

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRICOLA

AVALIAÇÕES ESTRUTURAIS DE SILOS PARA GRÃOS EM RESINA
POLIESTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

Antonio Amaro de Lima

CAMPINA GRANDE - PARAIBA

JUNHO - 1992

EPE-M SIA



L732a Lima, Antonio Amaro de
Avaliaco es estruturais de silos para graos em resina
poliester reforcado com fibra de vidro / Antonio Amaro de
Lima. - Campina Grande, 1992.
106 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Armazenamento de Produtos Agricolas 2. Processamento
de Produtos Agricolas 3. Silos - 4. Silos - 5. Dissertacao
I. Mata, Mario Eduardo R. M. Cavalcanti, M.Sc. II.
Nascimento, Jose Wallace Barbosa do, M.Sc. III.
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV.
Título

CDU 631.563(043)

AVALIAÇÕES ESTRUTURAIS DE SILOS PARA GRAOS EM RESINA
POLIESTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

Antonio Amaro de Lima

Dissertação Aprovada em 26 de Junho de 1992.

Mario Eduar do R. M. Cavalcanti Mata
Prof. MARIO EDUARDO R. M. CAVALCANTI MATA - M.Sc.

Orientador

Jose Wallace B. do Nascimento
Prof. JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO - M.Sc.

Co-Orientador

Maria Elita Duarte Braga
Prof^a. MARIA ELITA DUARTE BRAGA - M.Sc.

Examinadora

João Batista Queiroz de Carvalho
Prof. JOAO BATISTA QUEIROZ DE CARVALHO - Ph.D

Examinador

Carlito Calil Junior
Prof. CARLITO CALIL JUNIOR - Dr.

Examinador

CAMPINA GRANDE - PB

JUNHO - 1992

ANTONIO AMARO DE LIMA

AVALIAÇÕES ESTRUTURAIS DE SILOS PARA GRãos EM RESINA
POLIESTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

*Dissertação apresentada ao Curso
de Mestrado em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal
da Paraíba, como parte das
exigências para obtenção do Grau
de Mestre.*

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de
Produtos Agrícolas.

ORIENTADOR: Prof. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata - Prof.
Adjunto - (M.Sc.)

CO-ORIENTADOR: Prof. José Wallace Barbosa do Nascimento -
Prof. Assistente - (M.Sc.)

CAMPINA GRANDE - PB

JUNHO - 1992

DEDICATORIA

A

Memória de meu pai

Dedicação e amor de minha mãe

Minha esposa Fátima

Minha filha Priscilla

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal da Paraíba - UFPB, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida para a realização do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - NTA, que tornou possível a realização deste trabalho.

A oficina mecânica do Laboratório de Irrigação do Campus II da UFPB, pela construção dos equipamentos de determinação dos ângulos de atrito.

Ao professor Mário Eduardo R. M. Calvalcanti Mata, pela orientação, ensinamento e amizade.

Ao professor José Wallace Barbosa do Nascimento, pela co-orientação e pelas sugestões indispensáveis.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação, pela convivência e amizade.

os funcionários do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Massa específica aparente e porosidade intergra nular.....	4
2.2. Ângulo de repouso.....	5
2.3. Ângulo de atrito interno (grão/grão).....	7
2.4. Ângulo de atrito grão/parede.....	11
2.5. Pressões vertical e horizontal em silos.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1. Propriedades mecânicas da resina poliéster reforçada com fibra de vidro.....	29
3.1.1. Ensaio de tração.....	29
3.1.2. Ensaio de compressão.....	31
3.1.3. Ensaio de flexão.....	32
3.2. Determinação das propriedades físicas do milho.	35
3.2.1. Determinação do teor de umidade do milho	35

3.2.2. Massa específica aparente.....	35
3.2.3. Porosidade intergranular.....	35
3.2.4. Determinação do ângulo de repouso.....	37
3.2.5. Determinação do ângulo de atrito interno grão-grão.....	38
3.2.6. Determinação do ângulo de atrito grão- parede.....	39
3.3. Confeção dos manômetros.....	40
3.4. Determinação das pressões laterais e no fundo de um silo protótipo.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1. Resistência da resina poliéster reforçada com fibra de vidro aos esforços máximos de tração, flexão e compressão.....	43
4.2. Massa específica aparente e porosidade intergranular.....	47
4.3. Ângulo de repouso.....	50
4.4. Ângulo de atrito interno (grão/grão).....	53
4.5. Ângulo de atrito grão/parede.....	57
4.6. Pressões horizontais e verticais exercidas no silo	60
5. CONCLUSÕES.....	77
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APENDICE A.....	84
APENDICE B.....	96
APENDICE C.....	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Forças que atuam em uma camada de material ensilado.....	16
2	Forças que atuam na cunha do material.....	19
3	Ações sobre uma camada horizontal de material localizada em uma profundidade infinita.....	24
4	Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.....	30
5	Aparelho utilizado nos ensaios de tração.....	30
6	Corpo de prova para o ensaio de compressão....	31
7	Aparelho utilizado nos ensaios de compressão..	32
8	Dimensões do corpo de prova para o ensaio de flexão.....	34
9	Aparelho utilizado nos ensaios de flexão.....	34
10	Picnômetro de comparação a ar.....	36
11	Aparelho utilizado para determinar o ângulo de repouso de materiais granulares.....	37
12	Aparelho de cisalhamento direto utilizado para determinar o ângulo de atrito grão/grão..	38

13	Aparelho utilizado para determinar o ângulo de atrito grão/parede.....	39
14	Manômetro para medição de pressões.....	40
15	Silo protótipo instrumentado com manômetros para medição das pressões laterais e verticais.....	42
16	Variação da massa específica aparente do milho em função do seu teor de umidade	48
17	Variação da porosidade intergranular do milho em função do seu teor de umidade.....	49
18	Variação do ângulo de repouso do milho em função do seu teor de umidade.....	52
19	Variação do ângulo de atrito interno (grão-grão) do milho em função do seu teor de umidade.....	55
20	Comparação entre as curvas dos ângulos de repouso e de atrito interno do milho em função do seu teor de umidade.....	56
21	Variação do ângulo de atrito grão-parede do milho em função do seu teor de umidade.....	59
22	Formação do talude de grãos após a descarga...	62
23	Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.....	73

24	Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto a descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.....	74
25	Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito a descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.....	75
26	Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo a descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.....	76

LISTA DE TABELAS

TABELA		PAGINA
1	Resistência a tração da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função da sua secção média.....	44
2	Resistência a flexão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função da sua espessura média.....	45
3	Resistência média a compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 300 mm).....	46
4	Resistência média a compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 200 mm).....	46
5	Resistência média a compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 150 mm).....	47

6	Variação da massa específica aparente e da porosidade intergranular do milho em função do teor de umidade.....	50
7	Ângulo de repouso e coeficiente de atrito médio em função do teor de umidade.....	51
8	Ângulo e coeficiente de atrito interno médio grão-grão em função do teor de umidade.....	53
9	Ângulo e coeficiente de atrito médio grão/parede em função do teor de umidade.....	58
10	Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente no silo protótipo após 24 horas do silo carregado. (kgf/m ²).....	63
11	Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente no silo protótipo na carga e na descarga do milho após 48 do carregamento do silo. (kgf/m ²).....	64
12	Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente no silo protótipo na carga e descarga simultânea do milho. (kgf/m ²).....	65
13	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert. após 24 horas do carregamento. (kgf/m ²).....	67
14	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga	

	do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento. (kgf/m ²).....	67
15	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da abertura da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento.(kgf/m ²).....	68
16	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert. após 24 horas do carregamento.(kgf/m ²).....	68
17	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert. após 48 horas do carregamento.(kgf/m ²).....	69
18	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert. após 48 horas do carregamento. (kgf/m ²).....	69
19	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto da descarga do silo e as propostas pelas equações	

	de Janssen e Reimbert, após 48 horas do carregamento. (kgf/m ²).....	70
20	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert. após 48 horas do carregamento. (kgf/m ²).....	70
21	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material. (kgf/m ²).....	71
22	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da abertura da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m ²).....	71
23	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m ²).....	72
24	Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m ²).....	72

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo determinar as resistências máximas de tração, flexão e compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro para espessuras variando de 1,5 a 6,5 mm aproximadamente, bem como, estudar a variação da massa específica aparente, porosidade intergranular, ângulo de repouso, coeficiente de atrito grão-grão e coeficiente de atrito grão-parede dos grãos de milho em função do seu teor de umidade de 9 a 20 % base seca, além de conduzir ensaios experimentais de determinação das pressões horizontais e verticais em um silo protótipo nas operações de carga e de descarga de produtos granulares (milho), comparando-as com as pressões obtidas com as equações propostas por Janssen e Reimbert.

Concluiu-se que as resistências máximas de tração, flexão e compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro variaram de 544,7 a 1.119,7 kgf/m²; 1.394,2 a 2.618,5 kgf/m² e de 405,05 a 1.017,34 kgf/m², respectivamente e que a porosidade intergranular, o ângulo de repouso, os coeficientes de atrito grão-grão e grão-parede do milho crescem com aumento do teor de umidade de 9 para 20 % base seca, sendo que a massa específica aparente desse produto decresce com o aumento do teor de umidade para o mesmo intervalo acima mencionado.

As pressões horizontais obtidas experimentalmente são inferiores as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert e que as sobrepressões neste experimento ocorreram, principalmente, na descarga do milho do lado direito da descarga do material.

SUMMARY

This study determined the maximum traction, bending and compression strengths of a polyester resin that been strengthened by glass fiber with thickness varying from 1.5 mm to 6.5 mm. It has also been studied the change in apparent specific weight, intergrain porosity, rest angle, grain-to-grain friction coefficient, and the wall-grain friction coefficient for corn grains as a function of its water content, which varied from 9% to 20% dry base. Also, it was conducted some laboratory experiments to determine the horizontal and vertical pressures in a prototype silo when in grain corn loading and unloading operations. These pressures were compared to the values given by Janssen and Reimbert equations.

This analysis shows maximum traction, bending and compression strengths for the improved polyester resin varying, respectively, from 544.7 kgf/m² to 1,119.7 kgf/m², 1,394.2 kgf/m² to 2,618.5 kgf/m², and 405.05 kgf/m² to 1,017.34 kgf/m². It has been verified an increase in intergrain porosity, rest angle, grain-to-grain and wall-grain friction coefficients as the water content increases. However, the apparent specific weight

decreases when the water content increases. The analysis demonstrates that the Janssen and Reimbert equations overestimates the horizontal pressures, since the measured values were smaller than the ones given by those equations. The overpressures occurred during the unloading operations at the right hand side of the material exit.

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil assim como vários outros países, ainda enfrenta problemas quanto ao armazenamento de grãos destinados à alimentação, sendo comum, em algumas regiões do país, a perda de parte das colheitas devido à insuficiência da capacidade de armazenagem e/ou armazenamento inadequado (BAETA, 1980).

A necessidade de ampliar a capacidade de armazenagem de grãos alimentícios principalmente a nível de fazenda, e de atender às solicitações de novas construções ou ampliações de silos em indústrias alimentícias, torna o estudo da problemática dos silos importante.

Espera-se de um silo de armazenagem, uma eficiência máxima, como elemento de preservação e lucros, sendo uma estrutura de função especial no setor agrícola no período de entre-safra, enquanto se aguardam melhores preços para a comercialização dos alimentos e seu consumo gradativo. Essa estrutura adquire fundamental importância pelo seu atendimento às comunidades, rurais e consumidoras dos gêneros alimentícios de primeira necessidade.

O silo não convencional para armazenagem de produtos agrícolas é uma das linhas de estudo hoje no setor moderno industrial, principalmente pelas características do material que o compõe, bem como sua estrutura funcional, sendo um dos objetivos das linhas de pesquisas dirigidas para o atendimento às diversas regiões.

A utilização dos polímeros na modernização industrial tem sido intensificada desde a época da segunda guerra mundial, quando muitas novidades surgiram modificando comportamentos anteriores (ALBA, S.D.). O material polimérico faz parte de todas os setores da química atual, devido às várias vantagens apresentadas por estas substâncias de alta praticidade, desde sua funcionalidade e aquisição até ao seu barateamento.

Analisando as propriedades inerentes ao silo metálico, sua aplicação em regiões brasileira, especialmente no Nordeste, observa-se algumas particularidades que exigem correções específicas. Em clima quente, o metal do silo transfere o calor externo para o seu interior, cujos altos índices de elevação de temperatura atingem diretamente o produto, de modo a facilitar a degradação e alterar os percentuais de composição dos produtos armazenados. Em comparação com o alto coeficiente de transmissão de calor do metal, o baixo coeficiente da resina poliéster reforçada com fibra de vidro atua como isolante térmico atendendo melhor às expectativas rurais de nossa região (CAVALCANTI MATA, 1987).

Elaborada as operações da fase construtiva, os processos de carga e descarga devem ser estudados, podendo este desenvolvimento ser efetuado de duas maneiras: automatizado e manual.

O processo de carga e descarga que é um processo dinâmico de escoamento dos grãos, exigem o conhecimento do efeito

das pressões laterais nos silos de armazenamento. Ligado a isto está a importância da determinação das espessuras das paredes dos silos de resina poliéster reforçado com fibra de vidro em função das máximas pressões laterais.

O planejamento prévio, esquematizado dentro das faixas limites de processamento, asseguram o emprego de quantidades exatas de material, na construção de silos de resina poliéster reforçado com fibra de vidro. Baseado nas normas padronizadas de rotina industrial, efetivam-se os cálculos de modo a atender às necessidades da região.

1.1. OBJETIVOS

Com base no exposto o presente trabalho teve como objetivos:

- 1 - Determinar as resistências máximas de tração, compressão e flexão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro de aproximadamente 1,5 a 6,5 mm de espessura.
- 2 - Determinar as propriedades físicas do milho tais como: massa específica aparente, porosidade intergranular, ângulo de repouso, coeficiente de atrito interno (grão-grão) e grão-parede, em função do teor de umidade de 9 a 20% base seca.
- 3 - Construir um silo protótipo a fim de conduzir a determinação das pressões laterais e no fundo com relação as operações de carga e descarga, comparando-as com as equações propostas por Janssen (1895) e Reimbert.(1979).

2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Massa específica aparente e porosidade intergranular.

Segundo ALMEIDA (1979) denomina-se massa específica de um material a razão entre a massa e o volume do material. A massa específica é dita aparente, quando se refere ao volume total ocupado pela massa granular (volume do sólido mais o do ar intergranular).

No tocante a materiais biológicos existem três tipos de massa específica. Massa específica volumétrica refere-se à quantidade de massa de unidades individuais intactas do material reunidas em um dado volume. Esse tipo de massa específica inclui o espaço poroso dentro da massa do material. Massa específica aparente refere-se à massa de cada unidade intacta do material dividida pelo volume da partícula. Esse tipo de massa específica inclui o espaço poroso dentro de cada partícula. Finalmente, massa específica sólida refere-se à massa por unidade de volume dos sólidos dentro de cada unidade do material. Não inclui espaços vazios (MOHSEIN, 1980).

A massa específica aparente de materiais alimentícios e de produtos agrícolas desempenha um importante papel em muitas aplicações tais como, secagem e armazenagem de produtos agrícolas (CAVALCANTI MATA & FERNANDES FILHO, 1984).

Denomina-se porosidade intergranular a relação entre o volume ocupado pelo ar existente em massa granular, e o volume total ocupado pela mesma massa (ALMEIDA, 1979).

A porosidade de materiais biológicos tem sua importância na hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor e massa, além de ser necessária para o dimensionamento de silos (CAVALCANTI MATA & FERNANDES FILHO, 1984).

É importante conhecer a variação da porosidade na massa de grãos, em decorrência das modificações do volume e dimensões das sementes submetidas ao processo de secagem (PRADO, 1978).

Segundo MOHSENIN (1978) o processo mais apropriado para a determinação de volume é o processo do picnômetro por comparação a ar.

CAVALCANTI MATA & SOUZA (1987/1990) estudaram a porosidade intergranular e a massa específica aparente do feijão mulatinho em função do teor de umidade de 6 a 28% base úmida em situações simuladas de secagem e de armazenagem deste produto, tendo concluído que no processo simulado de armazenagem a porosidade intergranular diminui e a massa específica aparente aumenta com o aumento do teor de umidade dos grãos de feijão. Já durante o processo que simula a secagem a porosidade intergranular diminui com a diminuição do teor de umidade dos grãos, não se evidenciando alterações significativas da massa específica aparente dos grãos de feijão com a variação do teor de umidade.

2.2. - Ângulo de repouso

Segundo MOHSENIN (1978) o ângulo de repouso é o ângulo com a horizontal na qual o material permanecerá quando empilhado.

O tamanho, a forma, o teor de umidade e a orientação de partículas tem uma influência decisiva no ângulo de repouso.

Para o mesmo autor existem dois ângulos de repouso, isto é, ângulo de repouso estático e dinâmico. O ângulo de repouso estático é o ângulo de atrito do material sobre ele mesmo. O ângulo de repouso dinâmico é mais importante do que o estático, porque ele surge quando o material granular está em movimento.

KRAMER (1944) estudou o ângulo de repouso usando arroz numa estrutura de madeira montada em uma mesa de desenho com a superfície inclinada onde adaptou-se um transferidor para medir o ângulo. A superfície da mesa foi inclinada até o arroz começar a se mover deixando a superfície inclinada. Então mediu-se o ângulo da superfície inclinada que foi adotado como sendo o ângulo de repouso do arroz.

MOHSENIN (1978) descreveu um aparelho usado para medir ângulo de repouso que consiste numa plataforma circular, sustentadas por tres pernas imersa em uma caixa cheia de material granular, e com uma janela de vidro em um dos lados e acoplado um funil de metal no qual era feita a descarga. Dava-se descarga do material na caixa, deixando o cone permanecer livre de grãos na plataforma. O ângulo de repouso, θ , foi obtido da geometria do cone a seguir:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{2(H_c - H_p)}{D_p} \right] \quad (1)$$

onde:

- θ - ângulo de repouso
- Hc - Altura do cone
- Hp - Altura da plataforma
- Dp - Diâmetro da plataforma

Quando o teor de umidade do material granular variou, os valores experimentais do ângulo de repouso foram altamente correlacionados com os valores calculados usando a seguinte equação empírica.

$$\tan \theta = a.n^2 + b.\left(\frac{U}{D_{av}}\right) + c.s + d \quad (2)$$

onde:

- θ - ângulo de repouso
- n - fator de ajuste = $\frac{\text{superfície específica do material}}{\text{superfície específica da esfera}}$
- U - percentagem do teor de umidade
- Dav - diâmetro médio da partícula anteparo, cm
- S - gravidade específica
- a,b,c,d - constantes

2.3. - Ângulo de atrito interno (grão/grão).

Segundo BRUBAKER (1965) o coeficiente de atrito entre grãos é tomado como sendo igual a tangente do ângulo de atrito interno daquele material. O tamanho, a forma, o teor de umidade e a concentração dos grãos exercem grande influência na obtenção do ângulo de atrito interno.

Alguns engenheiros assumem em geral que o ângulo de repouso e o ângulo de atrito interno sejam aproximadamente o mesmo, STEWART et alii (1967) mostraram que para o sorgo os dois ângulos são diferentes e que o uso de um no lugar do outro, em um projeto, pode introduzir erros significativos.

Em projetos de silos e dimensionamento de moegas, se faz necessário o coeficiente de atrito entre materiais granulares como parâmetro para o cálculo da pressão horizontal na parede da estrutura. Para prever a pressão horizontal em projetos de silos rasos, a Equação (3) de Rankine, é geralmente usada.

$$P_h = W \cdot y \cdot \tan^2 (45 - \theta_1/2) \quad (3)$$

onde,

P_h = Pressão horizontal, kgf/m²

W = densidade do material, kg/m³

y = distância do ponto de atuação da pressão calculada à superfície do grão, m

θ_1 = ângulo de atrito interno

No projeto de silos profundos e outras estruturas de armazenamento semelhantes, o coeficiente de atrito entre materiais granulares é indispensável ao cálculo da razão de pressão, k que refere-se a razão entre a pressão horizontal (P_h) e pressão vertical (P_v).

$$k = P_h/P_v = (1 - \text{sen}\theta_1)/(1 + \text{sen}\theta_1) \quad (4)$$

Conhecendo-se o valor de k , a pressão horizontal contra a parede pode ser estimada por uma dada pressão vertical (KETCHUM, 1919).

O mesmo autor afirma que k não é constante mas varia com o tipo de material e a geometria do silo, assim como a profundidade, as propriedades de atrito e coesão e o volume de descarga do material.

A influência desses vários fatores na proporção da pressão é melhor ilustrada pela bem conhecida Equação de Janssen dada pela pressão horizontal, (P_h), nos silos profundos.

Os valores de P_v e P_h podem ser obtidas por um teste de compressão triaxial, onde a força principal menor P_v será igual a pressão no corpo inteiro mais a capacidade de impulso axial (TAYLOR, 1948).

Na determinação do círculo de Mohr, dois tipos de informação são necessárias, dentre as quais os semicírculos traçados que podem ser descritos e a linha da tangente estabelecida. Deste método gráfico pode se obter a resistência ao cisalhamento dos sólidos granulares como também o ângulo de atrito interno. Esses dois parâmetros podem ser também calculados diretamente da Equação do círculo de Mohr.

$$\cos \theta = \frac{[c' + P_h + (P_v - P_h)/2]}{(P_v - P_h)/2} \quad (5)$$

Depois de algumas simplificações a expressão acima produz o seguinte:

$$P_n(P_v/P_n - 1) \cdot \cos\theta - P_n(P_v/P_n + 1) - 2c = 0 \quad (6)$$

Obtendo dois conjuntos de dados, a Equação (3) pode ser escrita duas vezes e resolvida simultaneamente para obter θ e c :
Através destes dois parâmetros, o valor de c pode ser determinado por:

$$c = c' \tan\theta \quad (7)$$

O parâmetro c é geralmente tomado como a coesão do material granular. Entretanto, algumas autoridades consideram c um erro experimental e não uma propriedade do material.

Se a relação $P_n/P_v = k$ for substituído na Equação (6) e c terial for assumido como não coesivo, $c = 0$, então o resultado será a equação (4).

LORENZEN (1957) tentou relacionar ângulo de atrito entre materiais granulares e o ângulo de repouso, com o desejo de que um simples teste de determinação do ângulo de repouso fornecesse, através de uma relação, o ângulo de atrito interno do qual a razão de pressão k pudesse ser estimada. Os resultados mostraram que os valores dos dois ângulos correm quase que paralelos um ao outro para uma larga faixa de umidade, mas não existe relação simples que possa nos dar θ' a partir de θ .

As propriedades de atrito de materiais granulares, como

os grãos de cereais, são importantes no projeto de equipamento para fluidos, sólidos e estruturas para armazenagem destes materiais (GARG, 1972).

2.4. - Angulo de atrito grão/parede

REIMBERT & REIMBERT (1979) determinaram o ângulo de atrito do milho com a parede para vários tipos de materiais, estando os corpos de prova submetidos a uma tensão normal de 0.162 kgf/cm^2 , os resultados encontrados foram:

cimento liso	-	28,5°	a	25,9°
chapa lisa	-	18,16°	a	18°
chapa rugosa	-	20,33°	a	18,9°

CALIL JUNIOR (1984), trabalhando com plástico transparente nas paredes da maquete de silo, encontrou o ângulo de atrito do milho com as paredes, variando de 30° a 48° com a relação altura/lado de 6 a 0,75, respectivamente.

O mesmo autor, apresenta coeficientes de atrito do milho com a parede, citado por algumas Normas, para diversos materiais, e são:

- Chapa de aço:

Norma Australiana - 0,36

Norma Americana - 0,26

- Paredes lisas:

Norma Britânica - 0,25

Norma Canadense - 0,40

- paredes rugosas:

Norma Britânica - 0,40

CALIL JUNIOR, (1984) cita ainda que, se somente um valor do ângulo de atrito com a parede é disponível então os valores superiores e inferiores devem ser encontrados por adicionar e subtrair 5°(cinco graus), respectivamente. Também faz observações que o ângulo de atrito com a parede, medidos em silos, particularmente, durante a descarga tendem a ser menor 10-15% do que os valores determinados nas células de cisalhamento com mesmo material da parede do silo. Quando em dúvida, entretanto, é aconselhável subtrair 3°(três graus) do menor valor do ângulo de atrito com a parede.

2.5. - Pressões vertical e horizontal em silos.

Segundo RAVENET (1977), a construção dos primeiros grandes silos para armazenamento de grãos foram em concreto armado e o processo para o cálculo das pressões exercidas pelo material ensilado foi o da pressão hidrostática, dada pela fórmula abaixo. Verificou-se que esta teoria não leva em consideração os esforços de atrito que surgem nas paredes dos silos e o atrito entre as partículas.

$$P = h \cdot \gamma \quad (8)$$

onde:

P - Pressão lateral ou vertical, Kgf/m².

h - Altura desde a borda superior até seção considerada, m.

γ - Massa específico do material ensilado, Kg/m³.

A aplicação da pressão hidrostática resultava em uma espessura da parede excessivamente elevada e admitia-se que a pressão em um ponto no interior do material é igual as pressões em qualquer direção. Esta teoria não leva em conta os esforços de atrito que aparecem nas paredes e ao desprezar este atrito não é levada em consideração parcela do peso do material ensilado que é suportada pelas paredes da célula, sendo considerado que todo peso do material ensilado é suportado pelo fundo da célula. Entretanto sabe-se que as pressões horizontais exercidas pelo material ensilado são menores do que aquelas fornecidas pela teoria da hidrostática; assim, um recipiente destinado ao armazenamento de um líquido seria inadequado para o armazenamento de um material granular de mesmo peso específico do líquido, pois este recipiente poderia não suportar as forças de atrito atuantes e teria espessura de paredes antieconômicas, pois estas seriam construídas para resistir a pressões horizontais superiores às reais. Inversamente, um recipiente destinado a armazenar material granular poderia não suportar as pressões horizontais provocadas pelo líquido.

Roberts em 1882 citado por RAVENET (1977) foi um dos primeiros pesquisadores a investigar sobre pressões de grãos armazenados, chegando a conclusão que as regras aplicadas a hidráulica (pressões hidrostáticas) não pode ser aplicada neste caso, assim o autor realizou uma série de ensaios em maquetes hexagonais e quadradas, construídas de madeira, para determinar a pressão no fundo de silos altos. A relação altura-diâmetro

estudadas são superior a 4,5. Baseada nos ensaios, Roberts estabeleceu a seguinte Fórmula para determinar a força vertical sobre o fundo de um silo.

$$P = A.H.C.W \quad (9)$$

onde:

P - Pressão total sobre o fundo do silo, Kgf/m²

A - Area transversal do silo, m²

H - Altura do silo, m

C - Coeficiente prático, igual a 1.03

W - Massa específica do material, Kg/m³.

Em 1884 Roberts citado por RAVENET (1977) descreve os ensaios realizados em um silo real para determinar as pressões laterais e sobre o fundo da célula. Os materiais utilizados foram milho e ervilha. Nos ensaios realizados o autor obteve uma fórmula prática para o cálculo das pressões sobre o fundo.

$$P = D.W \quad (10)$$

onde:

P - Pressão sobre o fundo, Kgf/m²

D - Diâmetro ou lado da célula, m

W - Massa específico do material ensilado, Kg/m³

Para as pressões laterais obteve a seguinte fórmula:

$$P = C.W \quad (11)$$

onde:

P - Pressão horizontal, Kgf/m^2

C - Coeficiente igual a 0,8

W - Massa específico do material ensilado, Kg/m^3

Roberts conclui que as pressões que atuam sobre o fundo da célula, corresponde a uma altura de grãos igual ao diâmetro da célula, e que as pressões laterais máxima corresponde a uma altura de grãos igual a 0,368 D.

Segundo FORTES (1985) a teoria de Janssen e Pleizner apresentada em 1895, até hoje é bastante utilizada, determinando as pressões horizontal e vertical através do equilíbrio das forças verticais que atuam em uma camada horizontal do material ensilado de altura infinitesimal como mostra a Figura 01. Janssen baseou-se em duas suposições fundamentais para desenvolver sua teoria:

- A pressão vertical em uma seção transversal horizontal da massa ensilada é constante na seção;
- Denominando K a razão entre as pressões horizontal (P_H) e vertical (P_V), esta razão é constante para qualquer profundidade considerada.

