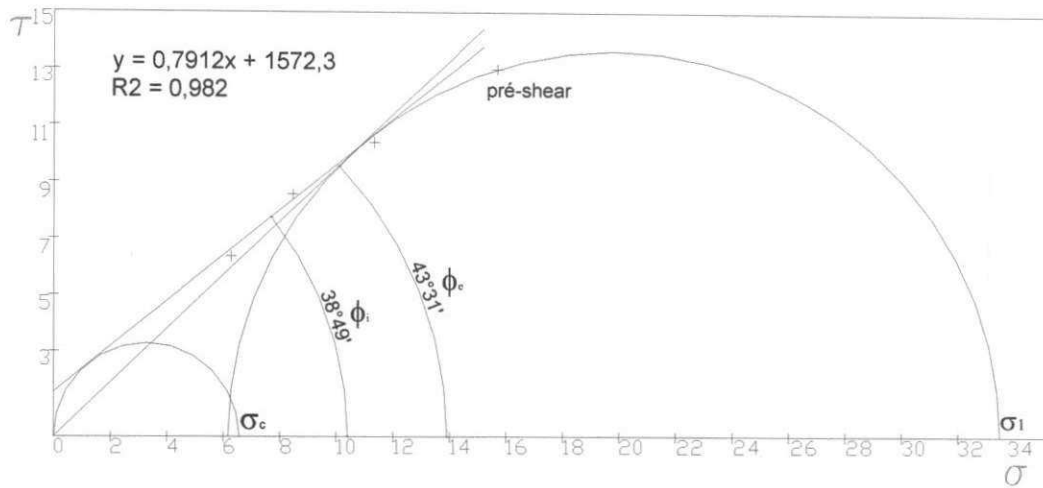


Figura 142 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

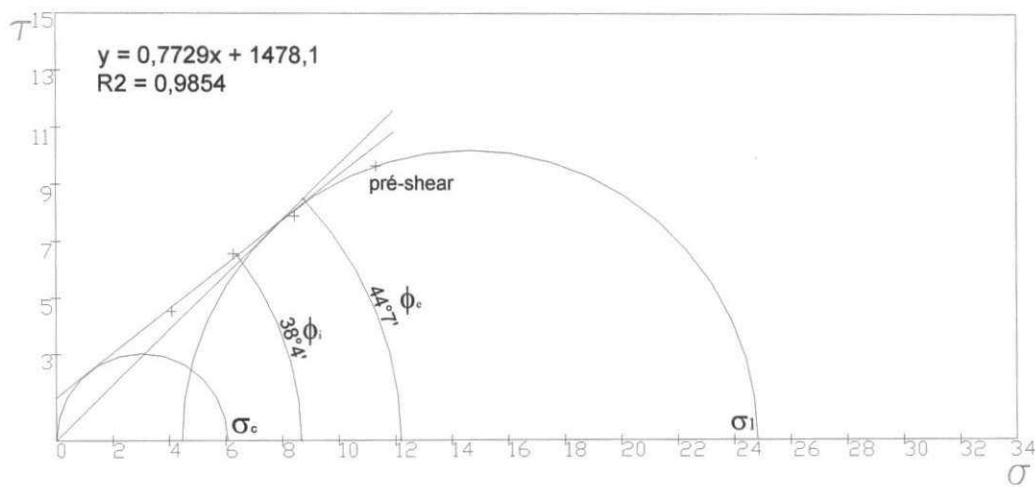


Figura 143 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

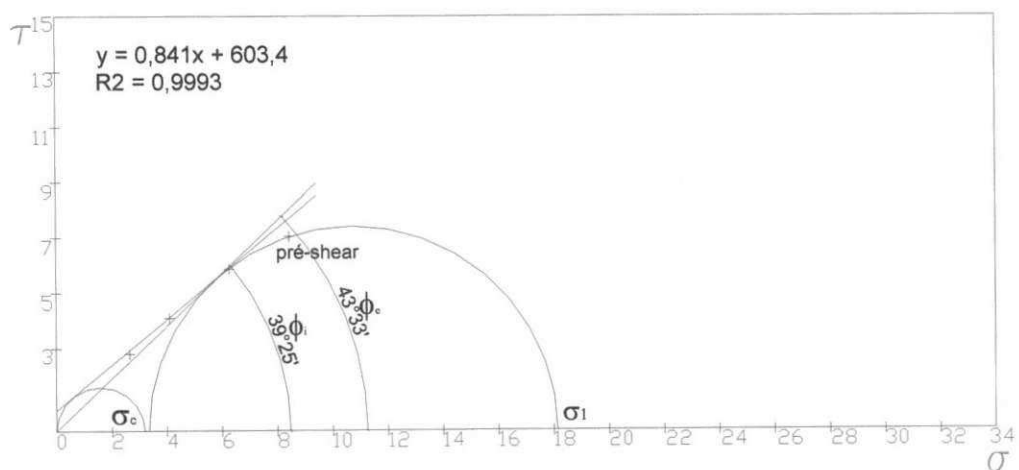


Figura 144 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

### Teor de umidade de 16%

Tabela 47 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 0$ hs.

