

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA**

**ANÁLISE DE VAZÃO E FLUXO DE RAÇÃO AVÍCOLA EM SILOS  
PRISMÁTICOS COM DESCARGA EXCÊNTRICA**

**MARCILENE VIEIRA DA NÓBREGA**

**Campina Grande – PB**

**Agosto/2003**



---

MARCILENE VIEIRA DA NÓBREGA

**ANÁLISE DE VAZÃO E FLUXO DE RAÇÃO AVÍCOLA EM SILOS  
PRISMÁTICOS COM DESCARGA EXCÊNTRICA**

---

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**Área de Concentração:** Construções Rurais e Ambiência

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

**Campina Grande - PB**

**Agosto/2003**



N754a  
2003

Nóbrega, Marcilene Vieira da  
Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos  
prismáticos com descarga excêntrica. Campina Grande: UFCCG,  
2003.

88p :il.

Inclui bibliografia

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)

UFCCG/CCT/DEAG

1. Silos – Descarga Excêntrica 2. Silos – Fluxo 3. Ração  
Avícola

CDU: 631.24



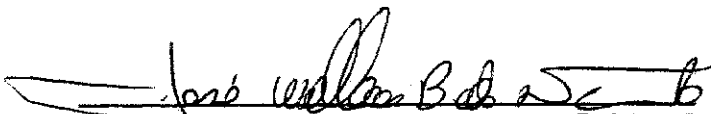
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

MARCILENE VIEIRA DA NÓBREGA


ANÁLISE DE VAZÃO E FLUXO DE RAÇÃO AVÍCOLA EM SILO  
PRISMÁTICOS COM DESCARGA EXCÊNTRICA

BANCA EXAMINADORA

PARECER

  
Dr. José Wallace B. do Nascimento-Orientador

APROVADO

  
Dra. Josivanda Palmeira G. de Gouveia-Examinadora

APROVADO

  
Dra. Odélsia Leonor S. de Alsina-Examinadora

APROVADO

AGOSTO - 2003



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Francisco e Rita.  
Às minhas irmãs, Deinha,  
Márcia, Eli, Mecinha e Cilinha  
e irmãos, Dedé, Celino, Nenê e  
Celo.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por fazer sentir sua presença nos momentos mais difíceis durante a realização deste trabalho;

Ao meu orientador o Professor Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, pela o material bibliográfico concedido, pela ajuda durante a realização dos ensaios e principalmente pela paciência, amizade e confiança;

Aos professores e funcionários do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente – LaCRa;

Aos colegas da pós-graduação, pelo companheirismo, respeito, em especial a Roberta, Elisângela, Kuelson, Marineide, Valneide, Rejane, Felipe e Luciano Jordan;

Ao professor Francisco de Assis Santos e Silva, pela orientação na análise estatística;

À indústria de ração GuarAVES, pelo fornecimento de uma das rações utilizadas neste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida;

Enfim, a meus pais, irmãs e irmãos que, mais do que ninguém sabem da importância desta conquista.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução geral.....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Critérios para projeto de silos.....	5
2.2 Determinação das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados....	5
2.2.1 Propriedades físicas.....	5
2.2.1.1 Granulometria.....	5
2.2.1.2 Teor de umidade.....	5
2.2.1.3 Teor de gordura.....	7
2.2.2 Propriedades de fluxo instantâneas e com tempo de consolidação.....	7
2.2.2.1 Ângulo de atrito interno.....	9
2.2.2.2 Efetivo ângulo de atrito interno.....	9
2.2.2.3 Ângulo de atrito do produto com a parede.....	10
2.2.2.4 Função fluxo.....	11
2.2.2.5 Fator fluxo.....	12

2.2.2.6 Densidade em função da consolidação do produto.....	14
2.3 Fluxo em silos.....	14
2.3.1 Classificação do fluxo em silos.....	15
2.3.1.1 Tipo de fluxo durante o descarregamento.....	15
2.3.1.2 Geometria do fluxo.....	18
2.3.2 Obstrução do fluxo.....	19
2.3.2.1 Arqueamento e efeito tubo.....	19
2.3.3 Taxa de fluxo.....	20
2.4 Pressões em silos.....	21
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1 Local dos ensaios.....	23
3.2 Produtos utilizados.....	23
3.3 Silo em modelo reduzido.....	23
3.3.1 Corpo do silo.....	24
3.3.2 Tremonha.....	24
3.4 Metodologia para determinação das propriedades físicas das rações.....	26
3.4.1 Teor de umidade.....	26
3.4.2 Teor de gordura.....	26
3.4.3 Granulometria.....	27
3.5 Metodologia para determinação das propriedades de fluxo das rações.....	27
3.5.1 Propriedades de fluxo instantâneas ( $T_1=0h$ ).....	27
3.5.1.1 Procedimentos para realização do ensaio de cisalhamento instantâneo.....	27
3.5.1.1.1 Pré-cisalhamento.....	30
3.5.1.1.2 Cisalhamento.....	30
3.5.2 Propriedades de fluxo com tempo de consolidação ( $T_2=12h$ ).....	30
3.5.3 Determinação do ângulo de atrito do produto com a parede.....	31
3.5.4 Determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno.	32
3.5.4.1 Ângulo de atrito interno.....	32
3.5.4.2 Efetivo ângulo de atrito interno.....	32
3.5.5 Densidade em função da consolidação.....	33
3.5.6 Função fluxo.....	33
3.5.7 Fator fluxo.....	34
3.6 Análise do fluxo.....	34

3.7. Determinação da vazão média de descarga.....	34
3.7.1 Análise estatística.....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1 Propriedades físicas.....	36
4.1.1 Teores de umidade e de gordura.....	36
4.1.2 Granulometria.....	37
4.2 Propriedades de fluxo.....	38
4.3 Análise do fluxo.....	42
4.4 Vazão de descarga.....	58
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01-	Reta que define o lugar geométrico de deslizamento do produto.....	10
Figura 02-	Função fluxo (FF) e Função no tempo (FFt).....	11
Figura 03-	Função fluxo típica para alguns produtos.....	12
Figura 04-	Determinação do fator fluxo.....	13
Figura 05-	Tremonhas que permitem fluxo de massa.....	16
Figura 06-	Tremonhas que permitem fluxo de funil.....	17
Figura 07-	Tipos de fluxo durante o descarregamento. Fluxo de massa(b), Fluxo de funil (a) e Fluxo expandido (c).....	17
Figura 08-	Tipos de trajeto do fluxo, quanto a geometria do silo. Trajeto simétrico (a), trajeto planar (b) e trajeto excêntrico (c).....	18
Figura 09-	Problemas durante o fluxo. Arco coesivo (a) e efeito tubo (b).....	20
Figura 10-	Detalhe da geometria da tremonha. Vista superior (a) e vista lateral (b).....	24
Figura 11-	Corpo do silo mais tremonha.....	25
Figura 12-	Aparelho de cisalhamento e aparelho registrador de tensões.....	28
Figura 13	Bancada de consolidação.....	31
Figura 14-	Círculo de Mohr de Tensões.....	33
Figura 15-	Curva granulométrica da ração 1 e ração 2 em função do diâmetro da partícula e do percentual que passa.....	38
Figura 16-	Função Fluxo no Tempo – Ração 1.....	41
Figura 17-	Função Fluxo no Tempo – Ração 2.....	42
Figura 18-	Comportamento do fluxo da ração 1, para $T1 = 0$ , $H/L = 1,76$ ,	

	STD1 = 42,25 cm <sup>2</sup> .....	45
Figura 19-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD1 42,25 cm <sup>2</sup> .....	46
Figura 20-	Formação do arco coesivo para ração 1, H/L = 5,3 e STD1 = 42,25 cm <sup>2</sup> .....	46
Figura 21-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 1,76, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	47
Figura 22-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	47
Figura 23-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 5,3, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	48
Figura 24-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 1,76, STD3 = 100 cm <sup>2</sup> .....	48
Figura 25-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD3 = 100 cm <sup>2</sup> .....	49
Figura 26-	Comportamento do fluxo da ração 1, para T1 = 0, H/L = 5,3, STD3 = 100 cm <sup>2</sup> .....	49
Figura 27-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 1,76, STD1 = 42,25 cm <sup>2</sup> .....	50
Figura 28-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD1 = 42,25 cm <sup>2</sup> .....	51
Figura 29-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 5,3, STD1 = 42,25 cm <sup>2</sup> .....	51
Figura 30-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 1,76, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	52
Figura 31-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	52
Figura 32-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 5,3, STD2 = 64 cm <sup>2</sup> .....	53
Figura 33-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 1,76, STD3 = 100 cm <sup>2</sup> .....	53
Figura 34-	Comportamento do fluxo da ração 2, para T1 = 0, H/L = 3,5, STD3 = 100 cm <sup>2</sup> .....	54

Figura 35-	Comportamento do fluxo da ração 2, para $T_1 = 0$ , $H/L = 5,3$ , $STD_3 = 100 \text{ cm}^2$ .....	54
Figura 36-	Formação do arco coesivo para ração 1, $T_2 = 12\text{h}$ , com $STD_1 = 42,25 \text{ cm}^2$ : (a) $H/L = 1,76$ ; (b) $H/L = 3,5$ e (c) $H/L = 5,3$ .....	55
Figura 37-	Formação do arco coesivo para ração 1, $T_2 = 12\text{h}$ , com $STD_1 = 64\text{cm}^2$ : (a) $H/L = 1,76$ ; (b) $H/L = 3,5$ e (c) $H/L = 5,3$ .....	56
Figura 38-	Formação do arco coesivo para ração 2, $T_2=12\text{h}$ , com $STD_1 = 42,25 \text{ cm}^2$ : (a) $H/L = 1,76$ ; (b) $H/L = 3,5$ e (c) $H/L = 5,3$ .....	57
Figura 39-	Comportamento do fluxo da ração 2, para $T_2 = 12\text{h}$ , $H/L= 1,76$ , $STD_2 = 64 \text{ cm}^2$ .....	57
Figura 40-	Formação do arco coesivo para ração 2, $T_2 = 12\text{h}$ , $H/L = 3,5$ e $STD_2 = 64 \text{ cm}^2$ .....	57
Figura 41	Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 10 – Instantâneo.	71
Figura 42	Círculo de Mohr de Tensões - Ração1 - Pré shear 10 Consolidação12h.....	72
Figura 43	Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 7 – Instantâneo...	73
Figura 44	Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 7 consolidação12h.....	74
Figura 45	Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 5 - Instantâneo	75
Figura 46	Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 5 – Consolidação12h.....	76
Figura 47	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 10 – Instantâneo.	77
Figura 48	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 10 – Consolidação12h.....	78
Figura 49	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 7 – Instantâneo...	79
Figura 50	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 7 – Consolidação12h.....	80
Figura 51	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 5 – Instantâneo...	81
Figura 52	Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 5 – Consolidação12h.....	82
Figura 53	Reta que define o lugar geométrico de deslizamento da ração 1 para o acrílico.....	83
Figura 54	Reta que define o lugar geométrico de deslizamento da ração 2 para	



	o acrílico.....	84
Figura 55	Determinação do $f\bar{f}$ para tremonhas cônicas e $\phi_e = 40^\circ$ .....	86
Figura 56	Determinação do $f\bar{f}$ para tremonhas cônicas e $\phi_e = 50^\circ$ .....	87
Figura 57	Determinação do $f\bar{f}$ para tremonhas cônicas e $\phi_e = 60^\circ$ .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01-	Níveis de cargas nos ensaios de cisalhamento instantâneos e com tempo de consolidação.....	28
Tabela 02-	Valores dos teores de umidade e de gordura.....	36
Tabela 03-	Resultados da análise granulométrica.....	37
Tabela 04-	Propriedades de fluxo.....	40
Tabela 05-	Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 1,76.....	43
Tabela 06-	Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 3,5.....	43
Tabela 07-	Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 5,3.....	44
Tabela 08-	Vazão de descarga (kg/s) para relação H/L = 1,76.....	58
Tabela 09-	Vazão de descarga (kg/s) para relação H/L = 3,5.....	59
Tabela 10-	Vazão de descarga (kg/s) para relação H/L = 5,3.....	59
Tabela 11-	Análise de variância e coeficiente de variação dos ensaios da vazão de descarga.....	60
Tabela 12-	Valores médios da vazão de descarga dos tratamentos.....	61
Tabela 13-	Valores médios da vazão de descarga (kg/s) para a interação <i>tempo de armazenamento x seção transversal de descarga</i> .....	62
Tabela 14-	Valores médios da vazão de descarga (kg/s) para a interação <i>tempo de armazenamento x relação altura/lado</i> .....	63

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 01-	Emprego do limite inferior e superior das propriedades de fluxo dos produtos.....	8
------------	---	---

## LISTA DE SÍMBOLOS

B	dimensão mínima do orifício de descarga (m)
Br	peso da diferença dos balões em branco (g)
Dp	diâmetro da partícula (mm)
EYL	efetivo lugar geométrico de deslizamento do produto
fc	tensão não confinada (k Pa)
ffc	relação entre a tensão máxima de consolidação e a tensão não confinada, que determina a escoabilidade do produto
ff	fator fluxo da tremonha
FF	função fluxo instantânea do produto
FF <sub>t</sub>	função fluxo no tempo do produto
g	aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
H	altura total do silo (cm)
H(α)	largura mínima da boca descarga para uma tremonha quadrada (m)
h	altura do módulo que compõe o silo (cm)
H/L	relação altura lado
IYL	lugar geométrico de deslizamento do produto
L	largura da seção transversal do silo (cm)
PA	peso da amostra (g)
PS	peso seco (soma do peso do balão com a quantidade de óleo extraído de uma amostra qualquer) %;
Pu	peso úmido da amostra (g)
Ps	peso seco da amostra (g)

T	peso do balão (g)
TU	teor de umidade (%)
WYL	lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede
Wp	carga do pré-cisalhamento (kg)
Ws	carga do cisalhamento para a consolidação (kg)
$\gamma$	densidade do produto ( $\text{kg/m}^3$ );
$\alpha_1$	inclinação vertical 1 da tremonha piramidal excêntrica ( $^\circ$ );
$\alpha_2$	inclinação vertical 2 da tremonha piramidal excêntrica ( $^\circ$ );
$\phi_i$	ângulo de atrito interno ( $^\circ$ );
$\phi_{il}$	ângulo de atrito inferior ( $^\circ$ );
$\phi_{iu}$	ângulo de atrito interno superior ( $^\circ$ );
$\phi_e$	efetivo ângulo de atrito interno ( $^\circ$ );
$\phi_{el}$	efetivo ângulo de atrito interno inferior ( $^\circ$ );
$\phi_{eu}$	efetivo ângulo de atrito interno superior ( $^\circ$ );
$\phi_w$	ângulo de atrito do produto com a parede ( $^\circ$ );
$\phi_{wl}$	ângulo de atrito do produto com a parede inferior ( $^\circ$ );
$\phi_{wu}$	ângulo de atrito do produto com a parede superior ( $^\circ$ )
$\sigma$	tensão normal (kPa);
$\sigma_w$	tensão normal do produto na parede (kPa);
$\sigma_1$	tensão máxima de consolidação (kPa);
$\sigma_c$	tensão crítica no orifício de descarga (kPa);
$\tau$	tensão de cisalhamento (kPa);
$\tau_w$	tensão de cisalhamento do produto com parede (kPa)

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMHB	Norma Britânica para o cálculo de silos
CV	coeficiente de variação (%)
DIN	Norma Alemã para o cálculo de silos
DMS	diferença mínima significativa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	variável do teste F
Fm	fluxo de massa
FV	fonte de variação
GL	graus de liberdade
H/L	relação altura/lado
H/L1	relação altura/lado igual a 1,76
H/L2	relação altura lado igual a 3,5.
H/L3	relação altura lado igual a 5,3
MG	média geral
nf	não fluxo
SQ	soma do quadrado
QM	quadrado médio
STD1	seção transversal de descarga do silo 6,5 x 6,5 cm
STD2	seção transversal de descarga do silo 8,0 x 8,0 cm
STD3	seção transversal de descarga do silo 10 x10 cm
T1	tempo de armazenamento igual a 0 horas

T2	tempo de armazenamento igual a 12 horas
TG	teor de gordura
TG1	teor de gordura da ração 1
TG2	teor de gordura da ração 2
V1	vazão de descarga 1 (kg/m <sup>3</sup> )
V2	vazão de descarga 2 (kg/m <sup>3</sup> )
V3	vazão de descarga 3 (kg/m <sup>3</sup> )

## RESUMO

NÓBREGA, Marcilene Vieira da. **Análise de fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2003. Dissertação de Mestrado.

Atualmente, na avicultura mundial, é imprescindível o uso de silos verticais e com o uso destes são detectados diversos problemas no armazenamento e na descarga da ração, devido às falhas no projeto de silo em que são negligenciadas as propriedades de fluxo dos produtos e não conhecimento da teoria de fluxo. Esses problemas são: a formação de arcos coesivos e efeito tubo. Objetivou-se com esse trabalho a análise do tipo de fluxo em silo prismático com descarga excêntrica para dois tipos de rações avícolas. Determinaram-se as propriedades físicas (teor de gordura, teor de umidade e granulometria) e de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, densidade em função da consolidação, função fluxo e fator fluxo) através do equipamento Jenike Shear Cell. Analisou-se o tipo de fluxo ocorrido para as duas rações, através de seqüências fotográficas, variando a seção transversal de descarga, relação altura/lado e tempo de armazenamento e por último foi determinada a vazão média de descarga. Os ângulos de atrito instantâneo e com consolidação de 12 horas da ração 1 variaram no intervalo de 33 a 39° e de 40 a 45°, respectivamente. Para a ração 2 os resultados dos ângulos de atrito interno instantâneo e com consolidação de 12 horas ficaram no intervalo de 43 a 46° e de 46 a 48°, respectivamente. Os efetivos ângulos de atrito interno instantâneo e com consolidação de 12 horas da ração 1 ficaram nos intervalos de 43 a 44° e 49 e 51°, respectivamente. Já a ração 2 obteve resultados para o mesmo ângulo instantâneo e com consolidação de 12 horas que ficaram entre 46 e 49° e 49 e 51°. A tremonha em forma de tronco piramidal excêntrica proporcionou fluxo de massa para as duas rações. O tipo de fluxo foi influenciado pela área da seção transversal do orifício de descarga e pelo tempo de armazenamento. A vazão média de descarga foi afetada pelo tempo de armazenamento, seção transversal de descarga e teor de gordura.



## ABSTRACT

NÓBREGA, Marcilene Vieira. Analysis of flow of avian ration in prismatic bin with eccentric discharge. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2003. Dissertação de Mestrado

Actually in the world aviculture is indispensable the use of vertical silo and with this several problems are detected in the storage and discharge of the ration, where imperfections in the bin project are detected for the neglected and not knowledge of the properties and of the theory of flow of the products. These problems are due formation of cohesive arches and effect tube. The objective of this work was the analysis of the flow type in prismatic silo with eccentric discharge for two types of avian rations. Determined the physical properties (fat content, moisture content and granulometry) and of flow angle of friction internal, effective angle of internal friction, angle of friction of the product with the wall, density in function of the consolidation, function flow and factor flow) across the equipment Jenike Shear Cell. The flow type was analyzed for the two rations, through photographic sequences, varying the transverse section of discharge, relationship height/side and time of storage and finally determined the mean rate of flow of discharge. The angles of instantaneous internal friction and with consolidation of 12 hours of the ration 1 varied in the interval from 33 to 39° and from 40 to 45°, respectively. For the ration 2 the results of the angles of instantaneous internal friction and with consolidation of 12 hours were in the interval from 43 to 46° and from 46 to 48°, respectively. The effective angles of instantaneous internal friction and with consolidation of 12 hours of the ration 1 were in the intervals from 43 to 44° and 49 and 51°, respectively. Already the ration 2 results obtained for the same instantaneous angle and with consolidation of 12 hours that were between 46 and 49° and 49 and 51°. The hopper in form of eccentric pyramidal provided mass flow for the two rations. The flow type was influenced by the area of the transversal section of the discharge hole and for the time of storage. The mean rate of flow of discharge was affected by the time of storage, transversal section of discharge and fat content.

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Introdução geral

A agroindústria brasileira cresceu de forma acentuada nos últimos anos garantindo ao Brasil destaque mundial. O setor avícola, dentro deste contexto, garante ao Brasil lugar importante com a produção de carne de frango estando sempre entre os três maiores produtores do mundo. De acordo com a Associação Brasileira dos produtores e Exportadores de Frango (ABEF, 2003) o Brasil é o segundo maior produtor de carne de frango do mundo perdendo apenas para os Estados Unidos, com uma produção de carne de frango em 2002 de 7.449 mil toneladas.

Se considerarmos, de um modo geral a ração pré-fabricada, a avicultura é responsável por 56% do total consumido em todo país (Nogueira Junior *et. al.*, 2002).

De acordo com informações do AviSite (2003), o PIB (produto interno bruto) do Brasil em 2002 atingiu o valor de R\$ 1,321 trilhões de reais e a avicultura é responsável por 2% deste total. Ou seja, a participação da avicultura na economia do país tem grande importância e recomenda tratar a atividade com muito respeito.

Esse êxito na avicultura depende basicamente do fornecimento de uma alimentação balanceada ao frango em todas as etapas de crescimento para garantir boa conversão alimentar por produção animal (Nascimento, 1996). Este processo vai desde a matriz reprodutora até a fabricação do alimento que garanta carne de qualidade. Além desses fatores, é necessária atenção no processo de armazenagem e expedição da ração nas fábricas uma vez que estes produtos apresentam diferentes propriedades que afetam intrinsecamente o comportamento durante o armazenamento e processamento. Os silos

são utilizados em larga escala em fábricas de ração por se tratar de estruturas que garantem, se bem projetadas, a qualidade do produto por um bom tempo e facilita o processo de distribuição do produto.

Como a ração avícola possui em sua composição teores energéticos e protéicos significativos, que são adicionados por meio de óleos ou produtos oleaginosos, proporcionando sérios problemas durante o armazenamento e no processo de descarga dos silos. Esses problemas ocorrem porque na fase da elaboração do projeto muitos técnicos desconsideram as propriedades de fluxo, como também aquelas adquiridas com a armazenagem nos silos. Outra característica que pode trazer problemas de fluxo é que a ração, dentro da escala granulométrica, trata-se de um produto pulverulento e algumas vezes coesivo. Sendo desta forma requeridos dos projetistas cuidados especiais ao se dimensionar tais unidades armazenadoras para ser evitado a formação de arcos coesivos e tubos.

Daí a preocupação de muitos pesquisadores em desenvolver trabalhos experimentais que tentem simular em protótipos ou em modelos reduzidos, as formas mais desfavoráveis de armazenamento para que se possa desenvolver silos que não acarretem problemas aos fabricantes. Geralmente os testes são realizados em escala reduzida, não gerando problemas quando a situação é convertida para prática. Os modelos reduzidos são muito utilizados devido ao baixo custo e permitem multiplicar todos os parâmetros que provavelmente influenciam no funcionamento do silo na situação real (Garnier, 1998).

Pretende-se com esse trabalho analisar o tipo de fluxo de ração avícola que poderá ocorrer em um modelo reduzido de silo prismático industrial com orifício de descarga excêntrico. Possui ainda como objetivos específicos: determinação das propriedades de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede do silo, densidade em função da consolidação, função fluxo e fator fluxo), determinação das propriedades físicas (teor de umidade, teor de gordura e Granulometria), relacionar o tipo de fluxo com o orifício de descarga, determinação da vazão média de descarga para as relações altura /lado iguais a: 1,76; 3,5 e 5,3 e a análise estatística da interação dos fatores teor de gordura, seção transversal de descarga tempo de armazenamento e relação altura/lado com a vazão média de descarga, utilizando o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial

2x3x2x3. Os dados serão analisados através do programa estatístico ASSISTAT desenvolvido por Silva (1996).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de armazenamento de produtos pulverulentos requer cuidados no projeto de silos, uma vez que a grande maioria das falhas que ocorrem em silos projetados para um determinado tipo de fluxo surge do desconhecimento das propriedades de fluxo do produto a armazenar. O conhecimento dessas propriedades como também de outros fatores, garante descarga por gravidade sem interrupções. Segundo Roberts (1987), basicamente existem dois tipos de problemas que podem ocorrer durante o fluxo: o arqueamento e o efeito tubo. Na maioria das vezes esses problemas ocorrem com produtos pulverulentos, não deixando de existir em produtos granulares, só que em menor escala (Calil Júnior *et al.*, 1997).

Estudos desenvolvidos por Jenike e Johanson *apud* Bandeira (1997), mostraram que, em indústrias que processam vários tipos de produtos, 80% dos problemas de armazenamento, diziam respeito ao arqueamento.

Calil Júnior (1984) verificou que não existe uma teoria segura ou norma para o cálculo de silos verticais destinados ao armazenamento de produtos pulverulentos coesivos. E no Brasil, especificamente, não existe norma que regulamente o projeto de pressões e fluxo em silos, gerando inúmeros problemas com o projeto de silos nas fábricas de processamento de produtos agrícolas.

Bandeira (1997) desenvolveu pesquisa com o intuito de relacionar as características físicas dos produtos pulverulentos coesivos, com os possíveis problemas que poderiam ocorrer durante o armazenamento. Foram utilizados três tipos de produtos: duas rações avícolas e farelo de trigo. Para esses produtos determinaram-se as propriedades físicas (granulometria, teor de umidade e teor de gordura) e de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, densidade em função da

consolidação e o ângulo de atrito do produto com a parede). A autor conclui que não se pode negligenciar as propriedades de fluxo dos produtos pulverulentos, porque estas estão diretamente relacionadas com o dimensionamento dos silos, ou seja, relação altura/lado e orifício de descarga. Foram verificados valores elevados de teores de gorduras para as duas rações e concluiu-se que esse fato interferiu no tipo de fluxo.

## **2.1 Critérios para projetos de silos**

No projeto de silos para armazenar produtos sólidos se faz necessário considerar, de acordo com Roberts (1987), os seguintes passos:

- Determinação da resistência e propriedades de fluxo dos produtos considerando as situações mais desfavoráveis que poderão ocorrer. Para determinação dessas propriedades de fluxo quatro tipos de testes de cisalhamento poderão ser usados: Teste de Cisalhamento de Jenike, Teste Torsional de Walker, Teste Triaxial e o Teste Biaxial. O Teste de Cisalhamento de Jenike é o mais utilizado pela maioria dos pesquisadores.
- Determinação da geometria do silo que forneça um tipo de fluxo desejável e que assegure descarga previsível. Na seleção da geometria do silo procura-se utilizar a ação da gravidade para garantir o fluxo previsto, muito embora, observa-se em algumas situações que esta ação não é suficiente para descarga de produto pulverulento.
- Previsão das pressões exercidas nas paredes do silo e transportadores helicoidais.
- Detalhamento da estrutura do silo.

## **2.2 Determinação das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados**

### **2.2.1 Propriedades físicas**

#### **2.2.1.1 Granulometria**

A análise da granulometria de um produto é importante, já que pesquisas mostram a sua relação com a escoabilidade, a capacidade das partículas finas formarem arcos ao contrário das partículas mais grossas que fluem livremente (Calil Junior, 1990). Essas partículas finas durante o carregamento, caem no centro do silo e são compactadas pelas partículas maiores, tendendo assim a formar arcos (Ravenet, 1983).