Sobre a camada de material ensilado, mostrada na Figura 01, atuam o peso próprio da camada, as forças nas faces superior e inferior da camada devidas ao material, que são expressas como produto da área da seção transversal pela pressão vertical na

face correspondente, e a força devida ao atrito entre material e paredes, que pode ser expressa como o produto da pressão horizontal pelo coeficiente de atrito entre material e paredes pela área lateral da camada. Fazendo-se o equilíbrio das forças na direção vertical.

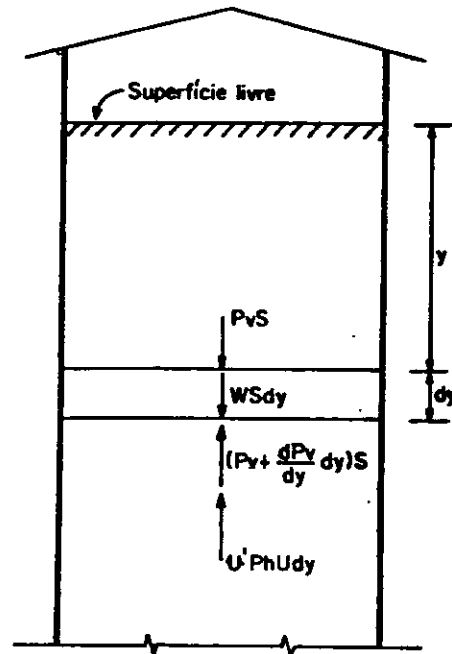


FIGURA 01 - Forças que atuam em uma camada de material ensilado.

$$P_v \cdot S + W \cdot S \cdot dy - \left(P_v + \frac{dP_v}{dy} \cdot dy \right) \cdot S - u' \cdot P_h \cdot U \cdot dy = 0 \quad (12)$$

Resolvendo esta equação diferencial, obtém-se as seguintes equações:

$$P_v = \frac{R'}{u'k} \left(1 - e^{- (u' \cdot k / R') \cdot y} \right) \quad (13)$$

$$P_h = k \cdot P_v = \frac{R'}{u'} \left(1 - e^{- (u' \cdot k / R') \cdot y} \right) \quad (14)$$

observando-se as fórmulas 13 e 14 percebe-se que as pressões sofrem acréscimos que se tornam cada vez menores com o aumento do valor de y , sendo que para grandes valores de y pode-se desprezar o termo exponencial, obtendo-se os valores máximo das pressões:

$$P_{\downarrow \text{máx}} = \frac{W \cdot R'}{u' \cdot k} \quad (a) \quad P_{\text{Hmáx}} = \frac{W \cdot R'}{u'} \quad (b) \quad (15)$$

A força vertical resultante da ação do atrito na superfície interna das paredes da célula na profundidade y pode ser obtida fazendo-se o equilíbrio das forças verticais atuando na massa ensilada até esta profundidade. O equilíbrio das forças verticais produzidas pelo peso próprio, pela pressão vertical e pelas ações de atrito é dado por:

$$F_{\text{a}} = W \cdot y \cdot S - P_{\downarrow} \cdot S = S \cdot [W \cdot y - (1 - e^{-(u'K/R') \cdot y})] \quad (16)$$

onde:

$$K = \frac{P_{\text{H}}}{P_{\downarrow}} = \frac{1 - \text{sen}\theta_1}{1 + \text{sen}\theta_1}$$

W - Massa específico do material ensilado, Kg/m^3

θ_1 - ângulo de atrito entre as partículas do material ensilado (ângulo de atrito interno), graus

θ' - ângulo de atrito entre material ensilado e as paredes da células, graus

$u = \text{tg } \theta_1$ - coeficiente de atrito entre as partículas do material ensilado (coeficiente de atrito interno)

$\mu' = \text{tg } \theta'$ - coeficiente de atrito entre material ensilado e paredes da célula

y - Altura desde a borda superior da célula até o ponto onde se calcula a pressão, m

P_h - pressão horizontal atuando na parede do silo, Kg/m^2

P_v - pressão vertical atuando sobre a seção transversal da massa ensilada, Kg/m^2

S - área da seção transversal da massa ensilada, m^2

U - Perímetro da seção do silo, m

R' - raio hidráulico da célula, m

K - razão entre as pressões horizontal e vertical

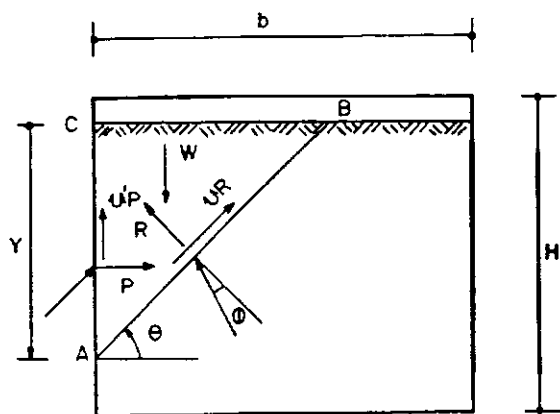
F_a - força vertical resultante das ações de atrito nas faces internas das paredes celulares.

AIRY (1897) apresentou uma teoria que possibilita o cálculo da força horizontal atuando por unidade de comprimento do perímetro interno da seção transversal da célula, sendo esta força calculada para cada parede isoladamente. Conhecendo-se esta força, pode-se determinar as pressões laterais nas paredes. Para determinar esta força, o autor estabeleceu o equilíbrio de uma cunha de material de espessura unitária, utilizando processo semelhante ao empregado por Coulomb na sua teoria para o cálculo de empuxo de terra.

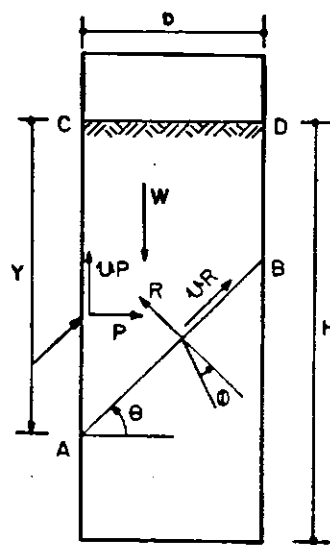
O autor acima citado desenvolveu sua teoria para dois tipos de células: a célula baixa e a célula alta. No caso da célula baixa o plano de deslizamento corta a superfície livre do material ensilado antes de atingir qualquer parede da célula; no

caso da célula alta o plano de deslizamento atinge uma das paredes antes da superfície livre do material. Observa-se que mesmo nas células altas existe uma região de material na qual o plano de deslizamento atinge a superfície livre antes de atingir qualquer parede. Na Figura 02 tem-se os dois casos citados.

Considerando-se primeiramente o caso da célula baixa Figura 2a, sobre a cunha ABC de espessura unitária atuam as seguintes forças: o peso W da cunha, a reação da massa de material restante atuando na superfície de deslizamento, considerando-se que ao longo deste plano a resistência ao cisalhamento deve estar totalmente mobilizada, reação esta decomposta na direção perpendicular ao plano de deslizamento (R) e na direção paralela a este plano ($U.R$), e a reação da parede sobre a massa ensilada, decomposta na direção horizontal (P), atuando na parede AC, e na direção vertical ($U'.P$), devido ao atrito entre os grãos e a parede AC.



(a) Célula baixa



(b) Célula alta

FIGURA 02 - Forças que atuam na cunha de material

Fazendo-se o somatório de força nas direções normal e paralela ao plano de deslizamento, encontram-se:

$$R - P.\text{sen}\theta = (W - u'.P).\text{cos}\theta \quad (17)$$

$$u.R + P.\text{cos}\theta = (W - u'.P).\text{sen}\theta \quad (18)$$

Das duas equações acima, multiplicando-se a primeira por (-1), somando-se as duas e dividindo-se por $\text{cos}\theta$, obtém-se:

$$P = W. \left[\frac{\text{tg}\theta - u}{(1 - u.u') + (u + u').\text{tg}\theta} \right] \quad (19)$$

Para obter o máximo valor de P deve-se encontrar a forma da cunha, variando θ , que exerce a máxima pressão sobre a parede e para este valor de θ a derivada de P em relação a θ deve ser nula. Substituindo o peso por $y^2/2\text{tg}\theta$ e impondo as condições acima, obtém-se o valor de $\text{tg}\theta$ que torna a pressão horizontal máxima; a fórmula que permite obter P em função da profundidade é a seguinte:

$$P = \frac{W}{2 \text{tg}\theta} \cdot \frac{\text{tg}\theta - u}{(1 - u.u') + (u + u').\text{tg}\theta} \cdot y^2 \quad (20)$$

$$\text{tg}\theta = u + \left[\frac{1 + u^2}{u + u'} \right]^{1/2} \quad (21)$$

No caso de célula alta, o processo para a obtenção de P e da $\text{tg}\theta$ é idêntico ao utilizado no caso das células baixas, substituindo-se W pelo seu valor para o caso do plano de deslizamento atingir a parede da célula:

$$W' = \frac{W.b}{2} (2.y - b.tg\theta) \quad (22)$$

onde:

W' - Peso da cunha do material

Deste modo para as células altas tem-se:

$$P = \frac{W.b}{2} (2.y - b.tg\theta) \frac{tg\theta - u}{(1 + u.u') + (u + u').tg\theta} \quad (23)$$

$$tg\theta = \left[\frac{2.y}{b} \cdot \frac{1 + u^2}{u + u'} + \left(\frac{1 + u^2}{u + u'} \right) \cdot \left(\frac{1 - u.u'}{u + u'} \right) - \frac{1 - u.u'}{u + u'} \right]^{1/2} \quad (24)$$

Ao considerar o equilíbrio da cunha de espessura unitária na obtenção de P, AIRY (1897) não leva em conta o atrito entre as paredes paralelas ao plano médio da cunha e o material ensilado, que interfere no deslocamento da cunha, sendo este um problema tridimensional e não bidimensional; assim, a teoria do autor, sob este ponto de vista, fornece bons resultados apenas nas regiões centrais de um "bunker" em que uma das dimensões da seção transversal é bem maior que as outras.

Jamieson citado por CALIL (1984), realizou ensaios em silos reais de madeira e em maquetes com placas de aço e madeira. A determinação experimental das pressões laterais e sobre o fundo foi realizada com um sistema de diafragmas hidráulicos com um medidor de coluna de água colado nas paredes do silo e das maquetes.

Caughey et alii em 1951 citado por RAVENET (1977) efetuou ensaios em maquetes, tendo obtido valores de k muito amplos. Para o trigo a oscilação foi de 0,30 a 0,67 e para cimento foi de 0,27 a 0,5. Esta variação o autor atribui ao efeito arco que produz o material. Um dado muito significativo foi a observação que houve um incremento das pressões laterais em 300% devido uma queda accidental de grãos, concluindo também que na descarga centrada dos silos não apareceram sobrepressões, de acordo com os valores obtidos experimentalmente, no entanto para a descarga excêntrica, no lado oposto a boca de saída, houve um incremento de pressões de 20% e diz ainda que estes resultados experimentais obtidos são validos para silos com relação altura-diâmetro igual a 3,6.

REIMBERT & REIMBERT (1956) explanando sobre sua teoria, determinaram as pressões laterais baseando-se tanto em resultados experimentais como em deduções matemáticas. Os autores realizaram uma série de ensaios com os quais obtinham a carga suportada pelo fundo da célula, com o objetivo de estabelecer uma função que relacionasse a parcela do peso do material suportado pelas paredes da célula, devido ao atrito entre elas e o material, com a altura do material ensilado. Para que os ensaios pudessem ser comparados entre si, todas as experiências foram realizadas nas mesmas condições, com velocidade de carga constante e altura de queda também constante, de modo que o ângulo de atrito interno e o coeficiente de atrito entre material e paredes fossem praticamente os mesmos para todos os ensaios. Os pesquisadores

chamaram a atenção para o fato de que na prática a velocidade de enchimento não é constante e a altura de queda do material é variável, sendo aconselhável levar em conta as variações das características físicas do material, utilizando-se os valores mais desfavoráveis. Os ensaios mostraram que o valor de pressão vertical (P_v) cresce com a profundidade, porém sofre acréscimos cada vez menores com o aumento da profundidade, tendendo a um valor máximo. A pressão horizontal (P_h) contra as paredes do silo tem também comportamento idêntico.

FORTES (1985) mostra a dedução das fórmulas para a obtenção das pressões horizontal e vertical, seguindo-se as mesmas etapas do trabalho original dos irmãos Reimbert.

Inicialmente os irmãos Reimbert estabelecem o valor da pressão horizontal máxima ($P_{hmáx}$) e da pressão vertical máxima ($P_{vmáx}$), sendo a primeira obtida igualando-se o peso de uma camada de material de altura infinitesimal a força proveniente do atrito entre grãos e paredes, que significa considerar não existir variação da pressão vertical com a profundidade, e a segunda é obtida da primeira considerando o material ensilado submetido a um estado ativo de pressões. Considerando-se uma camada horizontal de espessura dy no interior de uma célula cilíndrica, como mostra a Figura 03, o peso da camada será $W.S.dy$, estando a camada submetida a uma pressão horizontal em todo o perímetro da camada. Esta pressão horizontal cresce com a profundidade até atingir um máximo tal que a força devida ao atrito equilibre o peso próprio da camada considerada; nesta

profundidade tem-se:

$$P_{h\text{máx}} \cdot \text{tg}\theta' \cdot dy = W \cdot S \cdot dy \quad (25)$$

e com as devidas substituições

$$P_{h\text{máx}} = \frac{D}{4 \cdot \text{tg}\theta'} \quad (26)$$

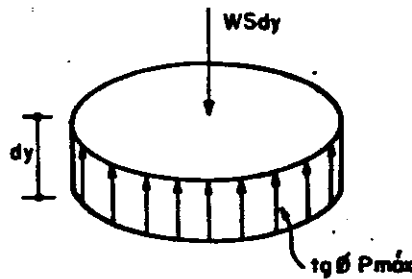


FIGURA 03 - Ações sobre uma camada horizontal de material localizada em uma profundidade infinita.

Segundo FORTES (1985) os irmãos Reimbert baseando-se em trabalhos de Caquot, que estabelece a existência de um estado ativo de Rankine para as pressões, estes relacionam as pressões horizontal e vertical através do mesmo estado.

$$\frac{P_v}{P_h} = \frac{1}{K} = \frac{1 + \text{sen}\theta}{1 - \text{sen}\theta} = \frac{1}{\text{tg}^2(45-\theta/2)} \quad (27)$$

assim, a pressão vertical máxima será:

$$P_{v\text{máx}} = \frac{P_{h\text{máx}}}{K} = \frac{D}{4 \cdot \text{tg}\theta' \cdot \text{tg}^2(45-\theta/2)} \quad (28)$$

Conhecendo-se as pressões vertical e horizontal máxima que atuam em uma célula de altura infinita, podem-se obter as

pressões para qualquer profundidade, desde que se conheça a função da curva representativa da força vertical a qualquer profundidade devida ao atrito dos grãos contra as paredes.

TURITZIN (1963) estudando as pressões dinâmicas que os materiais granulares exercem nos silos, classificou o movimento do produto granular em dois grupos fundamentais :

Fluxo Dinâmico - Ao abrir-se a boca de saída, toda a massa se põe em movimento, e isto tras como consequência o aparecimento de grandes incrementos nas pressões laterais durante a descarga.

Fluxo Não Dinâmico - Somente se põe em movimento a zona central da massa armazenada e em sentido vertical, este fluxo também é denominado fluxo de conduto ou tubo e se caracteriza pela ausência de sobre pressões durante a descarga.

RAVENET (1977) dissertando que os conhecimento atuais são deficientes e requerem amplos estudos posteriores, apresenta as Normas Alemãs DIN 1055 onde durante o carregamento a pressão horizontal máxima é:

$$P_{hmáx} = \frac{F}{u_c \cdot U} \quad (29)$$

Pressão vertical máxima

$$P_{vmáx} = \frac{F}{u_c \cdot U_c} \quad (30)$$

Força de atrito

$$P_{wm\acute{a}x} = \frac{F}{U} \quad (31)$$

Durante a descarga a press\~ao horizontal m\~axima \acute{e}:

$$P_{hm\acute{a}x} = \frac{F}{u_d \cdot U} \quad (32)$$

Press\~ao vertical m\~axima

$$P_{vm\acute{a}x} = \frac{F}{u_d \cdot U_d} \quad (33)$$

Força de atrito

$$P_{wm\acute{a}x} = \frac{F}{U} \quad (34)$$

RAVENET (1977) traçou as curvas utilizando as fórmulas de Janssen, norma alemã (DIN-1055) e outras, para a carga e descarga dos silos, juntamente com essas curvas traçou a curva das espessuras das chapas do silo, com coeficiente de segurança de 1,57 e a curva de espessura da chapa com coeficiente de segurança igual 1, que corresponde ao limite de deformação elástica do aço igual a 2200 kg/cm². Conhecida a pressão lateral o cálculo da espessura da chapa é aplicada através da seguinte fórmula:

$$e = \frac{P \cdot D}{20 \cdot t_{adm}} \quad (35)$$

onde:

e - espessura da chapa do silo, mm

P - pressão lateral, kg/m²

D - diâmetro do silo, m

T_{adm} - esforço de tração admissível igual a 1400 kg/cm²
(com coeficiente de segurança de 1,57).

Conclusões das teorias

Revisando algumas das principais teorias existente na área, segundo uma ordem cronológica. Percebe-se que cada teoria proposta, leva em consideração alguma característica física do produto. Nota-se ainda que há alguma controvérsia no uso do coeficiente de proporcionalidade entre as pressões verticais e horizontais, com isso leva a distorções de resultados entre teorias.

Existe uma tendência mundial entre os pesquisadores que a curva de pressão horizontal e vertical sobre as paredes dos silos, tem a forma semelhante a proposta por Janssen, por este motivo muitos pesquisadores propõem um coeficiente de majoração sobre a teoria de Janssen, principalmente para silos altos e durante a descarga.

Para silos baixos a teoria de Janssen satisfaz plenamente a previsão das pressões horizontais e verticais atuante sobre as paredes dos silos.

Atualmente já existe algumas normas que estabelece as condições para o cálculo das pressões para várias situações, inclusive para silos baixos e altos e para diversos tipos de material da parede.

3. - MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem (NTA), conjuntamente com o Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Civil (DEC), e o Núcleo Regional de Processamento, Pesquisa em Couros e Tanantes (PROCURT) do Departamento de Engenharia Química (DEQ), todos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Foram realizados ensaios de tração, flexão e compressão em corpos de prova confeccionados pela Indústria de Equipamentos de Fibras Ltda (EQUIFIBER), em resina poliéster reforçado com fibra de vidro, e determinadas as seguintes propriedades físicas do milho: teor de umidade, massa específica aparente, porosidade intergranular, ângulo de repouso, ângulo de atrito interno (grão-grão) e ângulo de atrito grão-parede.

Foi construído um protótipo de silo para realização dos testes de pressões, o mesmo tem formato cilíndrico, com paredes em resina poliéster reforçado com fibra de vidro, com espessura de 6 mm, diâmetro de 1000 mm e altura de 1500 mm. Foram feitos orifícios com diâmetro de 100 mm, para colocação dos manômetros para determinação das pressões laterais e no fundo.

Processo de fabricação da resina poliéster reforçada com fibra de vidro.

Neste trabalho usamos o processo "hand lay-up"

(processo manual). Neste processo, a resina já preparada pela adição do catalizador, acelerador e outros aditivos especiais, é aplicada com pincéis sobre uma manta de fibra de vidro que repousa sobre o molde. As bolhas de ar são removidas com roletes e pincéis. Camadas de mantas de fibras de vidro impregnadas pela resina são laminadas umas sobre as outras até que a espessura desejada seja atingida. O laminado normalmente é curado à temperatura ambiente. O laminado em contato com o molde é liso, e o lado exposto é áspero.

3.1. - Propriedades mecânicas da resina poliéster reforçada com fibras de vidro

3.1.1. - Ensaio de tração

Os ensaios de resistência e tração foram realizados em corpos de prova, preparados seguindo-se procedimentos adotados na PUC/RJ (CULZONI, 1986; GHAVAMI & VAN DOMBEECK, 1981), cujas dimensões são mostradas na Figura 04. Os ensaios foram realizados numa máquina marca KRATOS, modelo K.500/ 2.000 fabricada por DINAMOMETROS KRATOS LTDA com velocidade de deslocamento constante de 1cm/55s. Na Figura 05 é mostrado o equipamento utilizado para os ensaios de tração. Foram feitos 08 ensaios para cada corpo de prova de 1,5 mm, 2,5 mm, 4,5 mm, 5,0 mm e 6,0 mm de espessura. O ensaio consistiu em prender os corpos de provas nas garras de tração da máquina KRATOS e em seguida aplicar cargas, até a sua ruptura.

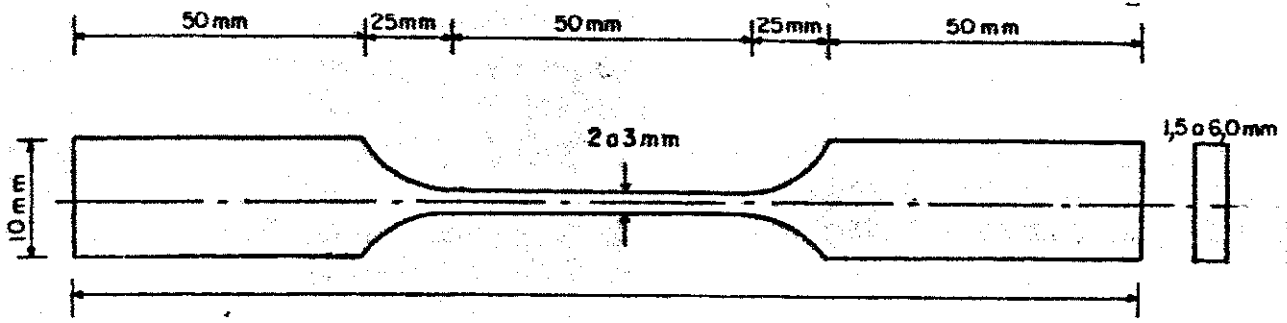


FIGURA 04 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração

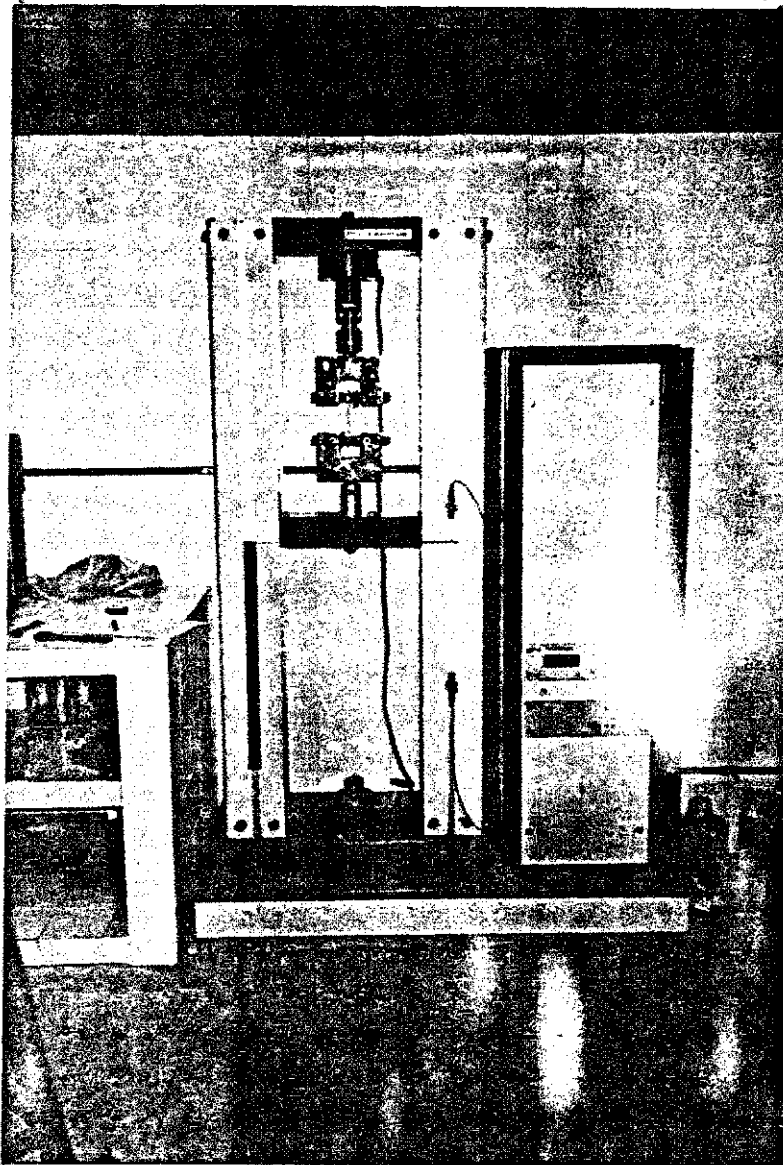


FIGURA 05 - Aparelho utilizado nos ensaios de tração

3.1.2. - Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram determinados em corpos de prova, preparados seguindo-se procedimentos adotados na PUC/RJ (CULZONI, 1986 ; GHAVAMIN & VELOSO, (1985), com a altura igual a duas vezes o diâmetro, de forma a afastar efeitos de flambagem conforme mostra a Figura 06.

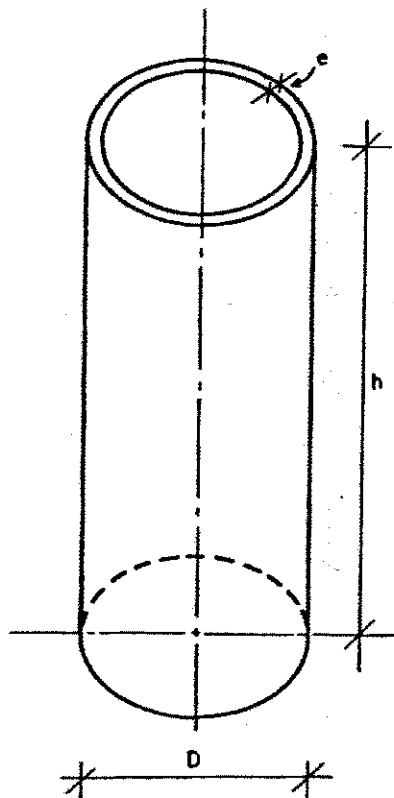


FIGURA 06 - Corpo de prova para o ensaio de compressão

Os ensaios foram desenvolvidos em uma prensa hidráulica com capacidade para 200 toneladas, modelo (ELE), fabricada pela Engineering Laboratory Equipment Limited. A Figura 07, mostra este equipamento. Foram confeccionados 45 corpos de prova, sendo:

- 5 corpos com espessuras de 2,0; 2,5; 4,5; 5,0 e 6,5 mm e

altura de 300 mm, com 03 repetições, totalizando 15 corpos de prova; - 5 corpos com espessuras de 2,0; 2,5; 4,5; 5,0 e 6,5 mm e altura de 200 mm, com 3 repetições, totalizando 15 corpos de prova; - 5 corpos com espessuras de 2,0; 2,5; 4,5; 5,0 e 6,5 mm, e altura de 150 mm, com 03 repetições, totalizando 15 corpos de prova. O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova na prensa hidráulica e aplicar uma carga de compressão até a sua ruptura.