Cargas (kg)		Tensão Normal - $\sigma_s$ Pa	Tensão de cisalhamento $\tau_s$ Pa	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear			$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.100,03	10.113,40		
10	5,0	8.212,58	8.462,23	15.435,03	11.847,13
10	3,5	6.043,29	7.108,28		
7	5,0	8.208,56	7.471,08		
7	3,5	6.041,08	6.034,33	11.098,18	8.620,47
7	2,0	3.874,79	4.821,62		
5	3,5	6.042,92	5.656,13		
5	2,0	3.875,09	3.334,32	8.209,38	6.645,95
5	1,0	2.429,58	3.249,13		

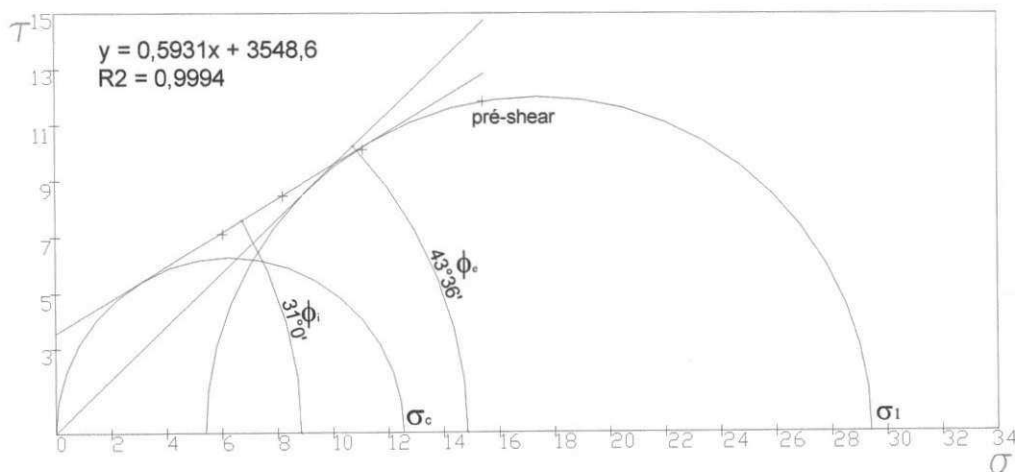


Figura 145 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

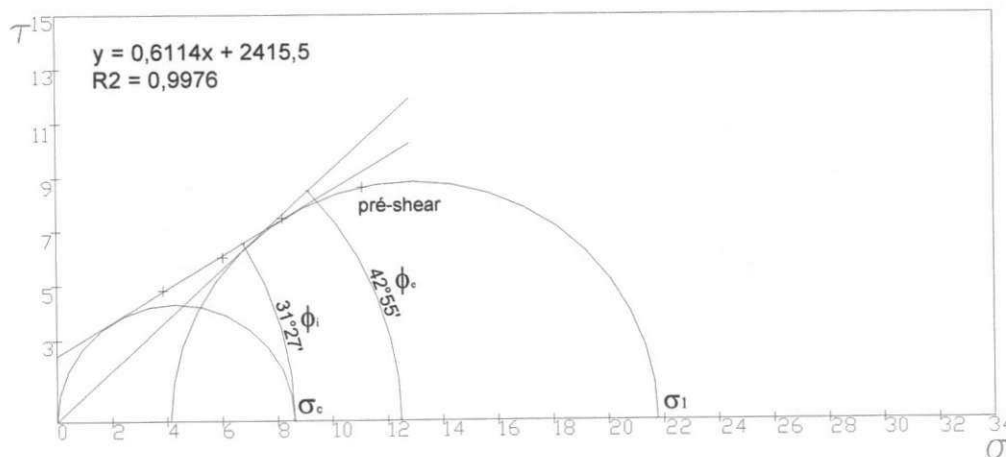


Figura 146 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