A quantidade de finos de um produto pode predizer a formação ou não de arco coesivo. Calil Junior (1984) desenvolveu pesquisas com produtos que possuíam em sua composição grande quantidade de finos. Em um dos produtos ele observou que depois de sucessivos carregamentos e descarregamentos, ocorria a perda da grande parte das partículas finas bem como o fluxo sem a formação de arcos. Com a constatação da importância dessa classificação quanto ao número de finos, foi proposto por Calil Junior (1990) a classificação dos materiais pulverulentos, em função do diâmetro da partícula, ou seja:

$D_p > 1,0$ mm.....	produtos granulares
$0,297$ mm $\leq D_p < 1,0$ mm.....	produtos pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos
$0,079$ mm $\leq D_p \leq 0,297$ mm.....	produtos pulverulento coesivos finos
$D_p < 0,079$ mm .....	produtos pulverulentos coesivos extra finos.

### 2.2.1.2 Teor de umidade

A capacidade de um produto em absorver umidade é importante no fluxo de produtos sólidos, pois com o aumento do teor de umidade ocorre o crescimento da tensão superficial de uma película de água do produto, havendo assim, uma maior e mais efetiva força coesiva entre elas (Calil Júnior, 1984). Essa absorção de água está relacionada com a umidade relativa do ar. De acordo com Teunou *et al.* (1999) durante a manipulação de muitos alimentos pulverulentos, existe a umidade relativa juntamente com uma determinada temperatura que pode fazer com que esse produto endureça e prejudique a escoabilidade.

De acordo com (Fleureau, 1998) o teor de umidade pode mudar as condições do fluxo por gravidade de produtos granulares e ainda evitar que a descarga ocorra.

### **2.2.1.3 Teor de gordura**

O frango brasileiro atinge o peso de 2300 g com 40 dias de idade e é alimentado com rações balanceadas, à base de milho, farelo de soja, minerais e vitaminas, sendo considerada ainda a carne de melhor qualidade produzida no mundo. E com a tentativa de tornar o frango brasileiro melhor geneticamente e, desta forma conseguir melhor desempenho e conseqüentemente, melhor carcaça, se adiciona óleo nas rações. Esta já é uma prática comum no mercado avicultor internacional e o Brasil não poderia ficar de fora. Alguns autores mostraram que a presença de óleo nas rações eleva o ganho de peso diário e o peso vivo final, ou seja, rações com energia mais alta melhoram a conversão alimentar e diminuem o consumo de ração (Moura, 2003).

### **2.2.2 Propriedades de fluxo instantâneas e com o tempo de consolidação**

As propriedades de fluxo de um produto que será armazenado são importantes para determinar o comportamento do mesmo no interior do silo, tanto durante o carregamento como durante os processos de descarregamento. Determinar os limites máximo e mínimo destas propriedades significa realizar projetos para silos com as mais amplas possibilidades de sucesso (Ravenet, 1983). Esta análise do limite inferior e superior das propriedades de fluxo foi empregada por Freitas (2001). Calil Júnior *et al.* (1997) afirma que as propriedades dos produtos armazenáveis em silos podem variar durante o tempo de estocagem. Com isto é proposto de acordo com a Norma Australiana AS que em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada propriedade, de modo a delimitar a sua faixa de variação e com isso deter-se às combinações mais desfavoráveis para cada caso. No Quadro 01 se verifica o emprego adequado dos limites das principais propriedades de acordo com o objetivo de acordo com a Norma Australiana.



Quadro 01 – Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos

APLICAÇÃO DAS PROPRIEDADES		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, $p_h$		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Cálculo da máxima pressão vertical, $p_v$		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Força máxima de atrito na parede do silo, $p_w$		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Carga vertical máxima na tremonha		Superior	Inferior	Superior	Superior

Fonte: Freitas (2001)

Nascimento (1996), ressalta a importância da determinação das propriedades de fluxo dos produtos armazenados durante o processo de carga e descarga, na determinação e predição das pressões que ocorrerão na estrutura e principalmente para determinar os tipos de fluxo que é muito importante no processamento e expedição de ração.

Para efeito de projeto, determinar as propriedades de fluxo instantâneas torna-se inviável uma vez que, de acordo com Benink (1989), os produtos são sempre armazenados por um longo tempo e esse tempo de armazenagem geralmente afeta o comportamento dos produtos coesivos e tem influência na mudança do lugar geométrico de deslizamento afetando negativamente as propriedades de fluxo.

Teunou *et al.* (1999), através de ensaios de consolidação realizados com três produtos (farinha, chá e leite desnatado), detectaram que os efeitos do tempo de consolidação influem na escoabilidade dos produtos testados.

As propriedades de fluxo que precisam ser analisadas no projeto de silos para armazenamento são as seguintes (Jenike, 1964; Robert, 1987; Ravenet, 1983):

- 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
- Densidade do produto em função da consolidação  $\gamma$

### 2.2.2.1 Ângulo de atrito interno

Para certos produtos, dada uma certa tensão de consolidação, ocorre uma força interna entre suas partículas. Esta inclinação é definida como ângulo de atrito interno. A determinação do ângulo de atrito interno está relacionada com o conhecimento do IYL (lugar geométrico de deslizamento). Este ângulo corresponde à inclinação que o IYL forma com o eixo horizontal do Círculo de Mohr de Tensões, que será detalhado no próximo capítulo.

Bandeira (1997) ressalta a importância da determinação das propriedades friccionais dos produtos agrícolas no projeto de equipamentos para descarga de sólidos e de estruturas para armazenagem destes produtos.

### 2.2.2.2 Efetivo ângulo de atrito interno

O efetivo ângulo de atrito interno relaciona-se da mesma forma que o ângulo de atrito interno, com o conhecimento IYL. É determinado através de uma reta que sai da origem e toca o Semicírculo de Mohr de Tensões.

Segundo Nascimento (1997) desde de que as tangentes às curvas do IYL ao Círculo de Mohr, tendam a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é na prática sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do efetivo lugar de deslizamento (EYL).

Este ângulo, se medido experimentalmente, varia entre 30° e 70° para diversos materiais. Produtos finos e secos apresentam valores baixos de  $\phi_e$  e produtos

grossos e úmidos apresentam valores altos (Ravenet, 1983). O mesmo autor diz que este ângulo indica que, durante o fluxo, o Círculo de Mohr tem uma linha reta que passa pela origem.

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

O atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL) (Figura 01). A sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (Benink, 1989).

De acordo com Calil Junior (1990) a determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis (umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície). Em algumas situações, dependendo do carregamento aplicado ao produto, o ângulo de atrito do produto com a parede aumenta. Daí se faz necessário a determinação do mesmo em função do tempo, para se ter valores confiáveis.

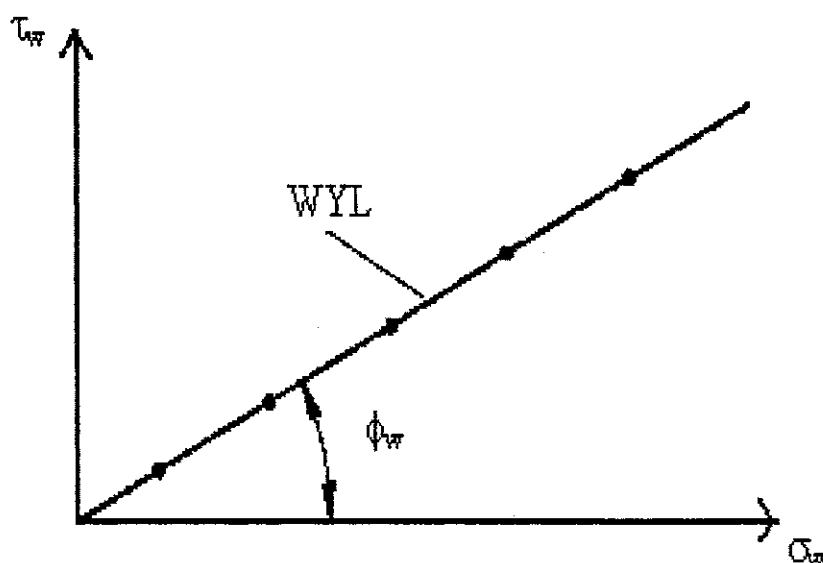


Figura 01: Reta que define o lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede

#### 2.2.2.4 Função fluxo

A função fluxo (FF) de um produto é a relação entre a tensão não confinada ( $f_c$ ) e a tensão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ). Obtém-se a curva que define a função fluxo plotando-se estes parâmetros ( $f_c \times \sigma_1$ ).

Quando o produto é submetido a longos períodos de armazenamento, o que na prática é mais comum de ocorrer, as tensões máximas principais tendem a aumentar juntamente com as tensões não confinadas e desta forma o comportamento da função fluxo com o tempo ( $FF_t$ ) será superior à função fluxo instantânea (FF), (Figura 02).

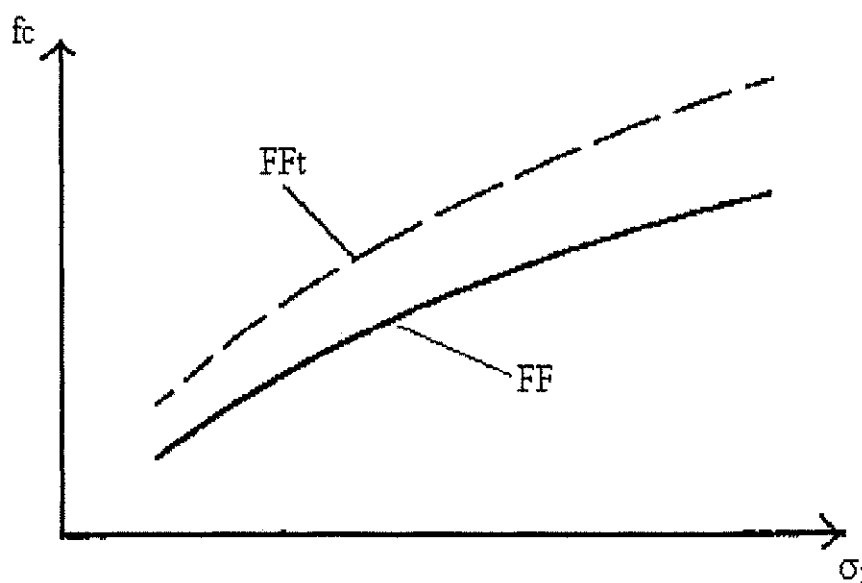


Figura 02: Função fluxo (FF) e Função no tempo (FFt)

Roberts (1987) definiu o comportamento de algumas funções fluxo relacionando com os tipos de materiais analisados (Figura 03).

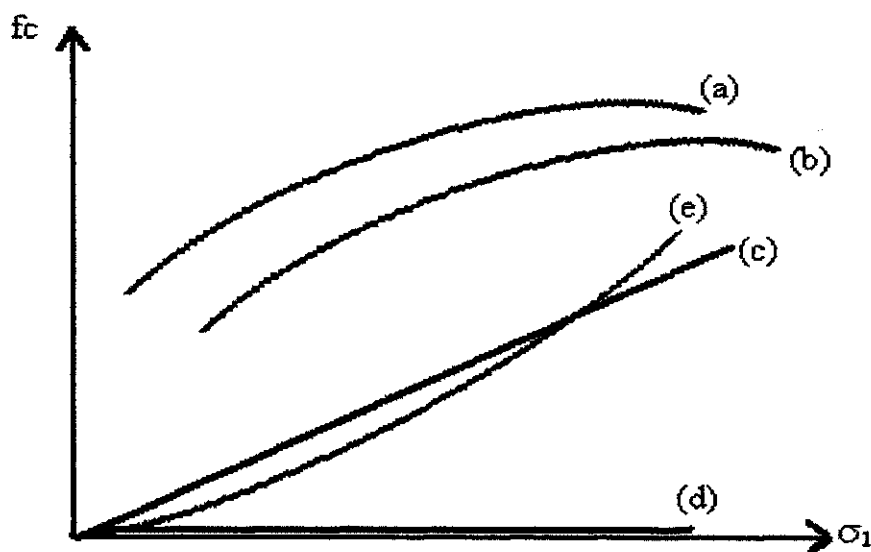


Figura 03 Função fluxo típica para alguns produtos

As curvas (a), (b) e (c) da Figura 03 representam o comportamento da FF para produtos coesivos. Para os produtos que fluem livremente, ou seja, que não possuem coesão, a função fluxo coincide com a horizontal (d). Quando as tensões de alguns materiais aumentam rapidamente, a pressão de consolidação aumenta e a função fluxo terá o comportamento descrito na curva (e). O tipo de função fluxo para cada produto poderá ser determinado também pela influência de diversos fatores como, teor de umidade, temperatura, tempo de consolidação, tempo de armazenamento, tamanho das partículas e sua distribuição e vibrações mecânicas (Roberts, 1987).

A função fluxo é uma medida da escoabilidade do produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (Benink, 1989).

#### 2.2.2.5 Fator fluxo

O fator fluxo (ff) é um parâmetro importante no projeto de silos para fluxo de massa, o qual descreve as condições das tensões na tremonha durante o fluxo, o que depende do ângulo de atrito do produto com a parede, da inclinação vertical da tremonha ( $\alpha$ ) e do efetivo ângulo de atrito interno (Roberts, 1987).

Existe uma relação muito importante entre a função fluxo e o fator fluxo. 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 a orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco, Figura 04 (a) e (b).

De acordo com BMHB (1985) e Roberts e Ooms *apud* Bandeira (1997), essa dimensão mínima da boca de descarga é dada pela seguinte Equação 01:

$$B = \frac{H(\alpha)\sigma_c}{\gamma} \quad \text{Eq.01}$$

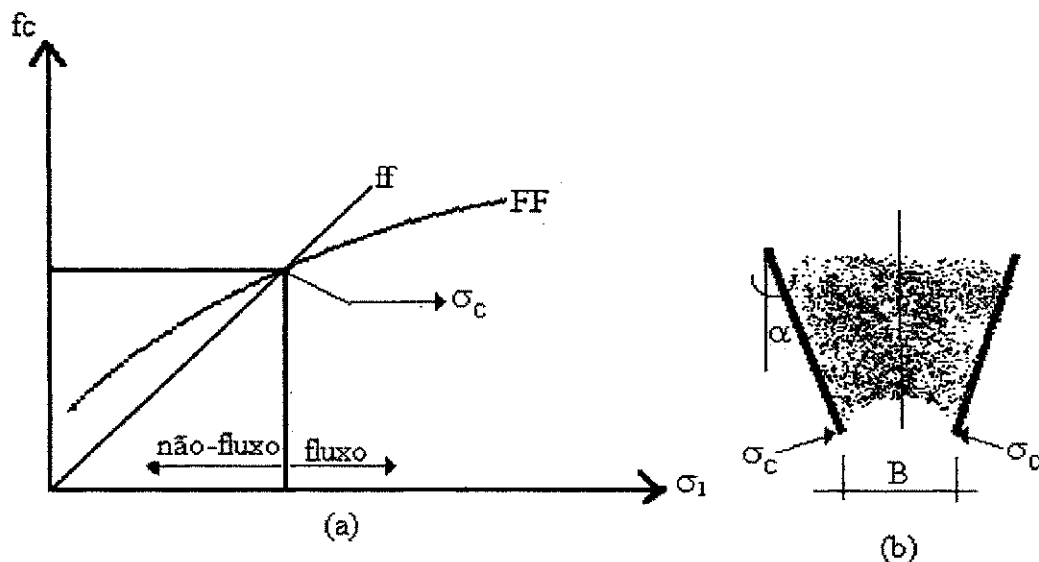


Figura 04: Determinação do fator fluxo

Drescher *et al.* (1995) escreveram que o fator fluxo pode ser considerado como uma medida aproximada da redistribuição de tensão no estado de consolidação do arqueamento.

Schulze (1998) classificou, de acordo com Jenike (1964), o comportamento dos produtos sólidos em função da relação entre a tensão não confinada e a tensão máxima de consolidação, que é uma medida da escoabilidade do produto armazenável. Os produtos podem ser classificados desta forma:

- $ffc < 1$ .....produto não flui  
 $1 < ffc < 2$ .....produto muito coesivo ou não flui  
 $2 < ffc < 4$ .....produto coesivo  
 $4 < ffc < 10$ .....produto de fluxo bom  
 $10 < ffc$ .....produto de fluxo livre

### 2.2.2.6 Densidade em função da consolidação produto

Jenike (1964) considera que analisar a mudança de densidade com a pressão de consolidação no processo de fluxo torna-se um procedimento desprezível. No entanto, para determinar o fluxo e as pressões em um silo, a densidade torna-se um fator essencial.

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, 1983).

## 2.3 Fluxo em silos

Segundo Roberts (1987) existe uma diferença básica entre o comportamento do fluxo dos sólidos em relação aos líquidos, ou seja, as propriedades dos sólidos e líquidos são diferentes e o mecanismo de fluxo para os dois casos são totalmente distintos. As principais são:

- Em condições estáticas os sólidos podem transferir tensões de cisalhamento, enquanto nos líquidos, isso não ocorre;
- Muitos produtos sólidos quando consolidados possuem tensões coesivas e diminuem suas formas com pequenas pressões;

o As tensões de cisalhamento para os produtos sólidos ocorrem para uma deformação lenta. Considera-se geralmente que a escoabilidade do produto independe da taxa de cisalhamento e depende das pressões médias que atuam no produto. Nos líquidos a situação é invertida.

### **2.3.1 Classificação do fluxo em silos**

Para classificar os silos quanto ao fluxo, muitas normas internacionais levam em consideração dois aspectos: o tipo de fluxo durante o descarregamento e a geometria do fluxo.

#### **2.3.1.1 Tipo de fluxo durante o descarregamento**

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 Júnior (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.

Freitas (2001) cita que o modo como o produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades físicas do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha (atrito com a parede).

Jenike (1964) definiu três tipos de fluxo: fluxo de massa, fluxo de funil e fluxo expandido (Figura 07).

O fluxo de massa (Figura 07 b) é aquele em que todo o sólido fluirá no silo e não existirão zonas mortas ou inativas e que tem uma relação direta com a inclinação da tremonha. O fluxo de massa possui algumas características, tais como: ausência de canais; fluxo uniforme e constante; a densidade do produto permanece quase que inalterada o que é bom quando quer se medir a taxa de fluxo; as pressões no produto e nas paredes são relativamente baixas e uniformes, como resultado do tempo de consolidação pequeno e do baixo desgaste do atrito do produto com a parede; a



primeira camada de produto que entra é primeira que sai evitando o processo de segregação;

O fluxo de massa em silos normalmente não é afetado pela descarga excêntrica, mas problemas no funcionamento no sistema de manipulação podem induzir facilmente ratholing excêntrico (Rotter, 1998). O mesmo autor definiu algumas geometrias de tremonhas (descargas) que garantem fluxo de massa (Figura 05).

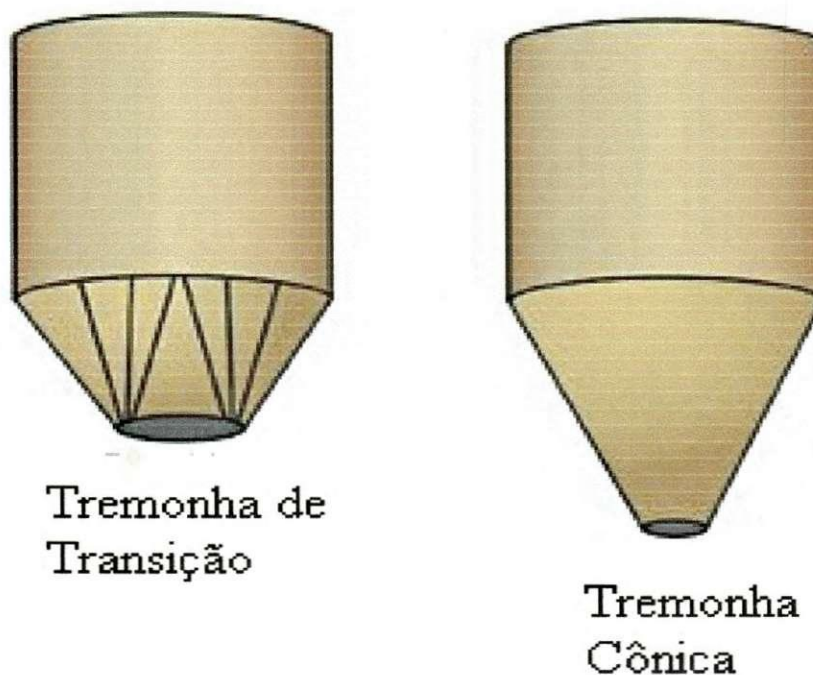


Figura 05: Tremonhas que permitem fluxo de massa

O outro tipo de fluxo definido por Jenike (1964) é o fluxo de funil (Figura 07 a), que ocorre quando, durante o descarregamento, o produto tender a formar um canal até a boca de descarga e parte do produto ficar parado nas laterais do silo. Este canal formado assume sua forma na vertical longitudinal ao silo e tem seu diâmetro aproximadamente igual ao diâmetro do orifício de descarga. Calil Júnior (1990), observou que a utilização do fluxo funil é mais recomendável para produtos com partículas grandes, o que permite fluxo livre.

A geometria de tremonhas que define o fluxo de funil é basicamente a cônica e a tronco piramidal (Figura 06). A tremonha cônica que permite fluxo de funil não possui inclinação suficiente para proporcionar fluxo massa. Observa-se na Figura 05 que a inclinação da tremonha cônica é superior a da Figura 06.

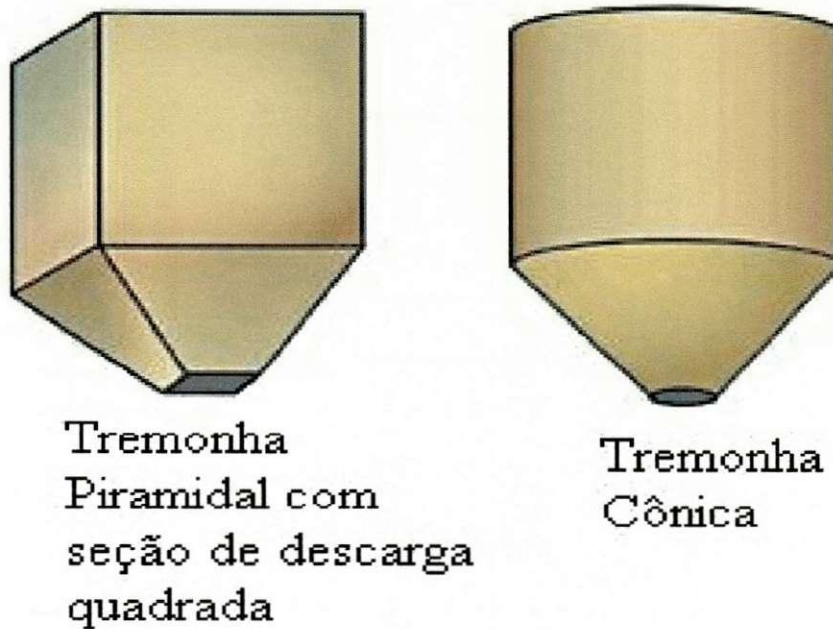


Figura 06: Tremonhas que permitem fluxo de funil

Dentro da literatura Jenike (1964) definiu outro tipo de fluxo: o fluxo expandido (Figura 07 c). É um termo usado para descrever um fluxo de funil em silos, no qual a parte inferior (tremonha) funciona como fluxo de massa. Este tipo de fluxo é eficiente para armazenar grandes quantidades de produtos não degradáveis, semelhantes a minérios.

A ocorrência ou não destes tipos de fluxos dependerá basicamente de três fatores: do tipo de produto, da geometria e do material de que é fabricado o silo (Benink, 1989).

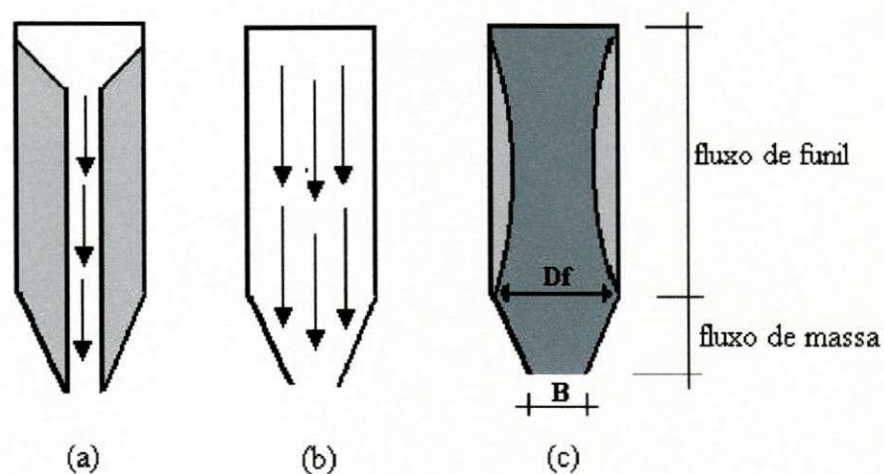


Figura 07: Tipos de fluxo durante o descarregamento: fluxo de massa (b), fluxo de funil (a) e fluxo expandido (c)

### 2.3.1.2 Geometria do fluxo

Quanto à geometria o fluxo pode ter: trajeto assimétrico, trajeto planar e trajeto excêntrico.

Trajeto assimétrico: o centro de gravidade do produto fluído coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (Figura 08 a).

Trajeto planar: é um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, na qual uma das dimensões do orifício de descarga é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal de fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (Figura 08 b).

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 08 c).

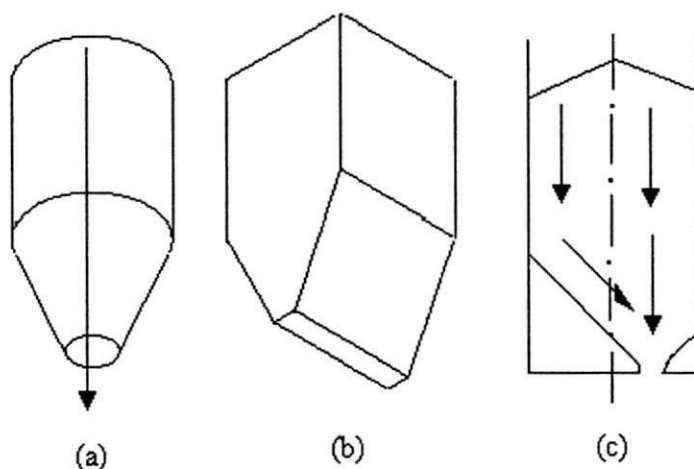


Figura 08: Tipos de trajeto do fluxo, quanto a geometria do silo. trajeto simétrico(a), trajeto planar(b) e trajeto excêntrico(c).

### 2.3.2 Obstrução do fluxo

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).

#### 2.3.2.1 Arqueamento e efeito tubo

O termo arqueamento é a formação espontânea de um arco na boca de descarga do silo Figura 09a, que resulta na retenção 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).

Quando o arco estável ocorre no orifício de descarga da tremonha, significa que o produto adquiriu, dentro do contorno da célula, resistência suficiente para suportar seu próprio peso e essa resistência está relacionada com o grau de consolidação. Plotando-se a resistência em relação ao grau de consolidação obtém-se a função fluxo. Geralmente na intersecção da função fluxo com o fator fluxo tem-se a determinação da tensão crítica ( $\sigma_c$ ) que dará o tamanho mínimo do orifício de descarga para que ocorra fluxo por gravidade sem a existência do arco (Jenike, 1964).