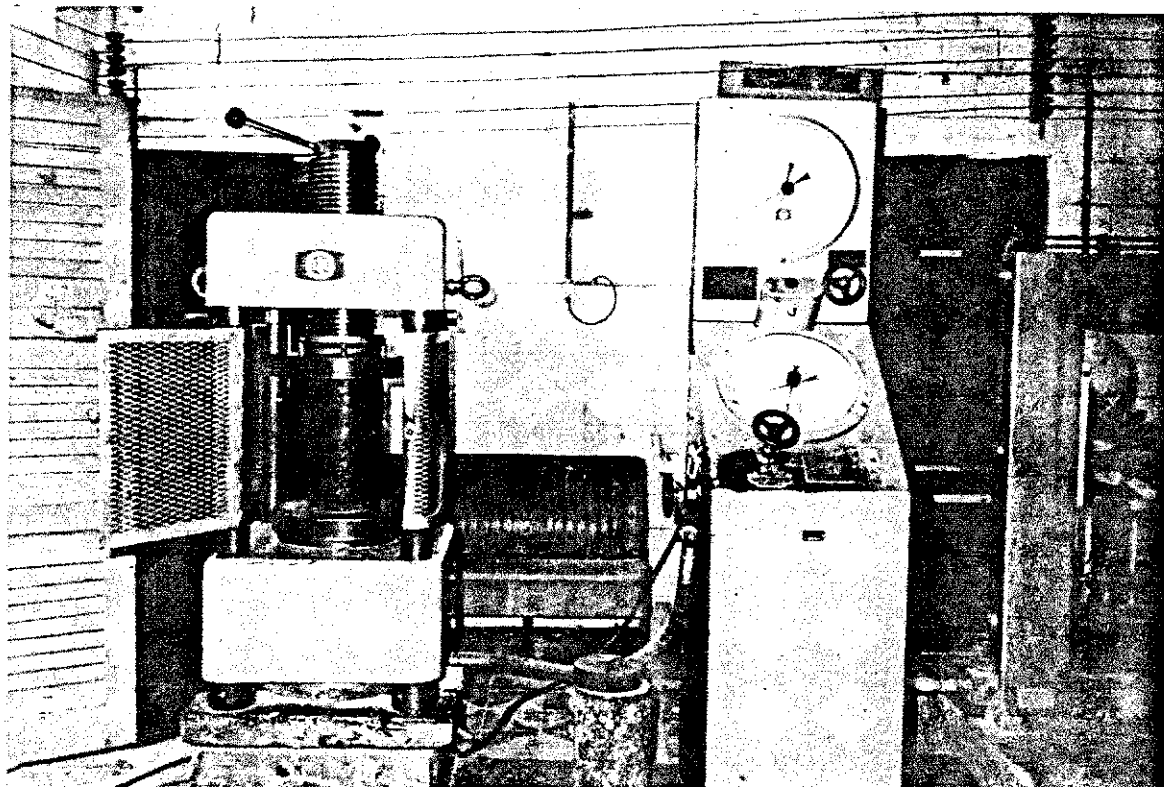


FIGURA 07 - Aparelho utilizado nos ensaios de compressão

3.1.3. - Ensaio de flexão

Neste ensaio, devido à semelhança entre os materiais

flexíveis de pequena espessura, na proporção dos corpos de prova para ensaio de flexão simples, utilizou-se a norma ASTM 0790-71, onde as dimensões são funções da espessura. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com as dimensões mostradas na Figura 08, utilizando-se uma máquina modelo FARNELL, fabricada por LEONARD FARNELL, com uma velocidade de deformação constante de 0,0508 cm/min. Na Figura 09 é mostrado o equipamento utilizado nos ensaios. Foram feitos 08 ensaios para cada corpo de prova de espessuras de 1,5 mm, 2,5 mm, 4,5 mm, 5,0 mm, e 6,0 mm. O ensaio consistiu em carregar os corpos de prova por um meio de uma carga central aplicada transversalmente, até produzir a ruptura. Os corpos de prova estavam simplesmente apoiados nos extremos e a carga foi aplicada com um cilindro colocado no meio do vão. A deformação foi medida por meio de um extensômetro mecânico colocado sob o ponto de aplicação da carga. A tensão de flexão no limite de proporcionalidade foi calculada utilizando a seguinte equação.

$$\sigma = \frac{0,0015.P.L}{b.(e)^2} \quad (36)$$

onde,

σ = tensão de resistência a flexão, MPa

P = carga, kN

L = comprimento, m

b = largura, m

e = espessura, m

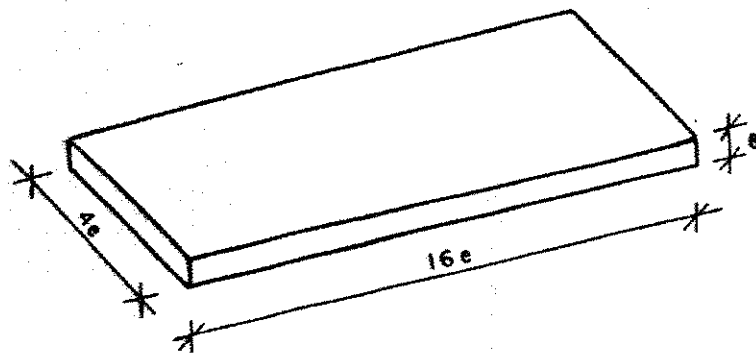


FIGURA 08 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de flexão

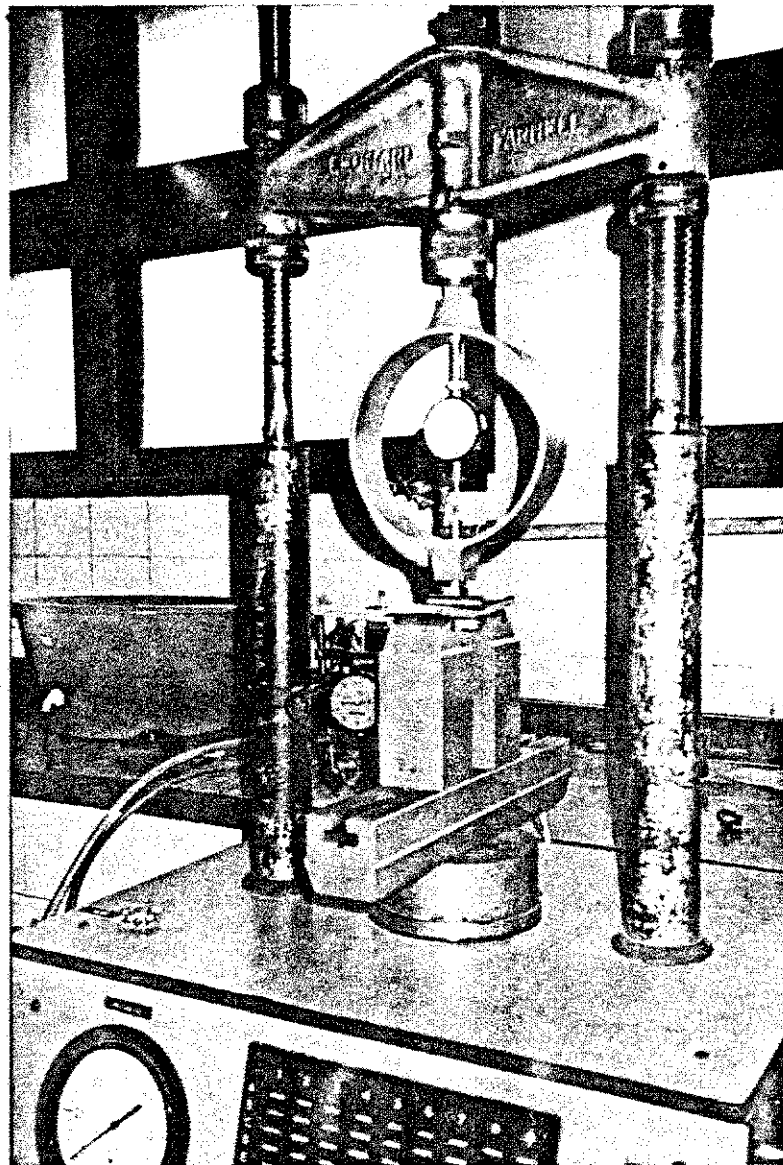


FIGURA 09 - Aparelho utilizado nos ensaios de flexão

3.2. - Determinação das propriedades físicas do milho

3.2.1. - Determinações do teor de umidade dos grãos

Antes do início de cada teste, determinou-se o teor de umidade do milho, utilizando-se estufa com circulação de ar tipo FANEN 330, a temperatura de 130°C durante o período de duas horas.

3.2.2. - Massa específica aparente

Para a determinação da massa específica volumétrica, utilizou-se um cilindro de volume conhecido. A amostra do milho foi colocada no cilindro e em seguida pesou-se em uma balança de precisão e a massa específica foi determinada dividindo-se a massa pelo volume da amostra.

$$C = m/v \quad (37)$$

onde:

C = massa específica do grão, kg/m³

m = massa de grãos, kg

v = volume ocupado pela massa de grãos, m³

3.2.3. - Porosidade intergranular

Determinou-se a porosidade usando um picnômetro de comparação a ar desenvolvido para essa finalidade pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem (NTA). Este aparelho é constituído basicamente por dois cilindros de volume conhecido. Os cilindros são intercomunicáveis através de tubulação acoplada em uma placa

de vedação dos dois cilindros. Coloca-se os grãos no cilindro 2
mostrado Figura 10 até seu completo enchimento. Com a válvula de
intercomunicação fechada coloca-se a placa de vedação sobre os

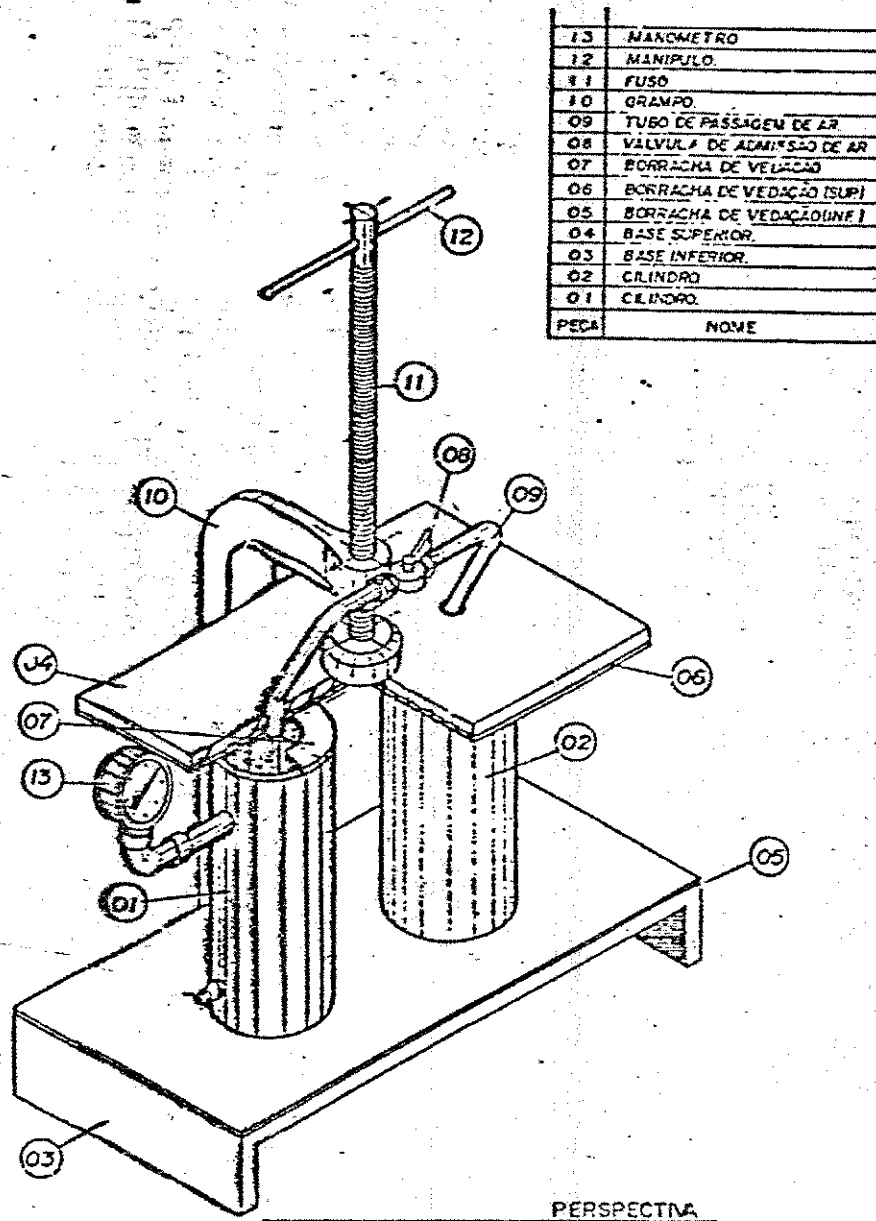


FIGURA 10 - Pícnômetro de comparação a ar

dois cilindros, pressionando-a através do mecanismo de prensa para que a vedação seja perfeita. Em seguida aplica-se, com o auxílio de um compressor, uma pressão P_1 no cilindro 1 que está vazio. abre-se em seguida a válvula de intercomunicação e faz-se a leitura da pressão P_2 .

Determina-se, então a porosidade pela Equação:

$$E = (P_1 - P_2) / P_2 \times 100 \quad (38)$$

3.2.4. - Determinação do ângulo de repouso

O ângulo de repouso foi determinado através do processo do plano inclinado, como mostra a Figura 11. Utilizou-se amostras com teores de umidade de 9, 11, 13, 15, 17 e 20%, este ensaio consistiu em usarmos uma estrutura de madeira com superfície de milho. O plano foi levantado até o milho começar a movimentar-se na superfície inclinada. O ângulo de repouso foi admitido como sendo igual ao ângulo imediatamente inferior a superfície inclinada.

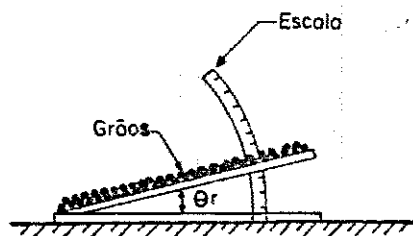


FIGURA 11 - Aparelho utilizado para determinar o ângulo de repouso de materiais granulares

3.2.5. - Determinação do ângulo de atrito interno (grão/grão)

O ângulo de atrito grão/grão foi determinado através do método de cisalhamento direto, conforme mostra a Figura 12. Utilizou-se três amostras, submetidas as tensões normais de 0,5 , 1,0 e 2,0 kgf/cm², com os seguintes teores de umidade: 9,0, 11,0, 13,0, 15,0, 17,0 e 20% b.s.

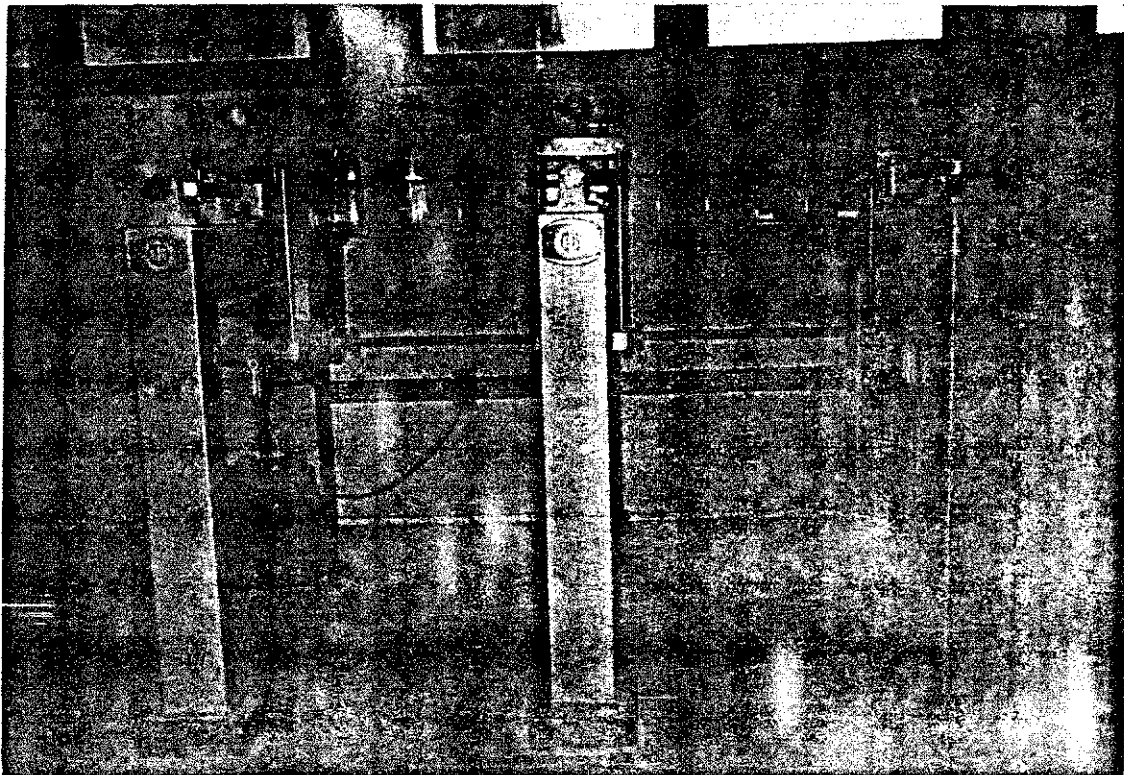


FIGURA 12 - Aparelho de cisalhamento direto utilizado para determinar o ângulo de atrito interno (grão/grão)

3.2.6.- Determinação do ângulo de atrito grão/parede

O ângulo de atrito do milho com a parede do silo de resina poliéster reforçado com fibra de vidro, foi determinado utilizando-se uma mesa de madeira com 400 mm de largura 600 mm de comprimento, fixada em uma das extremidades com um sistema de suporte para uma roldana com diâmetro de 70 mm. Foi confeccionado um caixote de resina poliéster reforçado com fibra de vidro, em uma das suas extremidades colocou-se um cabo de aço que foi tracionado por um peso. Colocou-se milho na superfície da mesa e sobre o mesmo o caixote de resina poliéster reforçada com fibra de vidro, com uma carga uniformemente distribuída, conforme Figura 13. O ângulo de atrito do milho com o material da parede foi determinado através do coeficiente de atrito, que foi obtido pela relação peso médio de tração necessário ao deslocamento do caixote pela carga uniformemente distribuída.

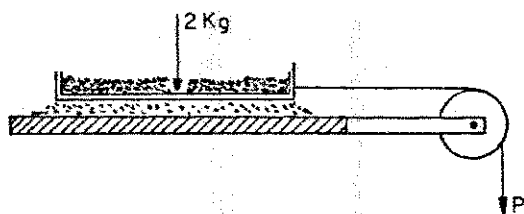


FIGURA 13 - Aparelho utilizado para determinar o ângulo de atrito grão/parede

3.3. - Confeccão dos manômetros.

Foram confeccionados 12 manômetros de água, utilizou-se cap de PVC de 100 mm e borracha tipo pulsômetro com espessura de 0,80 mm, visando a determinação das pressões laterais e verticais, incidentes no protótipo de silo, conforme figura 14.

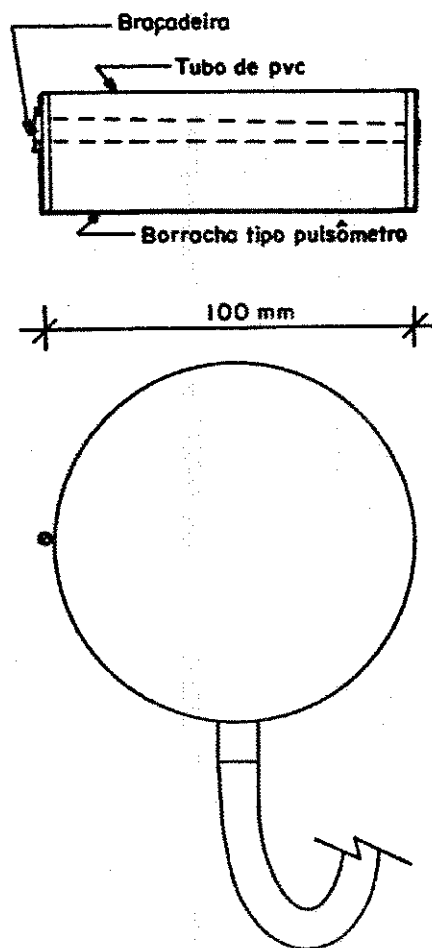


FIGURA 14 - Manômetro para medição de pressões.

3.4. - Determinação das pressões laterais e no fundo do protótipo de silo.

As pressões exercidas pela massa de milho armazenada sobre as paredes e sobre o fundo, foram determinadas em um protótipo de silo construído em resina poliéster reforçada com fibra de vidro. O mesmo tem formato cilíndrico, com espessura de 6,0 mm, diâmetro de 1000 mm e altura de 1500 mm. Utilizou-se uma série de manômetros, semelhante ao sistema utilizado por Jamieson citado por RAVENET (1977) e por BAETA (S.D.), dispostos em quatro colunas ao longo das paredes, espaçados de 500 mm e na parte central do fundo, conforme figura 15. Os manômetros foram calibrados fora do protótipo.

As pressões horizontais e sobre o fundo foram realizadas com três repetições e três situações diferentes de carga e descarga do material. Determinou-se as pressões laterais de carga e de descarga imediatamente após o carregamento. As pressões laterais e sobre o fundo foram determinadas na carga e na descarga após 24 horas e 48 horas do silo carregado com coluna de 500, 1000 e 1500 mm de altura de grão e as pressões estáticas 24 horas após a de carga. As pressões máximas foram determinadas durante a operação de descarga.

- 1) Carga e descarga imediata após o carregamento;
- 2) Carga e descarga após 24 horas do silo carregado;
- 3) Carga e descarga após 48 horas do silo carregado;

No período de 24 horas após o carregamento do silo acompanhou-se as pressões às 0, 03, 12, 20 e 24 horas e para o período de 48 horas acompanhou-se as pressões às 0, 07, 12, 20, 24, 36 e 48 horas.

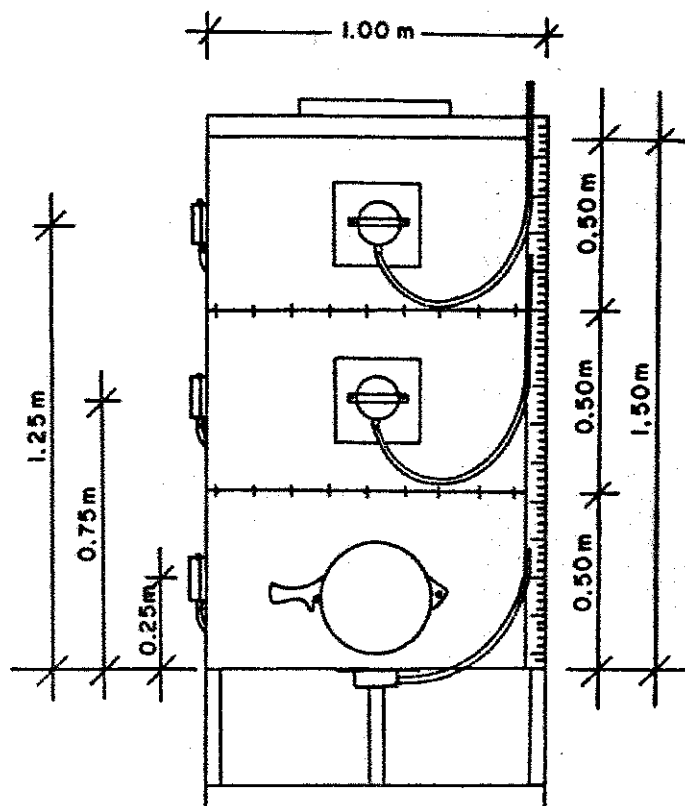


FIGURA 15 - Silo protótipo instrumentado com manômetros para medição das pressões laterais e verticais

4. - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As resistências a tração, flexão e compressão estudadas em função da espessura da resina poliéster reforçada com fibra de vidro são apresentadas nas Tabelas de 1 a 5.

A variação da massa específica aparente (ME), porosidade intergranular (PI), ângulo de repouso (AR), ângulo de atrito interno (ATI) (grão/grão) e ângulo de atrito grão/parede (ANG) do milho com a variação do seu teor de umidade, são apresentadas nas Tabelas de 6 a 9 e nas Figuras de 16 a 21. Utilizando-se estes parâmetros, foram comparadas as pressões horizontais e verticais propostas pelas equações de Janssen e Reimbert com as pressões obtidas experimentalmente, que são mostradas nas Tabelas de 10 a 24 e nas Figuras de 23 a 26.

A fim de facilitar a compreensão do texto e facilitar a leitura, a resina poliéster reforçada com fibra de vidro, a partir deste capítulo será denominado apenas "fibra de vidro".

4.1 - Resistência da "fibra de vidro" aos esforços máximos de tração, flexão e compressão

A Tabela 1 mostra a resistência a tração da "fibra de vidro" para as secções médias variando de 3.03 à 16.21 mm². Constata-se nesta Tabela que a resistência a tração da "fibra de vidro" variou de 544.7 à 1119.7 kgf/cm² e os desvios padrão são considerados altos. RABELLO et alii (1991) encontrou para uma

resistência a tração da "fibra de vidro" um valor médio de 796 \pm 74 kgf/cm², valor este, intermediário ao obtido neste trabalho.

TABELA 1 - Resistência a tração da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função da sua secção média.

Nº de Camadas	Secção média (mm ²)	desvio padrão	Tensão média (kgf)	desvio padrão	Resistência média (kgf/cm ²)	desvio padrão
01	3,03	0,355	1.62	0,452	552,6	211,5
02	4,73	0,781	3.66	1,119	770,1	189,6
03	9,60	0,961	5.25	1,290	544,7	110,8
04	8,85	0,580	9.92	2,300	1119,7	236,4
05	16,21	1,030	11.01	1,330	675,0	85,2

As variações aleatórias da resistência a tração da "fibra de vidro" não eram esperadas, no entanto, como o material veio confeccionado de fábrica onde o sistema de aplicação da resina utilizada é manual e disperso, podemos atribuir este resultado a pouca tecnologia empregada na empresa no sentido de fornecer um material mais homogêneo.

A Tabela 2 apresenta a resistência média à flexão da "fibra de vidro" para as espessuras do material variando de 1,53 a 6,11 mm. Os valores encontrados variam de 1394.2 à 2618.5 kgf/cm², observando-se uma tendência de diminuição da resistência a flexão com o aumento da espessura do material.

TABELA 2 - Resistência a flexão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função da sua espessura média.

No de Camadas	Espessura média (mm)	desvio padrão	Tensão média (kgf)	desvio padrão	Resistência média (kgf/cm ²)	desvio padrão
01	1,53	0,1030	11,90	2,07	2618.5	1217.7
02	2,03	0.2058	16,40	2,61	2466.4	695,3
03	3,95	0,4208	36,04	5,18	2108,8	420,6
04	3,46	0,2875	42,74	11,65	1412,5	273,1
05	6,11	0,6274	85,70	13,76	1394.2	283,8

As Tabelas 3, 4 e 5 mostram a resistência média a compressão da "fibra de vidro" em função da variação da espessura de 2 à 6.5 mm, para corpos de prova com alturas de 300 mm, 200 mm e 150 mm, respectivamente. Constata-se nestas Tabelas que existe uma tendência de aumento da resistência média a compressão com o aumento da espessura da fibra de vidro, embora os valores intermediários não sejam consistentes.

Como já explicado anteriormente a inconsistência dos dados pode-se atribuir a forma artesanal como são feitos os silos protótipos e os corpos de prova, o que implica na sugestão de uma melhoria tecnológica na indústria, de modo a se obter materiais mais uniformes, caso contrário, os custos devem se elevar já que para construir uma estrutura segura o projetista deverá super dimensionar o silo.

TABELA 3 - Resistência média a compressão da resina poliéster

reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 300 mm).

Nº de Camadas	Espessura média (mm)	desvio padrão	Tensão média (kgf)	desvio padrão	Resistência média (kgf/cm ²)	desvio padrão
01	2,0	1,0	1.983	0,755	408,08	159,21
02	2,5	0,5	4.433	1,010	934,54	212,98
03	4,5	1,3	15.916	1,825	822,46	94,30
04	5,0	0,8	16.560	2,550	680,15	104,73
05	7,0	0,4	23.250	9,390	622,91	256,86

TABELA 4 - Resistência média a compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 200 mm).

Nº de Camadas	Espessura média (mm)	desvio padrão	Tensão média (kgf)	desvio padrão	Resistência média (kgf/cm ²)	desvio padrão
01	1,8	0,8	2.136	0,793	405,05	150,66
02	2,5	0,5	5.480	0,120	564,51	12,36
03	4,5	1,3	14.950	0,867	906,42	52,60
04	4,5	1,3	11.073	3,375	671,37	204,68
05	6,5	1,2	15.333	2,386	705,05	109,71

TABELA 5 - Resistência média a compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro em função de sua espessura. (altura do corpo de prova 150 mm).