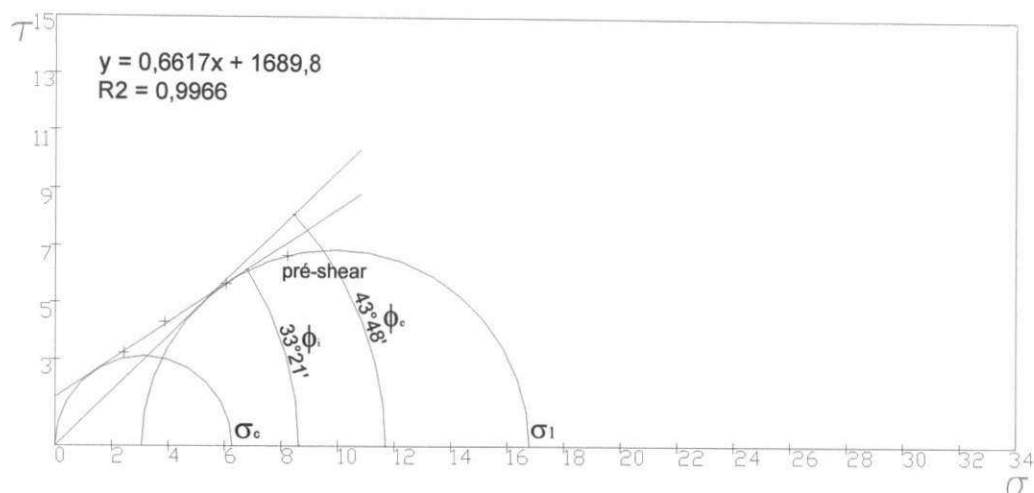


Figura 147 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 48 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 4$ hs.

Cargas (kg)		Tensão Normal - $\sigma_s$	Tensão de cisalhamento $\tau_s$	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Pa	Pa	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.319,54	9.861,49		
10	5,0	8.437,27	8.158,14	15.659,71	11.654,49
10	3,5	6.273,12	6.382,22		
7	5,0	8.431,42	7.166,07		
7	3,5	6.270,10	5.923,56	11.324,55	8.957,58
7	2,0	4.102,01	4.758,72		
5	3,5	6.269,38	5.779,09		
5	2,0	4.101,30	4.334,32	8.434,18	6.645,95
5	1,0	2.651,29	3.178,50		