Diversos estudos e análises sobre a teoria de arqueamento em tremonhas provém das teorias de Jenike conseqüentemente, serviram e base para outros autores. Dentro da literatura existem duas teorias que tentam explicar o arqueamento: Método da Mecânica Estrutural e o Método da Mecânica Contínua.

A teoria da mecânica estrutural considera que o produto em uma tremonha pode ser considerado como uma pilha de membros estruturais isolados, e o arqueamento pode ocorrer se a resistência desses membros for maior que o peso das tensões induzidas. Para a teoria da mecânica contínua o produto assume uma massa única que ocupa toda a tremonha e o arqueamento é identificado como um estado de equilíbrio global sem um suporte em baixo (Drescher *et al.*, 1995).

O efeito tubo ocorre basicamente durante o fluxo de funil, processo no qual se forma um tubo ao longo de todo corpo do silo formando zonas mortas próximas às paredes do silo (Figura 09b).

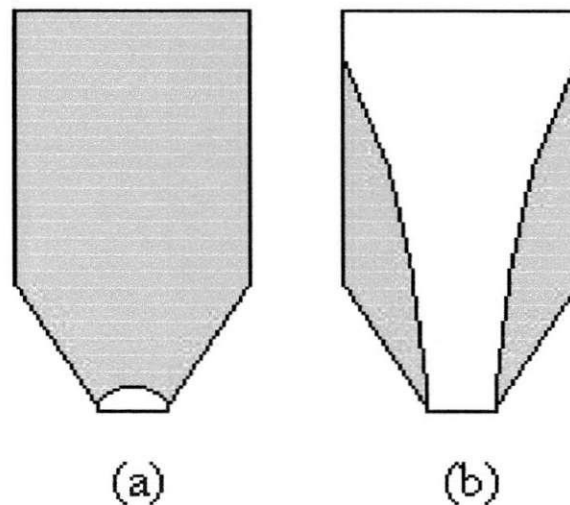


Figura 09: Problemas durante o fluxo. arco coesivo (a) e efeito tubo(b).

### 2.3.3. Taxa de fluxo

A determinação da taxa de fluxo de produtos sólidos, que pode ser denominada de vazão de descarga, de acordo com Marinelli e Carson (1992), é considerado um dos fatores importantes para o desenvolvimento do fluxo de massa e para assegurar fluxo seguro. Os fatores que interferem na taxa de fluxo para produtos sólidos finos são os seguintes: o tamanho e a forma da partícula do sólido (o tamanho pode diminuir essa taxa e a forma afeta não muito a permeabilidade do produto), o tamanho do orifício de descarga (em produtos finos a taxa de fluxo aumenta de acordo com o aumento do orifício de descarga), tempo de armazenamento (o longo tempo de armazenamento pode prejudicar a taxa de fluxo fazendo com se torne mais longa) e a forma do orifício de descarga.

O parâmetro taxa de fluxo, é de fundamental importância no funcionamento do silo. Daí o cuidado que devem ter os projetistas no dimensionamento levando em consideração tal fato. Geralmente estas análises são feitas em escalas

reduzidas, pois de acordo com Johanson *apud* Bandeira (1997) ocorrer erros após o silo construído torna-se muito dispendioso.

Bandeira (1997) mediu as taxas de fluxo de duas rações avícolas e farelo de trigo através de dois orifícios de descargas quadrados em modelo de silo prismático industrial. O silo tinha 0,34 x 0,34 x 2,90 m e possuía descarga concêntrica. Foi verificado que a taxa de fluxo permaneceu constante a medida que se aumentava a relação altura lado.

## 2.4 Pressões em silos

No projeto de silos é importante conhecer as ações que agem em toda estrutura. De acordo com Calil Júnior *apud* Freitas (2001), existem três tipos de ações que ocorrem nos silos: as ações permanentes que são decorrentes do peso próprio do silo e dos equipamentos que estão instalados em sua estrutura; as ações variáveis (carregamento, descarregamento, efeito de correias transportadoras, temperaturas, expansão do produto, ação de vibradores, recalque na fundação e força de fixação de elementos externos) e as ações excepcionais que são devidas ao impacto de veículos ou explosões.

Quando o produto é armazenado dentro do silo ocorrem dois tipos de pressões: as pressões estáticas e as pressões dinâmicas. As pressões estáticas são aquelas que atuam com o produto parado dentro do silo. Nesse caso as pressões verticais são máximas e considera-se um estado de tensão ativa. Quando o orifício de descarga é aberto e o fluxo começa ocorre uma diminuição das pressões verticais e passa a existir o estado de tensão ativa com as pressões dinâmicas (Freitas, 2001).

No projeto de silos a determinação das pressões nas paredes do silo é objeto de estudo de diversos autores por ser considerado bastante complexo. Mesmo admitindo esta complexidade, estudos concluíram que as pressões nas paredes dos silos estão diretamente ligadas aos tipos de fluxo que ocorrem nos mesmos (Roberts, 1992), muito embora sejam considerados outros pontos que influenciem nesse processo (Calil Júnior, 1990), tais como:

- Método de carregamento
- Vazão de carregamento
- Segregação
- Variações nas propriedades de fluxo do material armazenado
- Consolidação do produto
- Rigidez das paredes do silo
- Geometria do silo
- Temperatura
- Umidade

Todos esses cuidados muitas vezes são negligenciados pelos projetistas, porque falhas acontecem nessas estruturas em todo mundo, causando perdas econômicas e principalmente perdas humanas (Guaita *et al.*, 2003). É necessário ter como base na determinação das pressões em silos normas que delimitem parâmetros e valores. As normas internacionais existentes são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen para a estimativa das cargas estáticas ou iniciais e a teoria de Jenike para a estimativa das cargas dinâmicas durante o fluxo de massa ou fluxo de funil (Calil Júnior, 1990).

Nascimento (1996) cita que para o cálculo das pressões em silos verticais, é melhor adotar a norma DIN 1055 (1987) por se tratar dos itens de maior responsabilidade.



### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local dos ensaios**

As propriedades e fluxo, o teor de umidade, a granulometria, a análise do comportamento de fluxo das rações e a determinação da vazão média de descarga foram realizadas no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente - LaCRa do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande. A determinação do teor de gordura foi realizada no Laboratório de Apoio Multidisciplinar da EMBRAPA – Algodão, Campina Grande, PB.

#### **3.2 Produtos utilizados**

Foram utilizados dois tipos de rações avícolas correspondentes às diferentes fases de crescimento das aves. Uma ração foi fornecida pela fábrica GUARABIRA AVES LTDA (GuarAves), situada no município de Guarabira, e a outra foi comprada em fábrica na localidade de Puxinanã, ambas no estado da Paraíba. Para a realização foram utilizados 200 kg de cada tipo de ração

#### **3.3 Silo em modelo reduzido**

Foi utilizado um silo em modelo reduzido pela questão da viabilidade econômica do projeto como também pela funcionalidade. Estes modelos são extremamente usados porque permitem variar os teste de diversas formas e analisar os parâmetros que influenciam no funcionamento do silo, com mais detalhes.



### 3.3.1 Corpo do silo

O silo foi confeccionado em acrílico com chapas de espessura 1,7mm. A seção transversal do silo é de lado  $L = 340\text{mm}$  e a altura total  $H = 1800\text{mm}$  de altura, dividida em três módulos iguais com altura  $h = 600\text{mm}$ .

As paredes dos módulos foram conformadas no sentido horizontal em forma de ziguezague, com inclinação de  $70^\circ$ . Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.

### 3.3.2 Tremonha

A tremonha proposta para a realização do ensaio foi do tipo tronco-piramidal excêntrica como indica a Figura 10, com orifício de descarga quadrado. A tremonha possui duas inclinações diferentes:  $\alpha_1 = 21,5^\circ$  e  $\alpha_2 = 8,5^\circ$ , como indicado na Figura 10 e com 25% de excentricidade. A confecção foi com o mesmo material do corpo do silo. Foram utilizadas três seções transversais de descarga:  $\text{STD1} = 42,25\text{ cm}^2$ ,  $\text{STD2} = 64\text{ cm}^2$  e  $\text{STD3} = 100\text{ cm}^2$ . De acordo com (Rotter, 1998), a descarga excêntrica é utilizada em escala real, para algumas situações, com o propósito de simplificar o processo de descarregamento dos produtos armazenáveis. No entanto com ao longo do tempo de armazenamento podem ocorrer segregações e problemas de fluxo, que são comuns e caros que merecem muito estudo.

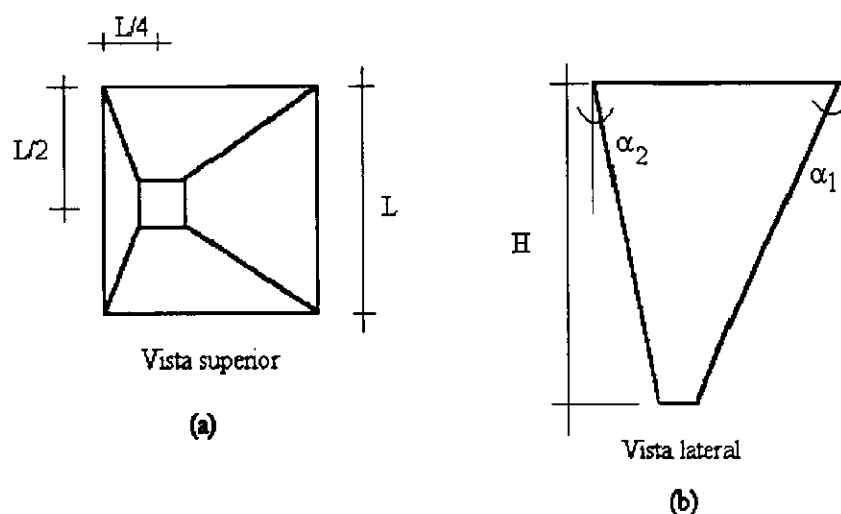


Figura 10: Detalhe da geometria da tremonha: vista superior (a) e vista lateral (b)

Observa-se na Figura 11, o conjunto corpo do silo mais a tremonha, utilizado nos ensaios.



Figura 11: Corpo do silo mais tremonha

### 3.4. Metodologia para determinação das propriedades físicas das rações

#### 3.4.1 Teor de umidade

Realizou-se a determinação do teor de umidade pelo método oficial da estufa a 105°C, com uma variação de até 93°C, durante 24 horas, efetuando-se três repetições. Com os valores dos pesos úmidos (Pu) e dos pesos secos (Ps) das amostras, calcularam-se os teores de umidade (Equação 02).

$$TU(\%) = \frac{Pu - Ps}{Pu} * 100 \quad \text{Eq.02}$$

#### 3.4.2 Teor de gordura

A determinação do teor de gordura foi feita no Laboratório de Apoio Multidisciplinar da EMBRAPA-Algodão. A metodologia utilizada foi a de Randall (1974). Este método consiste em pesar 2 g de cada amostra e transferir cartuchos de extração. Após preparação de prova em branco, colocaram-se os cartuchos dentro dos balões de extração, previamente lavados, adicionando-se 50 ml de éter de petróleo. Após aquecimento de 15 minutos em ebulição. Suspenderam-se os cartuchos durante 30 minutos. Retiraram-se os balões, colocando-se em banho-maria até evaporar o éter. Posteriormente, colocaram-se na estufa durante duas horas e em seguida no dissecador por 30 minutos.

O teor de gordura foi calculado através da Equação 03.

$$Gordura(\%) = \frac{[(PS - T) - Br]}{PA} * 100 \quad \text{Eq.03}$$

### **3.4.3 Granulometria**

A classificação granulométrica se deu em função das dimensões das partículas, utilizando-se o método do peneiramento. Este método consiste em retirar uma amostra do produto, previamente pesada com aproximadamente 500 g, em seguida, passadas por um jogo de peneiras e colocadas no agitador elétrico marca RETSCH em tempo determinado de 10 minutos, com uma velocidade adequada de 80 rpm. Após esse peneiramento, é feita a pesagem dos produtos retidos em cada peneira e determina-se a granulometria. As peneiras utilizadas, segundo padrão da ABNT foram: 07, 10, 14, 18, 30, 40, 50, 60 e 140.

## **3.5 Metodologia para determinação das propriedades de fluxo das rações**

### **3.5.1 Propriedades de fluxo instantâneas (T1 = 0 h)**

A determinação das propriedades de fluxo das rações foi feita através do ensaio de cisalhamento com a metodologia proposta por Milani (1993). Utilizou-se o aparelho de cisalhamento TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-40 conhecido como JENIKE SHEAR CELL, recomendado pela maioria das normas internacionais. O aparelho é constituído de duas partes principais: o aparelho de cisalhamento e o aparelho registrador de tensões (Figura 12).

As propriedades de fluxo determinadas foram: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, função fluxo, fator fluxo e densidade em função da consolidação.

#### **3.5.1.1 Procedimentos para realização do ensaio de cisalhamento instantâneo**

Antes de realizar o ensaio de cisalhamento instantâneo, seguiu-se um procedimento para a preparação da amostra a ser analisada.

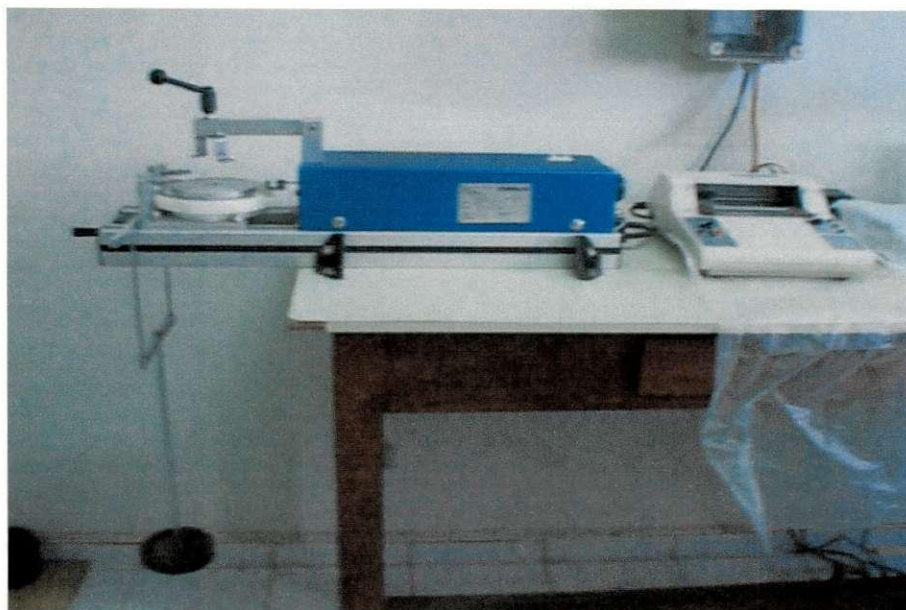


Figura 12: Aparelho de cisalhamento e aparelho registrador de tensões

Escolheu-se uma célula de cisalhamento com seção transversal de  $790 \text{ mm}^2$ . Os níveis de cargas utilizados foram propostos por Milani (1993) encontram-se na Tabela 01.

Tabela 01: Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneos e com tempo de consolidação

Cargas	
Pré – Cisalhamento (kg)	Cisalhamento (kg)
10	7; 5; 3,5
7	5; 3,5; 2
5	3,5; 2; 1

Determinados os níveis de cargas, a célula de cisalhamento foi montada e posta na posição correta sobre a base da célula e preenchida com uma amostra do produto. Esse preenchimento foi conduzido de tal forma que não ocorressem vazios na região onde o anel e a base se sobrepõe e o excesso foi raspado com uma espátula em posição inclinada.

Após o preenchimento da amostra foi realizado o processo de consolidação da amostra, no qual se procede da seguinte maneira:

a) coloca-se cuidadosamente a tampa de operação de rotações sobre a superfície do produto no anel molde, com os seus pinos alinhados com o eixo longitudinal do aparelho;

b) coloca-se o pendural de pesos com as cargas normais de consolidação (usualmente as mesmas cargas normais usadas no pré-cisalhamento) sobre o pino central da tampa de operações de rotações;

c) quando a amostra do produto dentro do anel está compactada e o adensamento for verificado, retira-se o pendural de pesos e a tampa, preenche o espaço vazio formado no anel molde, com o mesmo produto, conforme o procedimento de enchimento, descrito anteriormente;

d) realiza-se a operação de rotação de forma que não seja transmitida nenhuma força vertical. Essa rotação é de 90°. Durante esta operação, o anel de cisalhamento é pressionado contra os parafusos fixos para prevenir o seu deslizamento da posição original;

e) em seguida o aparelho de operação de rotações é deslocado da posição superior;

f) depois o pendural de pesos da tampa de twists é cuidadosamente retirado;

g) cuidadosamente retira-se o anel molde, segurando levemente a tampa de operação de rotações para não afetar a posição original do anel de cisalhamento;

h) remove-se a tampa de operação de rotações, deslizando-a na direção de medida da força, conservando a posição do anel de cisalhamento junto aos parafusos fixos;

i) retira-se o excesso de produto em pequenas quantidades, nivelando-se com o topo do anel de cisalhamento, com o mesmo procedimento adotado anteriormente.

Foi utilizado nos ensaios com as rações 25 rotações. Por fim, realizou-se o ensaio de cisalhamento instantâneo que foi dividido em duas etapas: pré - cisalhamento e cisalhamento.

### 3.5.1.1.1 Pré – cisalhamento

A fase conduz a amostra a uma deformação plástica desenvolvendo dentro dela uma zona de cisalhamento até ocorrer um fluxo de estado estável, com valor da tensão de pré - cisalhamento  $\tau_p$ . Esta tensão de pré - cisalhamento é mantida na célula, embora a distância de cisalhamento seja relativamente curta (varia em função do produto). Para determinar este valor e depois transmitir este movimento, a haste de medida de força é parada e invertida, até que a mesma perca o contato com o suporte (força de cisalhamento caindo a zero).

A estabilidade dos valores da tensão de pré - cisalhamento obtidos em estado estável do pré-cisalhamento, é uma indicação da reprodutibilidade de consolidação. Com amostras consolidadas corretamente, os valores individuais das tensões de cisalhamento em estado estável não deverão variar mais do que  $\pm 5\%$ , a uma dada carga normal de pré-cisalhamento (Barrêto, 1997).

### 3.5.1.1.2 Cisalhamento

Depois do pré-cisalhamento, as cargas normais correspondentes ao pré-cisalhamento são reduzidas conforme a Tabela 01 e o mesmo é indicado pela partida do motor propulsor da haste de medida de força com movimento para frente. A tensão de cisalhamento aumenta, passando por um máximo e depois diminui. O cisalhamento é contínuo, até que toda distância sobreposta da célula tenha sido percorrida, na condição de desenvolver um plano de cisalhamento preciso.

### 3.5.2 Propriedades de fluxo com tempo de consolidação ( $T_2 = 12$ h)

Os testes de cisalhamento com tempo de consolidação foram realizados depois de efetuados e analisados os testes instantâneos. Nos teste com tempo, as células de cisalhamento foram transferidas após a operação de pré-cisalhamento a uma bancada de consolidação onde permaneceram durante 12 horas sob a ação de uma força vertical (Figura 13). Depois foram retornadas ao aparelho para os testes de cisalhamento. Cuidados especiais foram tomados na transferência das células, mudança e colocação



das cargas, para que as condições inicialmente impostas não fossem alteradas. As células na bancada de consolidação ficam em condições herméticas para evitar a variação do teor de umidade do produto.

As cargas utilizadas para o ensaio de consolidação no pré-cisalhamento ( $W_p$ ) foram valores médios das cargas utilizadas no pré-cisalhamento instantâneo. A consolidação na bancada foi feita com a maior cargas de consolidação utilizada nos teste anteriores. Os níveis de cargas de cisalhamento ( $W_s$ ) foram escolhidos em função do pré-cisalhamento ( $W_s=1.3 W_p$ ).

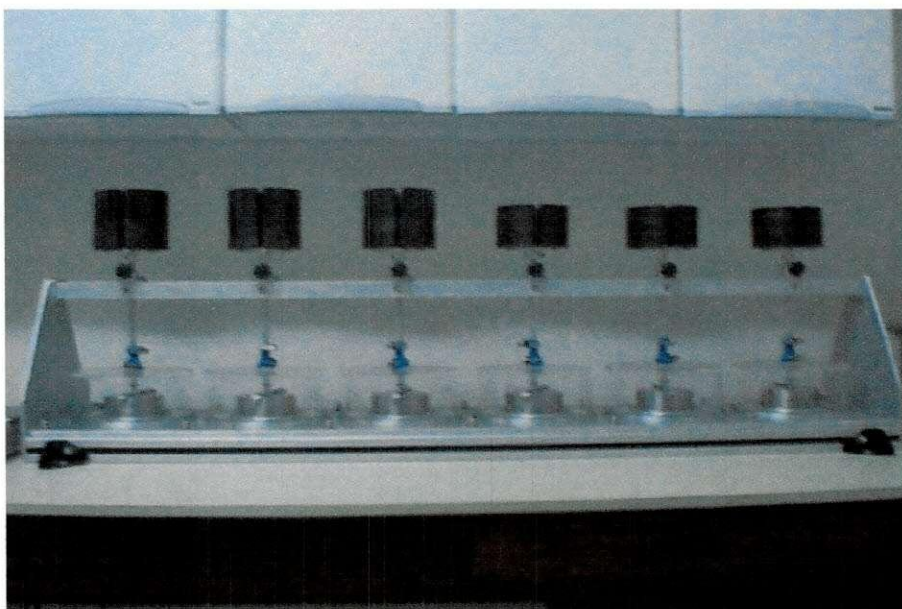


Figura 13: Bancada de consolidação

### 3.5.3 Determinação do ângulo de atrito do produto com a parede

Os ângulos de atrito com a parede são determinados nas mesmas células de cisalhamento usadas para a determinação do IYL, pela remoção do anel base da célula, e instalando neste local a amostra do mesmo material da parede a ser testada, no caso o acrílico. Determina-se o WIYL da parede para uma variedade de pressões da consolidação que irão atuar nas paredes do silo.

As etapas para a determinação do ângulo de atrito do produto com a parede são as seguintes:



- a) Colocam-se as cargas normais correspondentes a 5kg, selecionadas de acordo com as cargas utilizadas para o ensaio de cisalhamento instantâneo, sobre o pendural de pesos de modo que possam ser removidas;
- b) Põe-se o pendural de pesos sobre a tampa de cisalhamento, posicionada sobre a superfície nivelada do anel de cisalhamento;
- c) Antes de ligar o motor que aciona a haste de força, levanta-se levemente e manualmente o anel de cisalhamento da amostra do material da parede;
- d) Inicia-se a operação de cisalhamento com vários níveis de cargas normais;
- e) No final de cada teste, pesa-se a amostra do produto e prepara-se novamente para os teste seguintes.

### **3.5.4 Determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno**

#### **3.5.4.1 Ângulo de atrito interno**

Através da realização do ensaio de cisalhamento instantâneo é possível determinar a reta que define o lugar geométrico de deslizamento do produto (IYL), (Figura 14) plotando-se em um gráfico, as tensões normais de consolidação em função das tensões de cisalhamento. A inclinação dessa reta nos permite conhecer o ângulo de atrito interno do produto.

#### **3.5.4.2 Efetivo ângulo de atrito interno**

Este é o ângulo com a horizontal de uma linha entre a origem e a tangente ao IYL no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação. De acordo com Milani (1993) através do IYL, definido pela linha reta, são traçados dois círculos de Mohr (Figura 14). O primeiro é desenhado saindo da origem e tangenciando o ponto (A) pertencente ao IYL. Quando este círculo toca o eixo  $\sigma$ , é definida a tensão não confinada do produto. O outro círculo é traçado tocando o ponto (E) do IYL e o ponto (P) do pré-cisalhamento. Quando este círculo toca o eixo  $\sigma$  é definida a tensão máxima de consolidação do produto  $\sigma_1$ . A reta que sai da origem e toca o ponto (E) (valor

máximo do IYL) define o efetivo lugar geométrico (EYL) e a inclinação desta dá o efetivo ângulo de atrito interno.

### 3.5.5 Densidade em função da consolidação

A determinação da densidade do produto em função da consolidação consistiu em pesar o conjunto (célula + produto) após o ensaio de cisalhamento, e em seguida, subtrair o peso da célula e dividir por seu volume.

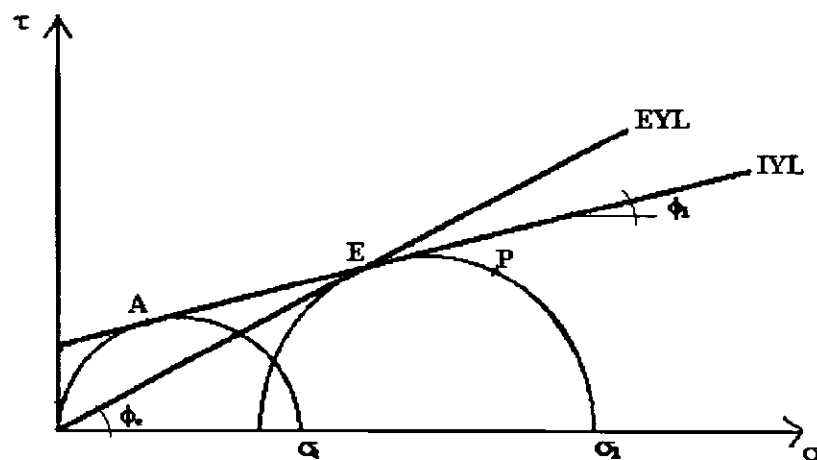


Figura 14: Círculo de Mohr de tensões

### 3.5.6 Função fluxo

Através dos valores determinados para a tensão máxima de consolidação  $\sigma_1$  e a tensão não confinada  $f_c$  obtidas com o círculo de Mohr de tensões (Figura 14), traça-se uma curva de  $\sigma_1 \times f_c$ , que define a função fluxo do produto.

### 3.5.7 Fator fluxo

Determinou-se o fator fluxo da tremonha através da metodologia de Jenike (1964), na qual utilizam-se ábacos que estão em ANEXO. Estes são em função do efetivo ângulo de atrito interno, da inclinação vertical da tremonha e do ângulo de atrito do produto com a parede.

### 3.6 Análise do fluxo

Analisou-se através de seqüências fotográficas, o fluxo instantâneo ( $T_1=0$  horas) e com o tempo ( $T_2=12$  horas). O silo era carregado de forma concêntrica intercalado com camadas do produto tingido, para que se pudesse ter uma melhor visualização do escoamento e do comportamento da simetria do fluxo do produto após a abertura do orifício de descarga.

### 3.7 Determinação da vazão média de descarga

Foram determinadas as vazões médias de descarga em função do tempo de consolidação  $T_1 = 0$  horas e  $T_2 = 12$  horas em função das relações altura/lado do silo: 1,76; 3,5; e 5,3.

Tentava-se medir a vazão média de descarga quase que instantaneamente, ou seja, ao se abrir o orifício de descarga acionava-se o cronômetro quase no mesmo instante. Dividiu-se o volume descarregado pelo tempo e determinamos a vazão mássica. Esta 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+ração. Depois se subtraía o peso do silo vazio do peso do conjunto.