Nº de Camadas	Espessura média (mm)	desvio padrão	Tensão média (kgf)	desvio padrão	Resistência média (kgf/cm ²)	desvio padrão
01	2,2	0,8	2.896	0,353	754,24	92,07
02	2,5	0,5	3.410	0,190	661,85	36,98
03	4,5	1,3	14.950	0,867	954,10	19,16
04	5,0	0,8	13.583	2,238	1.017,34	167,61
05	7,5	1,2	17,600	3,814	996,39	215,96

4.2. - Massa específica aparente do grão e porosidade intergranular

A Tabela 6 e as Figuras 16 e 17 mostram a variação da massa específica aparente (ME) e a porosidade intergranular (PI) do milho com a variação do seu teor de umidade (TU). A Tabela 6 e a Figura 16 indicam que a massa específica aparente diminui de 780 kg/m³ para 728 kg/m³ com o aumento do teor de umidade de 9 % b.s. para 20 % b.s., e que a porosidade intergranular, Figura 17 aumenta de 56,3 % para 61.1 % com o aumento do teor de umidade para os mesmos valores acima mencionados. O aumento da porosidade intergranular com o aumento do teor de umidade está de acordo com pesquisadores como CAVALCANTI MATA & SOUZA (1987/1990) e ALMEIDA (1979) que encontraram esse mesmo comportamento da porosidade para o feijão mulatinho e amêndoas de cacau, respectivamente. Já

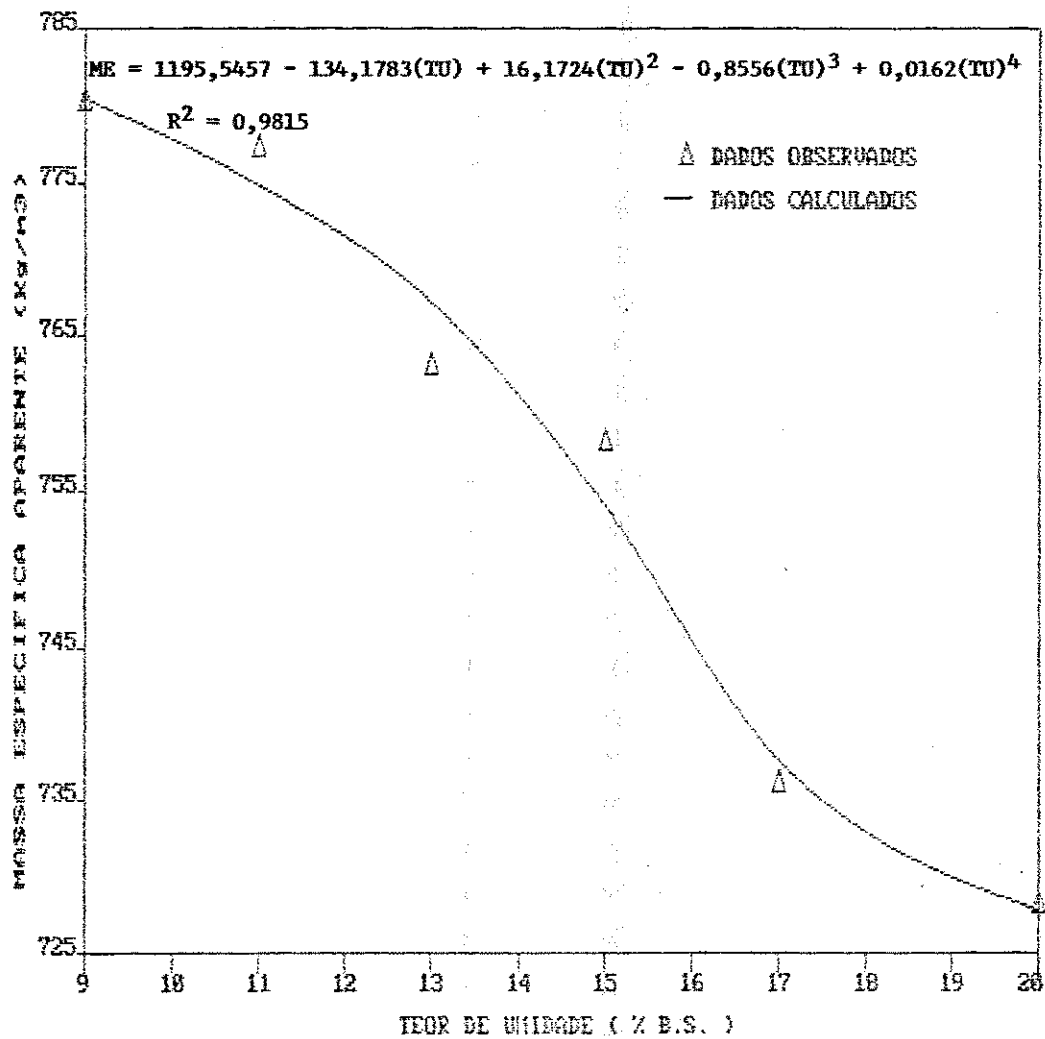


FIGURA 16 - Variação da massa específica aparente do milho em função do seu teor de umidade

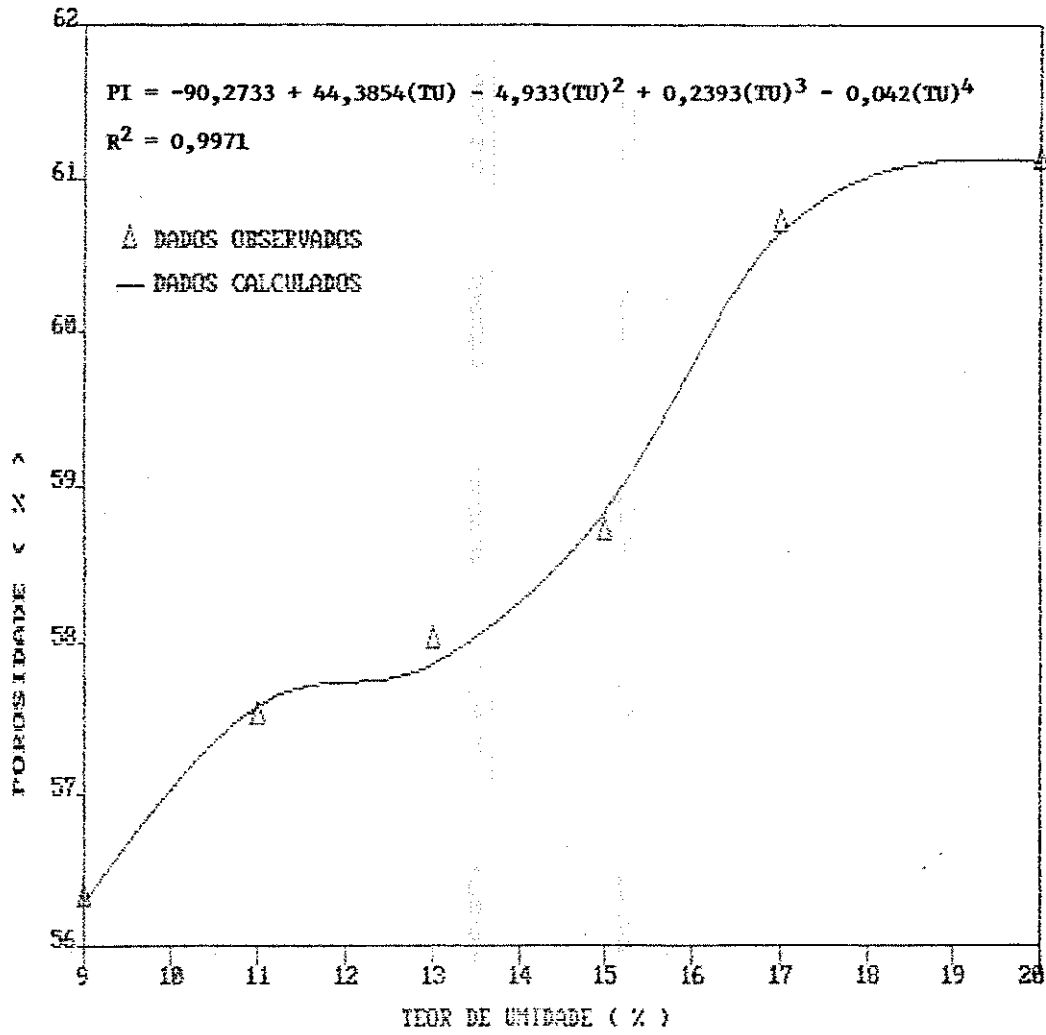


FIGURA 17 - Variação da porosidade intergranular do milho em função do seu teor de umidade

1990) não observaram alterações significativas dessa propriedade física do feijão com o aumento do teor de umidade, no entanto ALMEIDA (1979) encontrou para amêndoas de cacau um comportamento semelhante ao obtido neste trabalho.

TABELA 6 - Variação da massa específica aparente e da porosidade intergranular do milho em função do teor de umidade

Teor de umidade % b.s.	Massa específica aparente (kg/m ³)	porosidade intergranular (%)
9	780	56,3
11	777	57,5
13	763	58,0
15	758	58,7
17	736	60,7
20	728	61,1

4.3. - Angulo de repouso

A Tabela 7 e a Figura 18 mostram que o ângulo de repouso (AR) do milho aumenta de 20,5 para 41,8 para um incremento do teor de umidade (TU) de 9% base seca (%b.s.) para 20% b.s., respectivamente. Este resultado está coerente com a afirmação de MOHSENIN (1978) que observou este mesmo comportamento em seus trabalhos. Tomando-se a massa específica aparente do milho como 750 kg/m³ a 13% b.s., observa-se na Tabela

7 que o ângulo de repouso do milho está em torno de 26°, coerente com o encontrado por Ciesielski et alii, citado por FORTES (1985) que obtiveram para a mesma massa específica aparente um ângulo de repouso do milho de 25°, embora em seu trabalho não se mencione o teor de umidade do produto. REIMBERT & REIMBERT (1979), encontraram um ângulo de repouso do milho de 24,3°, utilizaram uma caixa de vidro transparente para melhor precisão da leitura do lado e altura de grãos, no entanto a massa específica aparente do milho variou de 690 á 705 kg/m³.

TABELA 7 - Ângulo de repouso e coeficiente de atrito médio em função do teor de umidade.

Nº de Ordem	Teor de umidade (%)	ângulo de repouso	desvio padrão	coeficiente de atrito
01	09	20,5	0,212	0,373
02	11	23,0	0,158	0,424
03	13	26,0	0,308	0,487
04	15	30,0	0,234	0,577
05	17	34,0	0,500	0,674
06	20	41,8	0,447	0,894

Estas diferenças encontradas em trabalhos experimentais na determinação do ângulo de repouso, pode ser também atribuída, talvez, a metodologia de determinação empregada ou mesmo as propriedades físicas do produto, uma vez que esta varia com o histórico dos grãos tais como: granulometria, forma e orientação das partículas (PUZZI, 1977).

A Figura 18, mostra ainda os dados experimentais e a equação de regressão polinomial ajustada para determinar o ângulo de repouso em função do teor de umidade dos grãos de milho, observando-se um bom coeficiente de determinação de 99,96%, para a faixa de umidade utilizada e o teste de análise de variância entre os dados experimentais e os calculados, foi significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de "F".

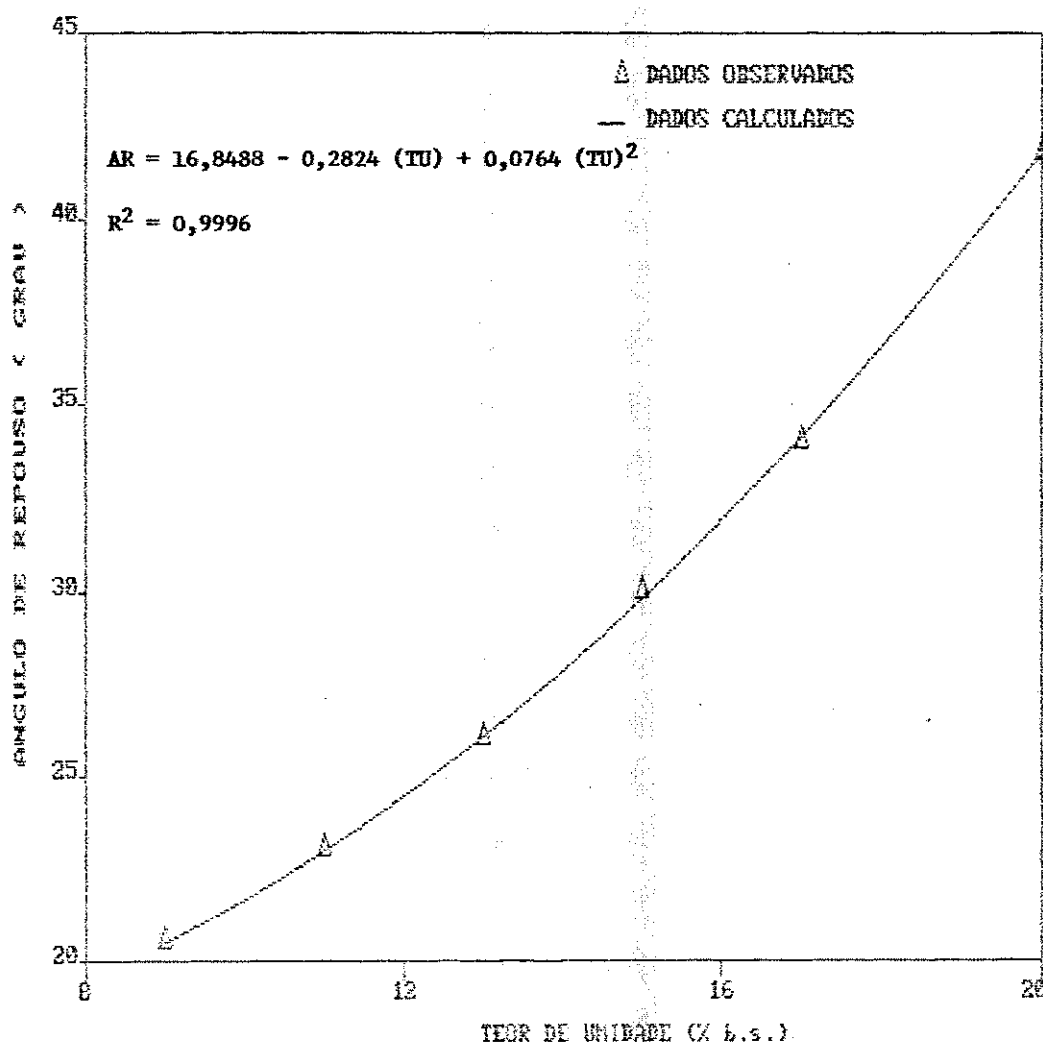


FIGURA 18 - Variação do ângulo de repouso do milho em função do seu teor de umidade

4.4 - Ângulo de atrito interno (grão/grão)

A Tabela 8 apresenta os resultados do experimento realizado para determinação do ângulo de atrito interno do milho em função do teor de umidade. Esta Tabela mostra que o ângulo de atrito interno médio variou de 15,8° para 31,8° quando o teor de umidade aumentou de 9% base seca (%b.s.) para 20% b.s.

O maior ângulo de atrito encontrado neste experimento (31,8°), está próximo ao obtido por REIMBERT & REIMBERT (1979) que encontraram valores variando de 27,3° à 31,33° para uma tensão normal de 0.110 kgf/cm², utilizando uma máquina Hvorsley.

TABELA 8 - Ângulo e coeficiente de atrito interno médio grão-grão em função do teor de umidade.

de em	Teor de umidade (%)	de ângulo de atrito	desvio padrão	coeficiente de atrito
01	09	15,8	0,273	0,282
02	11	17,4	0,548	0,313
03	13	20,1	0,223	0,365
04	15	23,0	0,001	0,424
05	17	26,1	0,223	0,489
06	20	31,8	0,447	0,620

O mesmo autor encontrou ainda valores mínimos do ângulo de atrito interno variando de 25° à 26° para uma tensão de 0,861 kgf/cm², já neste experimento, o ângulo mínimo obtido foi de

15,8° para os grãos de milho com 9% de umidade em base seca e tensões variando de 0,5 à 2 kgf/cm², valores estes, bem inferiores aos encontrados por REIMBERT & REIMBERT. No entanto, CALIL JUNIOR (1984), encontrou um ângulo de atrito interno do milho de 22° para o produto com 13% de umidade em base úmida e 750 kg/m³ de massa específica aparente, usando uma máquina de cisalhamento direto, semelhante a utilizada neste trabalho. Este resultado está coerente com o resultado encontrado em nossos ensaios que foi de 23°, para o mesmo teor de umidade e mesma massa específica aparente.

A Figura 19 mostra os dados experimentais observados e a equação de regressão polinomial ajustada para determinar o ângulo de atrito interno do milho em função do seu teor de umidade. A equação tem um coeficiente de determinação de 99,94% para a faixa do teor de umidade utilizado e a análise de variância entre os dados experimentais e os calculados, mostrou um efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de "F".

A Figura 20 apresenta uma comparação das curvas do ângulo de atrito interno e do ângulo de repouso com a variação do teor de umidade. Observa-se nesta Figura que a curva do ângulo de atrito interno, determinado pela máquina de cisalhamento direto, mantém uma equidistância da curva do ângulo de repouso.

Os valores dos ângulos de repouso foram consistentemente maiores que os ângulos de atrito interno, a

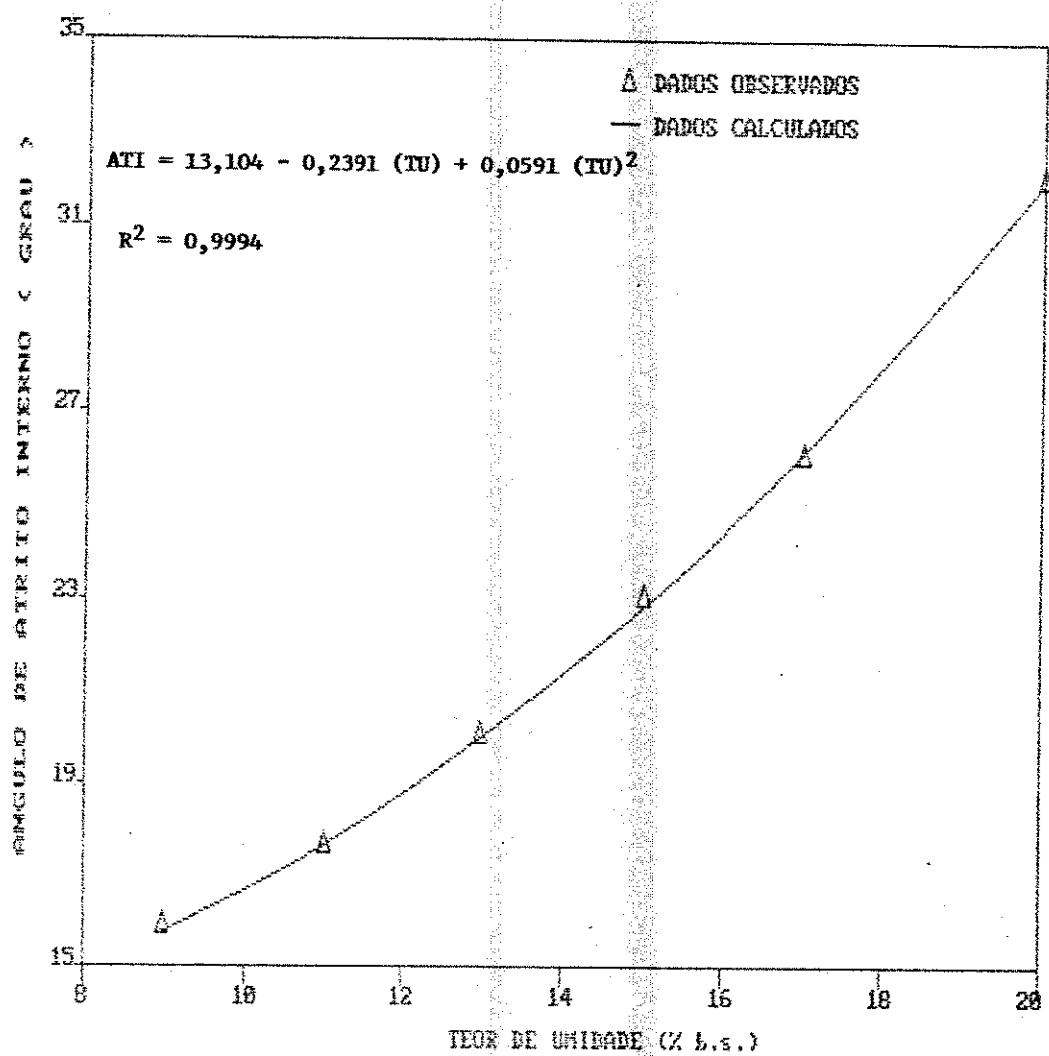


FIGURA 19 - Variação do ângulo de atrito interno (grão-grão) do milho em função do seu teor de umidade

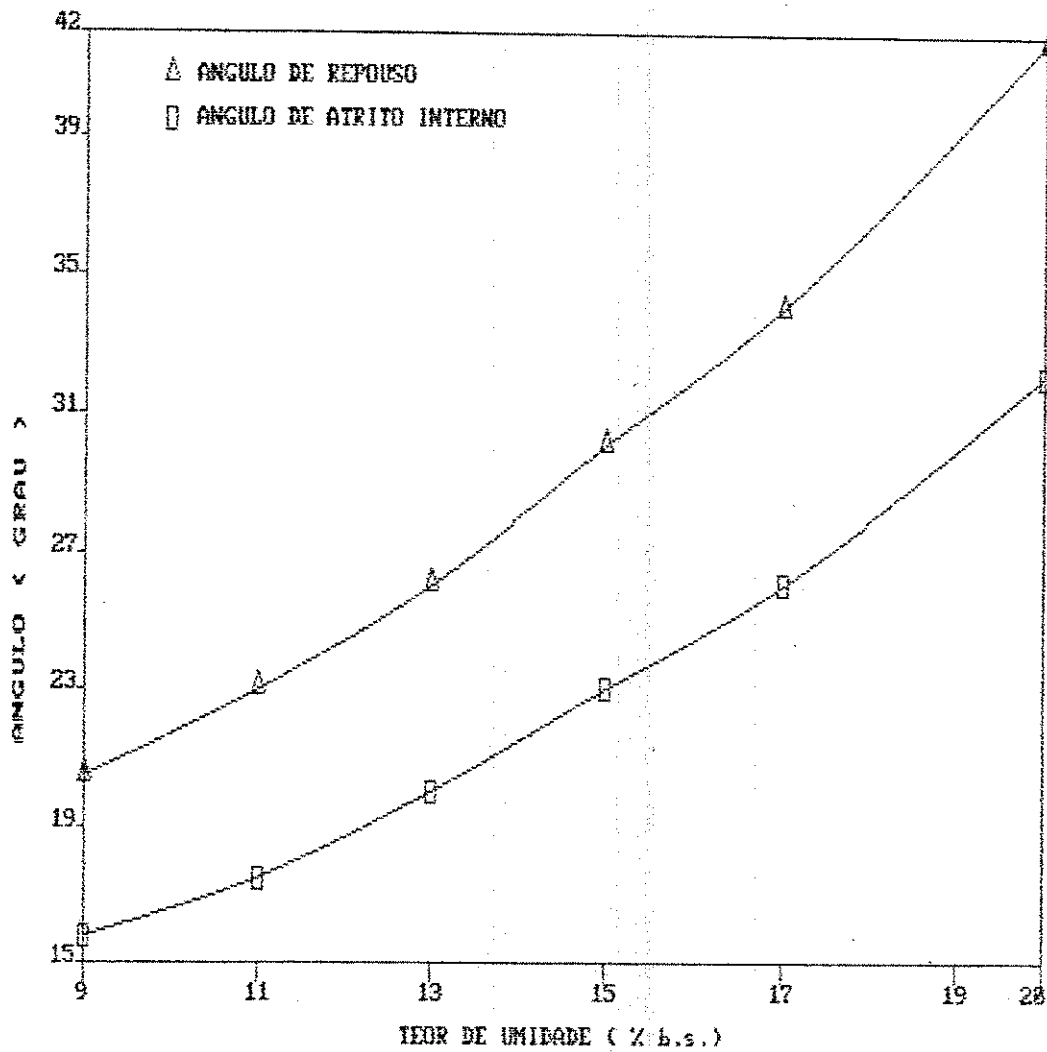


FIGURA 20 - Comparação entre as curvas dos ângulos de repouso e de atrito interno do milho em função do seu teor de umidade

dispersão média entre os ângulos está em torno de 30,5%, para um mesmo teor de umidade, o que vem confirmar as afirmações feitas por CALIL JUNIOR (1984) que diz que pode-se estimar o ângulo de atrito interno do produto, pela determinação do ângulo de repouso.

Com base nos dados determinados experimentalmente, mostrados através da Figura 20, podemos sugerir que ao invés de substituir o ângulo de atrito interno pelo ângulo de repouso, podemos estima-lo em aproximadamente 76,5% do ângulo de repouso, o que nos dá uma boa precisão.

O conhecimento do teor de umidade e a granulometria dos grãos, é muito importante, pois estas propriedades físicas influenciam diretamente no ângulo de atrito interno do produto e frequentemente na determinação dos esforços nas paredes dos silos.

4.5 - Ângulo de atrito grão-parede

Na Tabela 9 consta os dados experimentais do ângulo de atrito do milho com a parede de resina poliéster reforçada com fibra de vidro, para vários teores de umidade.

Observa-se nesta Tabela que o ângulo de atrito grão/parede, variou de 9.8° para 20.25° para um aumento respectivo do teor de umidade do milho de 9% b.s. para 20% b.s. A curva de regressão polinomial que representa esta variação é mostrada na Figura 21 com um coeficiente de variação de 0,9826,

sendo a análise de variância entre os dados experimentais e os calculados, significativa ao nível de 1% de probabilidade pelo teste "F". Segundo CALIL JUNIOR (1990) o coeficiente de atrito grão/parede do milho com paredes lisas varia segundo as normas internacionais de 0,25 á 0,40 e REIMBERT & REIMBERT (1979) encontraram o ângulo de atrito grão/parede (ANG) para o milho em chapa de aço de 18,16° à 18°. Para 13% base seca o valor do ângulo de atrito encontrado é de 12,35° e um coeficiente de atrito grão/parede de 0,210, valor este, 0,04 inferior a Norma Britânica para paredes lisas.

TABELA 9 - Ângulo e coeficiente de atrito médio grão/parede em função do teor de umidade.

Nº de Ordem	Teor de umidade (%)	ângulo de atrito	desvio padrão	coeficiente de atrito
01	09	9,80	8,36	0,172
02	11	10,37	4,47	0,183
03	13	11,86	4,18	0,210
04	15	12,35	8,94	0,219
05	17	15,60	7,07	0,279
06	20	20,25	8,94	0,369

Esta diferença pode ser atribuída a baixa rugosidade da resina poliéster, bem como ao próprio aparelho utilizado, que foi de confecção simples. Talvez utilizando-se o aparelho de cisalhamento direto se consiga melhores resultados ou então o uso do aparelho proposto por JENIKE (1980), no entanto as determinações

e as possíveis diferenças entre os valores obtidos pelos três aparelhos ainda precisariam ser investigados. Segundo MOHSEININ (1978) como a rugosidade dos materiais destinados às paredes dos silos variam muito e, sendo uma propriedade importante para as determinações dos esforços sobre as paredes e fundo dos silos, o autor recomenda ensaios exaustivos para obter com maior precisão os referidos ângulos.