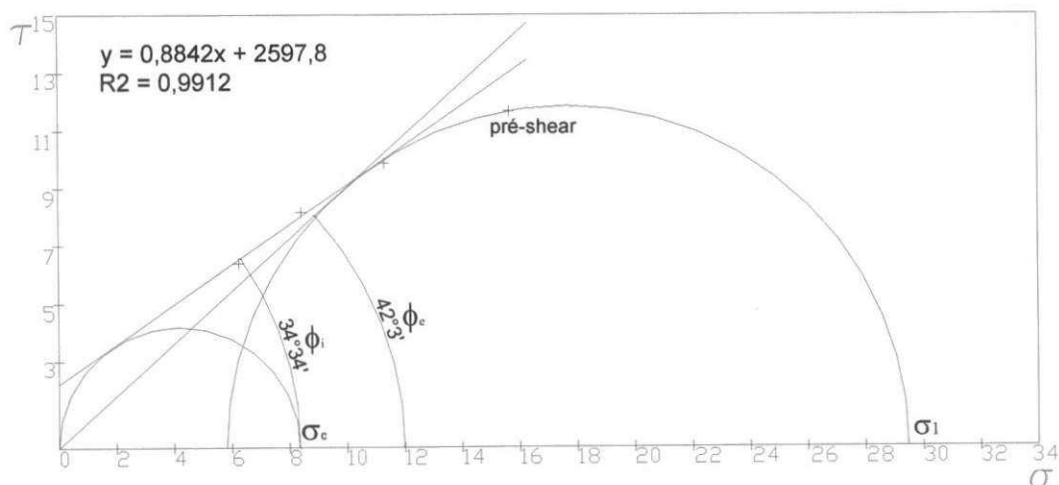


Figura 148 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

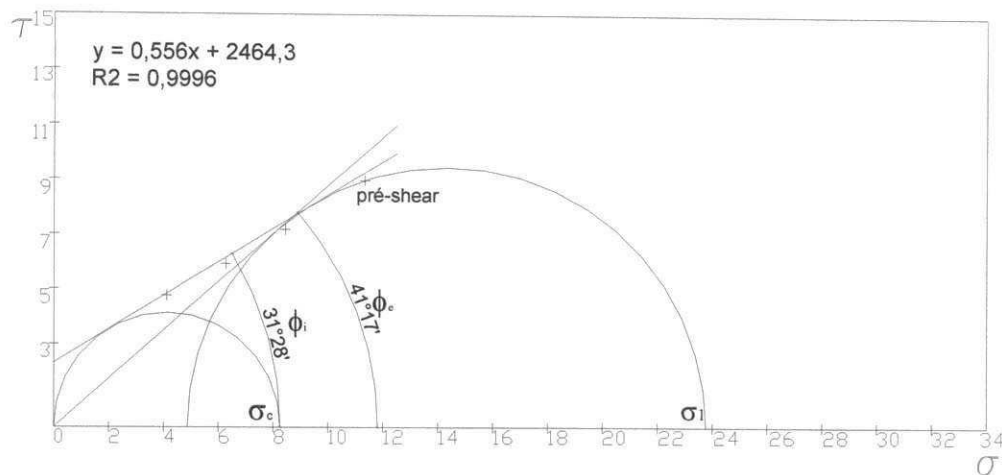


Figura 149 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

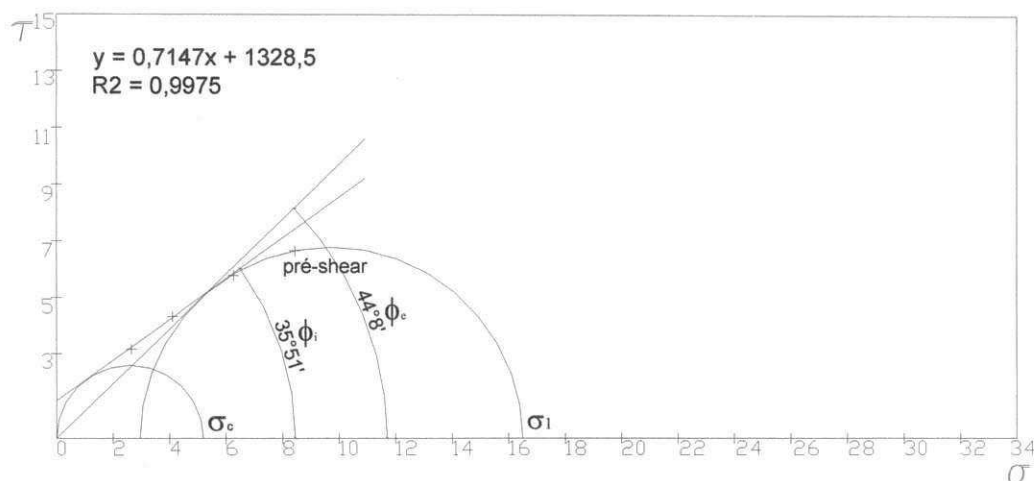


Figura 150 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 49 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 8hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.321,26	10.740,64		
10	5,0	8.441,91	8.896,29	15.661,04	12.232,40
10	3,5	6.270,76	6.698,70		
7	5,0	8.434,03	7.720,50		
7	3,5	6.268,75	6.198,54	11.322,90	9.150,22
7	2,0	4.095,83	4.575,11		
5	3,5	6.264,16	5.779,09		
5	2,0	4.099,16	4.623,27	8.431,37	6.645,95
5	1,0	2.650,24	3.467,45		