#### 3.7.1 Análise estatística

A análise estatística da vazão de descarga foi feita utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado com esquema fatorial  $2 \times 3 \times 2 \times 3$  com três repetições. Os fatores foram representados pelas seguintes combinações:

- Tempo de armazenamento das rações:

T1 = 0 horas

T2 = 12 horas

- Seção transversal de descarga:

STD1 = seção transversal 42 cm<sup>2</sup>

STD2 = seção transversal 64 cm<sup>2</sup>

STD3 = seção transversal 100 cm<sup>2</sup>

- Teor de gordura das rações:

TG1 = teor de gordura da ração 1

TG2 = teor de gordura da ração 2

- Relação altura/lado do silo:

H/L1 = relação altura/lado 1,76

H/L2 = relação altura /lado 3,5

H/L3 = relação altura/lado 5,3

Os dados foram analisados através do software ASSISTAT desenvolvido por Silva (1996).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades físicas

#### 4.1.1 Teor de umidade e teor gordura

Os resultados obtidos para a determinação do teor de umidade e de gordura encontram-se na Tabela 02. Observa-se que o teor de umidade da ração<sup>1</sup> é superior ao da ração<sup>2</sup>. Para os teores de gordura se percebe também diferença entre os percentuais.

Tabela 02: Valores dos teores de umidade e de gordura

Produto	Teor de umidade (%)	Teor de gordura (%)
Ração 1	12,94	6,99
Ração 2	11,90	7,24

Como as rações usadas pertencem a fases distintas de crescimento do frango, ocorreu diferença entre os teores de gordura. A diferença entre os teores de umidade é devido às características higroscópicas dos produtos utilizados na composição destas. De acordo com Torres *apud* Bandeira (1997), a percentagem de gordura adequada em rações não deve ultrapassar 10% e o teor de umidade deve ficar em torno de 5 a 10%. O autor encontrou para as rações analisadas em seu trabalho, teores de umidade que variaram de 10,50 a 11,51% e teores de gordura com variação

entre 5,53 e 7,11%. Foi observado que os resultados encontrados neste trabalho, para os teores de umidade e de gordura, não foram muito diferentes dos valores de Bandeira (1997), sendo concluído que para ração avícola, o teor de gordura adicionado pelos fabricantes está na ordem de 5 a 10% e o teor de umidade ultrapassa os 10%.

#### 4.1.2 Granulometria

Os resultados obtidos com os ensaios granulométricos encontram-se na Tabela 03 e na Figura 15. Observa-se que as duas rações possuem o maior percentual retido na peneira de malha 0,59 mm seguido da peneira 1,0 mm. Calil Junior (1984) propôs classificar os produtos cujos diâmetros das partículas encontram-se no intervalo de 0,297 [  $D_p$  ' 1,0 mm, como produtos pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos. Desta forma classifica-se as duas rações com esta característica. Nascimento (1996) em ensaios realizados com rações e farelos de cereais verificou que os maiores percentuais ficaram retidos na peneira de malha 0,50 mm e seguindo a mesma classificação proposta por Calil Júnior (1984), classificou tais produtos com produtos como pulverulentos a pulverulentos coesivos. Da mesma forma Bandeira (1997) classificou dois tipos de rações estudadas.

Tabela 03: Resultados da análise granulométrica

Peneira		Percentual retido (%)	
Nº ABNT	Malha (mm)	Ração1	Ração2
7	2,8	0,28	0,33
<b>10</b>	2,2	5,74	<b>5,84</b>
14	1,4	12,12	11,43
18	1,0	22,92	24,81
30	0,59	23,27	25,55
40	0,42	11,92	12,48
50	0,297	7,67	4,67
60	0,250	7,67	6,39
140	0,105	7,87	7,67

Mesmo as duas rações possuindo teores de gordura considerados elevados, não foram verificadas formações de pequenas esferas durante o processo de peneiramento. Segundo Nascimento (1996) estas esferas, que são formadas devido à presença de gordura, podem mascarar os resultados da classificação granulométrica. Atribui-se esse fato a uma pequena quantidade de finos presente nas duas rações, como se verifica na Tabela 03.

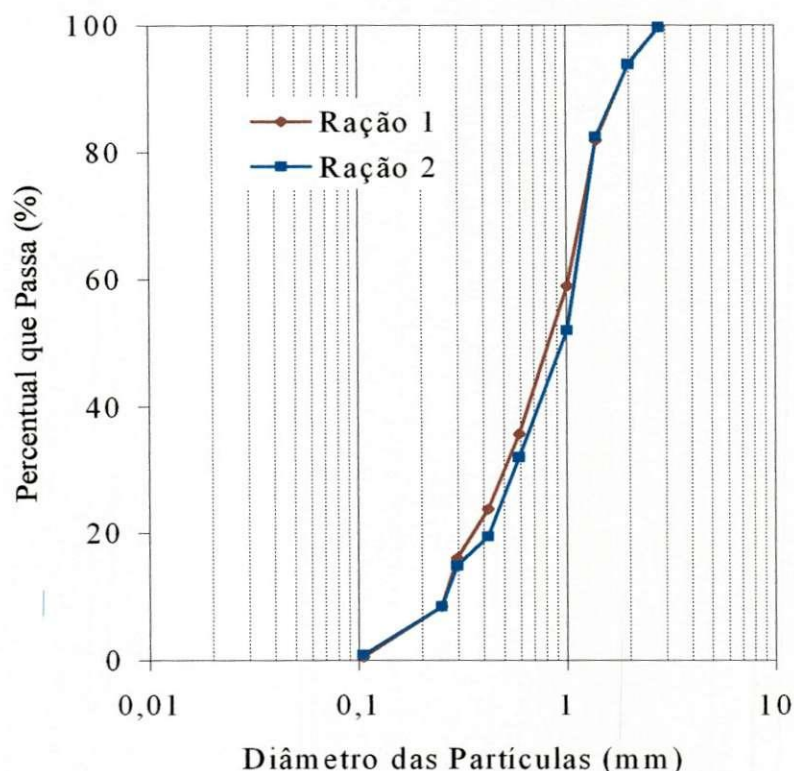


FIGURA 15: Curva granulométrica da ração 1 e ração 2 em função do diâmetro da partícula e do percentual que passa

#### 4.2 Propriedades de fluxo

As propriedades de fluxo foram determinadas para simular dois períodos de armazenamento: instantâneo ( $T_1=0$  horas) e em função do tempo de consolidação ( $T_2=12$  horas). Determinaram-se as seguintes propriedades: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, função fluxo, fator fluxo e densidade consolidada. Com o intuito de simular o tempo máximo de armazenamento da ração no processo de fabricação até a expedição, que é no máximo 12 horas, determinaram-se as propriedades de fluxo considerando esse tempo de

consolidação. Os valores instantâneos e com tempo de consolidação encontram-se na Tabela 04.

Os ângulos de atrito interno instantâneo e com consolidação de 12 horas da ração 1 variaram no intervalo de 33 a 39° e de 40 a 45°, respectivamente. Para a ração 2 os resultados dos ângulos de atrito interno instantâneo e com consolidação de 12 horas ficaram no intervalo de 43 a 46° e de 46 a 48°, respectivamente. Os efetivos ângulos de atrito interno instantâneo e com consolidação de 12 horas da ração 1 ficaram nos intervalos de 43 a 44° e 49 e 51°, respectivamente. Já a ração 2 obteve resultados para o mesmo ângulo instantâneo e com consolidação de 12 horas que ficaram entre 46 e 49° e 49 e 51°. Observa-se para as duas rações, que o tempo de armazenamento contribui para aumentar os ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito interno. A ração 2 obteve resultados para os ângulos de atrito internos e efetivos ângulos de atrito interno superiores aos da ração 1 (Tabela 02). Isto aconteceu porque o teor de gordura da ração 2 é superior ao da ração 1, o mesmo observado por Bandeira (1997).

Bokhoven e Lohnes (1989) utilizaram uma metodologia de ensaio diferente para realizar testes com farinha de soja. Considerou ainda nos ensaios 1 hora de consolidação como instantâneo e encontrou o ângulo de atrito interno de 46° e para uma consolidação de 22 horas este mesmo ângulo foi de 53°. Nascimento (1996), determinou as propriedades de fluxo para diversos produtos, entre eles dois tipos de rações avícolas, no qual, encontrou ângulos de atrito interno variando entre 43 e 45° e os efetivos ângulos de atrito interno entre 48 e 53°. Bandeira (1997) em ensaios com rações avícolas encontrou ângulos de atrito interno no intervalo de 40 a 44° e efetivos ângulos de atrito interno entre 36 e 48°. Nascimento (1996) e Bandeira (1997) não determinaram as propriedades de fluxo considerando o tempo de consolidação superior a zero.

Verifica-se coerência entre os resultados encontrados por Nascimento (1996), Bandeira (1997) e os dados deste trabalho por se tratar de produtos com características semelhantes e mesma metodologia de ensaio. Os ângulos de atrito interno dos três autores variaram entre 33 e 46° e os efetivos ângulos de atrito ficaram entre 36 e 53°.

Analisando os resultados dos ângulos de atrito do produto com a parede, a ração 1 obteve valor superior em relação a ração 2 por se tratar da ração que possui maior quantidade de finos (Tabela 03). O material utilizado para a realização do ensaio foi o acrílico pelo fato de ser o material utilizado na confecção de modelos reduzidos.



Bandeira (1997), determinou ensaios com o mesmo material e produto com características semelhantes e encontrou este ângulo variando de 13 a 16°.

A densidade consolidada da ração1 instantânea foi de 810 kg/m<sup>3</sup> e para consolidação de 12horas foi de 820 kg/m<sup>3</sup>. A ração 2 obteve uma densidade consolidada instantânea de 820 kg/m<sup>3</sup> e com consolidação de 12 horas ficou em 830 kg/m<sup>3</sup>. O aumento da densidade das duas rações, com o tempo de consolidação foi devido ao acréscimo das cargas de consolidação com o tempo.

Nascimento (1996) encontrou em ensaios realizados com rações avícolas, valores de densidades consolidadas instantâneas variando de 710 a 830 kg/m<sup>3</sup>. Bandeira (1997) determinou para produtos similares, densidades consolidadas instantâneas que variaram de 706 a 734 kg/m<sup>3</sup>. A metodologia utilizada para determinação da densidade consolidada foi a mesma usada por Nascimento (1996) e Bandeira (1997), no entanto observa-se que os resultados foram diferentes já que esta propriedade é influenciada pela granulometria, teor de gordura, teor de umidade e carga de consolidação, que variam dentro do mesmo produto tornando diferentes as densidades.

Tabela 04: Propriedades de fluxo

Produtos		Instantâneas (t=0horas)						
		Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)		Ângulo de atrito produto/parede (°)		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
		$\phi_{il}$	$\phi_{iu}$	$\phi_{el}$	$\phi_{eu}$	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$	
Ração1		33	39	43	44	18	20	810
Ração2		43	46	46	49	17	19	820
Produtos		Consolidação (12horas)						
		Ângulo de atrito interno (°)		Efetivo ângulo de atrito interno (°)		Ângulo de atrito produto/parede (°)		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
		$\phi_{il}$	$\phi_{iu}$	$\phi_{el}$	$\phi_{eu}$	$\phi_{wl}$	$\phi_{wu}$	
Ração1		40	45	49	51	18	20	820
Ração2		46	48	49	51	17	19	830

A determinação das propriedades de fluxo neste trabalho foi feita através do equipamento da Jenike Shear Test, o mesmo utilizado por Nascimento (1996) e Bandeira (1997). Foram usados nos três trabalhos os mesmos níveis de carga. Embora se trate do mesmo equipamento e níveis de carga, verificou-se diferença nos valores das propriedades de fluxo.

Com os resultados das tensões máximas de consolidação ( $\sigma_1$ ) e das resistências não confinadas ( $f_c$ ), determinaram-se as funções fluxos das rações 1 e 2. Na Figura 16 observam-se as funções fluxo (FF) e (FFt) da ração 1.

Verifica-se na Figura 16 que as funções fluxos adquiriram um comportamento côncavo o que de acordo com Roberts (1987) este tipo de curva indica produtos cujas tensões aumentam rapidamente e conseqüentemente aumentam também a pressão de consolidação. A função com tempo de consolidação de 12 horas ficou logo acima da função fluxo instantânea para as duas rações (Figuras 16 e 17). De acordo com Benink (1989) isto ocorre porque há um aumento de tensões no processo de consolidação.

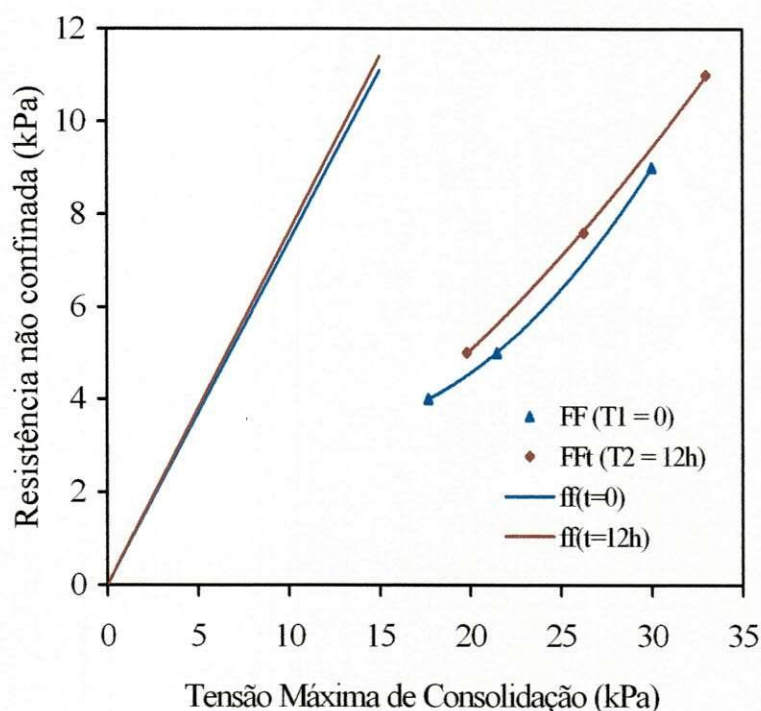


Figura 16: Função fluxo no tempo – Ração 1

A Figura 17 corresponde a função fluxo da ração 2. O comportamento convexo, para Roberts (1987), corresponde a um produto coesivo.

A determinação do fator fluxo foi feita utilizando o Método de Jenike (1964). Nas Figuras 16 e 17 encontram-se representados os fatores fluxo das rações 1 e 2 respectivamente. Para a ração 1 o fator fluxo de T1 foi 1,35 e T2 foi 1,31. A ração 2 obteve para T1 o fator de 1,35 e para T2 o fator fluxo de 1,30. O fator fluxo depende da inclinação da tremonha, do efetivo ângulo de atrito interno e do material que foi confeccionado o silo. O  $\arctan(ff)$  é a inclinação da reta que parte da origem do gráfico de FF e define o ff. Observa-se que não houve muita diferença entre estes valores de ff para as duas rações, devido a pequena diferença existente entre os efetivos ângulos de atrito internos. O tempo de armazenamento não interferiu no ff.

Não foi possível dimensionar os orifícios de descarga através na BMHB (1985), pois como os fatores fluxos não interceptaram as funções fluxos, não foi possível determinar a tensão crítica na descarga (Figuras 16 e 17). A literatura sugere nesses casos dimensionar o orifício de descarga através das dimensões das partículas.

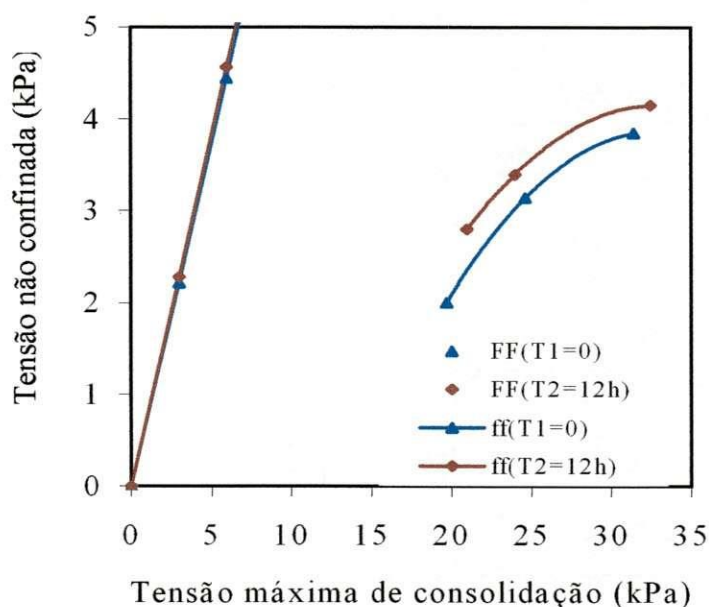


Figura 17: Função fluxo no tempo – Ração 2

### 4.3 Análise do fluxo

As análises do comportamento do fluxo das rações estudadas foram feitas por meio de observações visuais e logo depois registradas através de seqüências fotográficas. As Tabelas 05, 06 e 07 representam os resultados obtidos para o

comportamento do fluxo, instantâneo e com tempo de consolidação de 12 h das duas rações.

A análise do fluxo foi realizada para as duas rações, levando em consideração o tempo de armazenamento instantâneo e com 12 horas.

Tabela 05: Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 1,76

	Tempo de armazenamento								
	T1 = 0 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64 cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ração 1	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm
Ração 2	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm
	T2 = 12 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64 cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	Ração 1	ac	ac	ac	ac	ac	fm	ac	fm
Ração 2	fm	ac	ac	fm	fm	fm	fm	fm	fm

ac – arco cesivo      fm – fluxo de massa

Tabela 06: Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 3,5

	Tempo de armazenamento								
	T1 = 0 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ração 1	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm
Ração 2	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm
	T2 = 12 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64 cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	Ração 1	ac	ac	ac	ac	ac	ac	ac	fm
Ração 2	ac	ac	ac	ac	ac	ac	fm	fm	fm

ac – arco cesivo      fm – fluxo de massa

Tabela 07: Ocorrência do tipo de fluxo durante a descarga para relação H/L = 5,3

	Tempo de armazenamento								
	T1 = 0 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64 cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ração 1	ac	ac	ac	fm	fm	ac	fm	fm	fm
Ração 2	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fm
	T2 = 12 horas								
	STD1 = 42,5 cm <sup>2</sup>			STD2 = 64 cm <sup>2</sup>			STD3 = 100 cm <sup>2</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	Ração 1	ac	ac	ac	ac	ac	ac	ac	fm
Ração 2	ac	ac	ac	ac	ac	ac	fm	fm	fm

ac – arco cesivo    fm – fluxo de massa

Foi observado que para a ração 1 ocorreu fluxo de massa na condição instantânea (T1 = 0h), exceto para a relação altura/lado 5,3 e seção transversal de descarga 42,25 cm<sup>2</sup>. A não ocorrência do fluxo instantâneo para esta relação altura/lado, deve-se ao teor de umidade de ração 1 ser considerado alto e possuir grande quantidade de finos como também ao aumento de tensões que ocorrem na tremonha, a medida que a aumenta-se a altura do silo. Para o tempo de consolidação de 12 horas verificou-se que basicamente não houve fluxo devido à formação de arcos coesivos no orifício de descarga.

A ração 2 obteve fluxo de massa com o tempo instantâneo para os três orifícios de descarga e as três relações altura/lado. Para a consolidação de 12 horas o fluxo de massa só não ocorreu para as relações altura/lado 5,3 e 3,5 e as seções transversais de descarga 42,25 cm<sup>2</sup> e 64 cm<sup>2</sup>.

Bandeira (1997) em ensaio realizado com três produtos, entre eles duas rações avícolas, verificou através de fluxo instantâneo que uma das rações não fluiu com a seção transversal de 64 cm<sup>2</sup>. De acordo com a autora ocorreu este fato devido ao elevado teor de gordura do produto e da relação altura/lado do silo.

#### 4.3.1 Produto: ração 1

**Teor de gordura: 6,99%**

**Relação altura/lado: 1,76; 3,5 e 5,3.**

**Tempo de consolidação: T1 = 0**



a) Seção transversal de descarga 42,25 cm<sup>2</sup>

Observou-se nos ensaios instantâneos que, só não ocorreu fluxo de massa para a relação altura/lado 5,3. Nas Figuras 18, 19 e 20 verifica-se o comportamento do fluxo para as três relações altura/lado do silo. Na Figura 20 vê-se a formação do arco coesivo logo após a abertura do orifício de descarga. Este fato se deve as dimensões do orifício de descarga, teor de gordura da ração 1 e relação altura/lado. De acordo com classificação, em função do comportamento da FF, proposta por Robert (1987), a ração 1 é um produto que aumenta rapidamente as suas tensões e conseqüentemente as pressões de consolidação crescem, sendo desta forma prejudicado o fluxo. Bandeira (1997) na análise do fluxo de duas rações avícolas verificou a formação do arco coesivo e atribuiu este fato ao alto teor de gordura de um tipo de ração que foi de 7,11%.



Figura 18: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T_1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD_1 = 42,25$  cm<sup>2</sup>

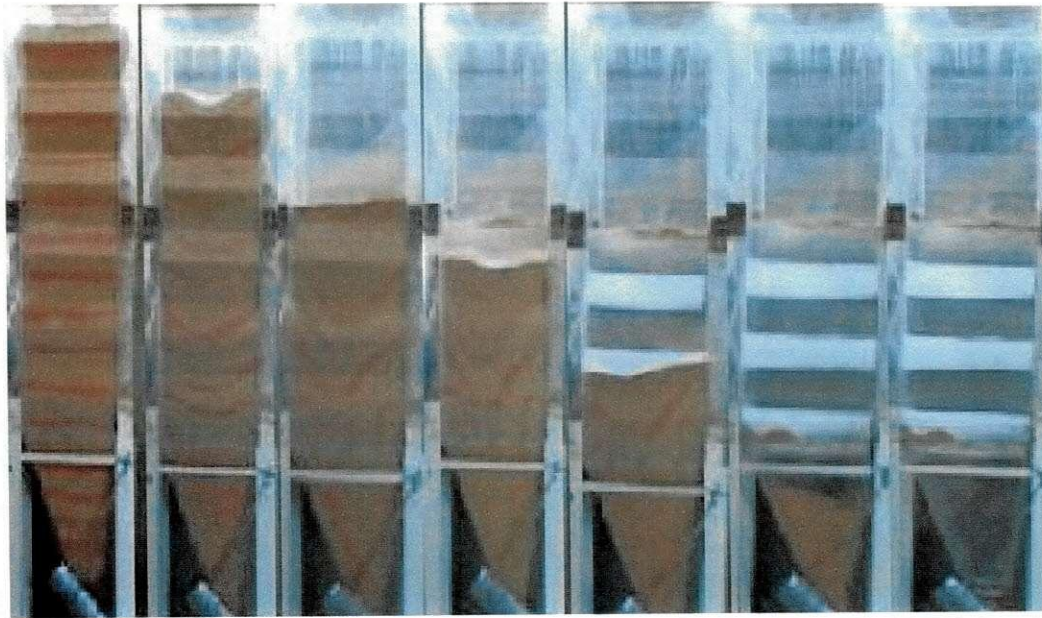


Figura 19: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD1 = 42,25$   $cm^2$



Figura 20: Formação do arco coesivo para ração 1,  $H/L = 5,3$  e  $STD1 = 42,25$   $cm^2$



b) Seção transversal de descarga  $64 \text{ cm}^2$

O fluxo de massa ocorreu para as três relações altura/lado como pode ser observado nas Figuras 21, 22 e 23. Com o aumento do orifício de descarga observou-se que o teor de gordura não influenciou no tipo fluxo da ração nem tão pouco a relação altura lado do silo.

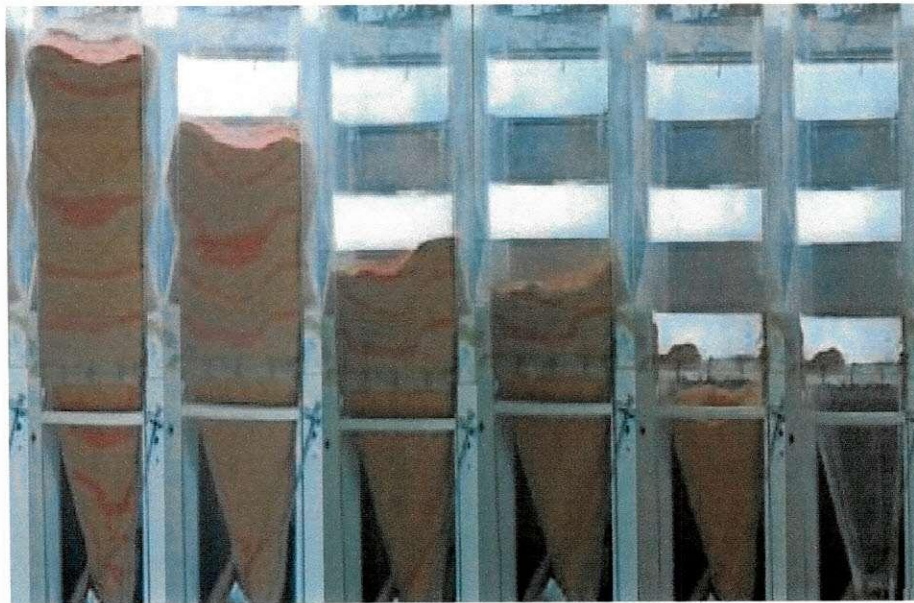


Figura 21: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$



FIGURA 22: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$



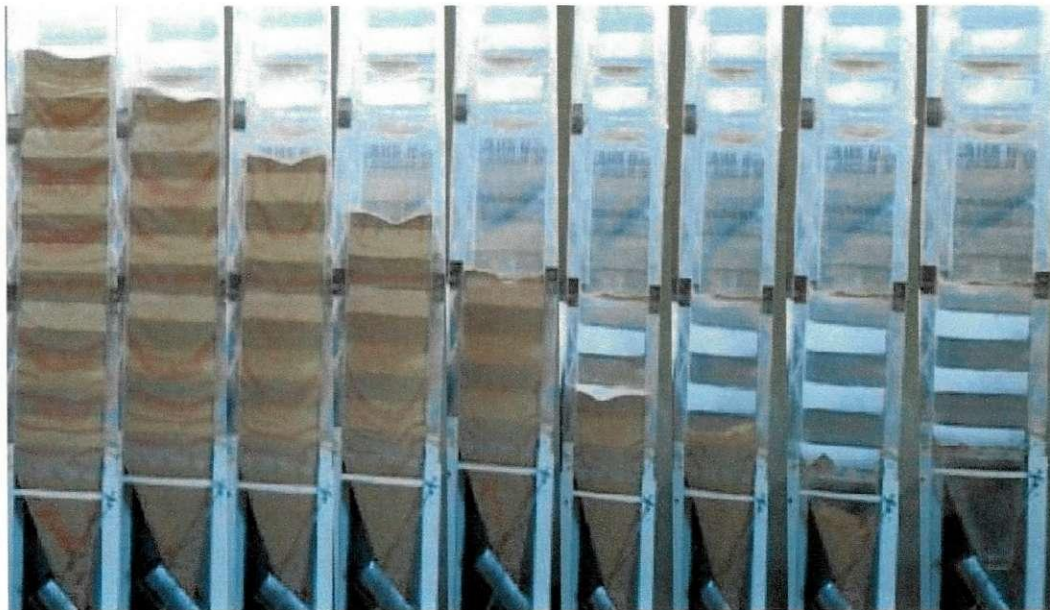


Figura 23: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 5,3$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$

c) Seção transversal de descarga  $100 \text{ cm}^2$

A maior seção transversal de descarga obteve fluxo de massa para as três relações altura/lado como pode ser verificado na Figuras 24, 25 e 26.