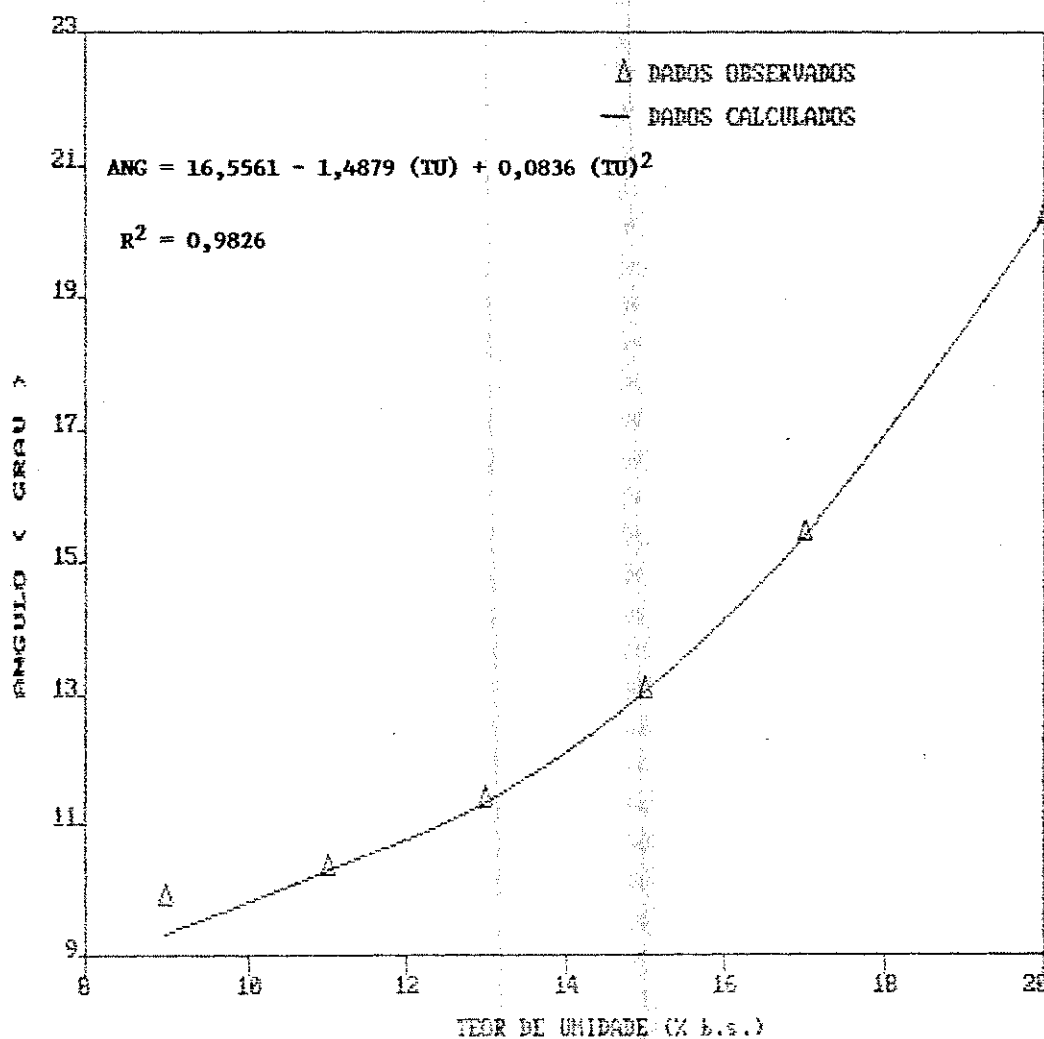


FIGURA 21 - Variação do ângulo de atrito grão-parede do milho em função do seu teor de umidade

4.6 - Pressões horizontais e verticais exercidas no silo

As Tabelas 10 à 12 mostram as pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente no silo protótipo, na carga e na descarga do milho, após 24 horas; na carga e na descarga do milho após 48 horas; e na carga e na descarga imediata. Nota-se nessas Tabelas que os diafragmas instalados imediatamente do lado esquerdo e do lado oposto à boca de descarga do material, não registram sobrepressões. Este fato pode estar associado ao talude formado pelos grãos como mostra a Figura 22. A relação altura/lado deste silo é 1.5, silo considerado baixo, portanto nestes casos os maiores esforços são no sentido vertical o que confirma as afirmações feitas por Reimbert citado por BAETA et alii (S.D.), que silos baixos, cujo diâmetro é menor ou igual a $2.H.t_0$ ($45 - \emptyset/2$), o fenômeno de sobrepressões nos processos de carga e descarga, são praticamente inexistentes, no entanto, RAVENET (1974), determinou que para cada tipo de silo ou relação altura/lado, tem que se aplicar um coeficiente de sobrepressão (E). O autor tomando como base a teoria de Janssen e para um silo com a relação altura/lado igual a 1.5, com descarga excêntrica, propôs um coeficiente de sobrepressão para o lado oposto a boca de saída de 1.48 e para o lado próximo a boca de saída um coeficiente de sobrepressão que varia de 0.74 a 1.67.

Nas Tabelas 10, 11 e 12 observa-se que nos diafragmas instalados a altura de 0.75 m ocorreu uma sobrepressão variando de 10,3% , 9,1% e 36,4%, respectivamente no silo do lado direito da boca de descarga do material, fato este, não esperado, uma vez

que, este fato não se repetiu do lado esquerdo, já que supõem-se que o silo é simétrico. Fatos semelhantes foram verificados por Pieper citado por RAVENET (1977) que em seus ensaios observou, em descarga excêntrica, que as maiores pressões ocorriam no lado próximo a boca de saída, contrariando as afirmações mais aceitas de que as pressões aumentam do lado oposto a boca de descarga. Ainda na Tabela 11, onde o silo foi descarregado 48 horas após ser carregado com milho, observou-se do lado da boca de saída do material uma sobrepressão de 28% e 71%, as alturas de 0.75 e 1,25 metros, respectivamente. Cabe ressaltar que os diversos autores sempre se reportam ao comportamento das pressões em silo onde a boca de descarga é centrada ou excêntrica só que a saída do material se dá pelo fundo do silo, neste trabalho, as pressões verificadas experimentalmente foram realizadas com uma boca de descarga lateral que pode minimizar os impactos da sobrepressão uma vez que há a formação de um talude correspondente ao ângulo de repouso do material que fica retido. conseqüentemente não havendo deslizamento de grãos pelo perímetro da parede do protótipo atingido pelo talude, minimizando assim os impactos (Figura 22). Uma inconveniência da existência deste talude é a quantidade de material que deixará de ser descarregado por gravidade, necessitando, neste caso, de equipamento ou mão de obra suplementar.

Os valores encontrados de sobrepressão, neste trabalho, são setorizados contrariando os valores encontrados por BAETA et alii (S.D.) que trabalhando na determinação de esforços das

pressões laterais em silo baixo, cuja relação altura/diâmetro era inferior a 1.0, e com descarga excêntrica, encontrou um coeficiente de sobrepressão de 4.2, com relação as pressões laterais estáticas. O mesmo autor afirma que em silos baixos os coeficientes de sobrepressão são altos em todo o silo.

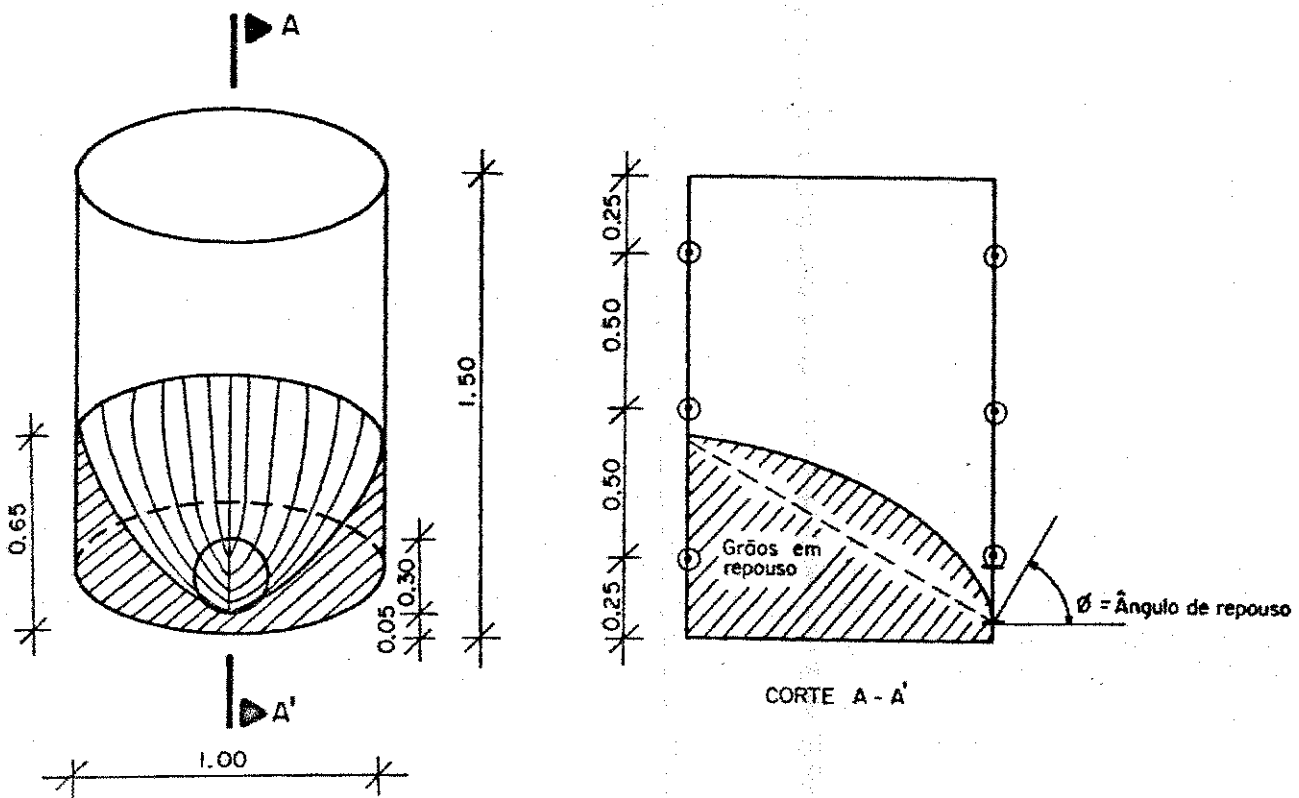


FIGURA 22 - Formação do talude de grãos após a descarga

TABELA 10 - Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente no silo protótipo após 24 horas do silo carregado. (kgf/m²).

Localização dos manômetros										
Altura do manômetro (m)	lado da abertura		lado direito		lado esquerdo		lado oposto		fundo	
	Phi	Ph24	Phi	Ph24	Phi	Ph24	Phi	Ph24	Pvi	Pv24
0.25	40.1	37.6	40.1	40.1	55.2	50.2	50.0	50.2	120.0	129.0
0.75	75.2	82.8	67.7	72.5*	85.3	99.3	95.3	110.3	120.0	129.0
1.25	-	-	80.3	90.3	45.1	50.2	70.2	80.3	120.0	129.0

Phi - Pressão lateral verificada após a carga do silo

Ph24 - Pressão lateral verificada após o material estabilizado em 24 horas

Pvi - Pressão vertical verificada após a carga

Pv24 - Pressão vertical verificada após o material estabilizado em 24 horas

* - Sobrepressão ocorrida de 72.5 para 80.0 kgf/m².

As Tabelas 13 a 24 mostram as pressões laterais obtidas experimentalmente e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, utilizando-se os dados de ângulo de repouso, coeficiente de atrito interno (grão/grão) e grão/parede do milho a 13% de base seca encontrado neste trabalho, para as 4 localizações simétricas dos manômetros no silo e as alturas de

0.25, 0.75 e 1.25 metros, e para as três situações de carga e descarga do milho. As Tabelas 13 a 16 mostram as pressões laterais na carga e na descarga após 24 horas do silo carregado, as Tabelas 17 a 20 apresentam as pressões laterais na carga e na descarga após 48 horas do silo carregado e as Tabelas 21 a 24 mostram as pressões na carga e na descarga feita logo após o silo carregado com milho.

TABELA 11 - Pressões verticais e horizontais obtida experimentalmente no silo protótipo na carga e na descarga do milho após 48 do enchimento do silo. (kgf/m²).

Localização dos manômetros										
Altura do manômetro (m)	lado da abertura	lado direito	lado esquerdo	lado oposto	fundo					
	Phi	Ph48	Phi	Ph48	Phi	Ph48	Phi	Ph48	Pvi	Pv48
0.25	30.2	60.0*	29.1	32.6	45.1	42.6	45.1	42.6	126.0	122.0
0.75	65.7	70.0*	53.1	55.0**	75.2	82.8	65.2	76.2	126.0	122.0
1.25	-	-	80.2	85.3	45.1	42.6	80.2	80.2	126.0	122.0

Ph48 - Pressão lateral verificada após o material estabilizado em 48 horas

Pv48 - Pressão vertical verificada após o material estabilizado em 48 horas

* - Sobrepressão ocorrida de 70 para 90 e de 35 para 60 kgf/m², respectivamente.

** - Sobrepressão ocorrida de 55.0 para 60.0 kgf/m².

TABELA 12 - Pressões verticais e horizontais obtida experimentalmente no silo protótipo na carga e descarga simultânea do milho. (kgf/m²).

Localização dos manômetros					
Altura do manômetro (m)	lado da boca	lado direito	lado esquerdo	lado oposto	fundo
	Phi	Phi	Phi	Phi	Pvi
0.25	30.0	27.6	45.1	60.2	129.0
0.75	65.2	55.0*	75.2	60.2	129.0
1.25	-	80.3	45.1	80.3	129.0

* - Sobrepressão ocorrida de 55.0 para 75.0 kgf/m².

As Tabelas mostram que as pressões laterais obtidas experimentalmente são inferiores as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert . A profundidade de 0,25 metros as pressões laterais variam de 27,60 kgf/m² a 60 kgf/m² com situações mais frequentes em torno de 43 kgf/m² o que é praticamente a metade da encontrada pela equação de Janssen que é de 87,3 kgf/m², sendo a de Reimbert o dobro da de Janssen. A profundidade de 1,25 metros essas disparidades aumentam . Os valores experimentais variam de 45,1 kgf/m² a 90 kgf/m² e os valores da equação de Janssen estão em torno de 359 kgf/m² o que representa de 4 a 8 vezes maior.

Estas situações não são de estranhar uma vez que RAVENET (1979) descreve uma discrepância acentuada entre os

valores encontrados por Janssen e Platonov na ordem de 400% em algumas situações. Este fato também foi observado em menor proporção por BAETA et alii (S.D.) que encontrou valores das pressões laterais à altura de 1.5 m em torno de de 2 vezes menor quando comparada com a proposta pela equação de Janssen para silos baixos. Estes fatos indicam que ainda exaustivos testes devem ser realizados no sentido de se averiguar melhor essas ocorrências, e que os ensaios devem ser repetidos usando-se equipamentos mais precisos.

As Figuras 23 a 26 apresentam as curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert nas 4 localizações simétricas dos manômetros no silo, para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo ser carregado. As Figuras das pressões laterais nas demais situações de carga e descarga do milho estão no Apêndice B.

As evoluções da estabilização das pressões laterais obtidas experimentalmente durante 24 e 48 horas após a carga do silo, são mostrados no Apêndice C.

TABELA 13 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental oposto a descarga carga estática descarga		P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-
0.25	50.00	50.15	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	95.30	110.34	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	70.21	80.25	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

TABELA 14 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental lado esquerdo da descarga carga estática descarga		P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-
0.25	55.17	50.15	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	85.26	99.30	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	45.10	50.15	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

TABELA 15 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)		P _n experimental lado da descarga carga estática descarga		P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	40.10	37.60	37.60	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	75.23	82.75	82.75	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	-	-	-	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 16 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 24 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)		P _n experimental lado direito da descarga carga estática descarga		P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	40.10	40.10	40.10	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	67.70	72.70	80.25	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	80.25	90.28	90.28	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 17 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 48 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental lado direito da descarga carga estática descarga			P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	29.10	32.60	32.60	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	53.10	55.17	60.18	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	80.25	85.26	85.26	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 18 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 48 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental lado da descarga carga estática descarga			P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	30.15	35.10	60.00(*)	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	65.20	70.21	90.28(*)	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	-	-	-	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 19 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto a descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 48 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental oposto a descarga carga estática descarga			P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	45.10	42.60	42.60	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	65.20	76.23	76.23	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	80.25	80.25	80.25	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 20 - Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, após 48 horas do carregamento. (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental lado esquerdo da descarga carga estática descarga			P _n Janssen	P _n Reimbert
0.0	-	-	-	-	-
0.25	45.10	42.60	42.60	87.30	162.41
0.50	-	-	-	166.07	284.22
0.75	75.23	82.75	82.75	237.14	377.92
1.00	-	-	-	301.21	451.54
1.25	45.10	42.60	42.60	359.10	510.43
1.50	-	-	-	414.29	558.27

TABELA 21- Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m^2).

Profundidade (m)	P_h experimental		P_h Janssen	P_h Reimbert
	carga	descarga		
0.0	-	-	-	-
0.25	27.60	27.60	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	55.17	75.23	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	80.25	80.25	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

TABELA 22- Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m^2).

Profundidade (m)	P_h experimental		P_h Janssen	P_h Reimbert
	carga	descarga		
0.0	-	-	-	-
0.25	30.09	30.09	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	65.20	65.20	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	-	-	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

TABELA 23- Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental		P _n Janssen	P _n Reimbert
	lado oposto a carga	descarga		
0.0	-	-	-	-
0.25	45.10	45.10	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	60.18	60.18	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	80.25	80.25	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

TABELA 24- Comparação entre as pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert após a carga e descarga do material (kgf/m²).

Profundidade (m)	P _n experimental		P _n Janssen	P _n Reimbert
	lado esquerdo a carga	descarga		
0.0	-	-	-	-
0.25	45.10	45.10	87.30	162.41
0.50	-	-	166.07	284.22
0.75	75.23	75.23	237.14	377.92
1.00	-	-	301.21	451.54
1.25	45.10	45.10	359.10	510.43
1.50	-	-	414.29	558.27

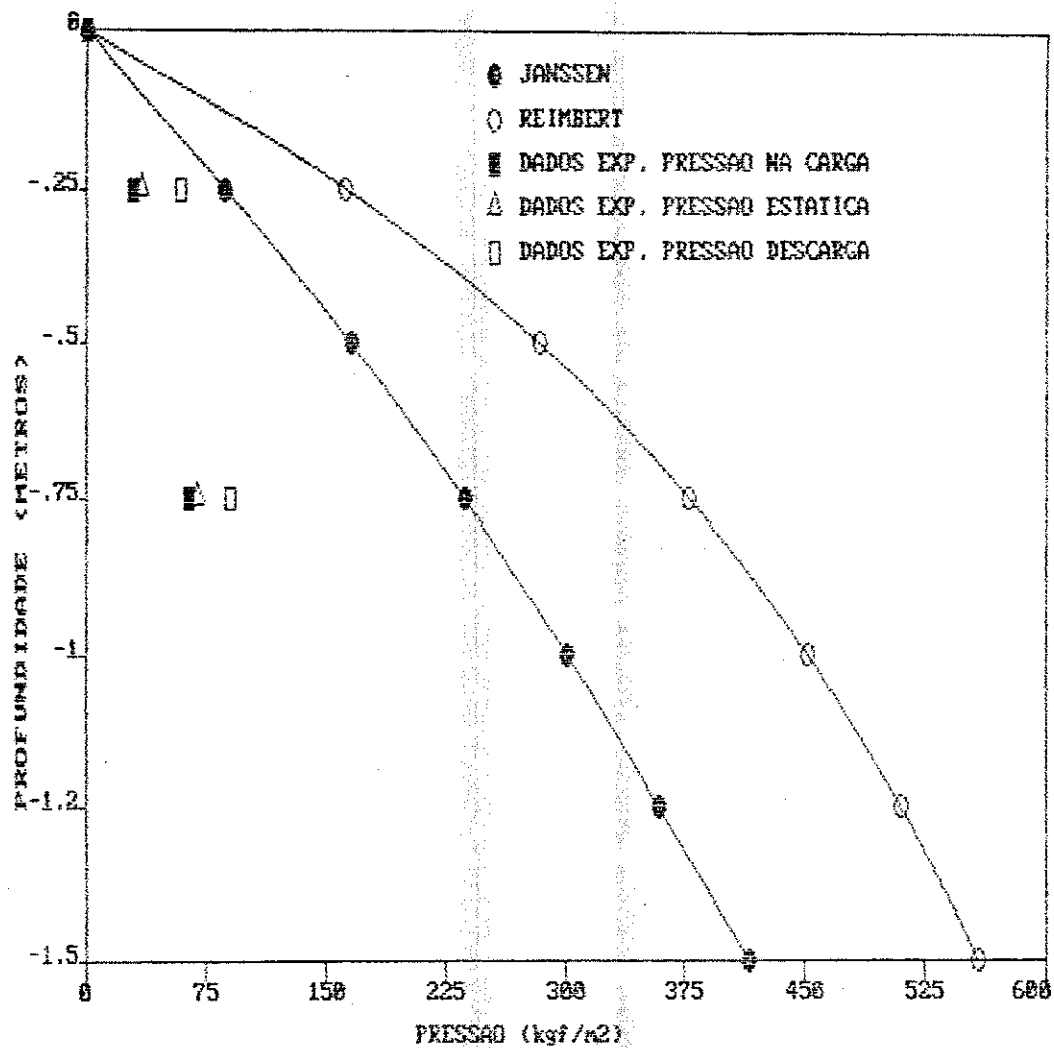


FIGURA 23 - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga do silo e as proposta pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.

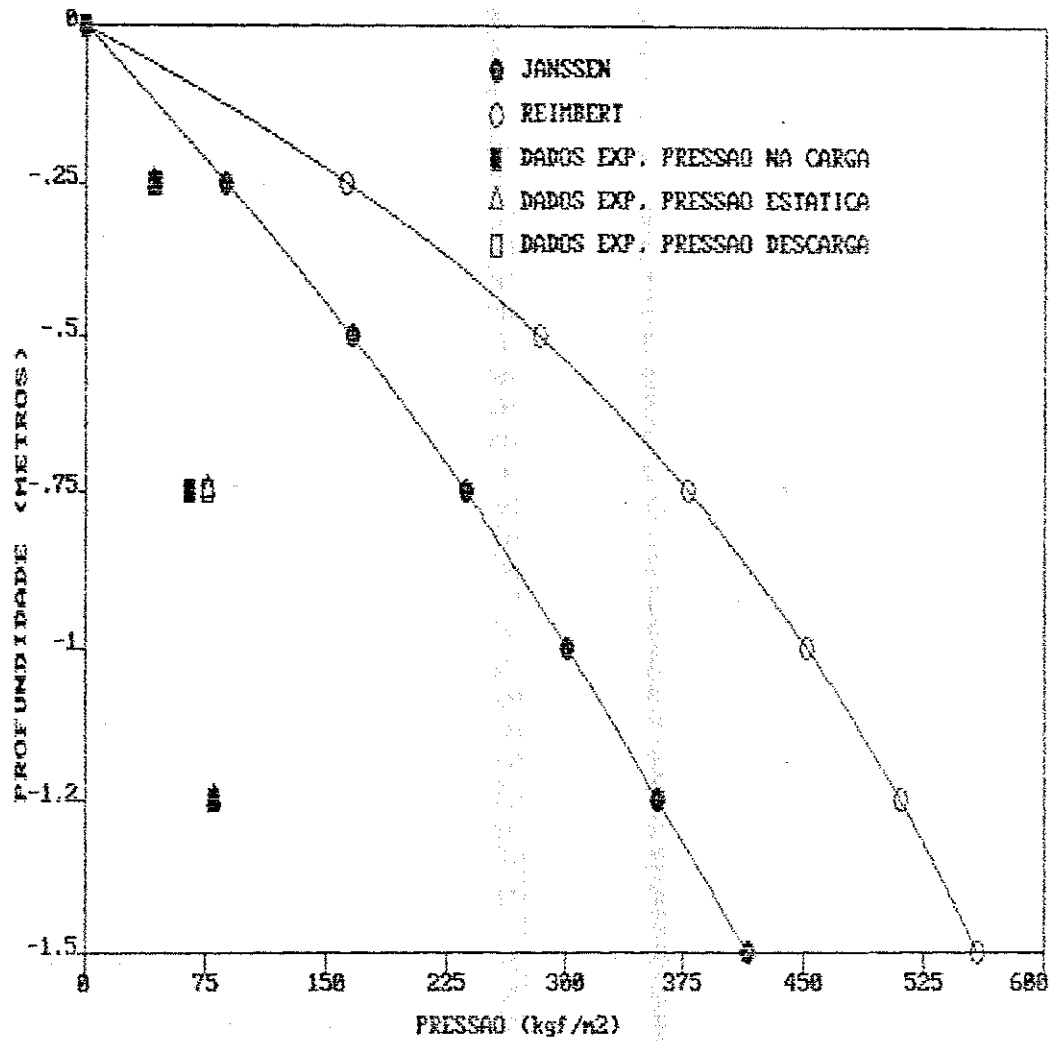


FIGURA 24 - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.

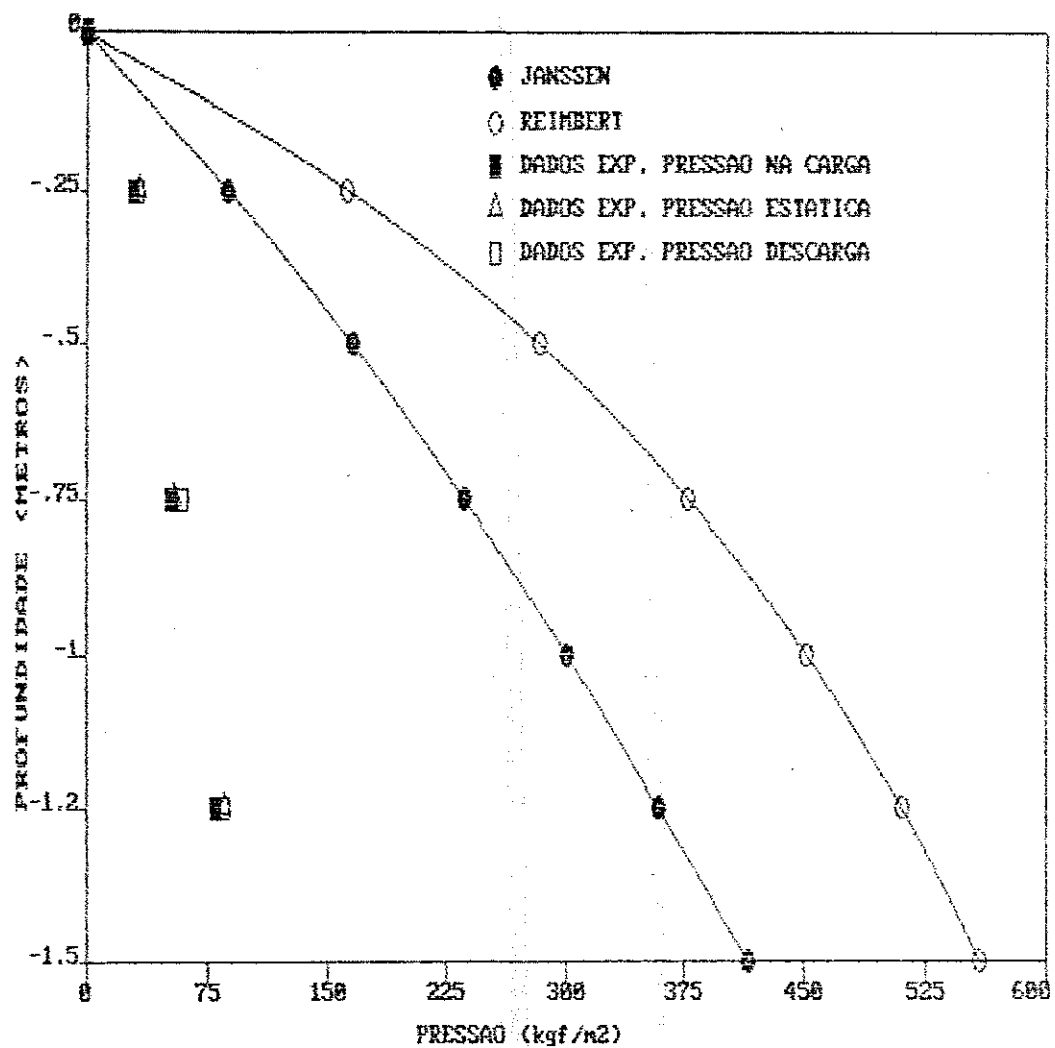


FIGURA 25 - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.