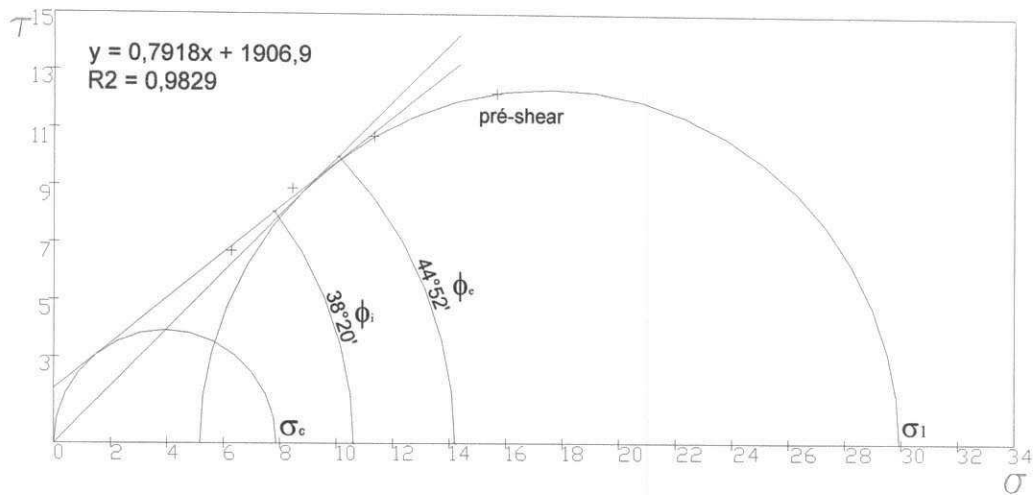


Figura 151 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

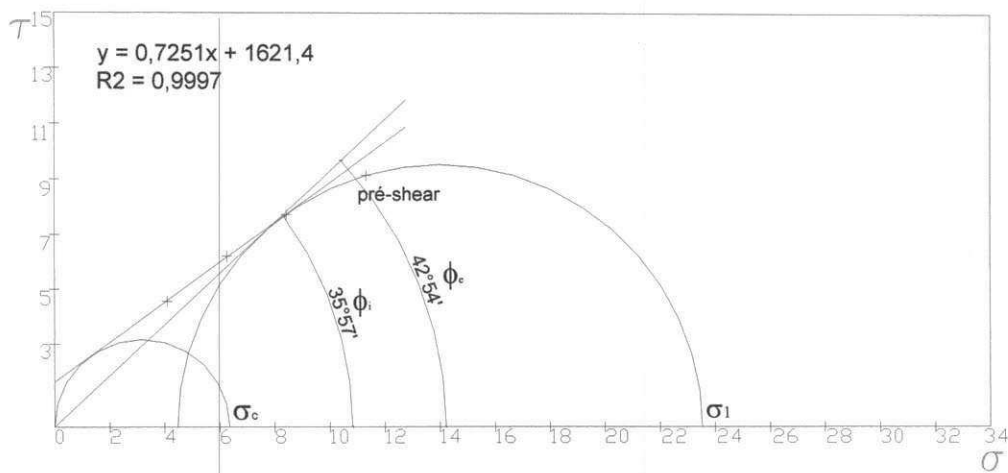


Figura 152 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

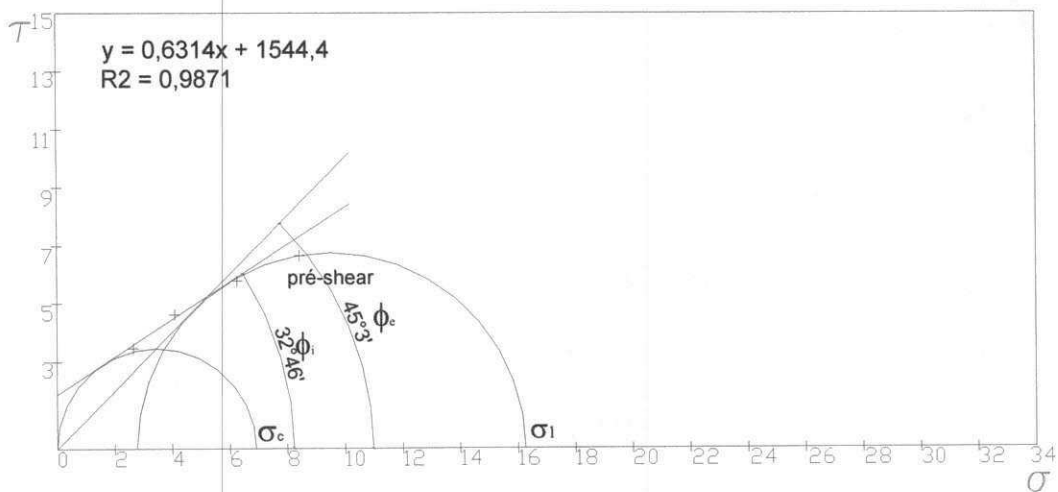


Figura 153 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 50 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 14hs

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.323,95	9.984,19		
10	5,0	8.445,18	8.313,17	15.663,78	12.039,76
10	3,5	6.273,02	7.166,53		
7	5,0	8.418,64	7.223,86		
7	3,5	6.260,32	6.277,28	11.315,09	8.668,63
7	2,0	4.096,20	4.474,13		
5	3,5	6.272,05	5.678,76		
5	2,0	4.103,64	4.303,90	8.436,73	6.814,51
5	1,0	2.653,94	3.259,11		