Figura 24: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD3 = 100 \text{ cm}^2$



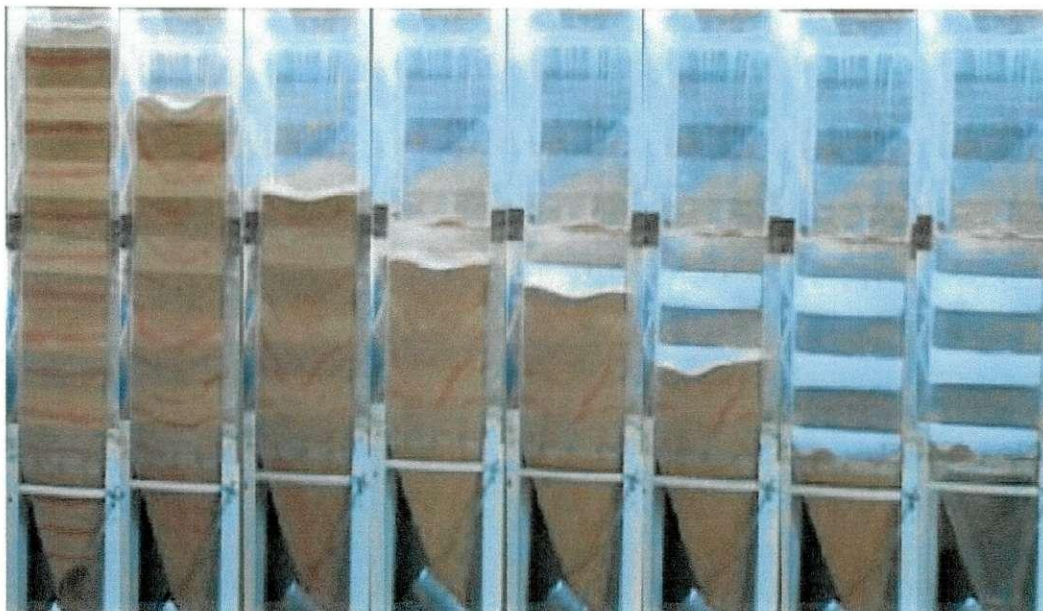


Figura 25: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD3 = 100$   $cm^2$

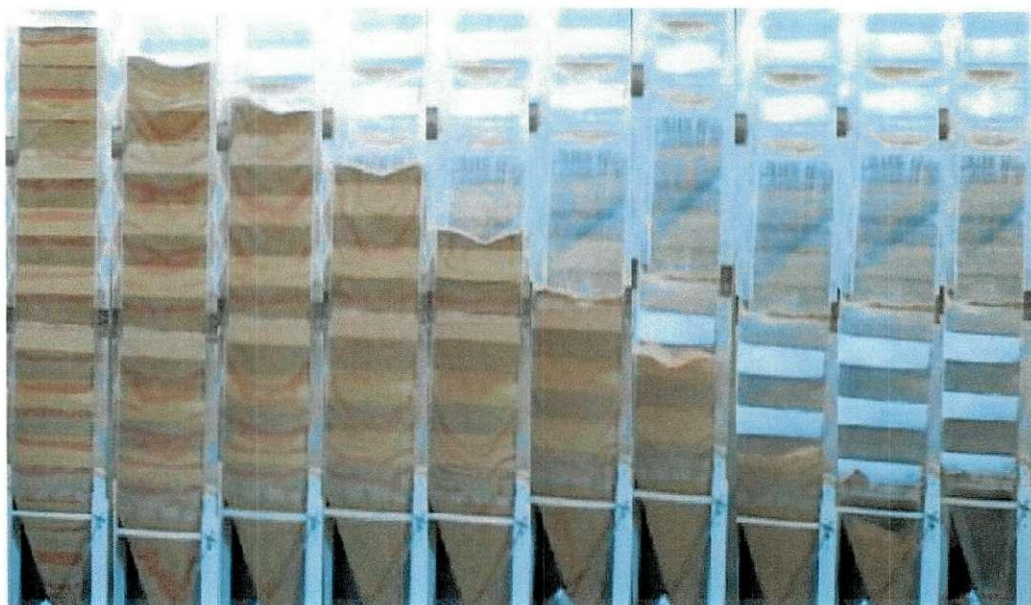


Figura 26: Comportamento do fluxo da ração 1, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 5,3$ ,  $STD3 = 100$   $cm^2$

De acordo com as condições de realização do experimento o fluxo instantâneo da ração 1, ocorreu independente da relação altura/lado e não teve

problemas para os três orifícios de descargas estudados. Sendo observado apenas a formação do arco coesivo para relação altura/lado 5,3 e seção transversal de descarga  $42,25\text{cm}^2$ . Fato este atribuído ao aumento de tensões que ocorre no corpo do silo e na tremonha com o acréscimo da altura do silo.

#### 4.3.2 Produto: ração 2

**Teor de gordura: 7,24%**

**Relação altura/lado: 1,76; 3,5 e 5,3.**

**Tempo de consolidação:  $T1 = 0$**

##### a) Seção transversal de descarga $42,25\text{ cm}^2$

Contrário ao resultado da ração 1 que, para este mesmo orifício de descarga formou o arco coesivo nesta esta seção transversal de descarga, a ração2 obteve o fluxo de massa para as três relações altura/lado como se verifica na Figura 27, 28 e 29. Atribui-se este fato ao teor de umidade da ração1 ser superior ao da ração2 (Tabela 02), como também a ração1 possuir maior quantidades de partículas finas (Tabela 03). Mesmo com a utilização do menor orifício de descarga, a relação altura/lado do silo não interferiu no fluxo.

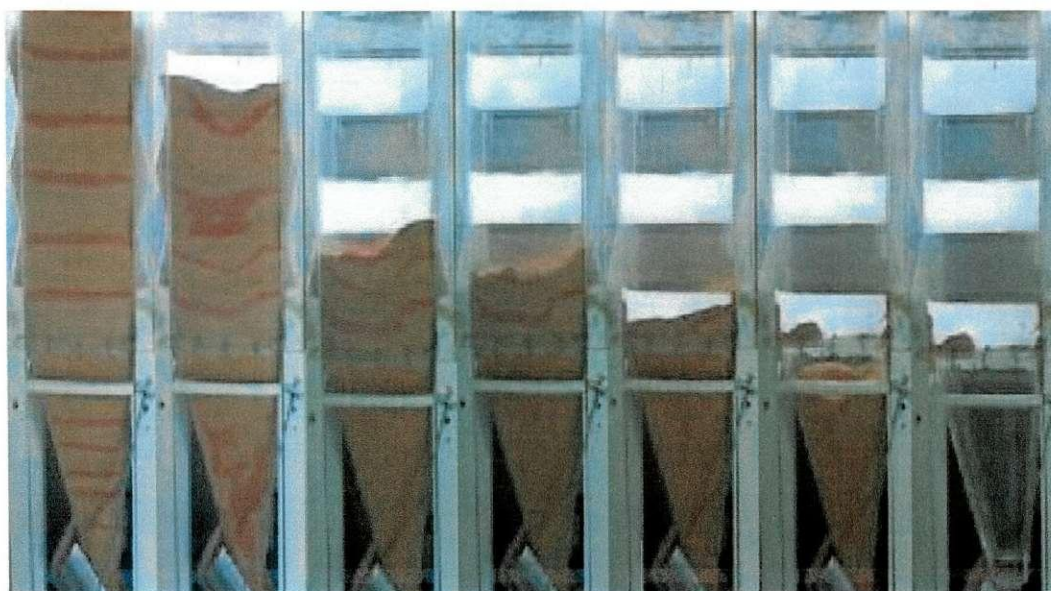


Figura 27: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD1 = 42,25\text{ cm}^2$



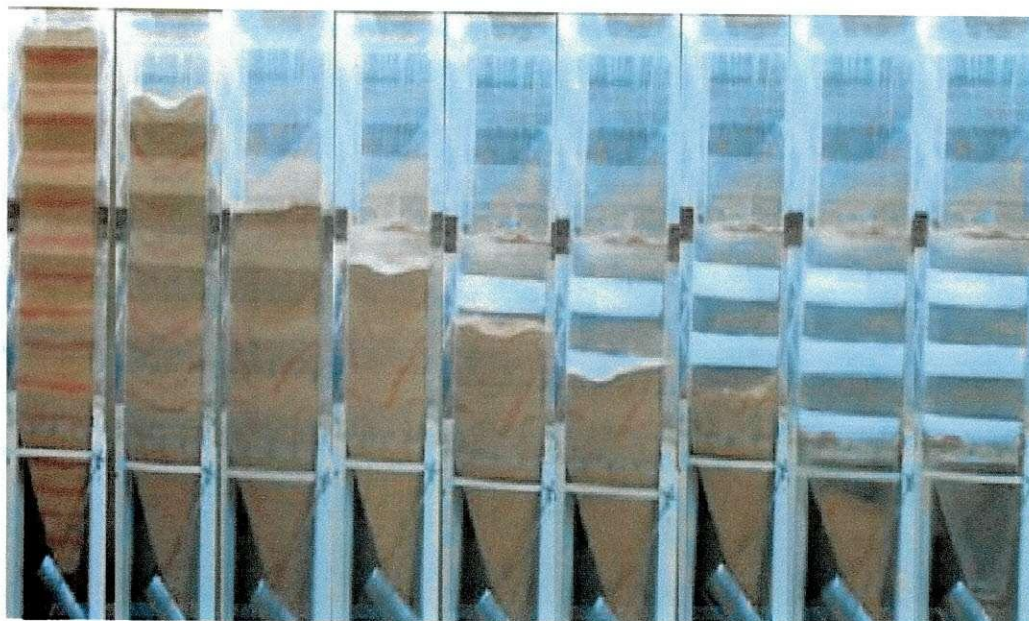


Figura 28: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD1 = 42,25$   $cm^2$

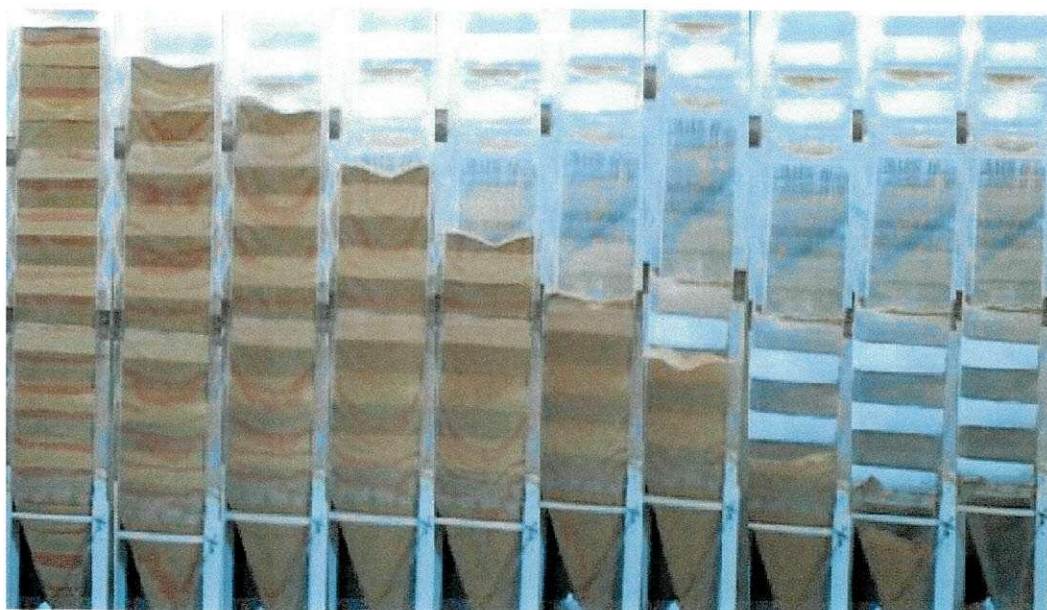


Figura 29: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 5,3$ ,  $STD1 = 42,25$   $cm^2$



b) Seção transversal de descarga  $64 \text{ cm}^2$

A razão 2 obteve também fluxo de massa para as três relações altura/lado como se vê nas Figuras 30, 31 e 32.

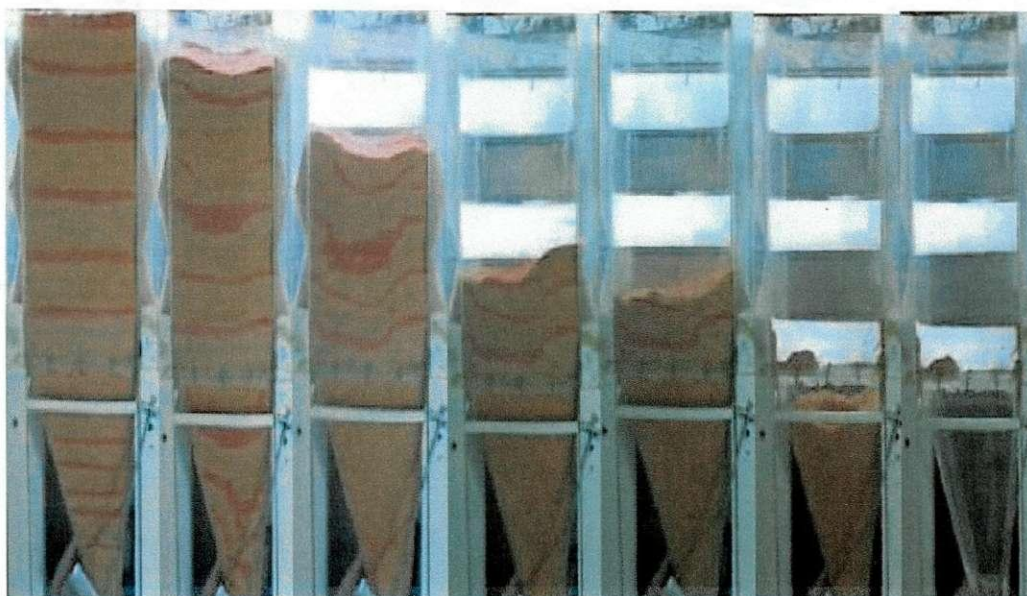


Figura 30: Comportamento do fluxo da razão 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$

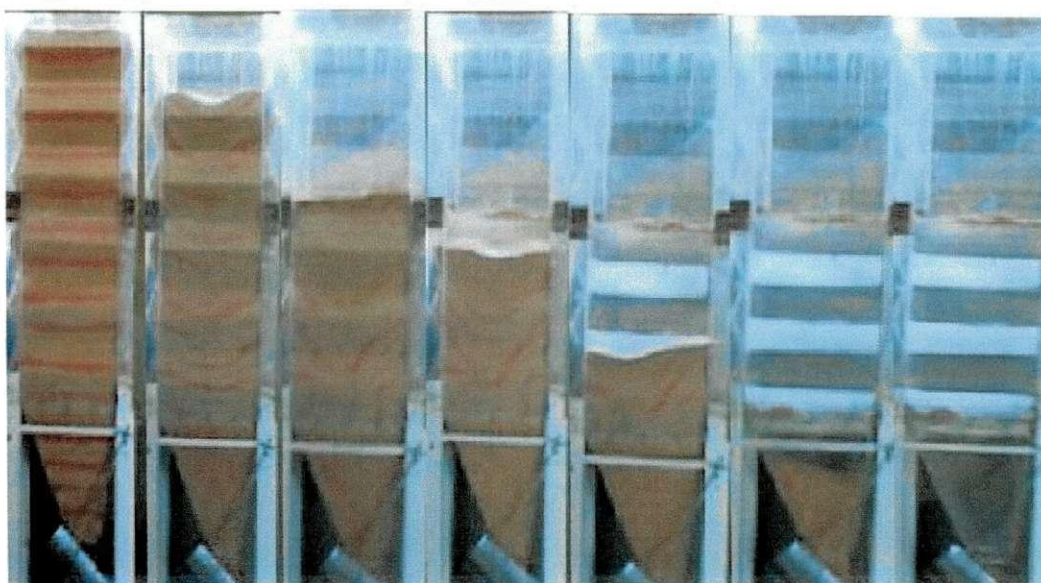


Figura 31: Comportamento do fluxo da razão 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$

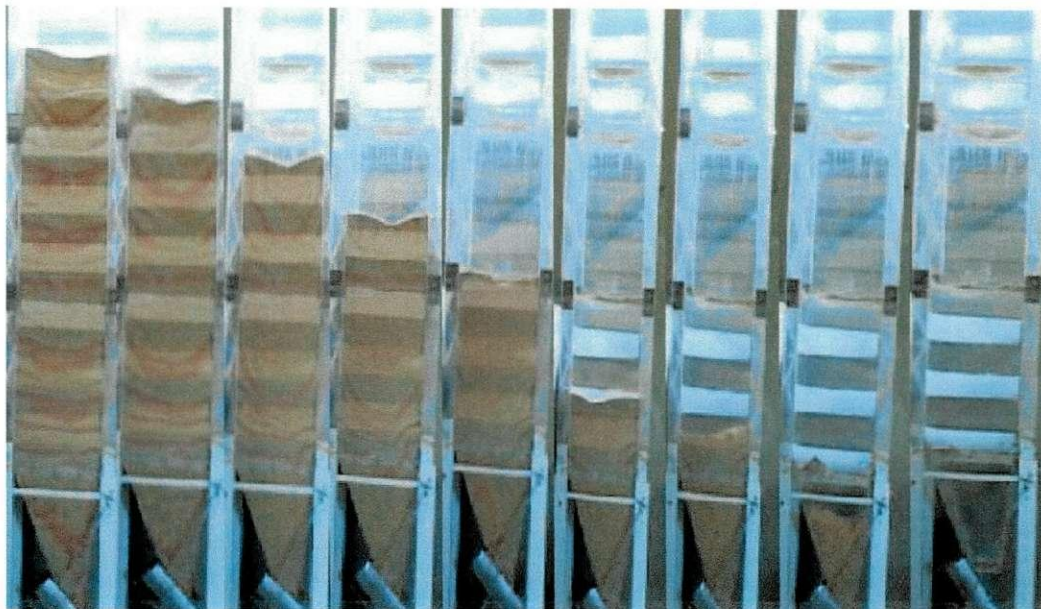


Figura 32: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 5,3$ ,  $STD2 = 64 \text{ cm}^2$

c) Seção transversal de descarga  $100 \text{ cm}^2$ .

Verificou-se também neste caso fluxo de massa para as três relações altura/lado, como está nas Figuras 33, 34 e 35.

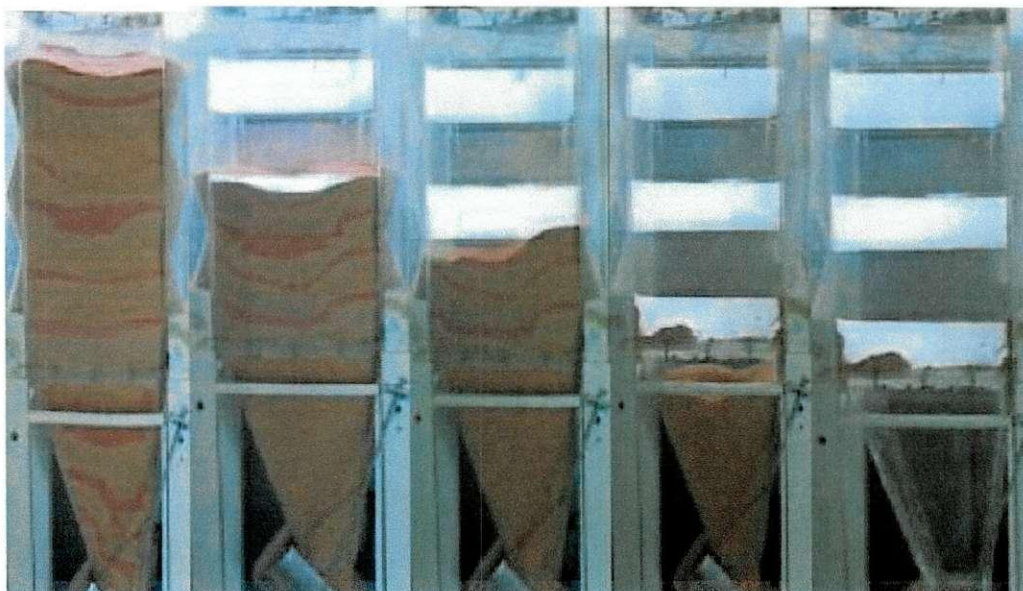


Figura 33: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $STD3 = 100 \text{ cm}^2$



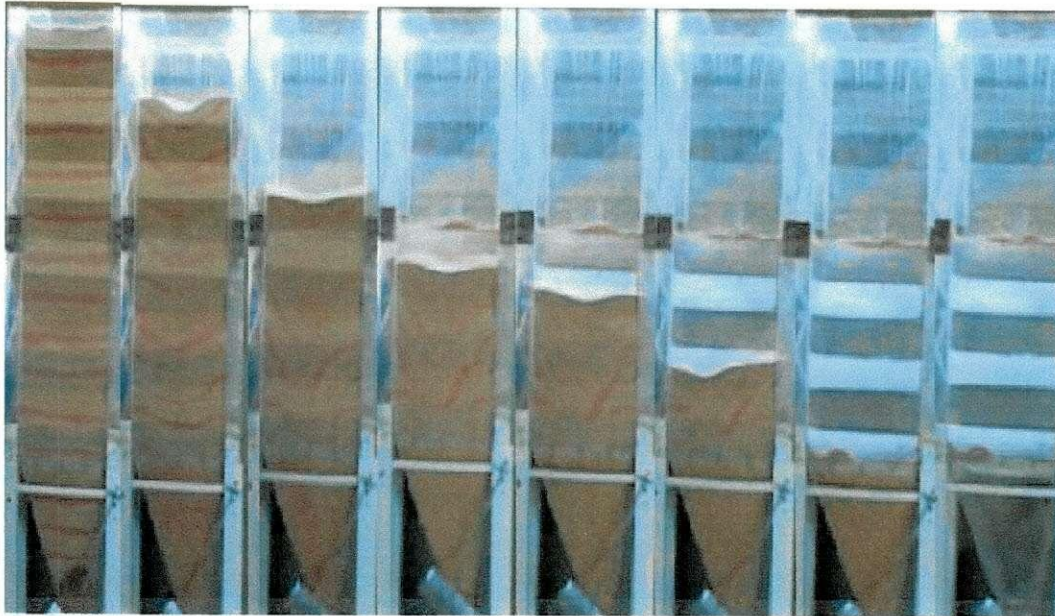


Figura 34: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 3,5$ ,  $STD3 = 100$   $cm^2$

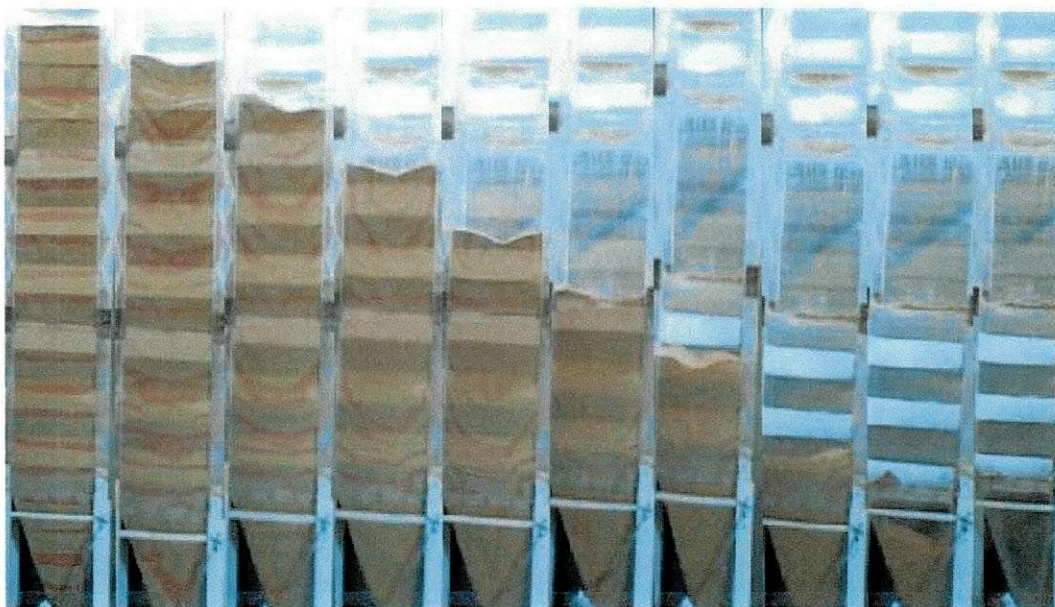


Figura 35: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T1 = 0$ ,  $H/L = 5,3$ ,  $STD3 = 100$   $cm^2$

A ração 2 obteve melhor comportamento de fluxo instantâneo em relação à ração 1 para as três relações altura/lado e os três orifícios de descarga, mesmo

possuindo o teor de gordura superior (Tabela 02). O fator fundamental para a determinação do tipo de fluxo foi o teor de umidade e a granulometria.

#### 4.3.3 Produto: ração 1

**Teor de gordura: 6,99%**

**Relação altura/lado: 1,76; 3,5 e 5,3.**

**Tempo de consolidação: T2=12h**

##### a) Seção transversal de descarga 42,25 cm<sup>2</sup>

Com o aumento do tempo de consolidação para 12 h, observou-se que a ração 1 não fluiu para as três relações altura/lado. À medida que o orifício de descarga era aberto formava-se o arco coesivo (Figura 36), só ocorrendo o fluxo induzido. Com o aumento do tempo de armazenamento as forças coesivas que agem entre as partículas do produto crescem e dificultam o fluxo e impede que ele ocorra com a formação de arcos coesivos ou tubos.

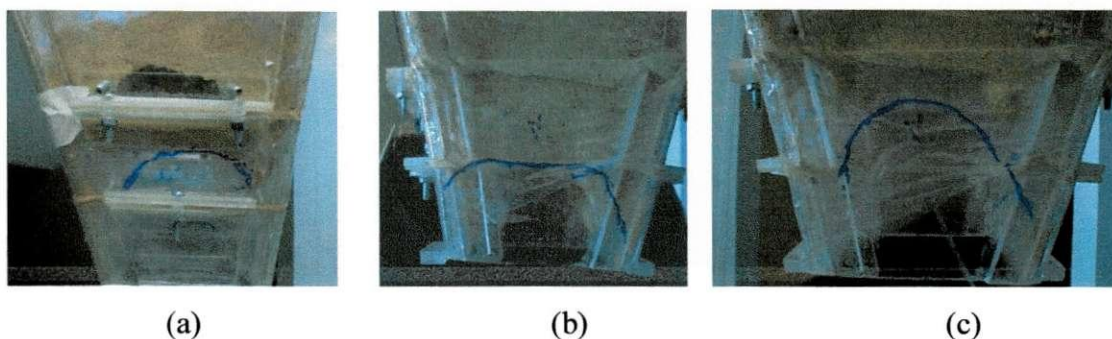


Figura 36: Formação do arco coesivo para ração 1, T2 = 12h, com STD1 = 42,25 cm<sup>2</sup>:

(a) H/L = 1,76; (b) H/L = 3,5 e (c) H/L = 5,3

##### b) Seção transversal de descarga 64cm<sup>2</sup>

Observou-se que o fluxo não ocorreu também para esta seção transversal de descarga. Verificou-se a formação do arco coesivo (Figura 37) com as três relações altura/lado.