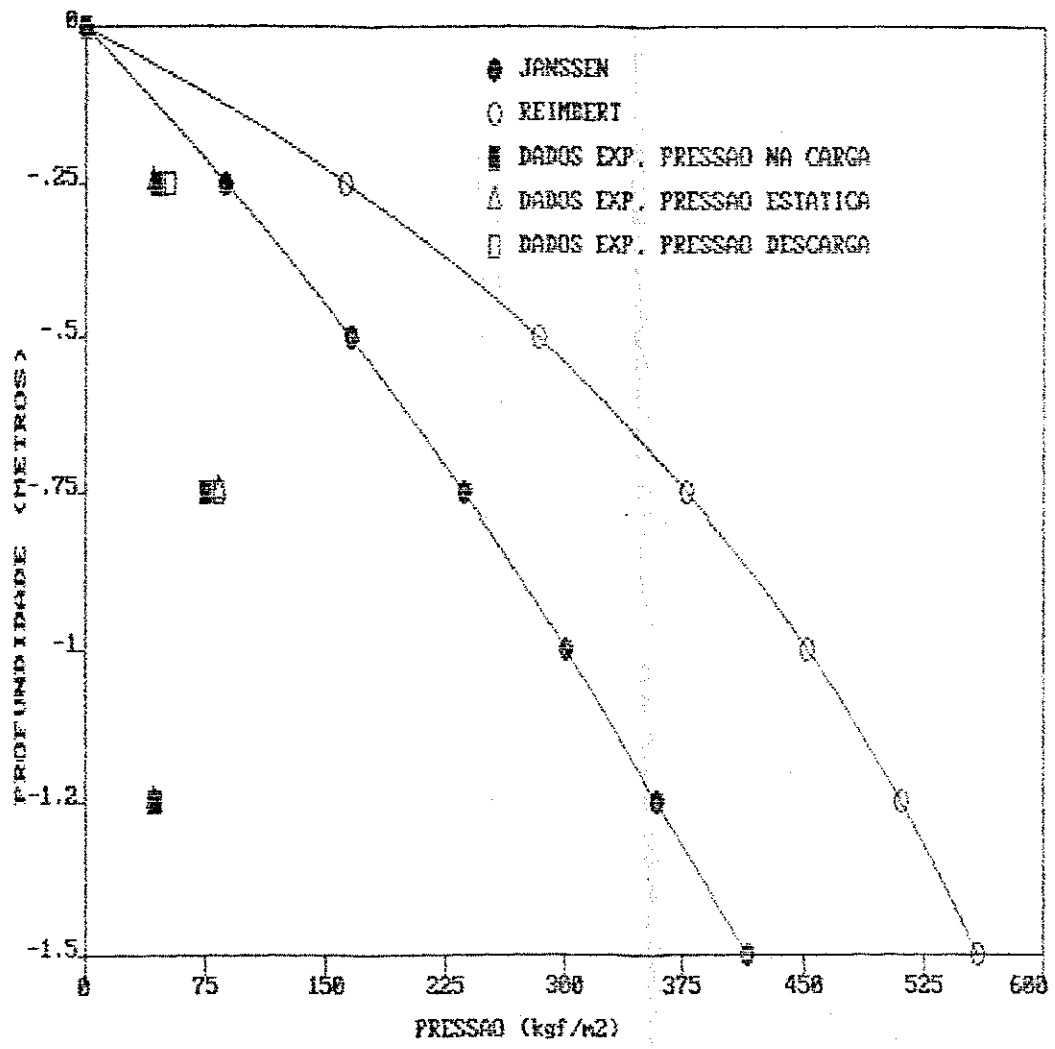


FIGURA 26 - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo a descarga do silo e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert para uma descarga do milho feita após 48 horas do silo carregado.

5. CONCLUSÕES

Para as condições experimentais em que este trabalho foi realizado e com os dados obtidos concluiu-se que:

1. Os esforços máximos a tração e compressão da resina poliéster reforçada com fibra de vidro variam de 544 a 1.119,7 kgf/m² e 405,05 a 1.117,34 kgf/m², respectivamente.

2. Os esforços máximos a flexão diminuem de 2.618,5 para 1.394,2 kgf/m² com o aumento da espessura da fibra de vidro de 1,5 para 6,1 mm.

3. A massa específica aparente diminuiu de 780 kg/m³ para 728 kg/m³ com o aumento do teor de umidade de 9% para 20% base seca.

4. A porosidade intergranular, aumenta de 56,3% para 61,1% com o aumento do teor de umidade de 9% b.s. para 20% b.s.

5. O ângulo de repouso aumenta de 20,5° para 41,8° para o incremento do teor de umidade de 9% base seca para 20% base seca.

6. O coeficiente de atrito interno (grão/grão) variou de 0,282 para 0,620 quando o teor de umidade aumentou de 9% base seca para 20% base seca.

7. O coeficiente de atrito grão/parede variou de 0,172 para 0,369 para um aumento do teor de umidade de 9% base para 20% base seca.

8. Que o ângulo de atrito interno (grão/grão) pode ser estimado em 76,5% do ângulo de repouso.

9. As pressões horizontais obtidas experimentalmente são inferiores às propostas pelas equações de Janssen e Reimbert.

10. Nas operações de descarga do milho ocorreram sobrepressões principalmente do lado direito da boca de descarga variando esta sobrepressão de 9,1 a 36,4 % .

Para futuros trabalhos sugere-se que:

1. Um aprimoramento dos manômetros levando-se em consideração a elasticidade da borracha.

2. Confeção dos corpos de prova com maior homogeneidade.

3. Elaboração de técnicas construtivas do protótipo de modo a se obter silos de espessuras mais uniformes.

4. Determinação das pressões através de células de pressão.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AIRY, W. The pressure of grain; minutes of proceedings. Institution of Civil Engineers, London: v.131, p.347-358, 1897.
- ALBA Indústrias químicas - Plásticos reforçados com fibra de vidro na fabricação de equipamentos industriais resistentes à corrosão. S.D., 44p.
- ALMEIDA, B.V. Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*, L.) Viçosa: UFV, 1979. 70p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- BAETA, F.C. Pressões máximas na lateral e no fundo dos silos verticais com relação às operações de carga-descarga. Viçosa: UFV, 1980. 49p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1980.
- BAETA, F.C. Desenvolvimento e análise de um silo graneleiro com paredes de madeira compensada e sistema de contenção lateral metálico. Viçosa, (MG): Universidade Federal de Viçosa, S.D., 17p.
- BRUBAKER, J.E., POS, J. Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. Transactions of the ASAE. p.53-55, 1965.
- CALIL JUNIOR, C. Silos de madeira. São Carlos: EESC, 1975. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1975.

CALIL JUNIOR, C. Sobrepressões em las paredes de los silos para almacenamiento de produtos pulverulentos cohesivos. São Carlos: EESC, 1984, 184p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1984.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M., FERNANDES FILHO, J.G. Determinação da porosidade de sementes de mamona e algaroba. Revista Nordeste-
na de Armazenagem, Campina Grande-Pb, v.1, n.1, p.55-64, 1984.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M., SOUZA, E.B. Determinação da porosidade e da massa específica aparente de feijão mulatinho em situações simuladas de secagem e armazenagem. Revista Nordeste-
na de Armazenagem. Campina Grande-Pb., v.4, n,1, p.26-41, 1987/1990.

CULZONI, R.A.M., Características do bambú e sua utilização como material alternativo no concreto. Rio de Janeiro:PUC, 1986. Dissertação (Mestrado) - Pontifca Universidade Católica, 1986.

FORTES FILHO, J. Uma introdução ao estudo dos silos. São Carlos:EESC, 1985. 427p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1985.

GARG, R.M. - Maximum pressures of granular materials in silos. Indian Concrete Journal. p. 487-493, Dec. 1972, p. 101-106 e 111-112, março 1973.

GHAVAMI, K., VAN HOMBEECK, R. Application of bambu as a construction material. In: SIMPOSIO LATINO-AMERICANO DE RACIONALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO. 1981, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. p.49-66.

- GHAVAMI, K., VELOSO, R.F.R, Análise macroscópica do bambu e comportamento mecânico das fibras de coco. Rio de Janeiro:PUC, 1985.
- JANSSEN, H.A. Experiments on grain pressures in silos. Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift: v.39, Aug.31. Ano 1895. p.1045-1049.
- JENIKE, A.W. Effect of solids flow propertiers and hopper configuration on silo londs. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1980, San Francisco - USA, 1980.
- KETCHUM, M.S. The desing of walls, bins and grain elevators. New York. The Engineering News Publishing Company, 1919. 356p.
- KRAMER, H.A. Factors influencing the desing of dulk storage bins for rough rice: Agricultural Engineering. v.25, p.459-463, 1944.
- LORENZEN, C., LAMOURIA, L.H. Hydraulic handling of fruit in processing operations. Agricultural Engineering. v.5, n.45, p. 258-259,262-263, 1964.
- MOHSENIN, N.N. Phisical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1978. 734p.
- MOHSENIN, N.N. Thermal propriertiers of foods and agricultural materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980. 407p.
- PFEIL, W. Estruturas de aço. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e

Científicos, 1976. 483p.

PRADO, E.P. Secagem de sementes de cacau em camadas finas, a sessenta e oitenta graus Celsius e variação de porosidade durante o processo. Viçosa:UFV, 1978. 31p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1978.

PUZZI, D. Manual de armazenamento de grãos; armazéns e silos. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1977. 405p.

RABELLO, M., CARVALHO, L., BATISTA W., MEDEIROS T. Desenvolvimento de compósitos de poliéster insaturado com fibras de sisal e de vidro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS, 1, 1991, São Paulo. Anais... São Paulo: p.439-443, 1991.

RAVENET, J. Silos; deformaciones, fallas, explosiones, prevención de accidentes. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1978. 364p.

RAVENET, J.C. Silos; teoría, investigación, construcción. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1977. 381p.

REIMBERT, M., REIMBERT, A. Silos: Teorias e prática. Buenos Aires: Editorial Américalee. 1979. 463p.

STEWART, B.R. Effect of moisture content and specific weight on internal-friction properties of sorghum grain. Transactions of the ASAE. v.2, n.11, p.260-266, 1968.

STEWART, B.R., HUSAIN, Q.A., KUNZE, O.R. Friction coefficient of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces. ASAE,

Saint Joseph, Michigan, Paper Nº 67-918, 1967.

TAYLOR, D.W. Fundamentals of soil mechanics. New York:John Wiley & Sons. 1948. 367p.

TURITZIN, A.M. Dinamic pressure of granular material in deep bins
proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal
of the Structural Division** v.85, n.2, p.49-73, 1963.

A P E N D I C E A

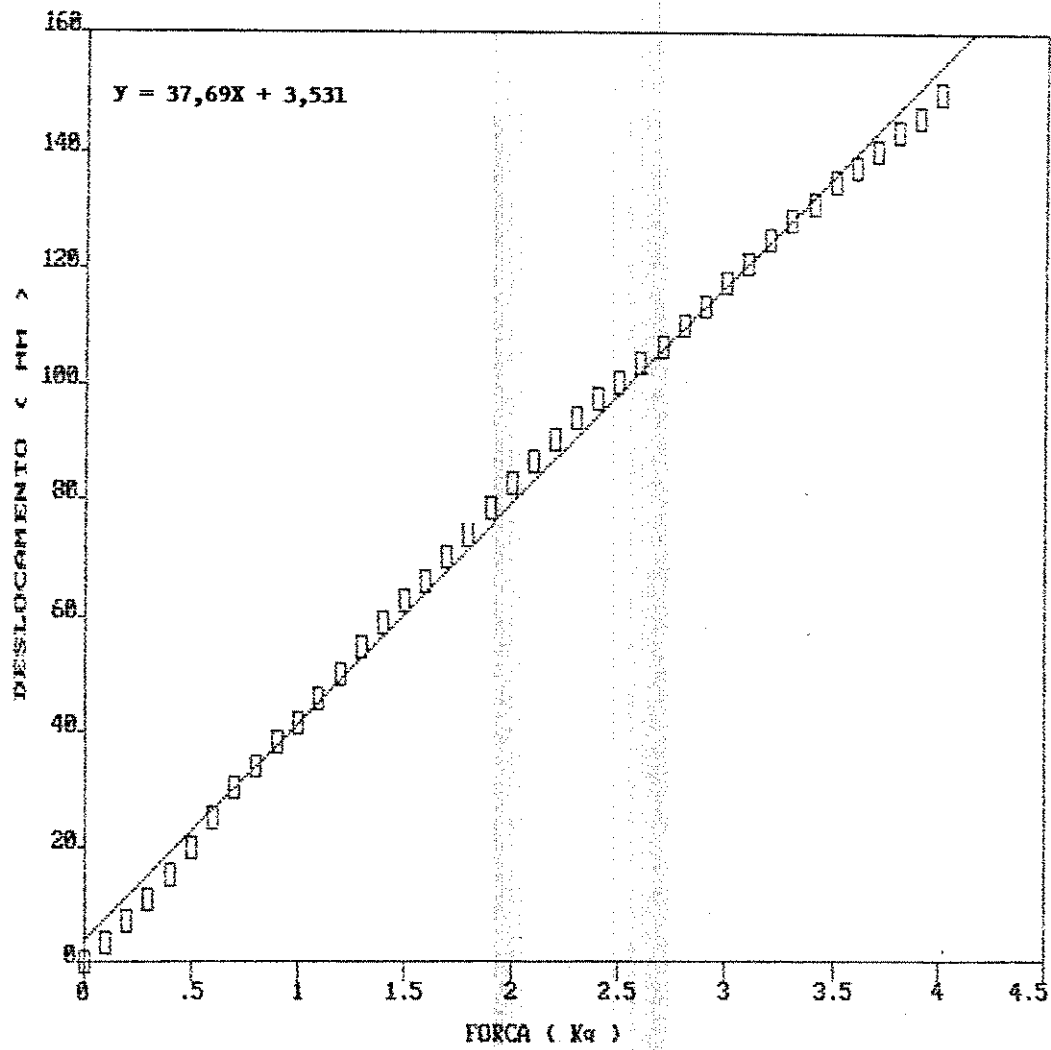


FIGURA 1A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,75m e do lado da descarga do silo.

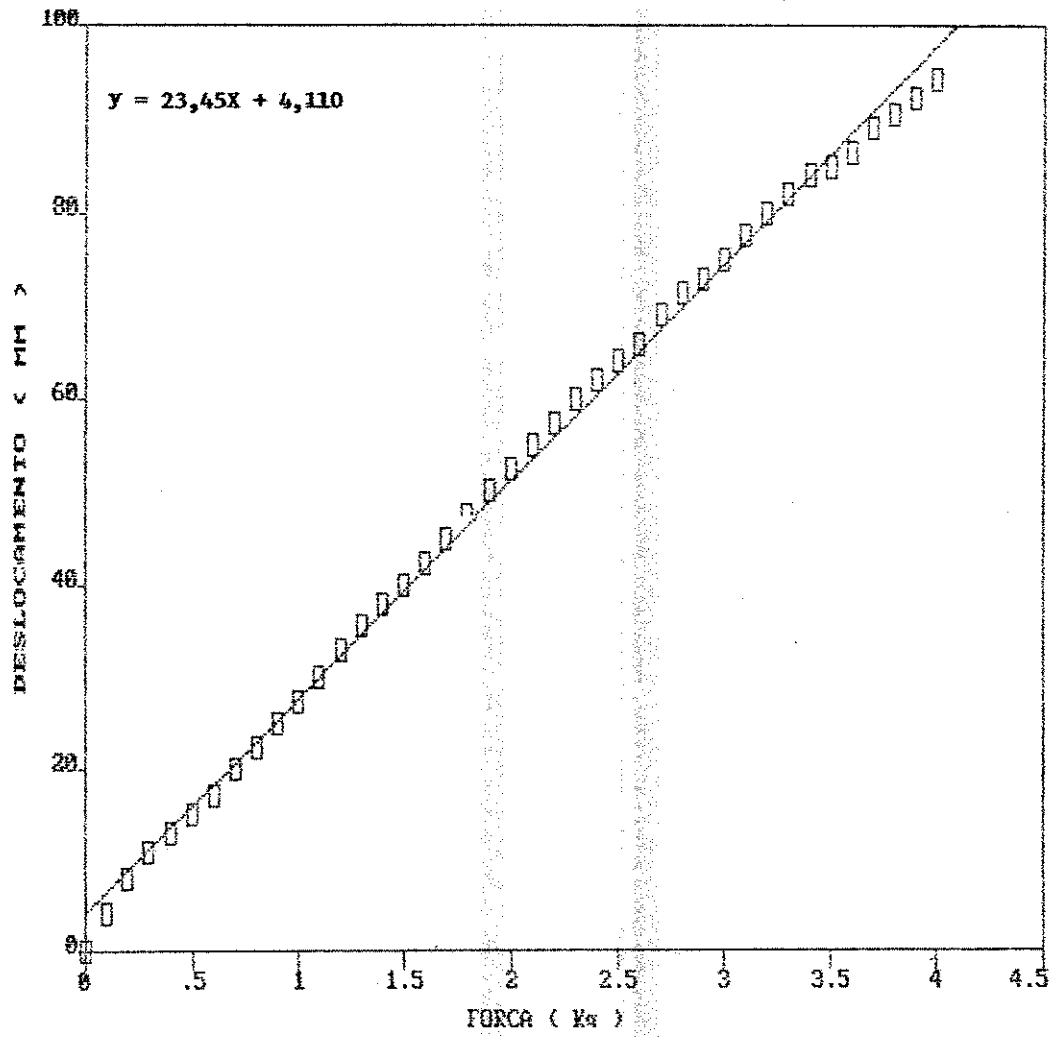


FIGURA 2A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 1,25m e do lado da descarga do silo.

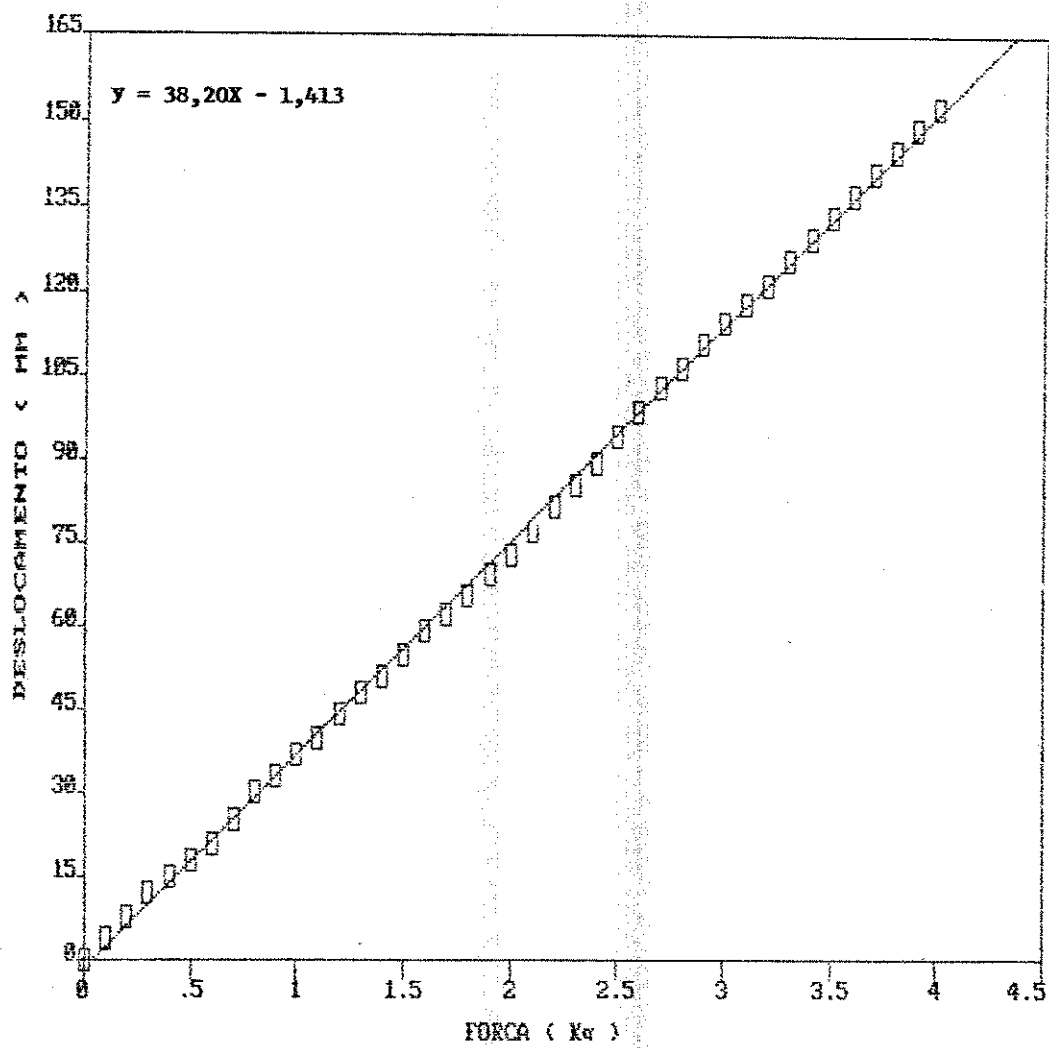


FIGURA 3A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,25m e do lado direito da descarga do silo.

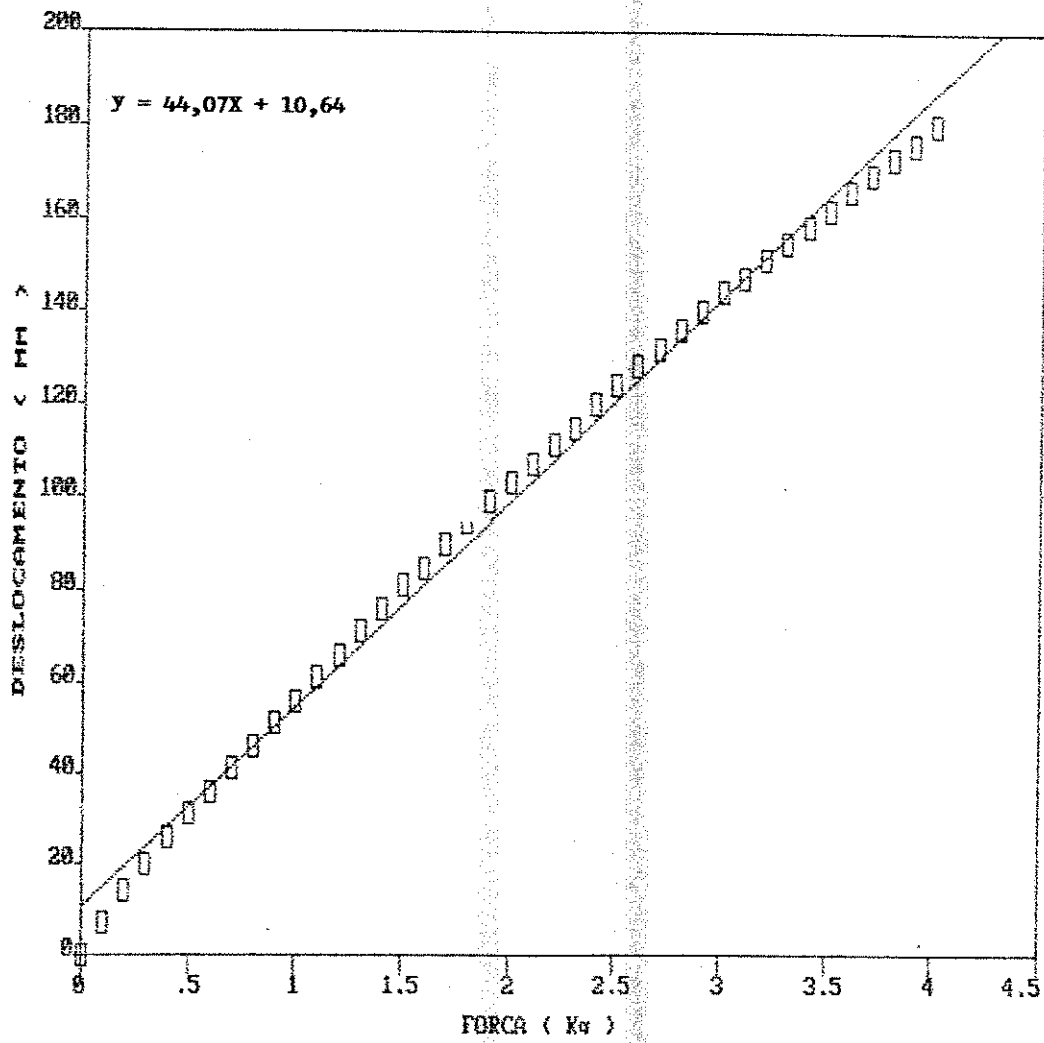


FIGURA 4A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,75m e do lado direito da descarga do silo.

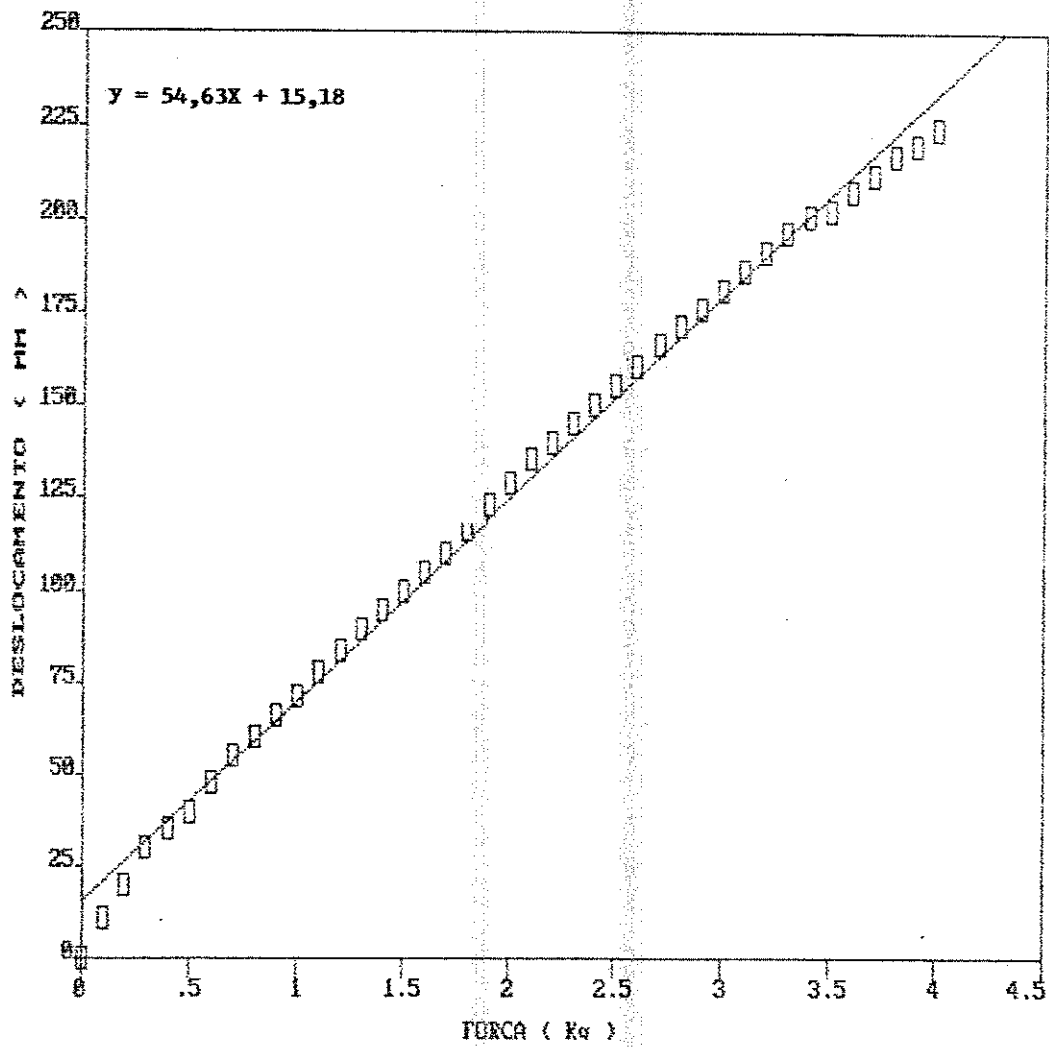


FIGURA 5A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 1,25m e do lado direito da descarga do silo.