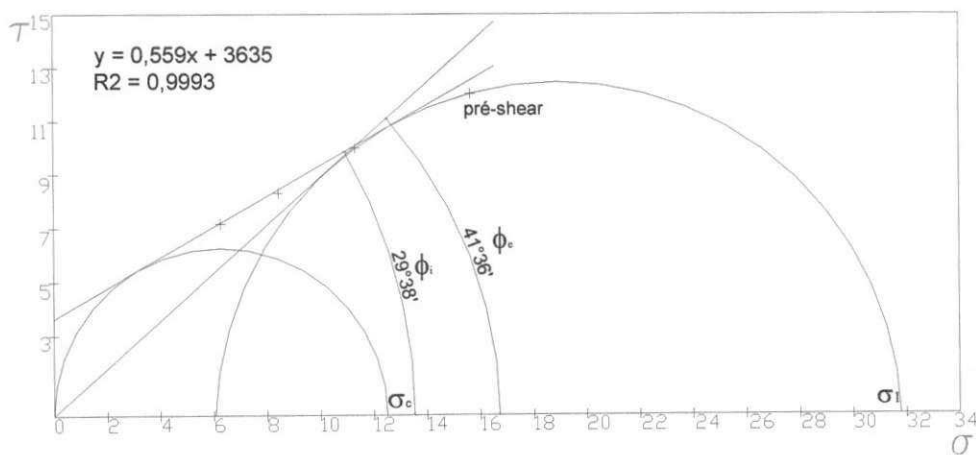


Figura 154– Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

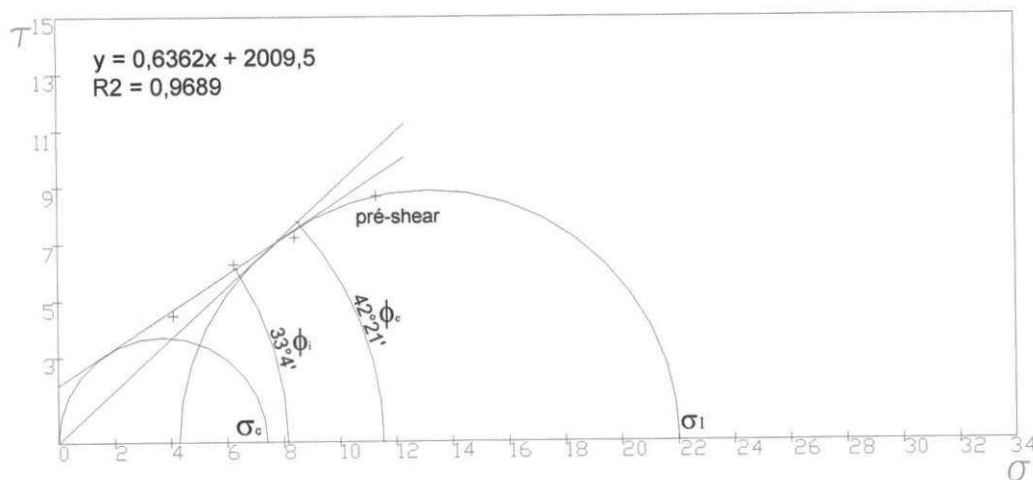


Figura 155 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg



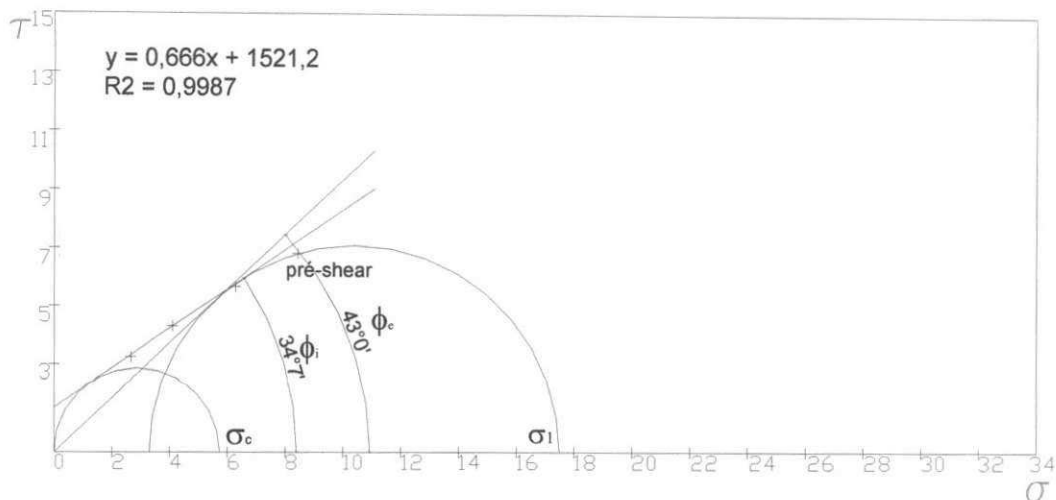


Figura 156 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 51 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para t = 18hs.

Cargas (kg)		Tensão	Tensão de	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear	Normal - $\sigma_s$	cisalhamento $\tau_s$	$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
		Pa	Pa		
10	7,0	11.322,28	9.419,21		
10	5,0	8.438,52	7.999,28	15.659,75	11.702,65
10	3,5	6.269,26	5.423,18		
7	5,0	8.431,10	7.351,25		
7	3,5	6.270,61	6.135,46	11.323,39	8.764,95
7	2,0	4.098,34	4.674,64		
5	3,5	6.266,88	5.634,61		
5	2,0	4.092,46	4.229,24	8.429,23	6.645,95
5	1,0	2.647,79	3.046,06		