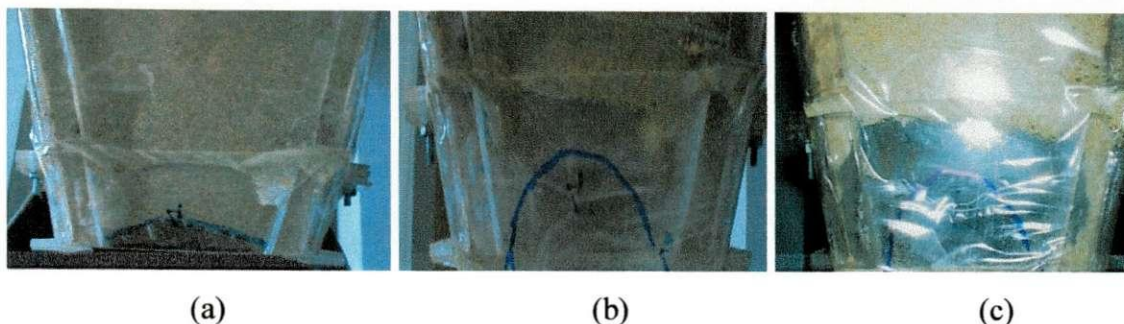


Figura 37: Formação do arco coesivo para ração 1,  $T_2 = 12h$ , com  $STD1 = 64cm^2$ : (a)  $H/L = 1,76$ ; (b)  $H/L = 3,5$  e (c)  $H/L = 5,3$

c) Seção transversal de descarga  $100\text{ cm}^2$

Verificou-se que a ração 1 só não fluiu para a relação altura/lado de 5,3. Atribui-se esse fato ao fato de ocorrer aumento de tensões no corpo do silo e conseqüentemente na tremonha, quando a sua altura aumenta. Este acréscimo de tensões nas paredes do silo e da tremonha permite a formação do arco coesivo e a parada do fluxo. Mesmo não ocorrendo o fluxo com o aumento da relação altura/lado, para esse produto a seção transversal de descarga que garante fluxo satisfatório, mesmo com o aumento do tempo de armazenamento, é a de  $100\text{ cm}^2$ . Não é possível mostrar a seqüência fotográfica deste comportamento.

#### 4.3.4 Produto: ração 2

**Teor de gordura: 7,24%**

**Relação altura/lado: 1,76; 3,5 e 5,3.**

**Tempo de consolidação:  $T_2 = 12h$**

a) Seção transversal de descarga  $42,25\text{ cm}^2$

Para as três relações altura/lado não ocorreu o fluxo. Formou-se o arco coesivo como pode ser verificado na Figura 38.

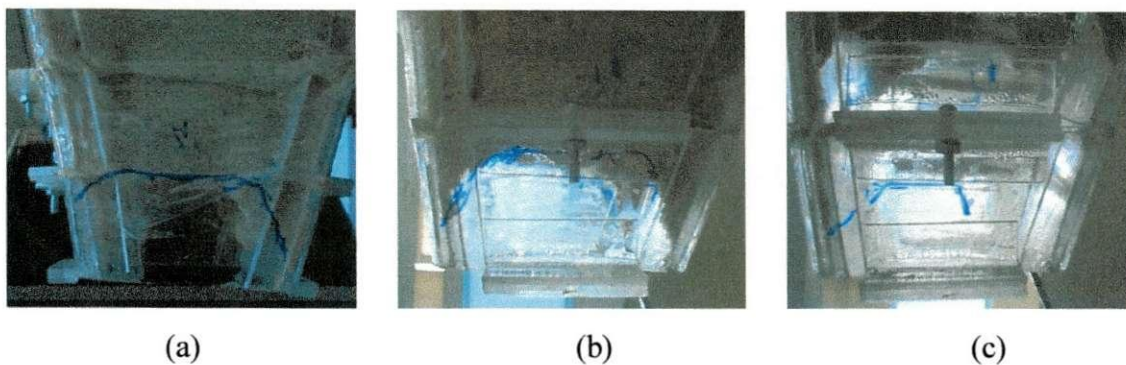


Figura 38: Formação do arco coesivo para ração 2,  $T_2 = 12\text{h}$ , com  $\text{STD1} = 42,25\text{ cm}^2$ :

(a)  $H/L = 1,76$ ; (b)  $H/L = 3,5$  e (c)  $H/L = 5,3$

b) Seção transversal de descarga  $64\text{ cm}^2$

O fluxo só ocorreu para a relação altura/lado 1,76 (Figura. 39) Para as demais houve a formação do arco coesivo. Na Figura 40 observa-se a formação do arco para a relação altura/lado 3,5. Para a relação altura/lado 5,2 não foi possível obter a seqüência fotográfica.

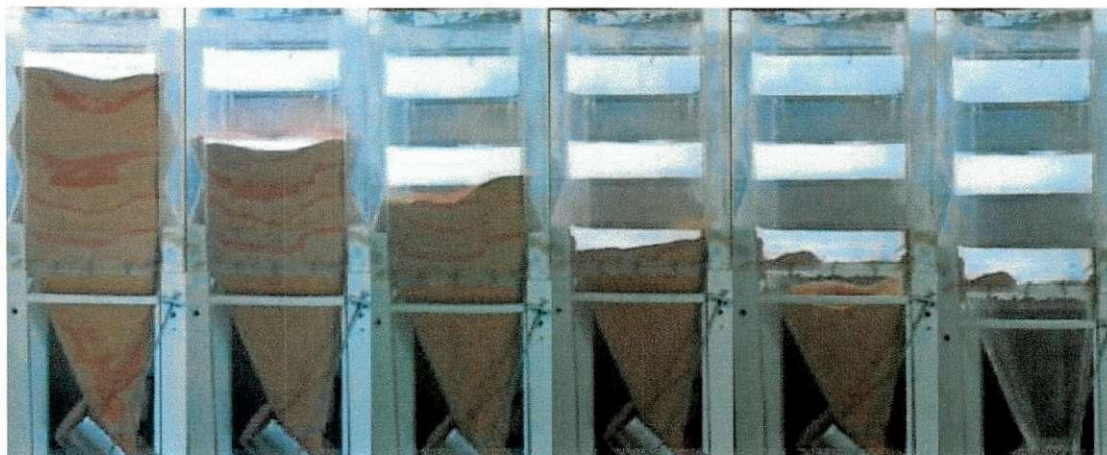


Figura 39: Comportamento do fluxo da ração 2, para  $T_2 = 12\text{h}$ ,  $H/L = 1,76$ ,  $\text{STD2} = 64\text{ cm}^2$



Figura 40: Formação do arco coesivo para ração 2,  $T_2 = 12\text{h}$ ,  $H/L = 3,5$  e  $\text{STD2} = 64\text{ cm}^2$

c) Seção transversal de descarga 100 cm<sup>2</sup>.

O fluxo de massa ocorreu para as três relações altura/lado. O fluxo obteve o mesmo comportamento para o tempo de armazenamento instantâneo, como mostram as Figuras 31, 32 e 33.

Nas situações em que houve a formação do arco coesivo o fluxo de massa ocorria depois da quebra do arco que era feita por meio de choque laterais na tremonha. Não foi observado o efeito tubo em nenhum dos testes realizados. O que não ocorreu com Bandeira (1997), que verificou em ensaios com rações avícolas, a formação do tubo para uma ração cujo teor de gordura era de 7,11%. As rações estudadas neste trabalho possuem teores de gordura variando de 6,99 a 7,24%, valores superiores aos de Bandeira (1997) e mesmo assim não se formou o tubo durante o fluxo. Isto ocorreu porque a ração estudada por esse autor mesmo tendo um teor de gordura inferior formou o tubo porque tinha maior quantidade de partículas finas e a tremonha era tronco piramidal com descarga concêntrica.

#### 4.4 Vazão de descarga

Os resultados encontrados para a vazão de descarga encontram-se nas Tabelas 09, 10 e 11. Observa-se que ocorreram resultados de vazões nulas para o tempo T1 = 0 h e T2 = 12 h devido a não existência do escoamento do produto quando o orifício de descarga era aberto. A maior incidência de vazões nulas foi observada com o aumento do tempo de armazenamento para 12 h.

Tabela 08: Vazão de descarga (kg/s) para relação H/L = 1,76

Produto/teor de gordura	Instantâneo T1=0								
	Seção transversal de descarga								
	STD1			STD2			STD3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ração1/TG1	1,53	1,53	1,54	2,65	2,77	2,77	3,02,	2,99	3,09
Ração2/TG2	1,49	1,48	1,48	3,05	3,19	3,21	3,64	3,57	3,67
	Consolidação T2=12h								
	Seção transversal de descarga								
	STD1			STD2			STD3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ração1/TG1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	0,00	3,22	3,25
Ração2/TG2	1,53	1,49	1,41	2,96	3,02	2,93	3,76	3,6	3,61

Tabela 09: Vazão de descarga para relação H/L = 3,5

Produto/teor de gordura	Instantâneo T1=0								
	Seção transversal de descarga STD								
	SD1			SD2			SD3		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Ração1/TG1	1,64	1,63	1,60	2,56	2,59	2,49	3,09	3,04	3,13
Ração2/TG2	1,54	1,52	1,53	2,92	2,91	2,84	3,44	3,47	3,45
	Consolidação T2=12h								
	Seção transversal de descarga STD								
	SD1			SD2			SD3		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Ração1/TG1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	3,14
Ração2/TG2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,39	3,42	3,37

Tabela 10: Vazão de descarga para relação H/L = 5,3

Produto/teor de gordura	Instantâneo T1=0								
	Seção transversal de descarga STD								
	STD1			STD2			STD3		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Ração1/TG1	0,00	0,00	0,00	2,55	2,56	0,00	3,06	3,04	3,04
Ração2/TG2	1,49	1,48	1,49	2,93	2,81	3,00	3,37	3,37	3,34
	Consolidação T2=12h								
	Seção transversal de descarga STD								
	STD1			STD2			STD3		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Ração1/TG1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,04	0,00
Ração2/TG2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,41	3,34	3,42

Na Tabela 11 constam estão apresentados os resultados da análise de variância da vazão de descarga das rações estudadas. Os fatores analisados apresentam diferenças estatísticas significativas ao nível de 1%. O fator tempo de armazenamento interagindo com a seção transversal de descarga obteve resultado significativo ao nível de 1%. Este mesmo fator interagindo com a relação altura/lado teve uma significância ao nível de 5% de probabilidade e foi não significativo interagindo com o teor de gordura.

Verifica-se também na Tabela 11 que a interação entre a seção transversal de descarga e os fatores teor de gordura e relação altura/lado, não foram significativos. O que ocorreu também entre os fatores teor de gordura e relação altura/lado. Bandeira (1997) em ensaios realizados com o mesmo silo utilizado neste

trabalho, mas usando descarga concêntrica, verificou interações significativas ao nível de 5% de probabilidade, fazendo interagir estes mesmos fatores.

Tabela 11: Análise de variância e coeficiente de variação dos ensaios da vazão de descarga

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F.
T	1	40,87288	40,87288	101,2258**
STD	2	86,54954	43,27477	107,1743**
TG	1	14,77052	14,77052	36,5807**
H/L	2	12,28318	6,14159	15,2103**
TxSTD	2	8,82447	4,41223	10,9273**
TxTG	1	1,42370	1,42370	3,5259ns
TxH/L	2	3,66404	1,83202	4,5372*
STDxTG	2	1,71746	0,85873	2,1267ns
STDxH/L	4	3,68240	0,92060	2,2800ns
TGxH/L	2	2,41150	1,20559	2,9858ns
Resíduo	72	29,07212	0,40378	—
TOTAL	107	—	—	—

CV = 35,60607

MG = 1,78463

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns não significativo

Na comparação das médias aplicou-se o Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Na Tabela 12 verificam-se os valores médios das vazões de acordo com os parâmetros analisados.

Os valores médios de vazão das duas rações com relação ao tempo de armazenamento, diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. A média de vazão para o tempo T1 de armazenamento foi superior a média do tempo T2 de armazenamento. Verificou-se com isso que com o aumento do tempo de armazenamento ocorreu um decréscimo da taxa de vazão, influenciado pela não ocorrência do fluxo quando o orifício de descarga era aberto.

Os resultados da vazão média para o teor de gordura, também diferiram entre si, como se encontra na Tabela 12. Bandeira (1997), trabalhou com duas rações avícolas e verificou que as médias de vazão para os teores de gordura não foram diferentes entre si. Mesmo, os dois trabalhos tratar de produtos com características semelhantes, pode se atribuir essa diferença nos resultados às condições de temperatura durante a realização dos ensaios e também ao fato de neste trabalho se tratar de descarga excêntrica.

Para os três orifícios de descargas analisados, verificou-se que os valores médios da vazão de descarga diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade. Este fato se deve à não ocorrência do fluxo com tempo T2, para a STD1 e STD2.

Os valores médios de vazão de descarga em função da relação altura/lado não diferiram entre si, muito embora tenha ocorrido uma diferença com a relação H/L1, sem interferir nos resultados. Este fato confirmou a afirmação de Wang *et al.*, (1995) *apud* Bandeira (1997), onde é citado que a altura do silo não interfere na vazão de descarga. A mesma autora encontrou estes mesmos resultados realizando ensaios com descarga concêntrica.

Tabela 12: Valores médios da vazão de descarga dos tratamentos

	T	TG	STD	H/L
Médias	2,400a	1,414b	0,761c	2,227a
	1,169b	2,154a	1,651b	1,717b
	–	–	2,941a	1,409b
DMS	0,243	0,243	0,358	0,358

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula (linha) ou pela mesma letra minúscula (coluna), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Verificando-se na Tabela 13, os resultados dos dados médios da vazão de descarga para a interação tempo de armazenamento x seção transversal de descarga, observa-se que para o tempo T1 de armazenamento as médias das vazões das duas rações diferem entre si para as três seções transversais de descargas analisadas. Com relação ao tempo T2 de armazenamento verifica-se que não houve diferença significativa entre a STD1 e a STD2. Este fato é devido à não existência do fluxo para essas duas seções de descarga considerando o tempo T2 de armazenamento.



As interações entre as seções transversais de descargas e os tempos de armazenamentos diferiram entre si, muito embora para a interação tempo de armazenamento e STD3, a diferença entre os resultados não tenha sido muito grande.

Tabela 13: Valores médios da vazão de descarga (kg/s) para a interação *tempo de armazenamento x seção transversal de descarga*

Tempo de armazenamento	Seção transversal de descarga			Médias
	STD1	STD2	STD3	
T1	1,276aC	2,655aB	3,267aA	2,40
T2	0,246bB	0,646bB	2,615bA	1,17
Médias	0,76	1,65	2,94	1,79

DMS (Colunas): 0,4224

DMS (Linhas): 0,5072

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula (linha) ou pela mesma letra minúscula (coluna), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Analisando os resultados dos dados médios de vazão de descarga na Tabela 14, para a interação tempo de armazenamento e relação altura/lado, verifica-se que para o tempo T2 de armazenamento os resultados médios das vazões não diferiram para a relação H/L2 e H/L3, isto porque não ocorreu o fluxo neste tempo de armazenamento, para estas duas relações altura/lado.

Com relação às interações entre as relações altura/lado e os tempos de armazenamentos, constatou-se que diferiram entre si ao nível de 5%.

Tabela 14: Valores médios da vazão de descarga (kg/s) para a interação *tempo de armazenamento x relação altura/lado*

Tempo de armazenamento	Relação altura/lado			Médias
	H/L1	H/L2	H/L3	
T1	2,5928aA	2,5217aAB	2,0850aB	2,40
T2	1,8617bA	0,9128bB	0,7339bB	1,17
Médias	2,23	1,72	1,41	1,79

DMS (coluna) =0,4224

DMS (linha) =0,5072

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula (linha) ou pela mesma letra minúscula (coluna), não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey



## 5 CONCLUSÕES

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

A ração 1 obteve teor de umidade de 12,94% e a ração 2, 11,90%.

O teor de gordura presente nas rações não proporcionou a formação de pequenas esferas durante o peneiramento para obtenção da granulometria. Essas esferas poderiam camuflar a classificação granulométrica das rações;

O tempo de armazenamento contribuiu para o acréscimo nos valores dos ângulos de atrito interno, efetivos ângulos de atrito interno, densidade em função da consolidação;

A ocorrência ou não do fluxo foi influenciada pela área da seção transversal do orifício de descarga, tempo de armazenamento e pela relação altura/lado;

Com o aumento do tempo de armazenamento de 0 para 12 h, verificou-se que, para as duas rações, a medida que o orifício de descarga era aberto formava-se o arco coesivo;

Das três áreas de seções transversais de descarga analisadas, a que proporcionou fluxo de massa sem a formação de arco coesivo foi a de 100 cm<sup>2</sup>;

A tremonha tronco piramidal com excentricidade 0,25, proporcionou fluxo de massa para ração avícola;

A excentricidade da tremonha facilitou a ocorrência do fluxo de massa.

Para projetos de silos que venham armazenar ração avícola recomenda-se a utilização de excentricidades em tremonhas tronco piramidais, uma vez que estas proporcionam o fluxo de massa.

A vazão de descarga dos produtos foi afetada pelo tempo de armazenamento, seção transversal de descarga e teor de gordura;

Para futuros trabalhos sugere-se:

1. Validar por meios de elementos finitos os resultados encontrados experimentalmente;
2. Analisar o tipo de fluxo para carregamento excêntrico;
3. Determinação das tensões nas paredes, do corpo e da tremonha, do silo, com descarga excêntrica.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEF. Disponível em: <<http://abef.com.br>> Acesso em: 18/06/2003.

AVISITE. Disponível em: <<http://avisite.com.br/noticias/default.asp?codnoticias=2726>>  
Acesso: 22/08/2003

BANDEIRA, I. S. A. Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais. Campina Grande: UFPB, 1997. 71p. Dissertação Mestrado

BARRÊTO, R. L. Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos de urucum (*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos. Campina Grande: UFPB, 1997. 84p. Tese Mestrado

BMHB – British Materials Handling Board. Draft code of practice for design of silos, bins, bunkers and hoppers. Inglaterra, 1985. 101p.

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

BOKHOVEN, W. H; LOHNES, R. A., Preconsolidation effects on flow characteristics of soybean. American Society of Agricultural Engineers, Iowa, v.32, n.5, p. 1779 – 1783, sep-oct. 1989.

CALIL JUNIOR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1990, 106p.

CALIL JUNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. Silos metálicos multicelulares. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1997. 178p.

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

DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties. Powder Technology, USA, v.84, n.8, p.165-176, 1995.

FLEREAU, J. M. Measurement of moisture in silos. Silos: fundamentals of theory, Behaviour and design. London and New York. p.761 – 773, 1998.

FREITAS, E. das G. A. Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2001. 175p. Tese Doutorado.

GARNIER, J. Classification of silo tests. Silos: fundamentals of theory, Behaviour and design. London and New York. p.612- 619, 1998.

GUAITA, M.; COUTO, A.; AYUGA, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. Biosystems Engineering, Santiago de Compostela, v.85, n.3, p. 101 – 109, 2003.

JENIKE, A. W. Storage and flow of silos. Bolletín 123. Utah Engineering Experiment station. University of Utah. Salt Lake City. Estados Unidos, 1964, 196p.

MARINELLI, J.; CARSON, J. W. Solve solids flow. Problems in bins, hoppers and feeders. Chemical Engineering Progress. p.22-28. 1992.

MILANI, A. P. Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1993. 272p. Tese Doutorado.

MOURA, B., H., S., Uso de óleo nas rações de frango de corte. Disponível em: <  
<http://www.avimig.com.br/nutrição.asp> Acesso: 23/06/2003.

NASCIMENTO, J. W. B. Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1996. 152p. Tese Doutorado.

NOGUEIRA JUNIOR, S.; NEGRI NETO, A.; NOGUEIRA, E. A. Perspectivas de consumo de alimentos para animais em 2002. Disponível em: <  
<http://www.iea.sp.gov.br/ana%2Doli0602.htm>> Acesso em 05/11/2002.

RANDALL, E. L. Improved method for fat and oil analysis by a new process of extractin. Journal of the AOAP. V.57, n.5, p.1167-1168. 1974.

RAVENET, J. Silos, flujo e vaciado sólidos, formacioon de bovedas, efectos. Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados, S.A., 1983. 335p.

ROBERTS, A. W. Storage, flow and handling of bulk solids. The University of Newcastle, 1987.

ROBERTS, A. W. Modern Technological developments in the storage and handling of bulk solids. 1992 Disponível em: <  
<http://www.ckit.co.za/Conveyor/papers/Bionic%20research%202/I%20BRI2%20Paper10.htm> Acesso em: 03/10/2002.

ROTTER, J. M. Challenges for the future in numerical simulation. Silos: fundamentals of theory, Behaviour and design. London and New York. p.584-604, 1998.

SCHULZE, D. Measurement of the flowability of bulk solids. Silos: fundamentals of theory, Behaviour and design. London and New York. P.18-52, 1998.

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

SILVA, F. de A. S. e. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: International Conference on Computers in Agriculture, 6, Cancun, 1996. Anais... Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p. 294 – 298.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. Characterisation of food powder flowability. Journal of food engineering, Cork, v.39, p.31-37, 1999.

**APÊNDICE**

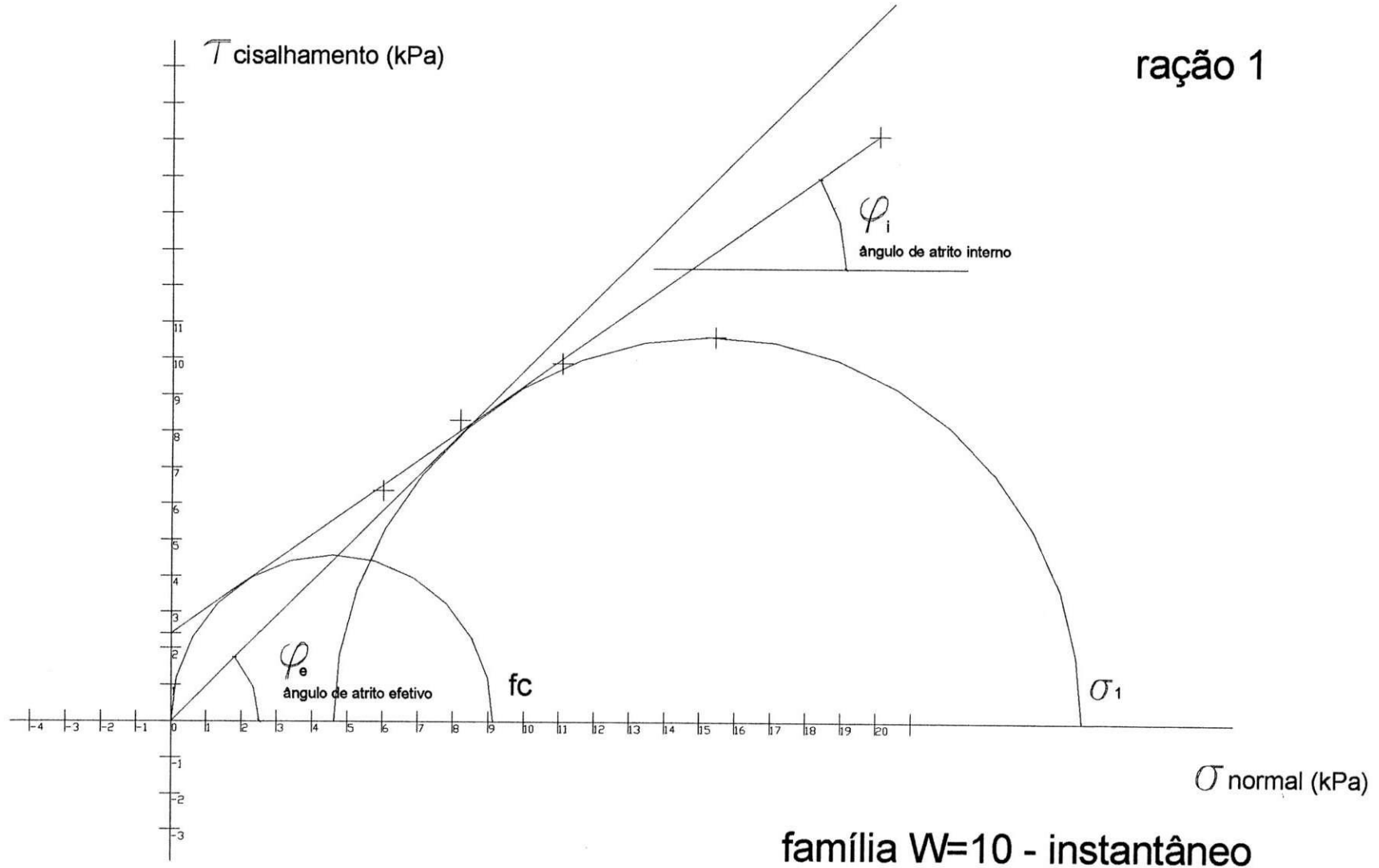


Figura 41: Círculo de Mohr de Tensões – Ração 1 – Pré shear 10 - Instantâneo



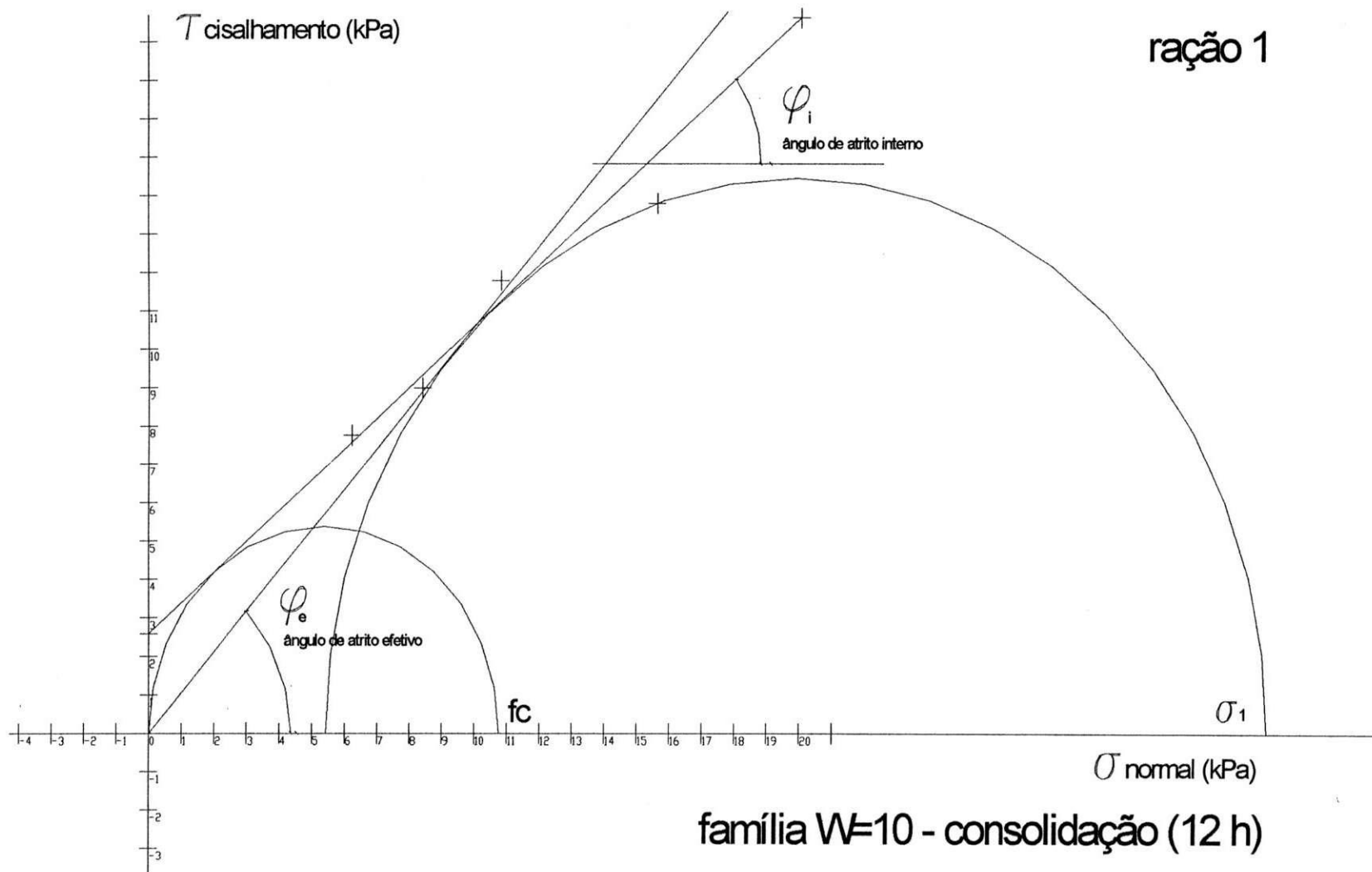


Figura 42: Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 10 – Consolidação 12h