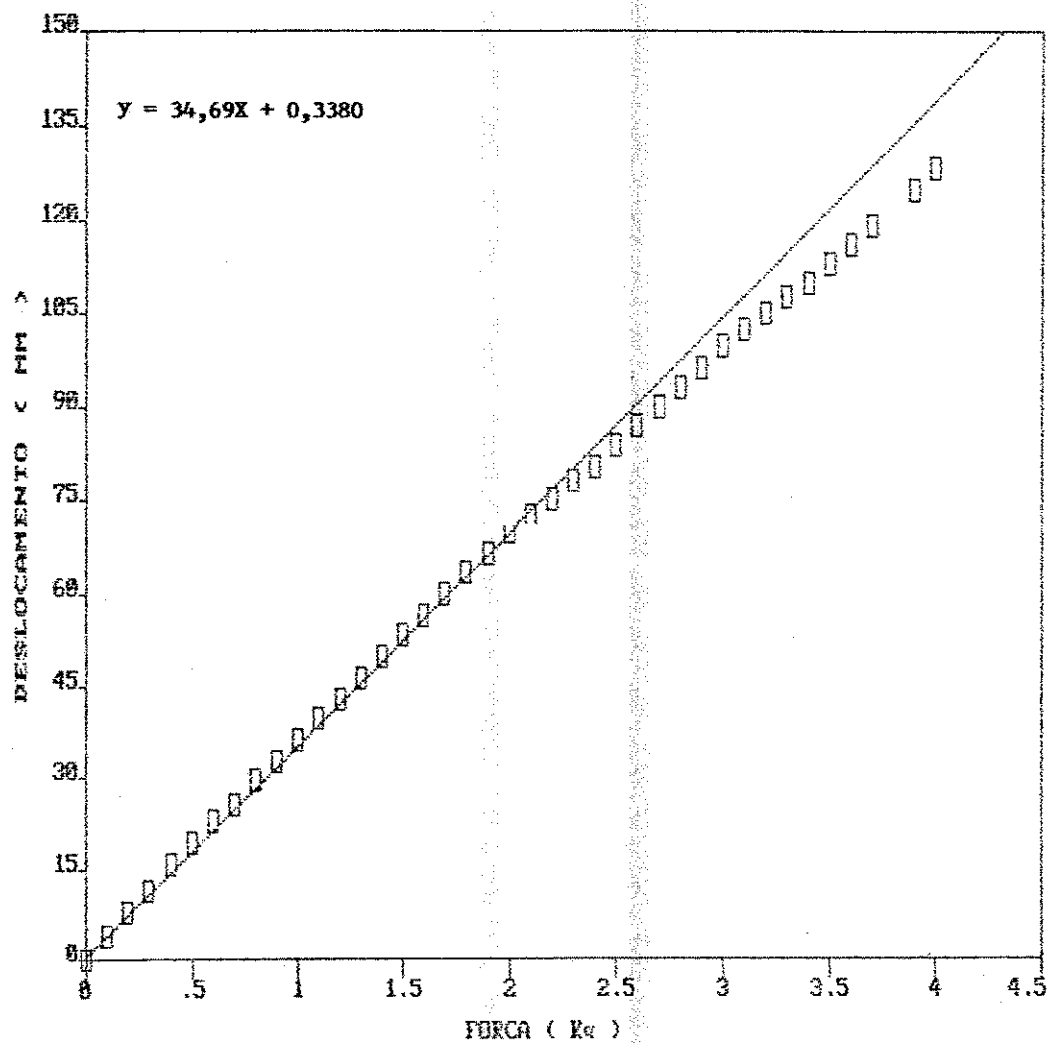


FIGURA 6A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,75m e do lado oposto a descarga do silo.

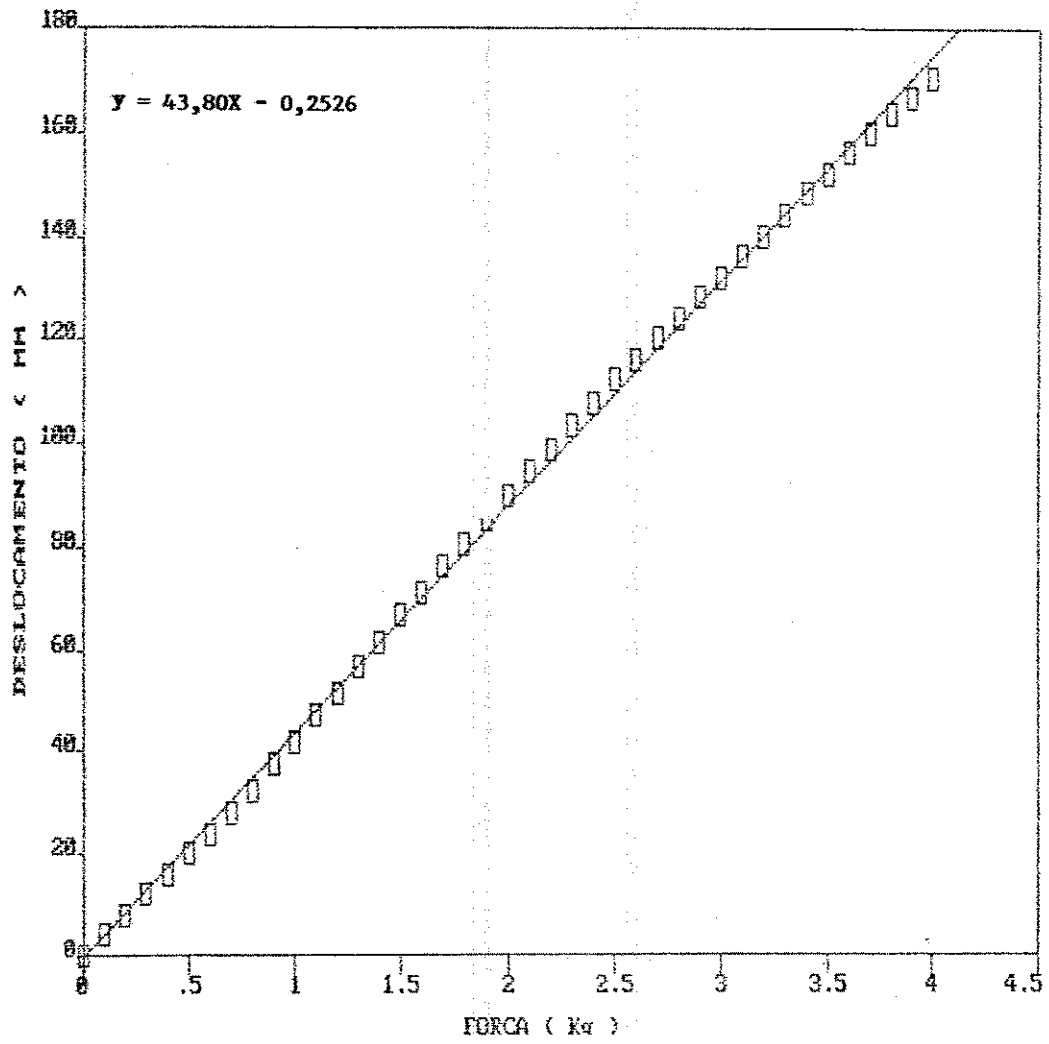


FIGURA 7A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,25m e do lado oposto a descarga do silo.

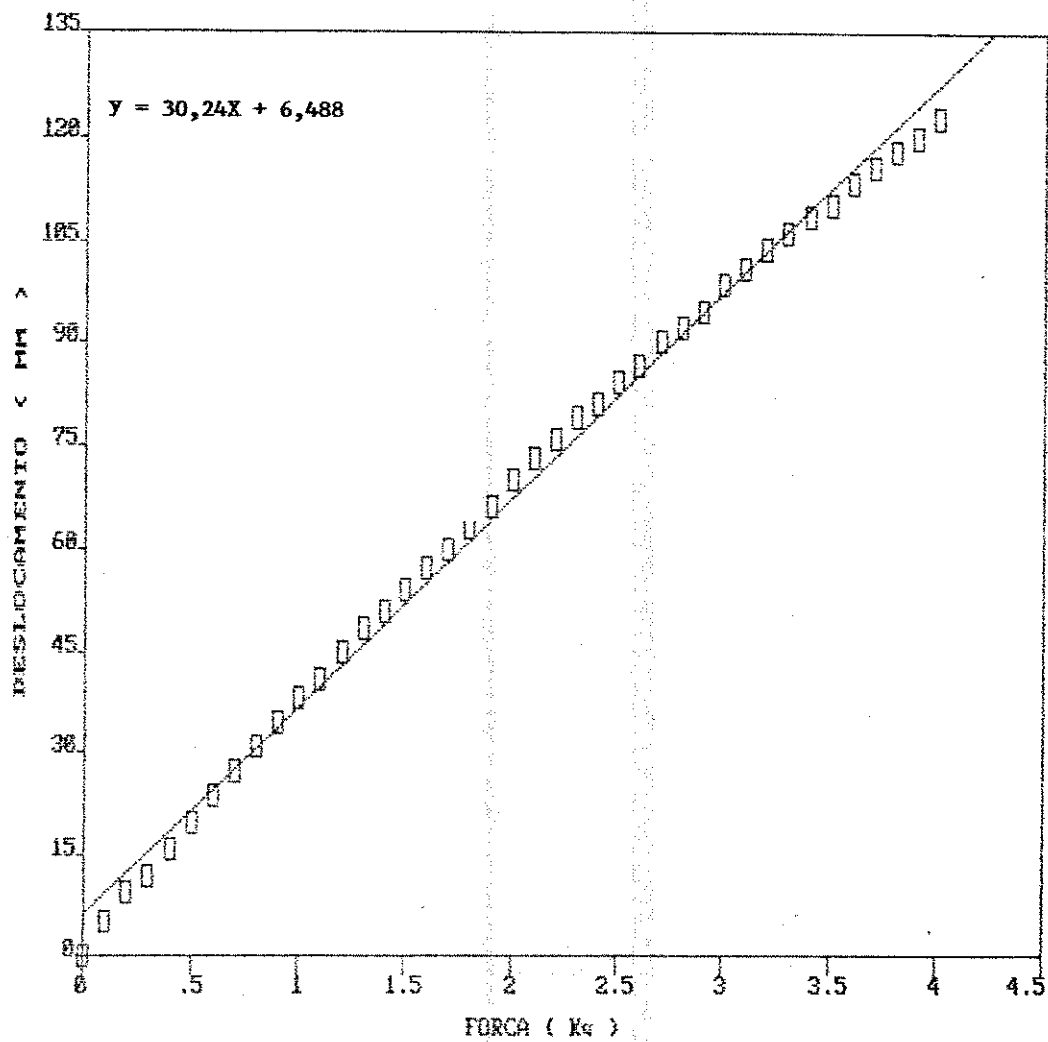


FIGURA 8A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 1,25m e do lado oposto a descarga do silo.

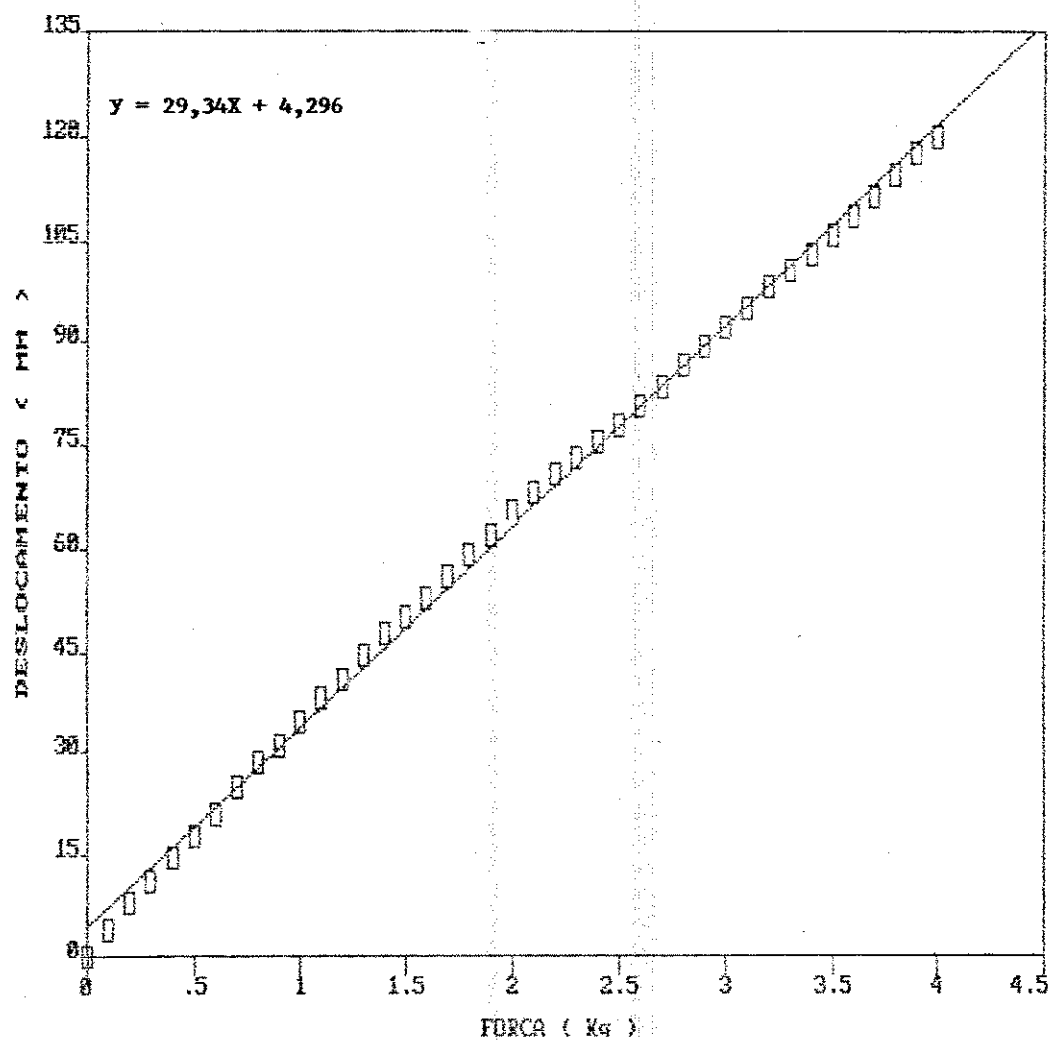


FIGURA 9A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,25m e do lado esquerdo da descarga do silo.

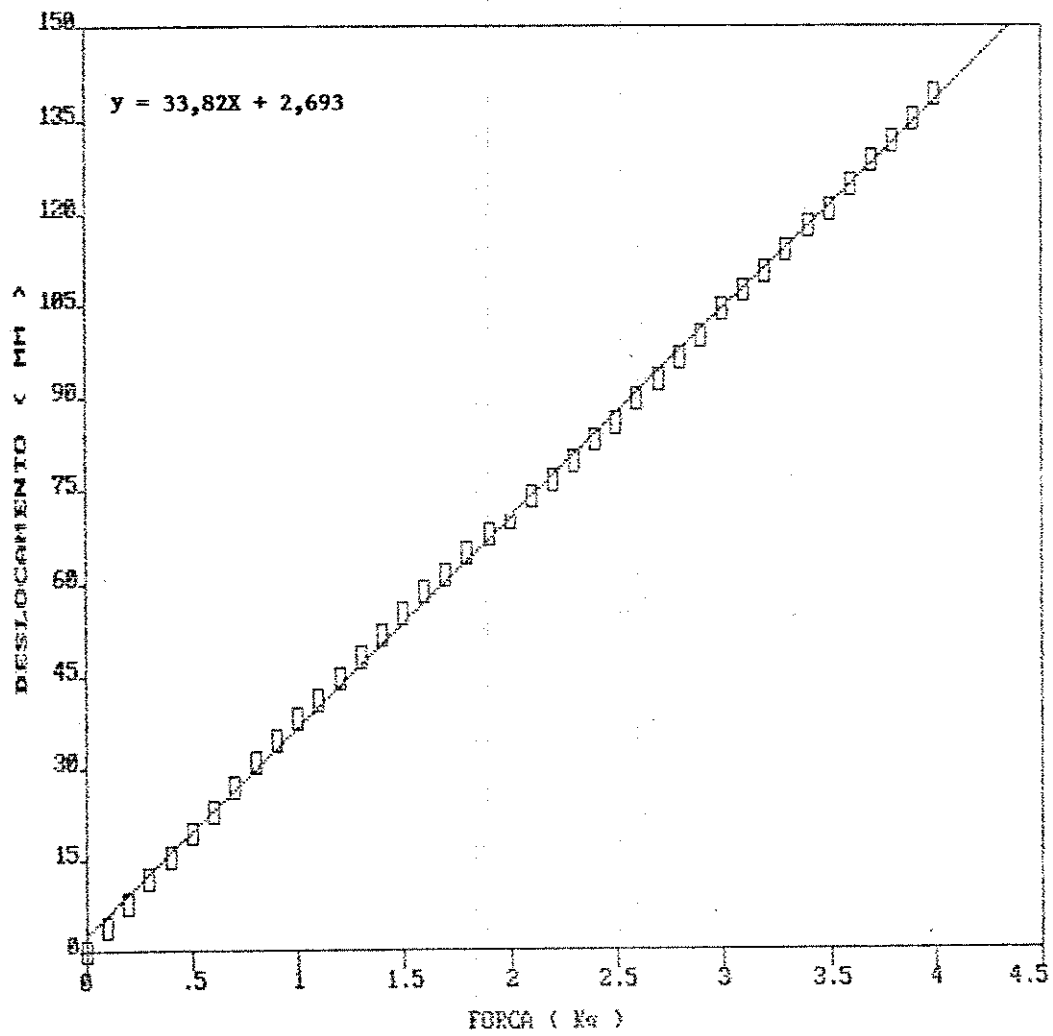


FIGURA 10A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 0,75m e do lado esquerdo da descarga do silo.

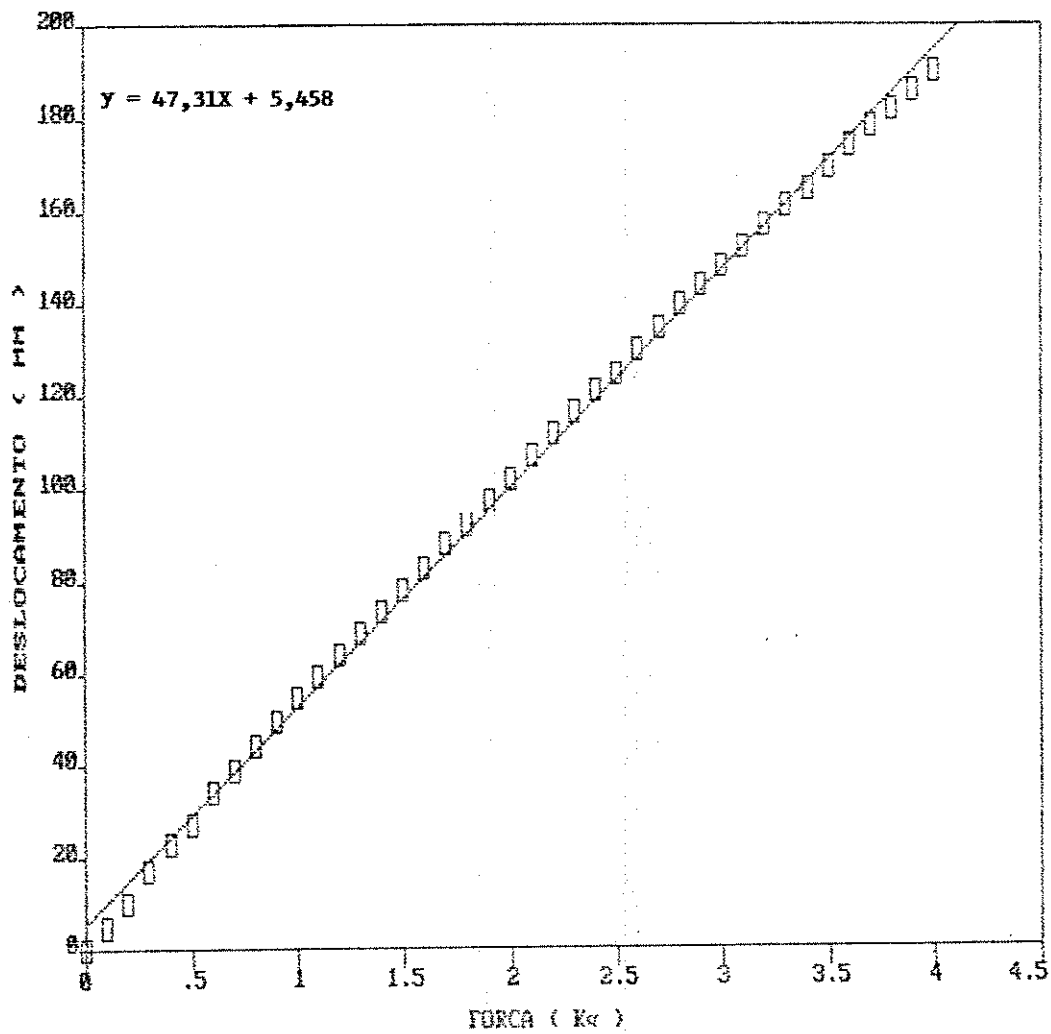


FIGURA 11A - Curva de calibração do manômetro situado a altura de 1,25m e do lado esquerdo da descarga do silo.

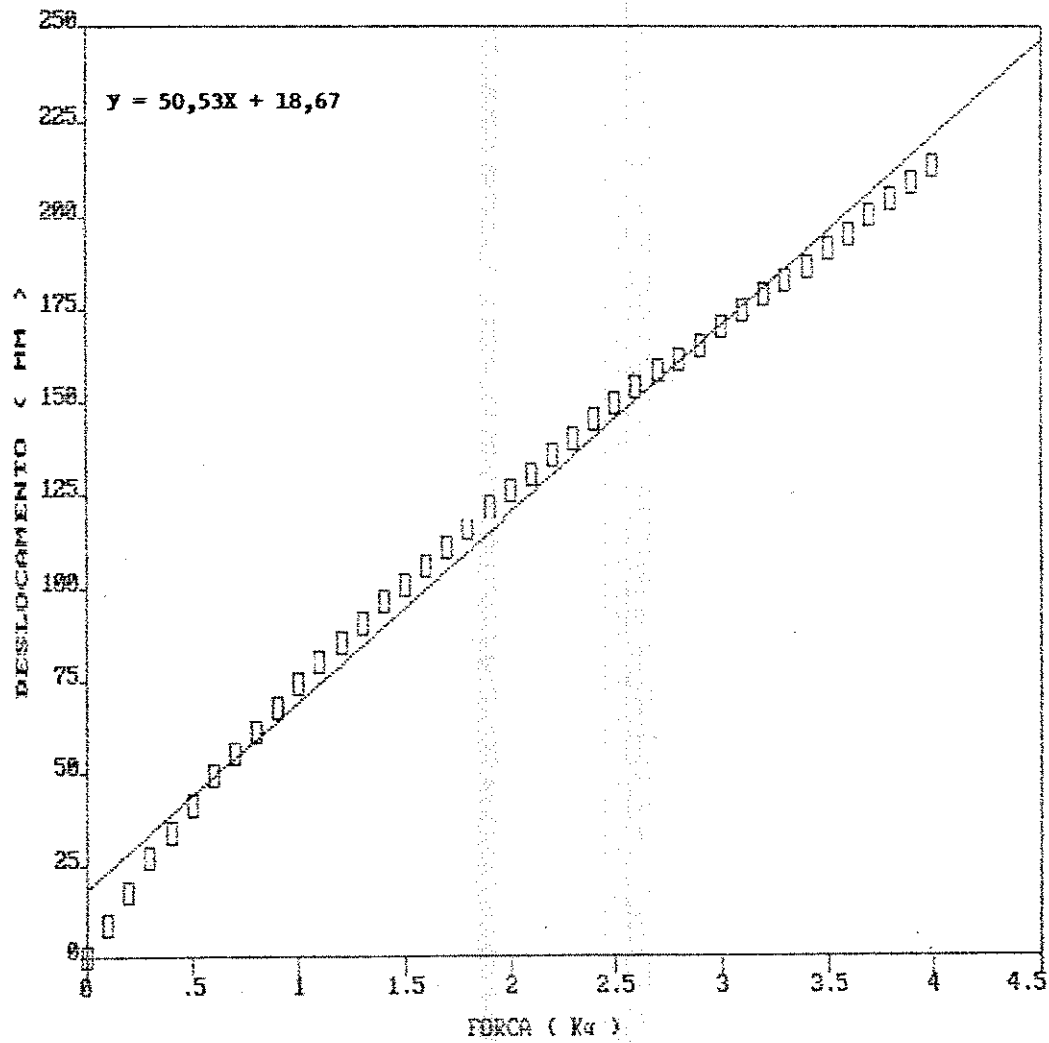


FIGURA 12A - Curva de calibração do manômetro situado no fundo do silo.