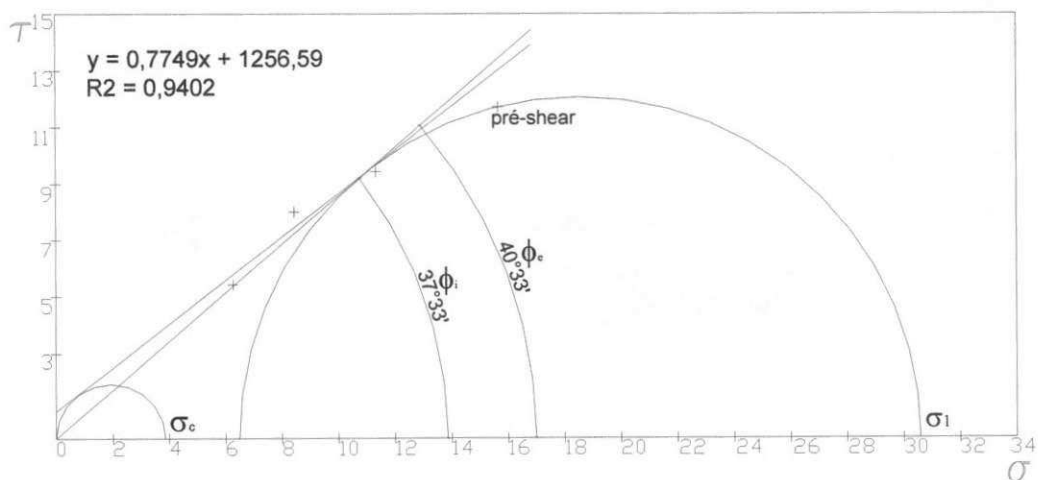


Figura 157 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

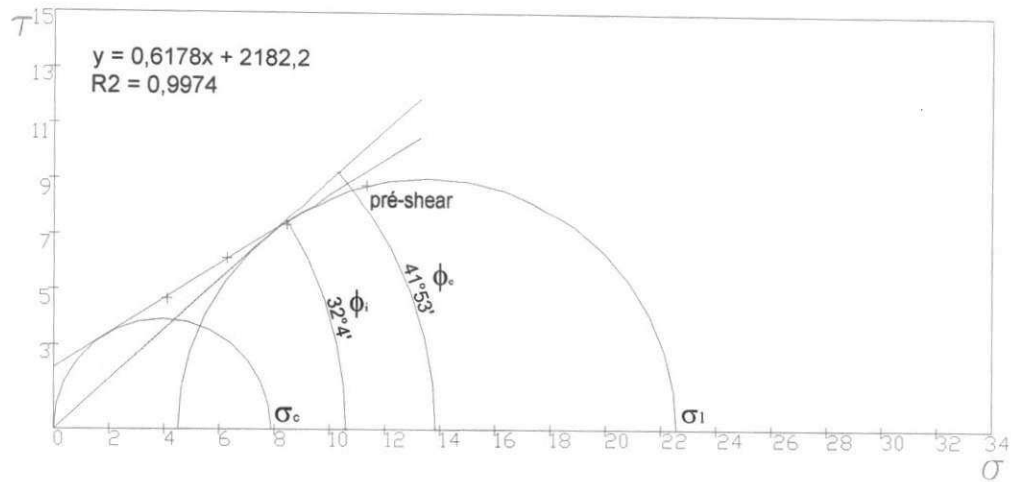


Figura 158 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

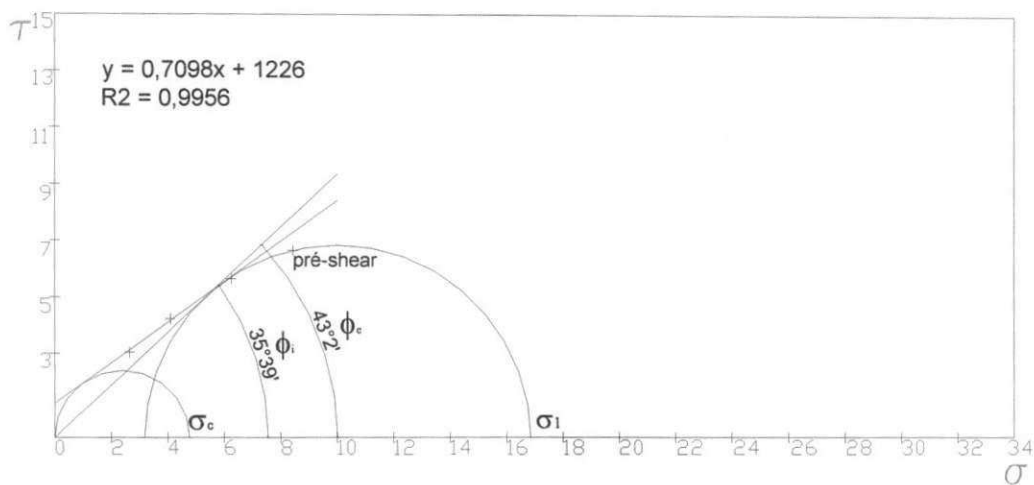


Figura 159 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg

Tabela 52 – Valores médios das tensões normal e de cisalhamento, no shear e pré-shear para  $t = 24$ hs.

Cargas (kgf)		Tensão Normal - $\sigma_s$ Pa	Tensão de cisalhamento $\tau_s$ Pa	Ponto de pré-shear	
Shear	Pré-shear			$\bar{\sigma}$ (Pa)	$\bar{\tau}$ (Pa)
10	7,0	11.323,64	10.442,29		
10	5,0	8.443,43	8.818,71	15.663,23	12.232,40
10	3,5	6.273,43	5.902,84		
7	5,0	8.420,23	7.472,96		
7	3,5	6.263,84	6.068,04	11.316,35	8.668,63
7	2,0	4.094,89	4.474,13		
5	3,5	6.270,96	5.609,48		
5	2,0	4.104,88	4.102,55	8.437,40	6.790,43
5	1,0	2.655,80	3.034,02		