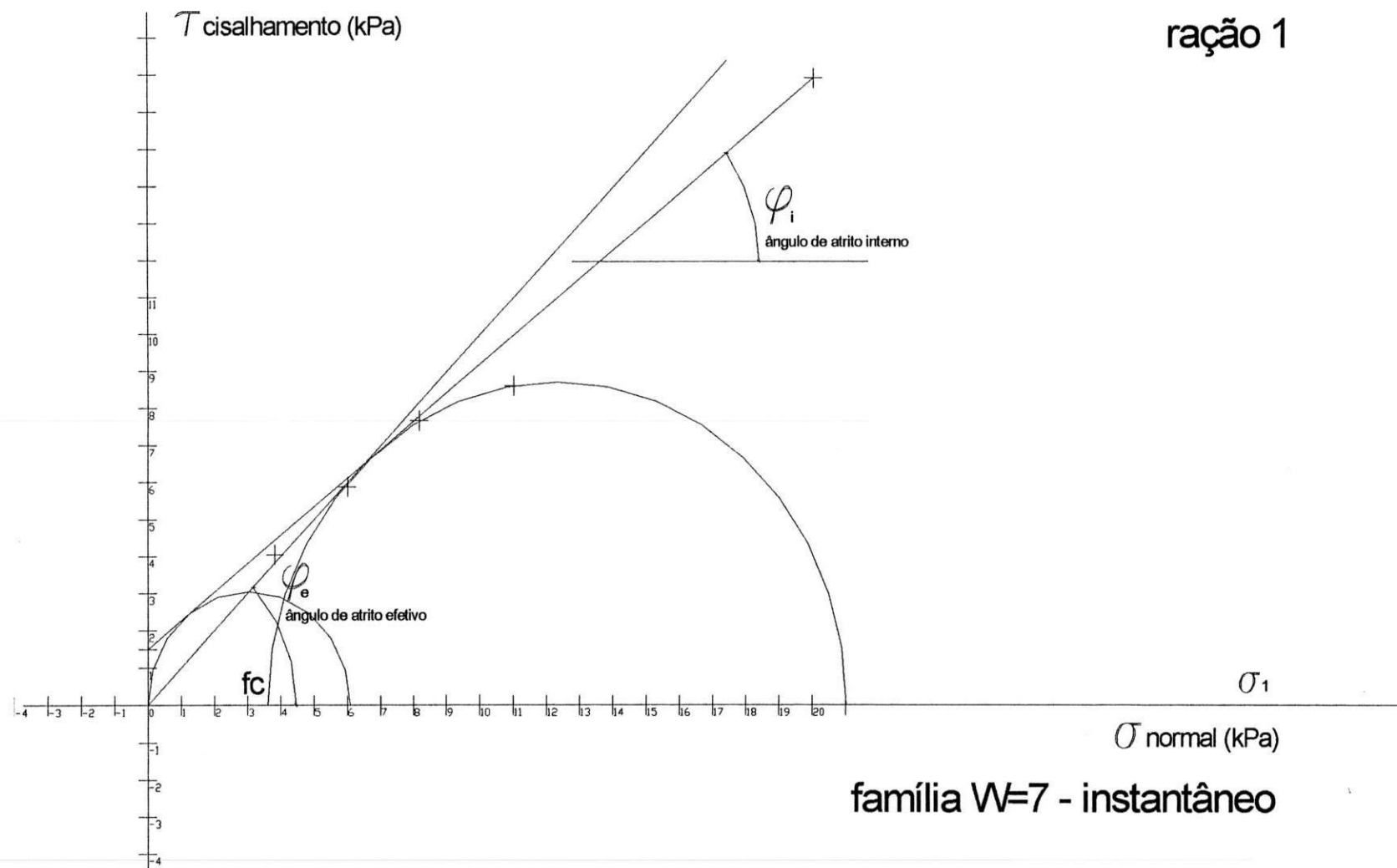


Figura 43: Círculo de Mohr de Tensões – Ração 1 – Pré shear 7 - Instantâneo

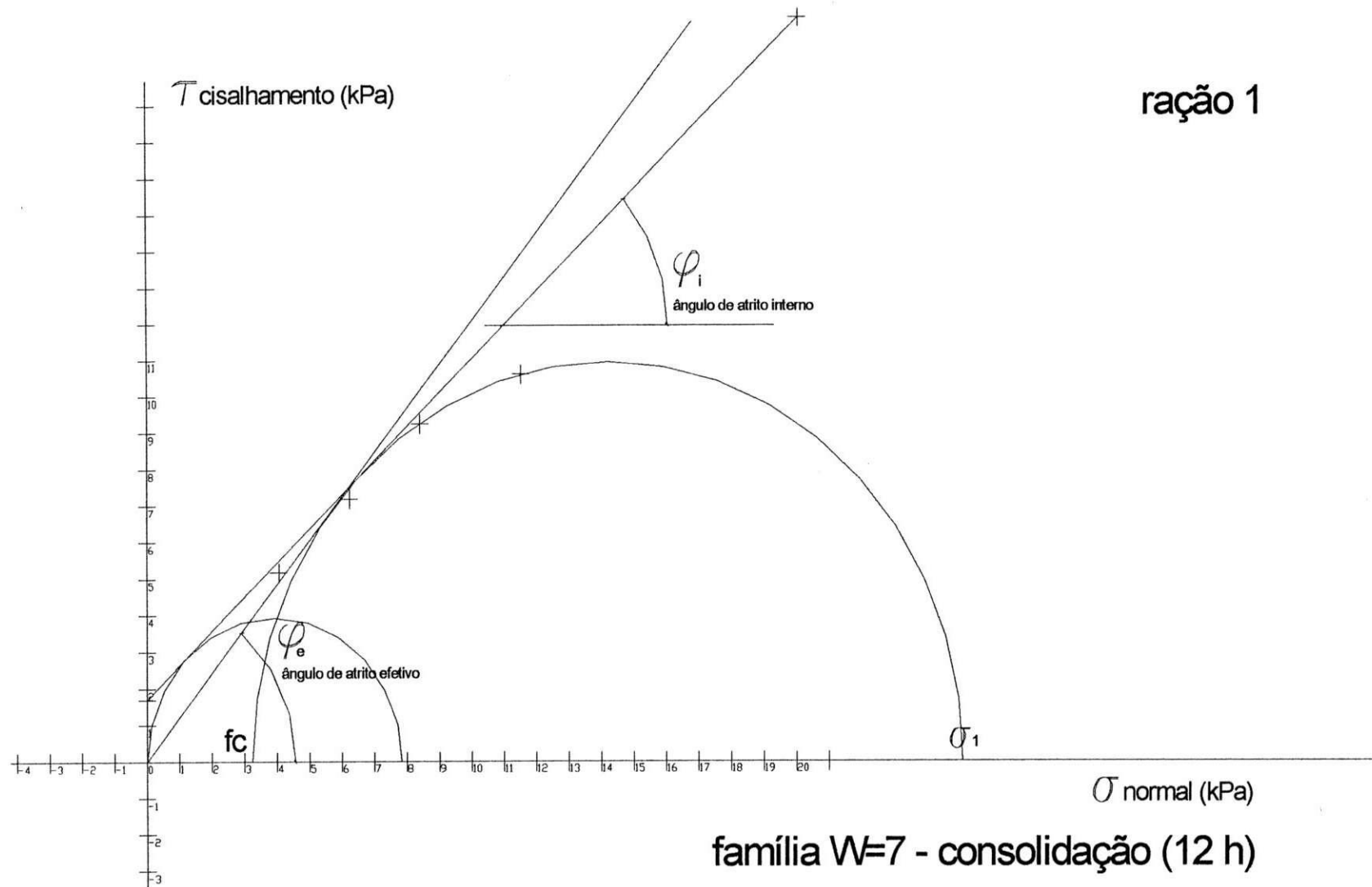


FIGURA 44: Círculo de Mohr de Tensões – Ração1 – Pré shear 7 – consolidação 12h

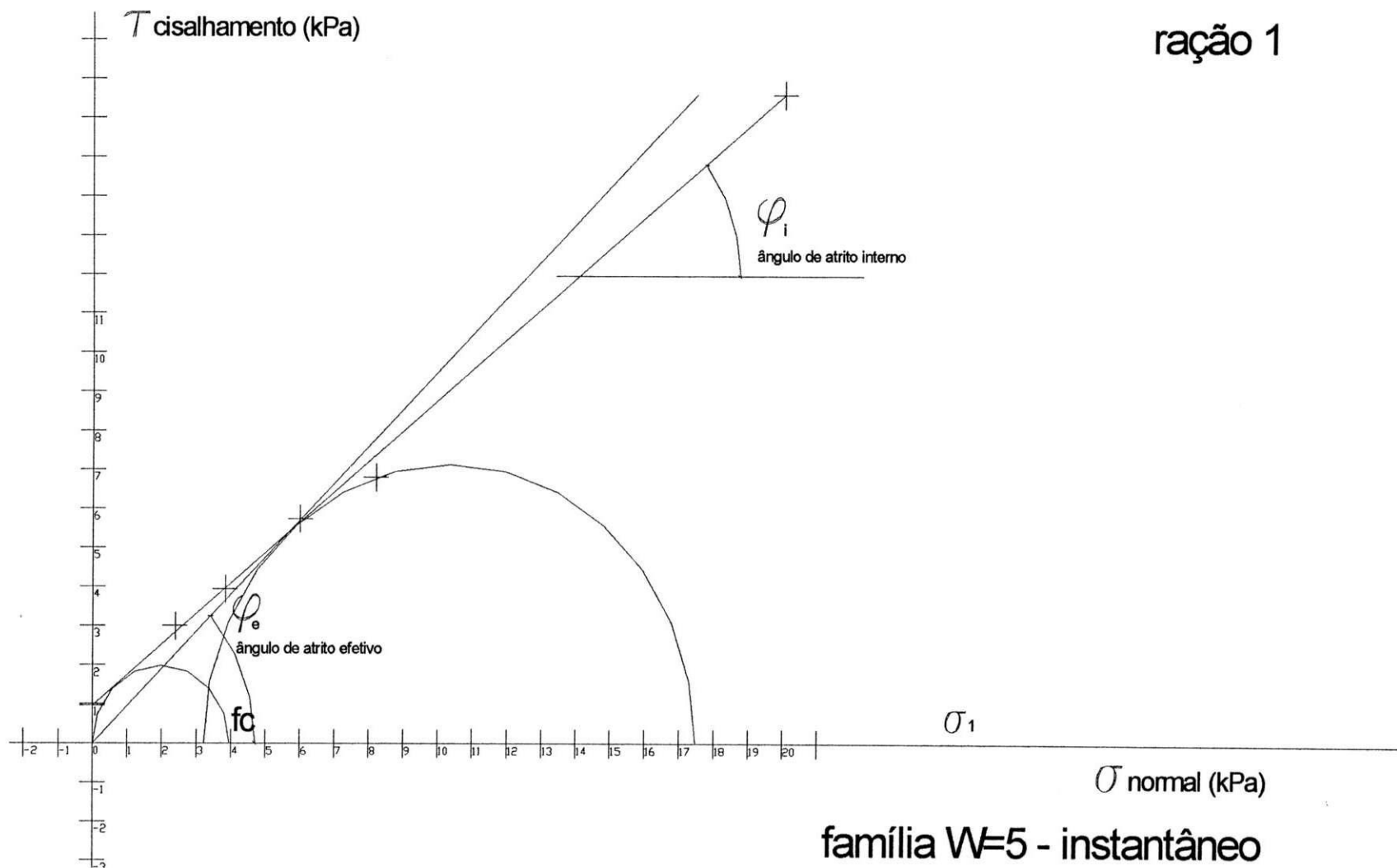


Figura 45: Círculo de Mohr de Tensões – Razão 1 – Pré shear 5 - Instantâneo

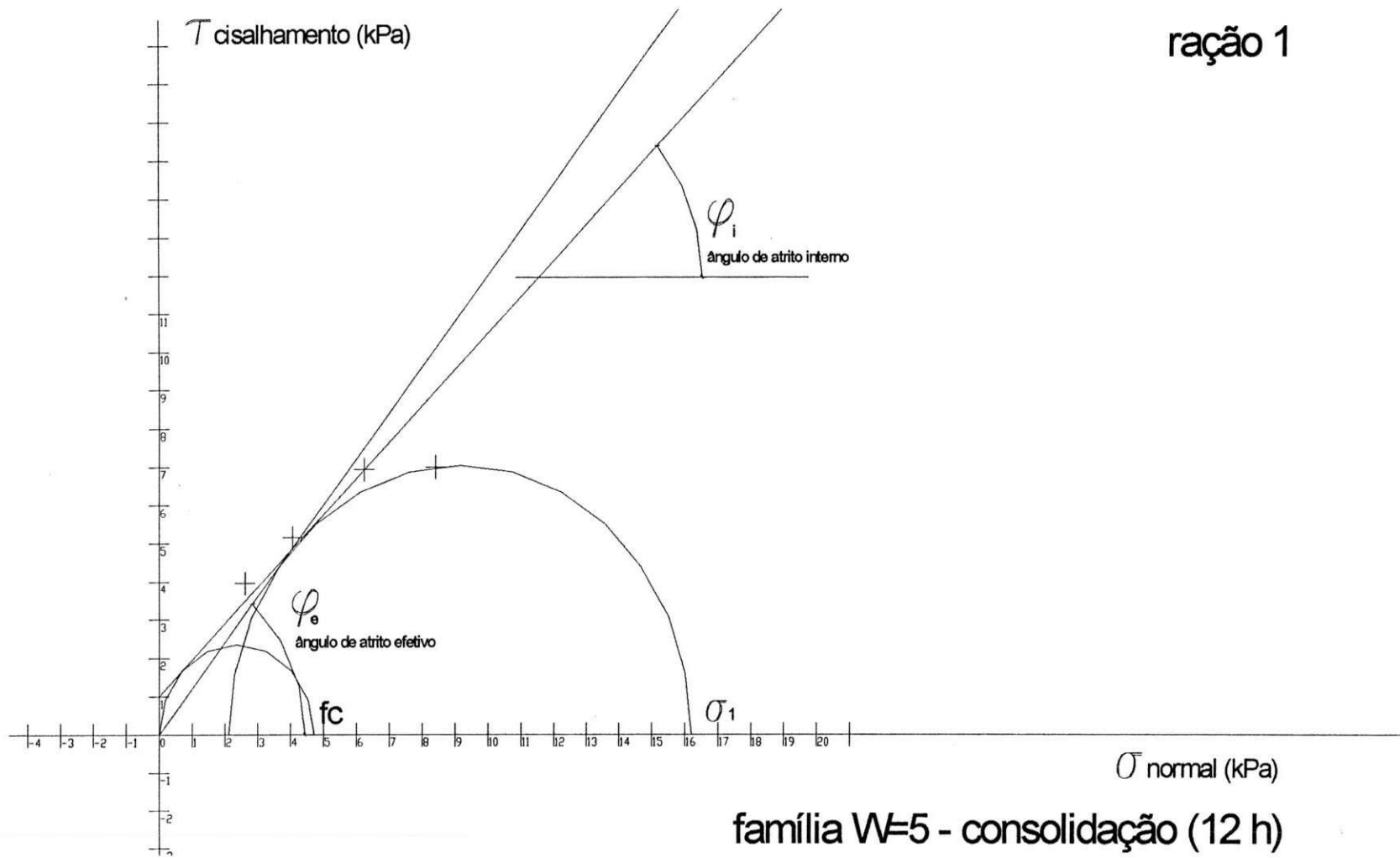


Figura 46: Círculo de Mohr de Tensões – Ração 1 – Pré shear 5 – Consolidação 12h

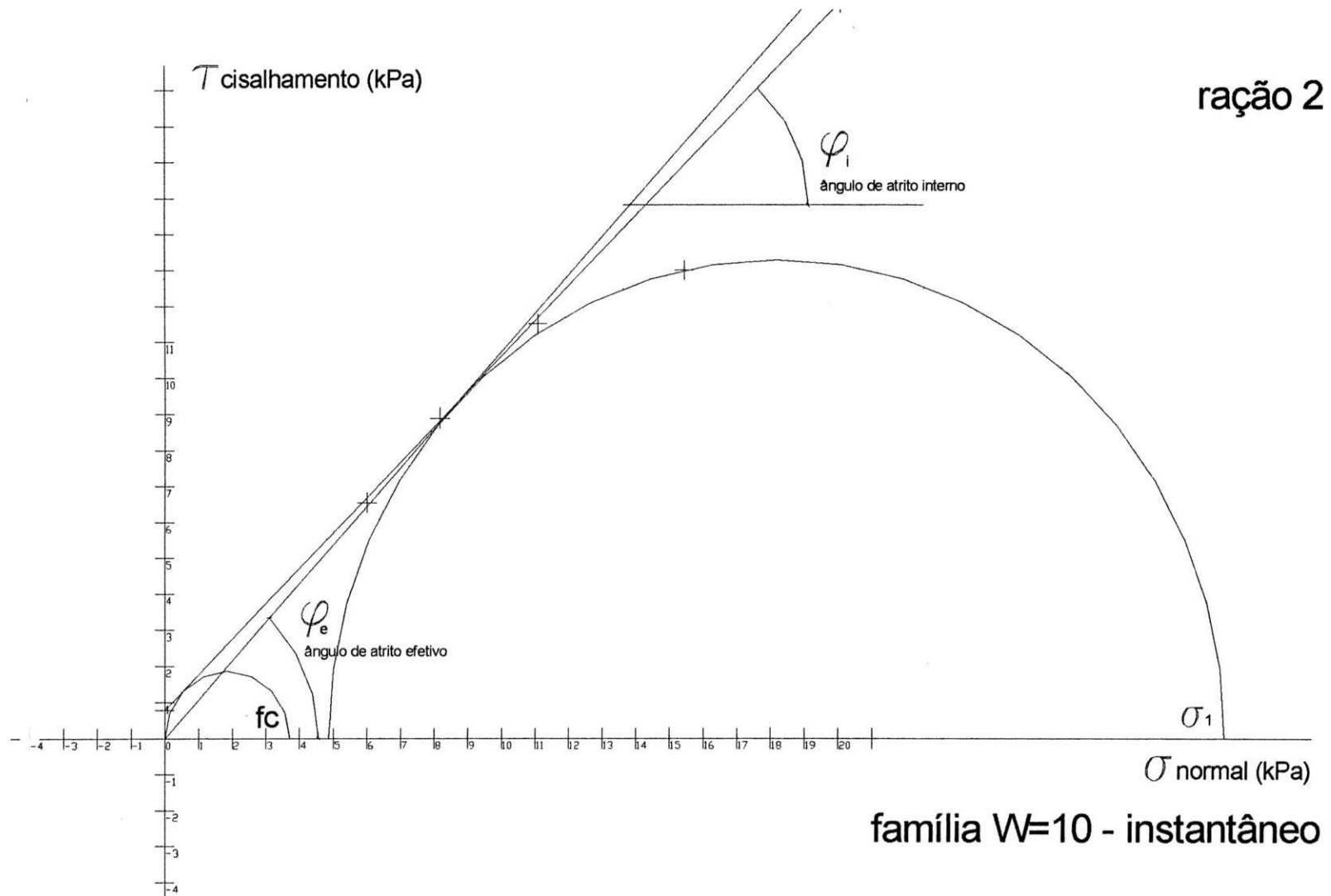


Figura 47: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 10 – Instantâneo

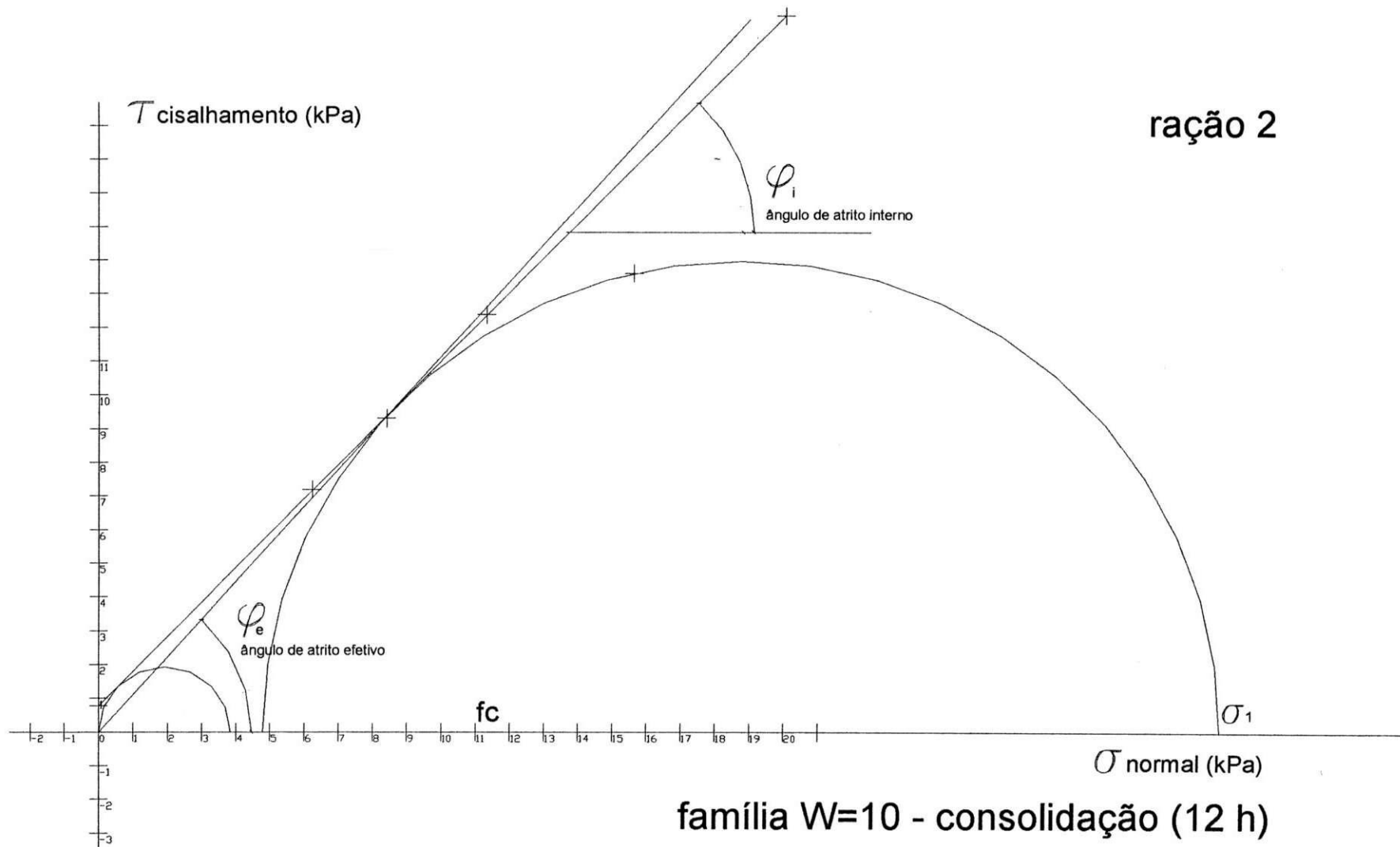


Figura 48: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 10 – Consolidação 12h