A P E N D I C E B

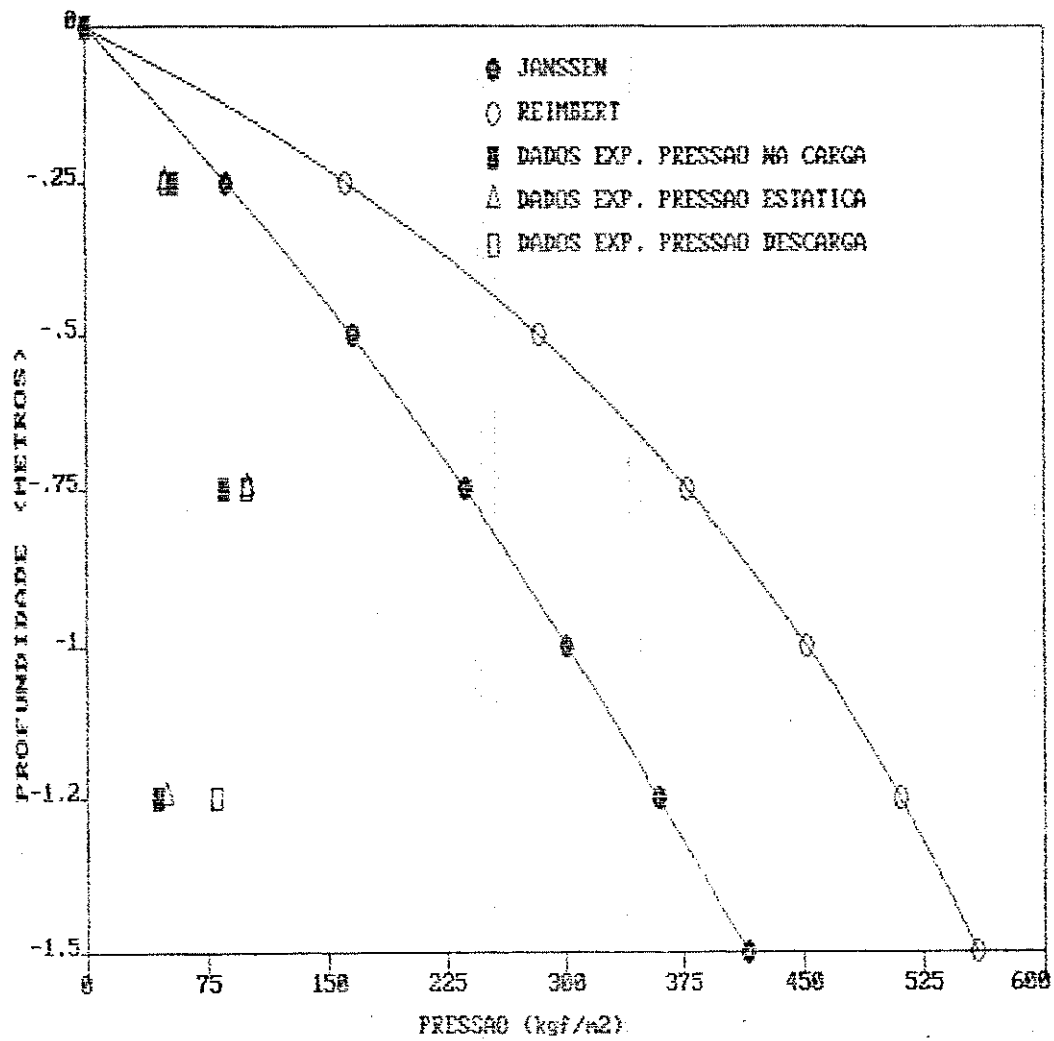


FIGURA 1B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma descarga de milho feita após 24 horas do silo carregado

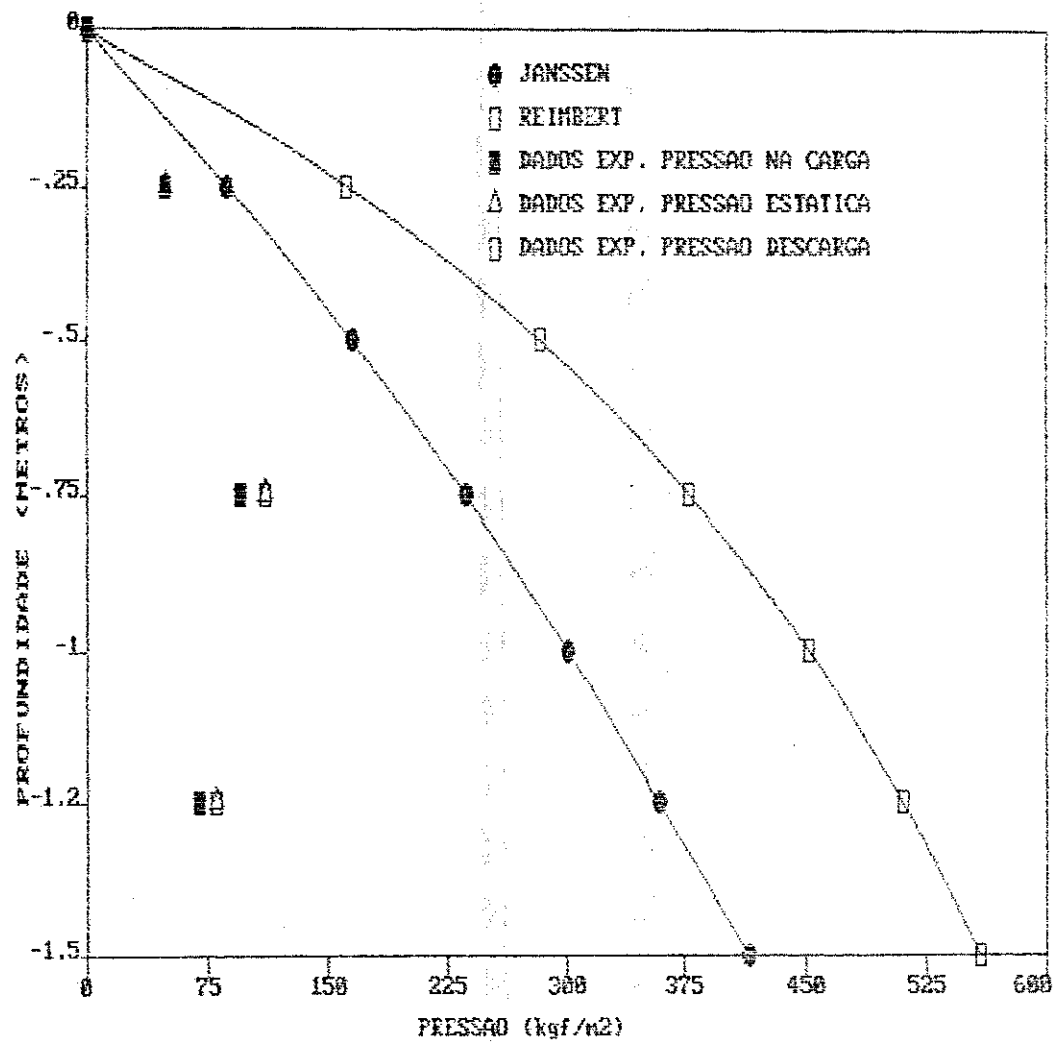


FIGURA 2B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto da descarga e as propostas pelas equções de Janssen e Reimbert, para uma descarga de milho feita após 24 horas do silo carregado.

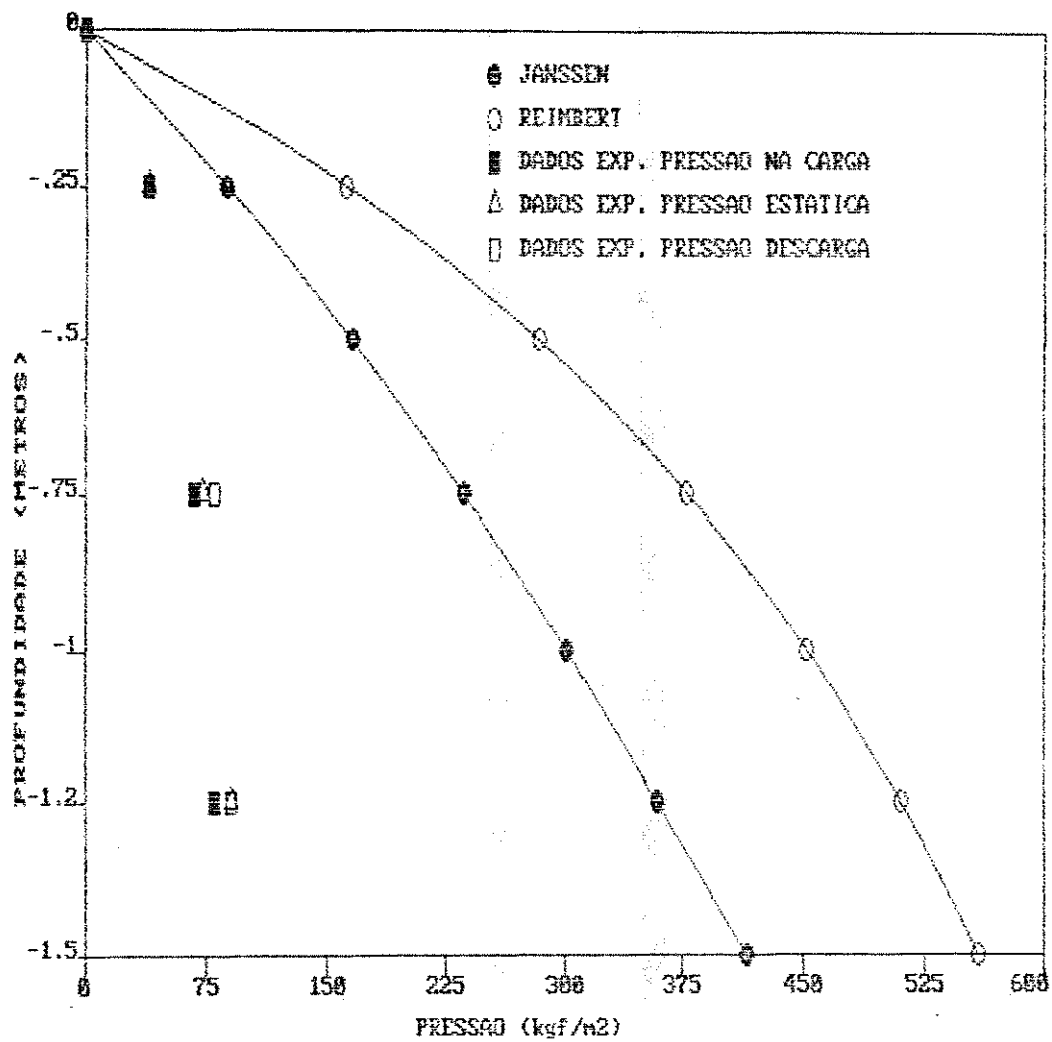


FIGURA 3B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga e as propostas pelas equções de Janssen e Reimbert, para uma descarga de milho feita após 24 horas do silo carregado.

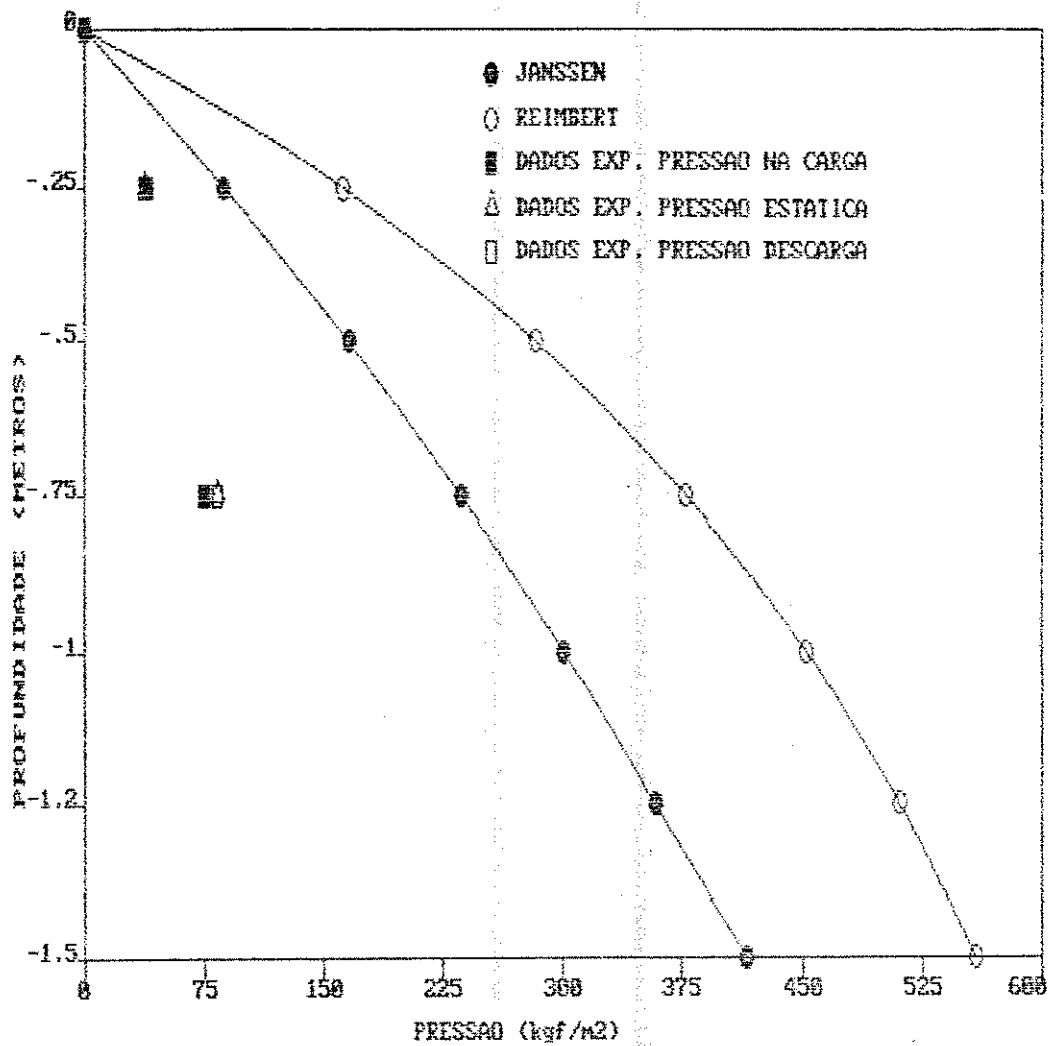


FIGURA 4B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma descarga de milho feita após 24 horas do silo carregado.

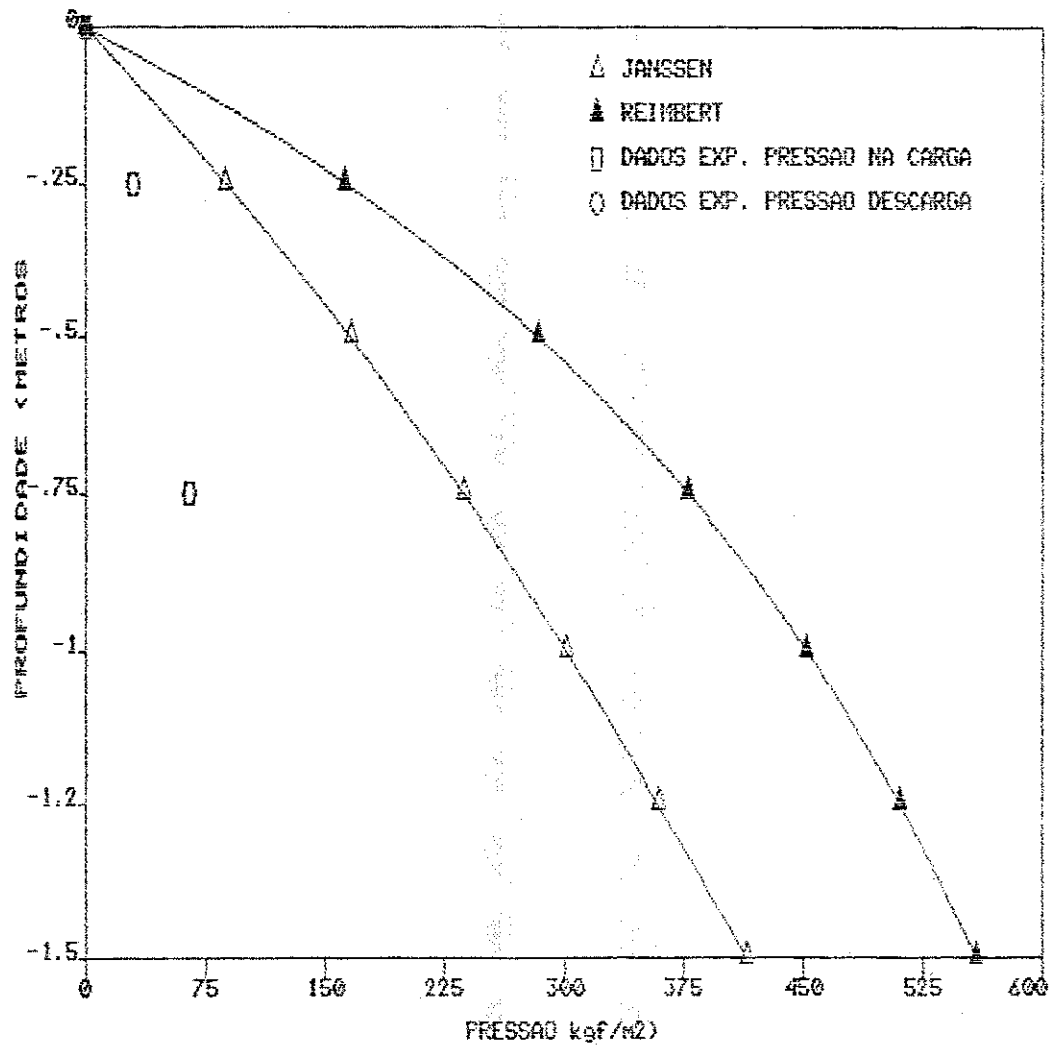


FIGURA 5B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma carga e descarga simultânea de milho.

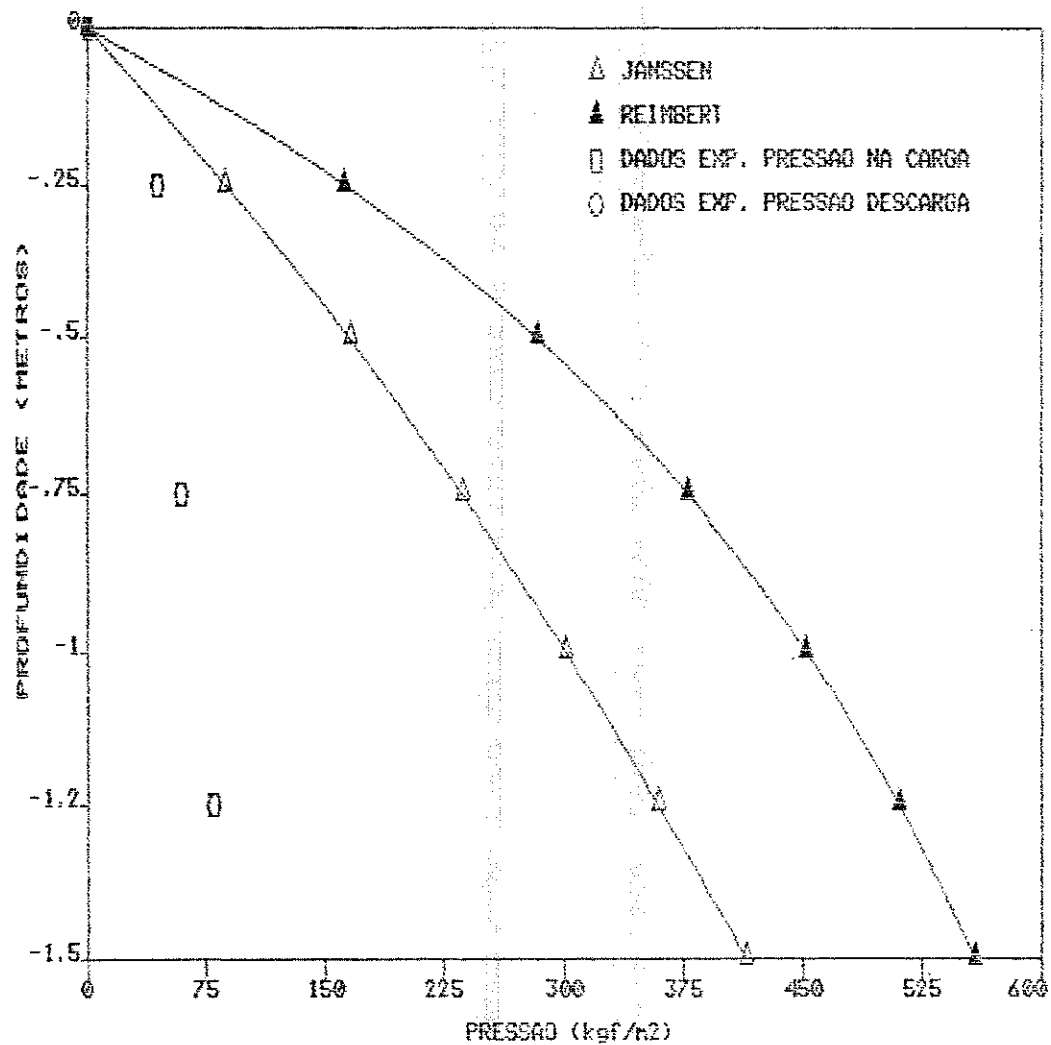


FIGURA 6B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado oposto da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma carga e descarga simultânea de milho.

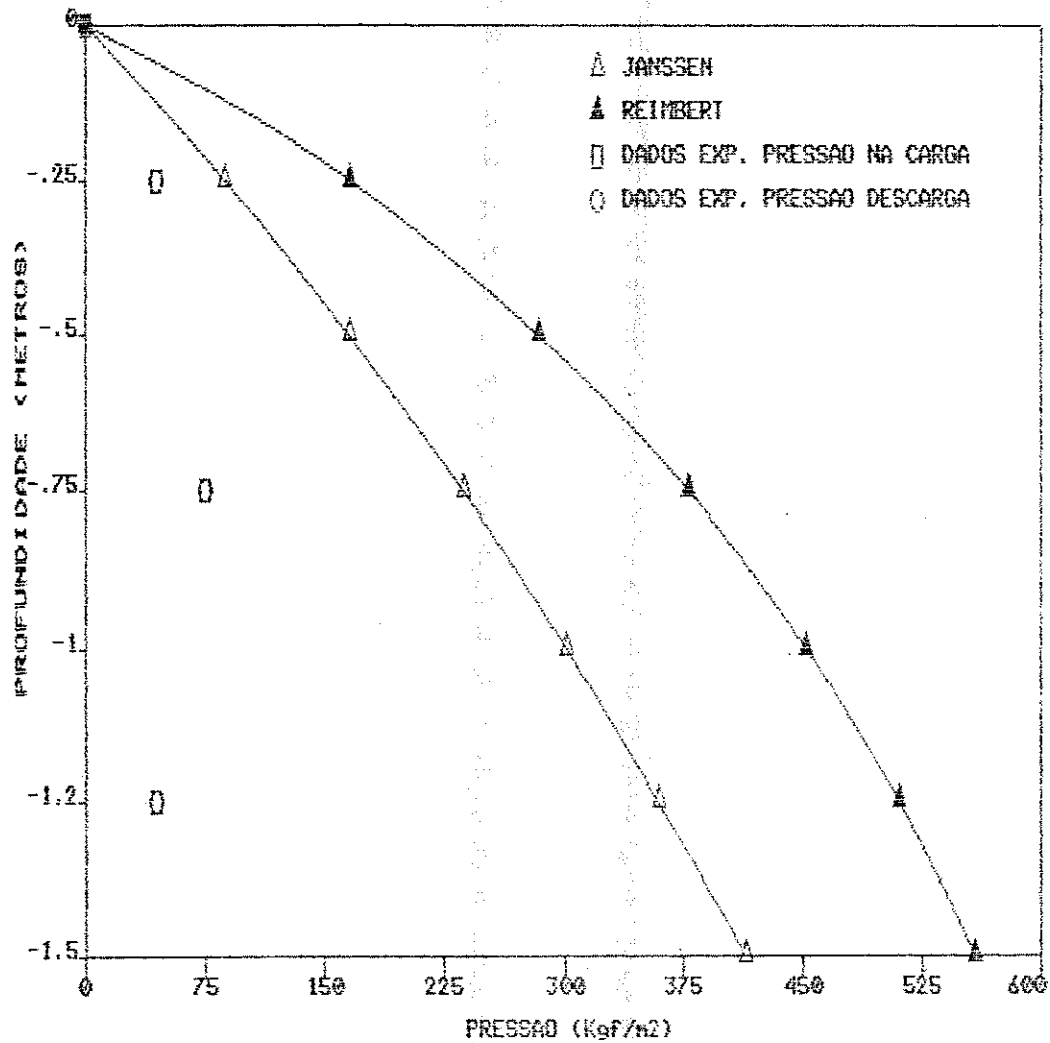


FIGURA 7B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado esquerdo da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma carga e descarga simultânea de milho.

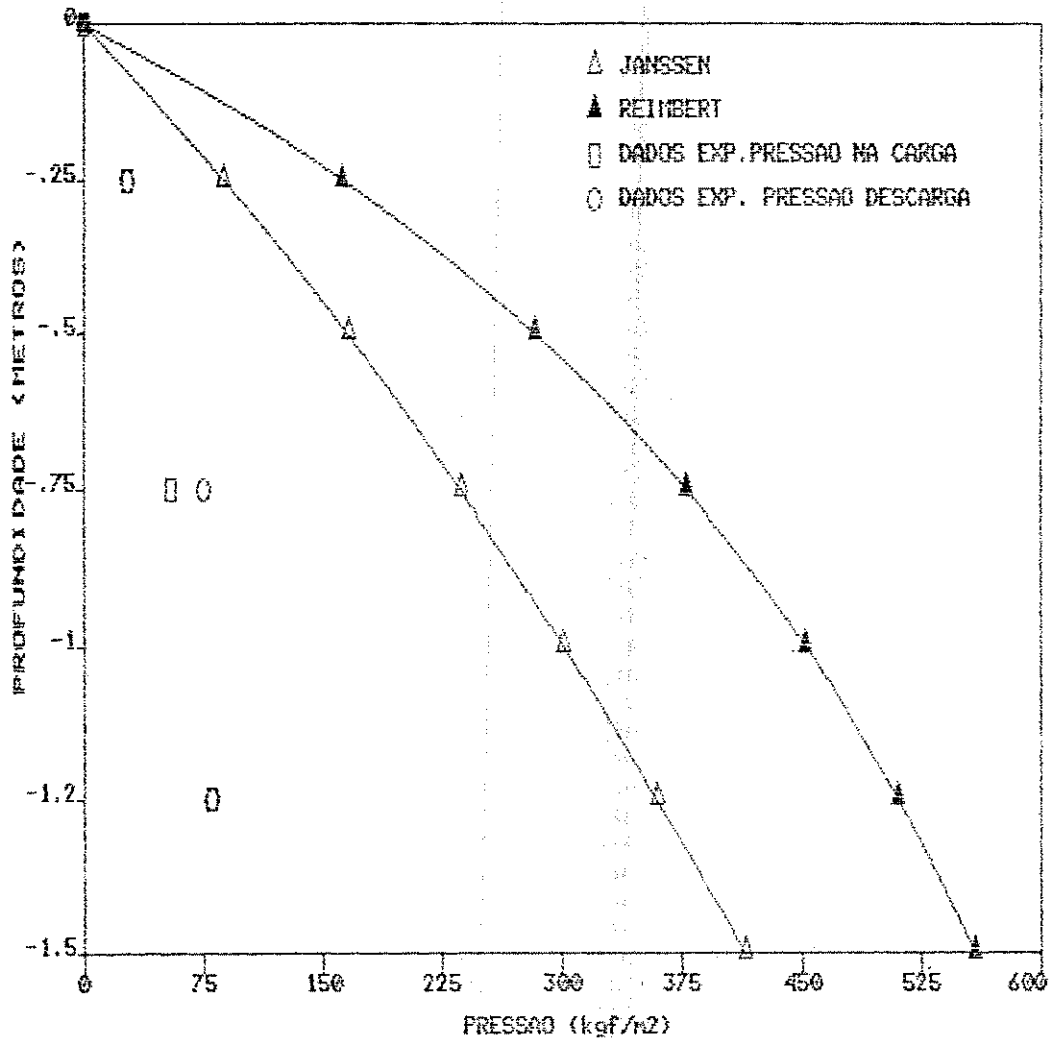


FIGURA 8B - Curvas das pressões laterais obtidas experimentalmente do lado direito da descarga e as propostas pelas equações de Janssen e Reimbert, para uma carga e descarga simultânea de milho.

A P E N D I C E C

PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Pressão do lado esquerdo da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)				
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0
0.25	55.17	50.15	53.10	53.10	50.15
0.75	85.26	95.30	105.30	100.80	99.30
1.25	45.10	50.15	52.10	50.15	50.15

Pressão do lado direito da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)				
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0
0.25	40.10	40.10	40.10	40.10	40.10
0.75	67.50	75.23	82.75	77.70	72.70
1.25	80.25	85.25	95.30	90.28	90.28

Pressão do lado da descarga do silo em função do tempo. (kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)				
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0
0.25	40.10	41.50	45.10	40.10	37.50
0.75	75.23	87.00	90.28	85.25	82.50
1.25	-	-	-	-	-

Pressão do lado oposto da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)				
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0
0.25	50.15	50.17	50.15	50.15	50.15
0.75	95.30	110.34	110.34	110.34	110.34
1.25	70.21	80.25	80.25	80.25	80.25

Pressão do lado oposto da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/n²).

profundidade (m)	tempo (h)						
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0	36,0	48,0
0.25	45.10	45.10	45.10	45.10	45.10	45.10	42.60
0.75	62.20	75.23	77.70	77.70	77.70	77.70	77.70
1.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25

Pressão do lado Direito da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)						
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0	36,0	48,0
0.25	27.50	30.00	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
0.75	55.00	70.00	65.00	65.00	60.00	55.00	55.00
1.25	80.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.26

Pressão do lado esquerdo da descarga do silo em função do tempo.
(kgf/m²).

profundidade (m)	tempo (h)						
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0	36,0	48,0
0.25	45.00	50.00	45.00	45.00	45.00	43.00	42.60
0.75	75.00	87.50	90.00	85.00	85.00	84.00	82.75
1.25	45.00	50.00	45.00	45.00	45.00	45.00	42.60

Pressão do lado da descarga do silo em função do tempo. (kgf/n²).

profundidade (m)	tempo (h)						
	0,0	7,0	13,0	20,0	24,0	36,0	48,0
0.25	30.00	37.50	35.00	35.00	30.00	30.00	25.00
0.75	60.00	75.00	70.00	70.00	65.00	63.00	60.18
1.25	-	-	-	-	-	-	-