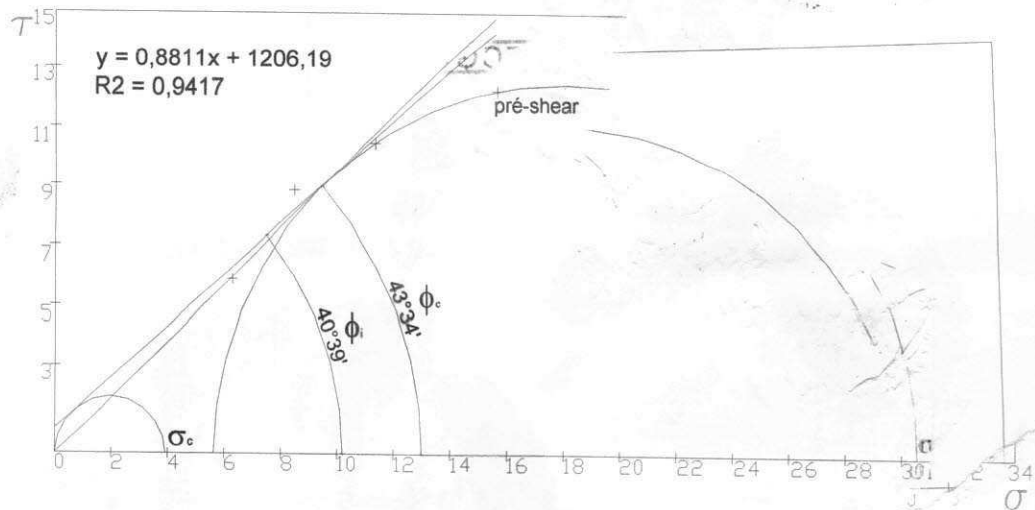


Figura 160 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 10,0kg

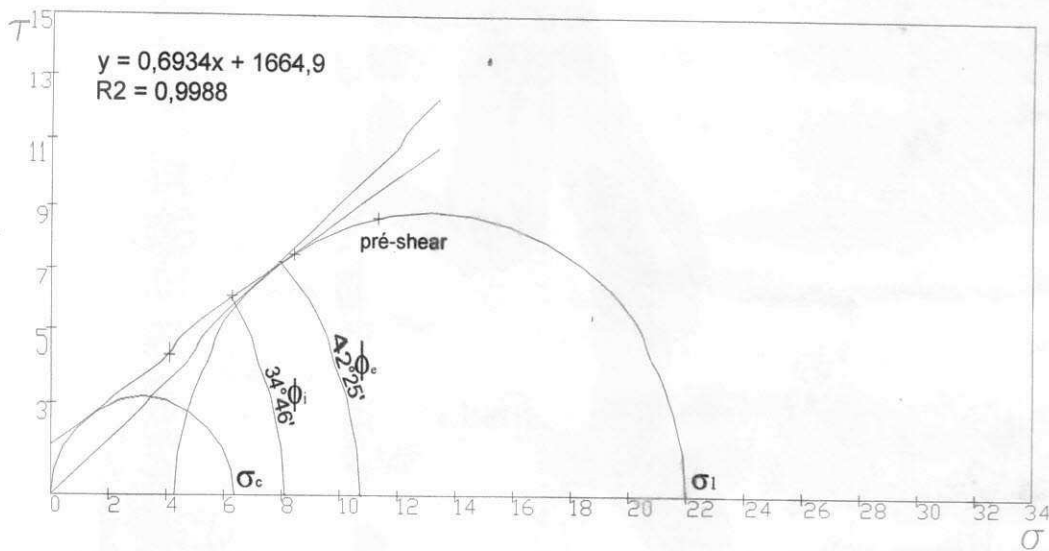


Figura 161 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 7,0kg

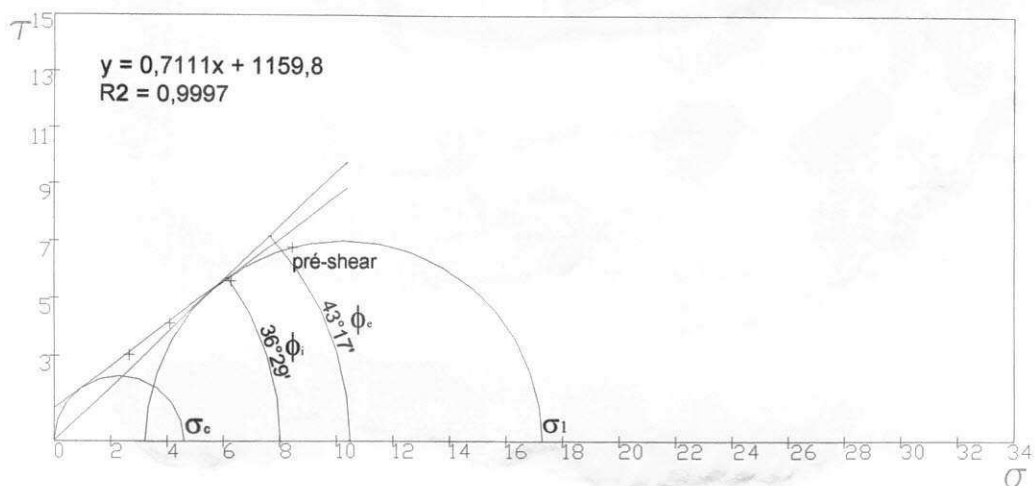


Figura 162 – Lugar geométrico de deslizamento (YL) para a carga de 5,0kg