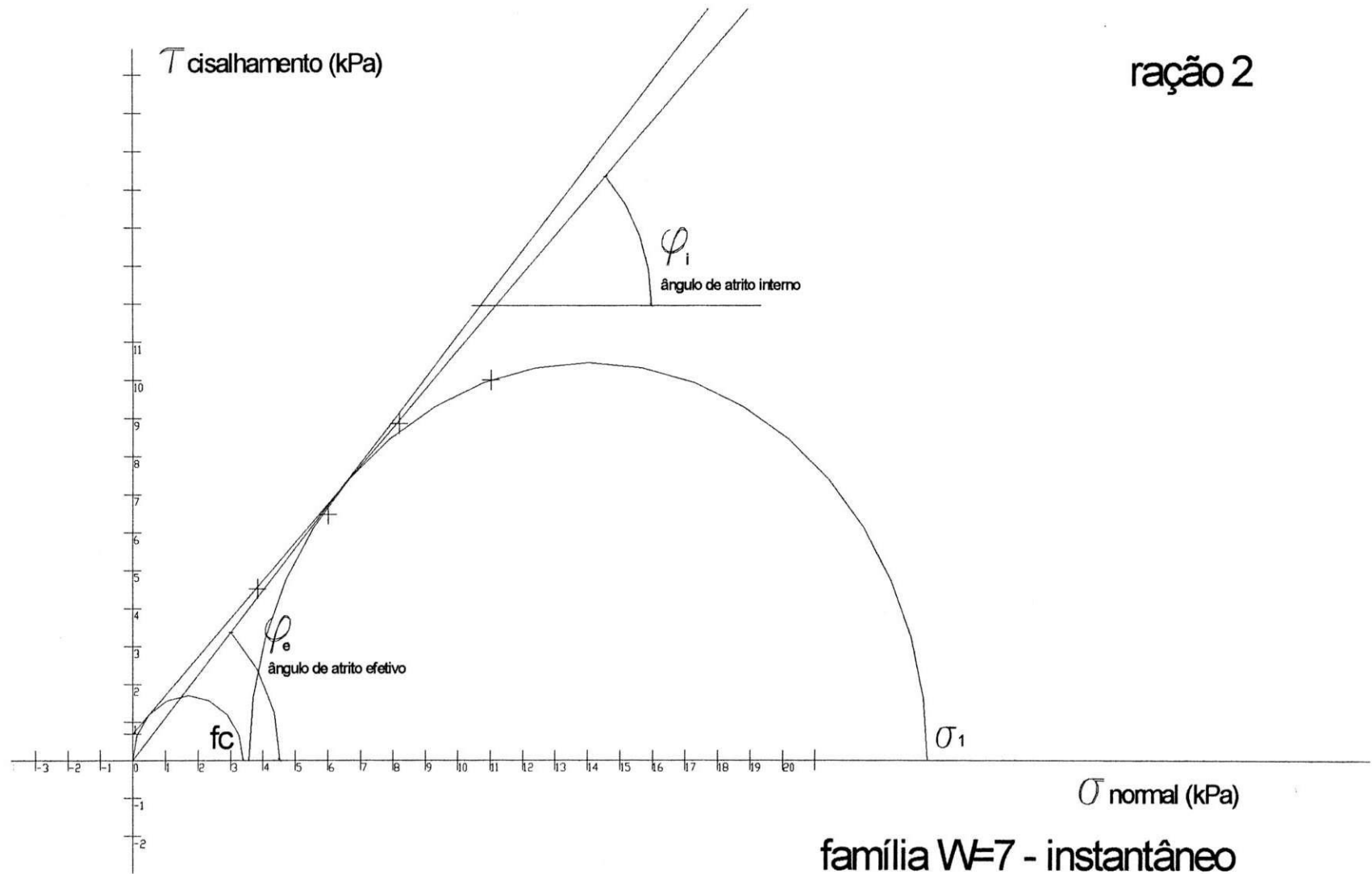


Figura 49: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 7 - Instantâneo



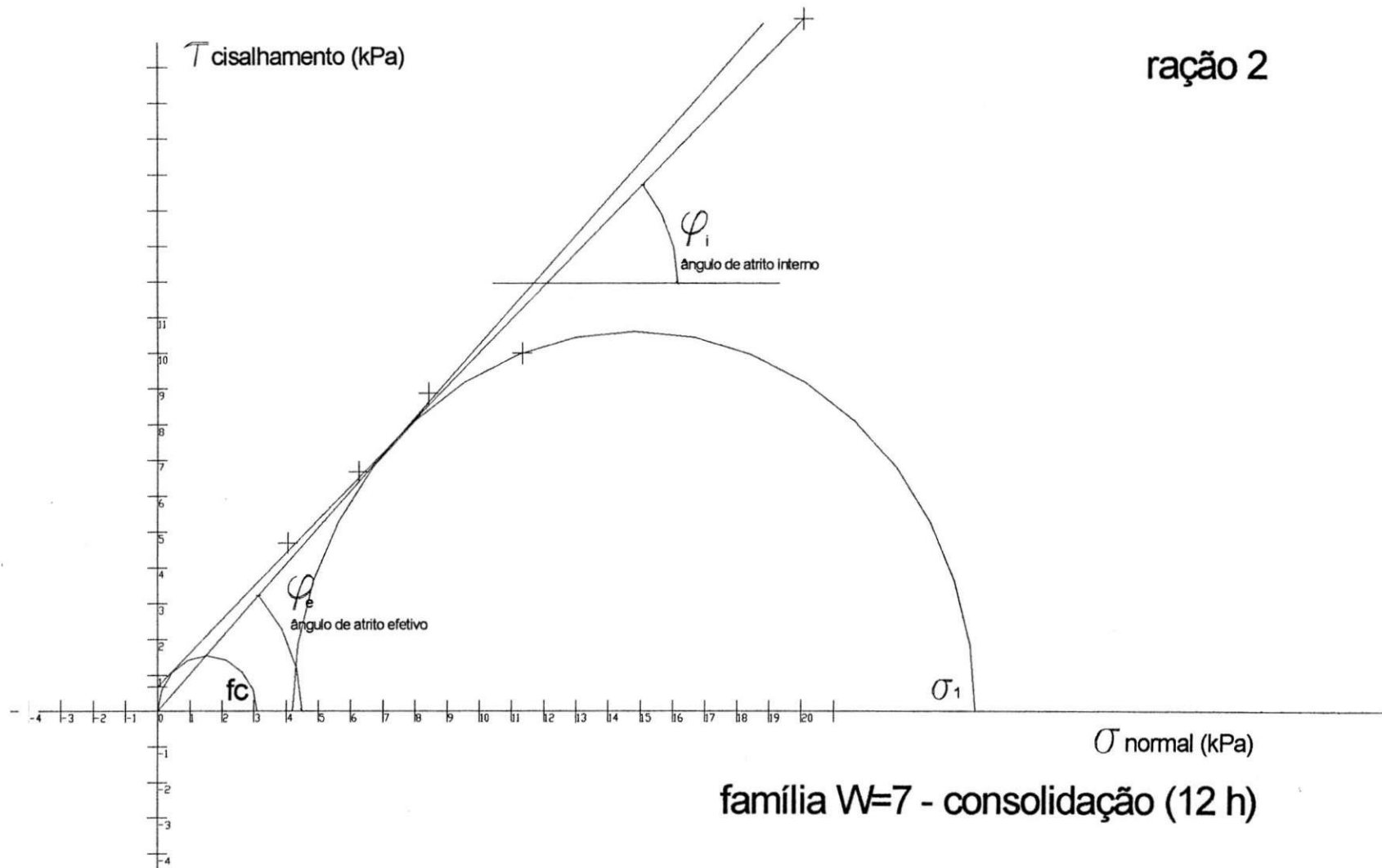


FIGURA 50: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 7 – Consolidação 12h

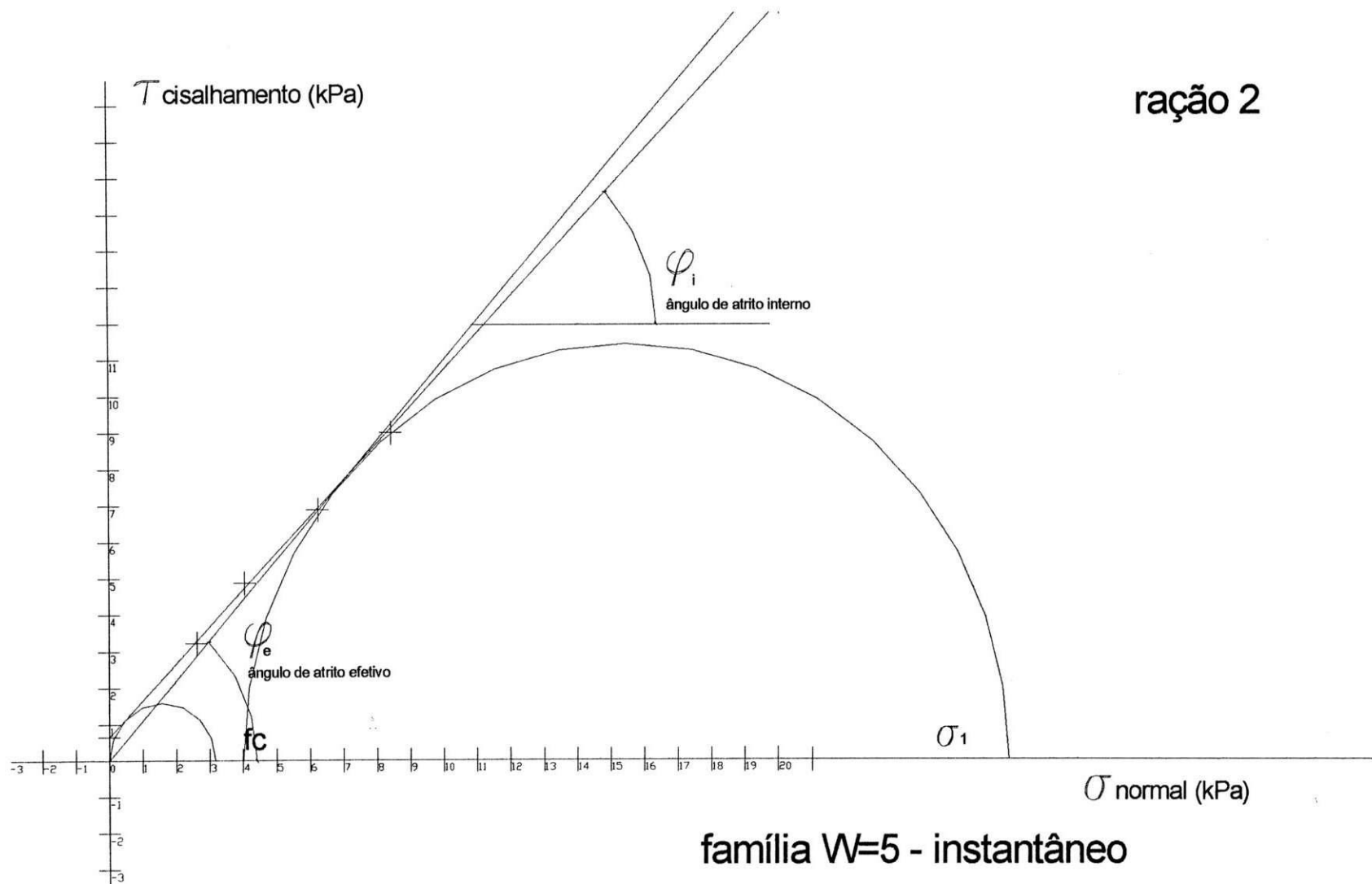


Figura 51: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 5 - Instantâneo

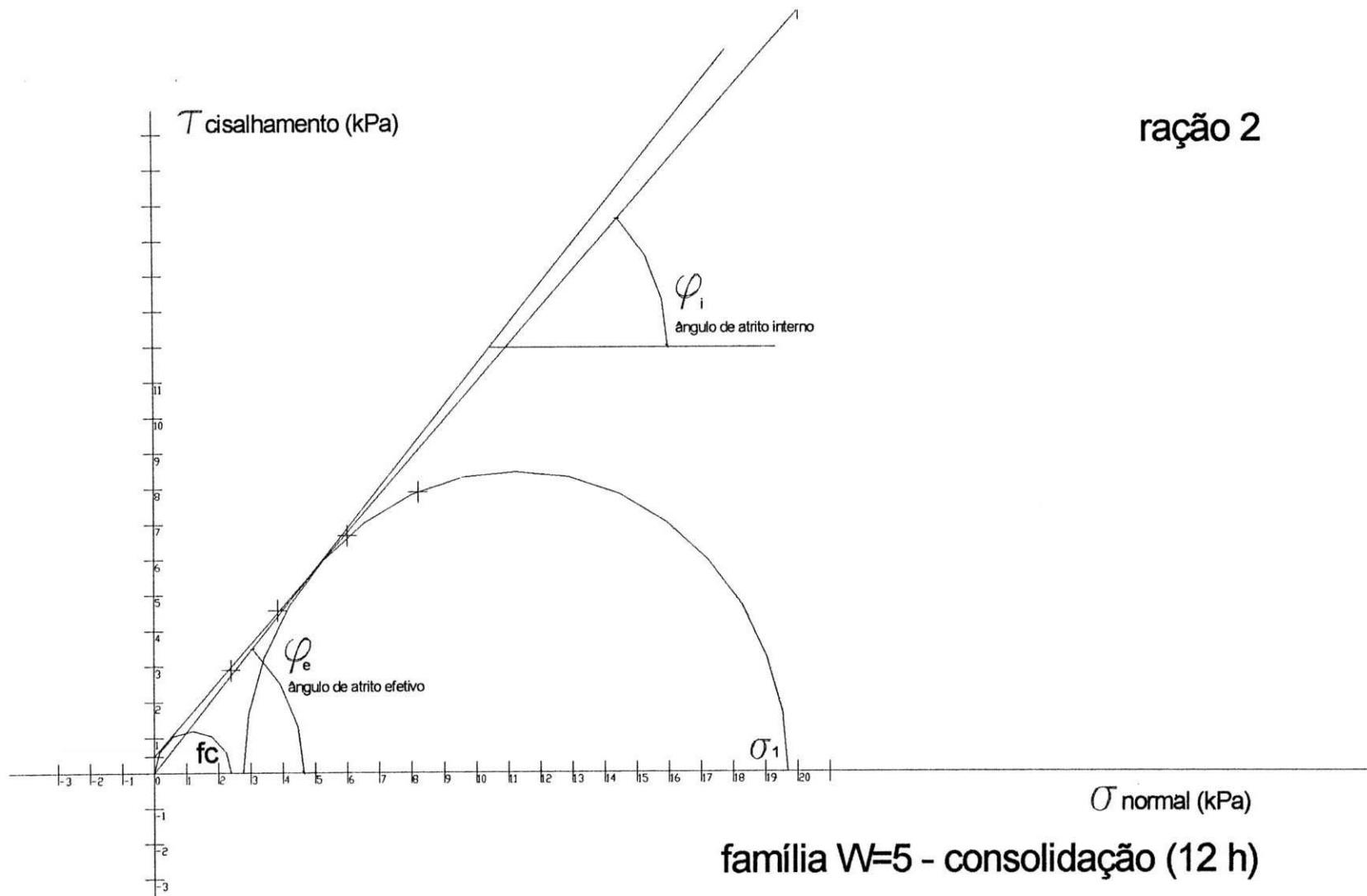


Figura 52: Círculo de Mohr de Tensões – Ração2 – Pré shear 5 – Consolidação 12h

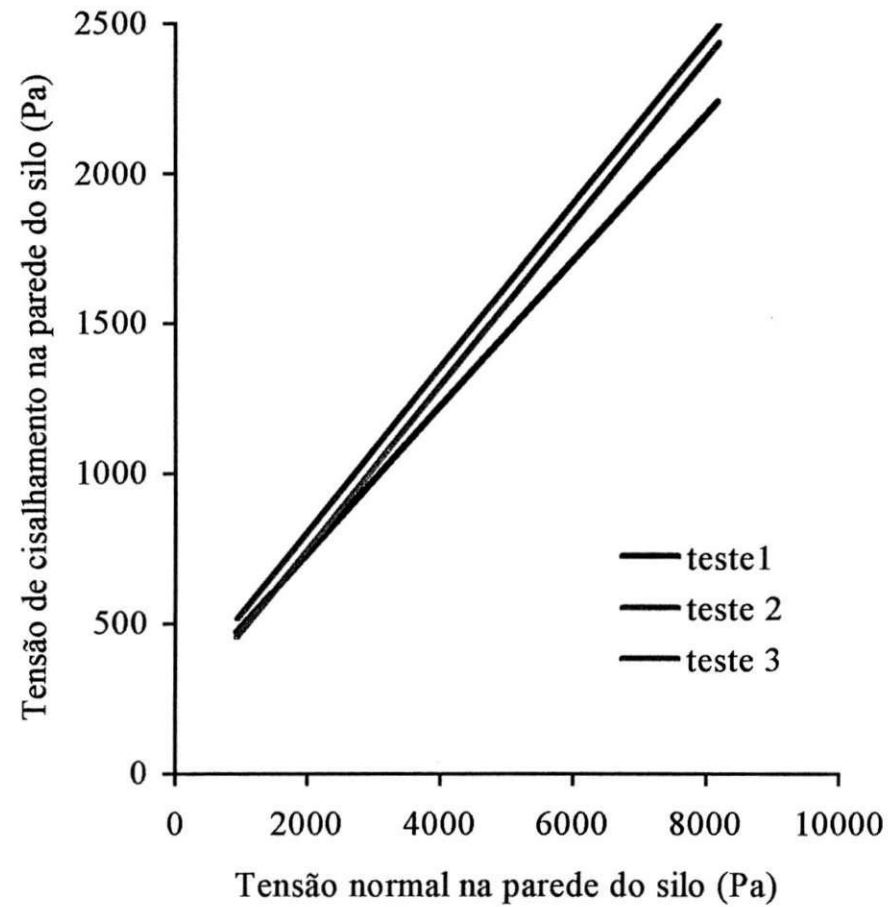


Figura 53: Reta que define o lugar geométrico de deslizamento da razão 1 para o acrílico

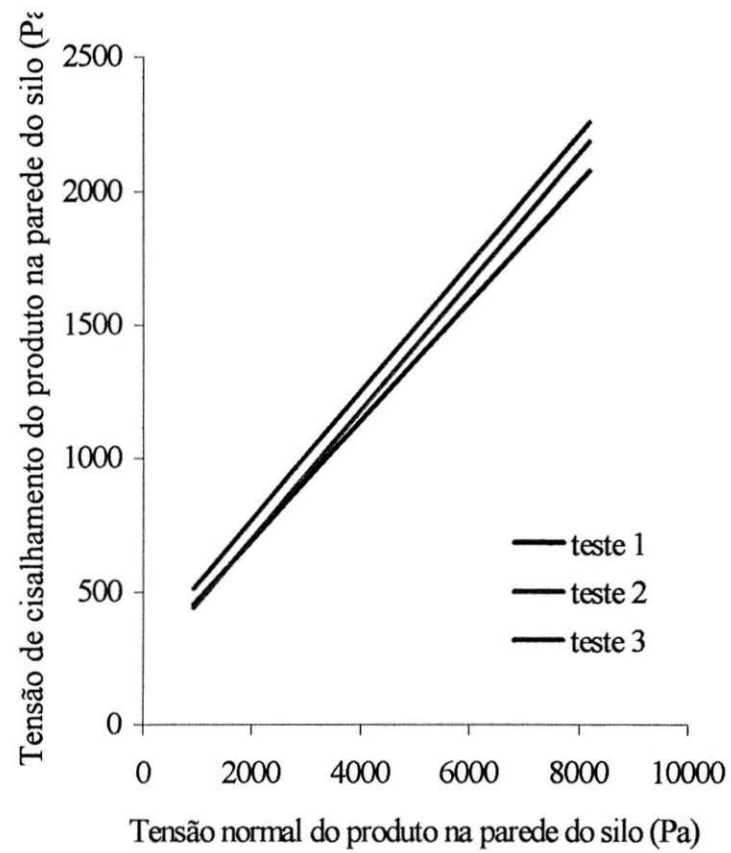
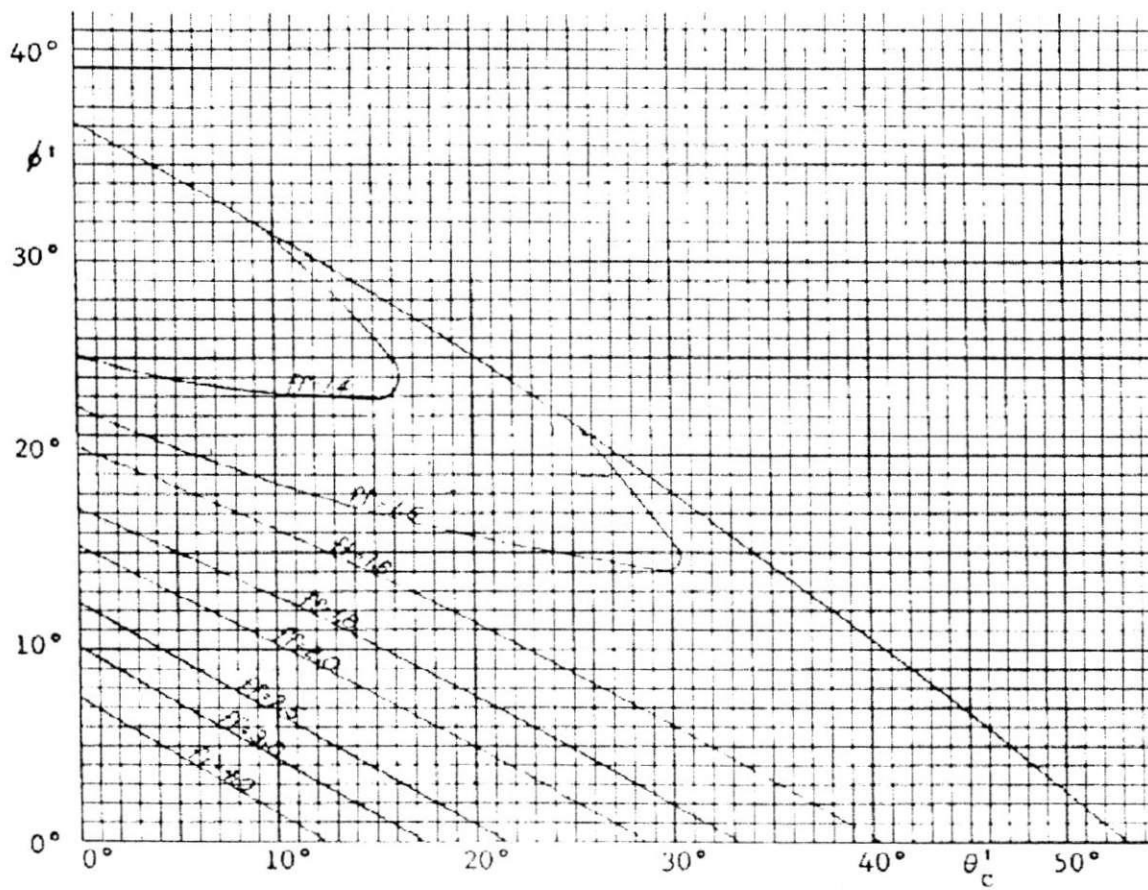


Figura 54: Reta que define o lugar geométrico de deslizamento da ração2 para o acrílico

**ANEXO**



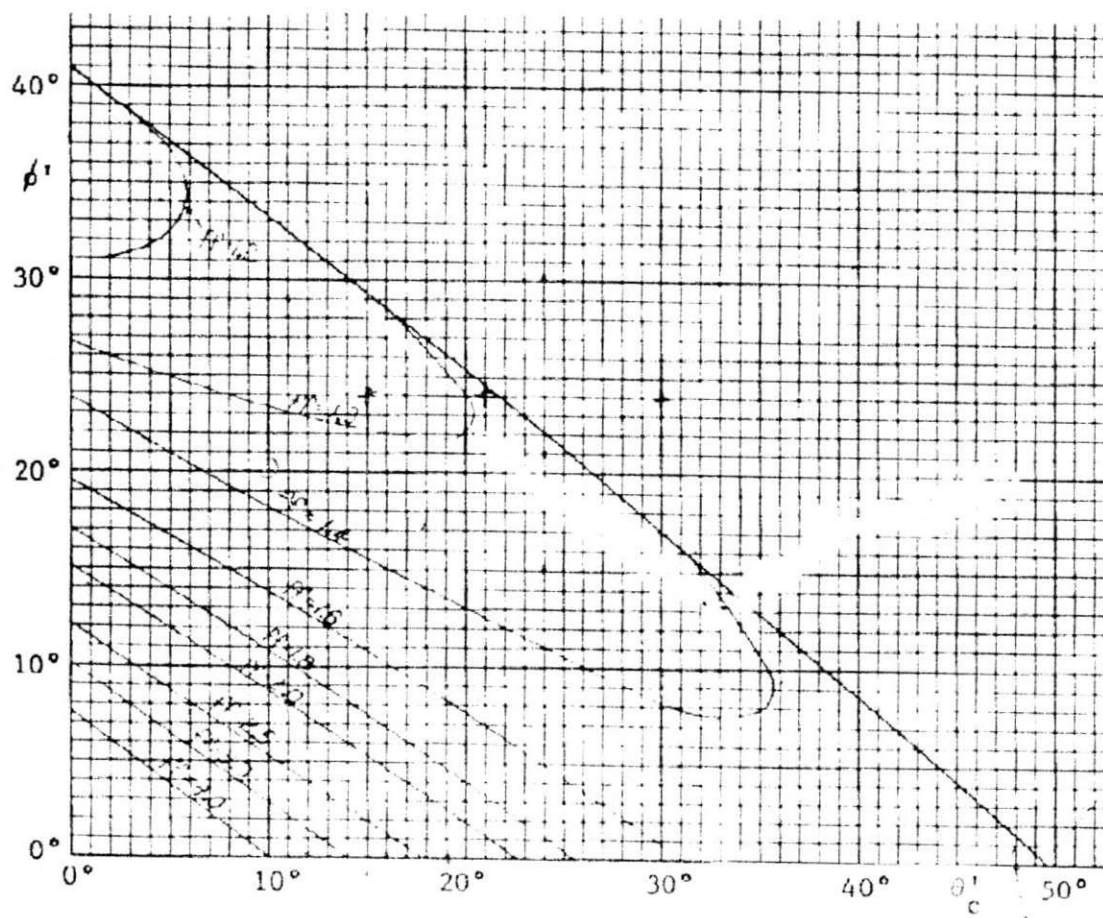


Figura 57: Determinação do  $\phi'$  para tremonhas cônicas e  $\phi_e = 50^\circ$



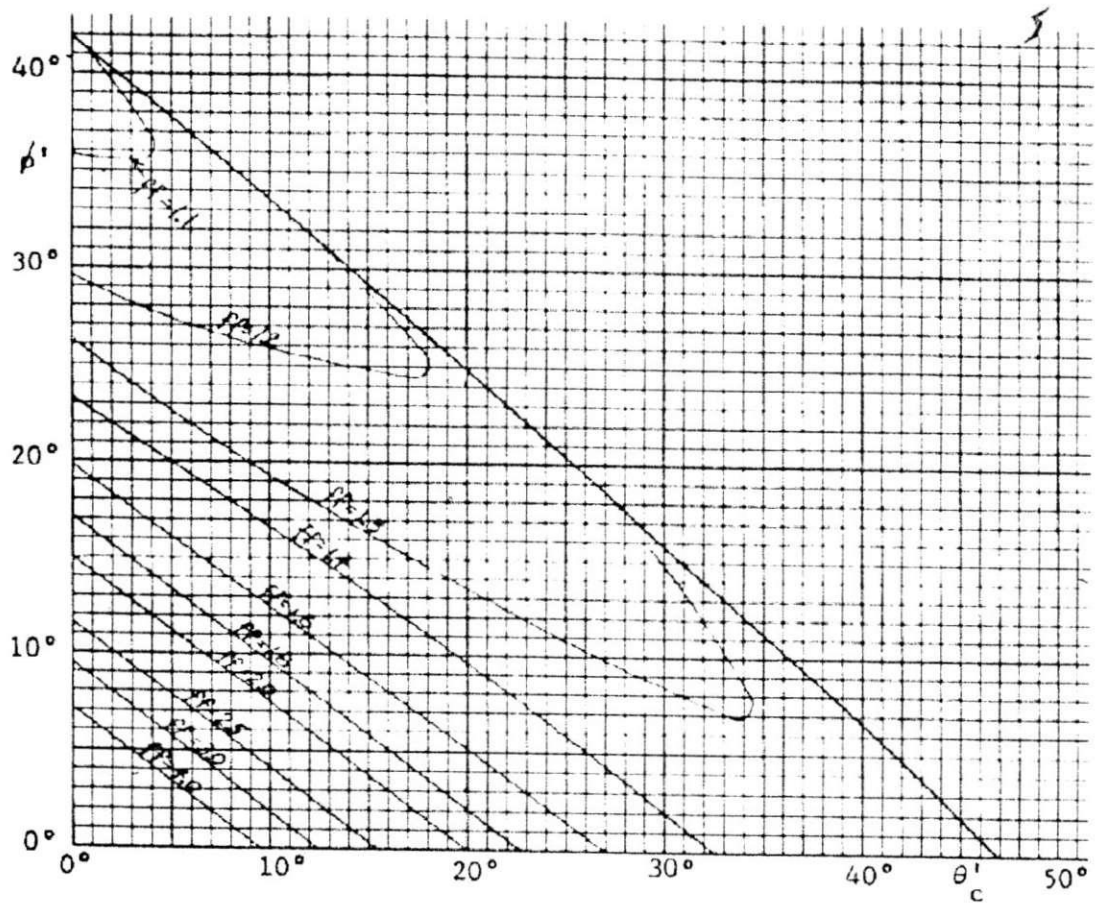


Figura 58: Determinação do  $\phi'$  para tremonhas cônicas e  $\phi_c = 60^\circ$