

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

PRESSÃO LATERAL EM FÔRMAS PARA CONCRETO

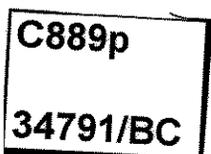
Autora: Rosana Máximo da Cruz

Orientador: Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Campinas - S.P - Brasil

1997



ERRATA

Onde se lê *Velocidade de Lançamento* leia-se *Velocidade de Enchimento*

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

PRESSÃO LATERAL EM FÔRMAS PARA CONCRETO

Autora: Rosana Máximo da Cruz

Orientador: Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo
Universidade Estadual de Campinas

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas

Campinas - S.P - Brasil

1997

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C889p Cruz, Rosana Máximo da
Pressão lateral em fôrmas para concreto. / Rosana
Máximo da Cruz.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Mauro Augusto Demarzo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Madeira - Estruturas. 2. Instrumentos de medição
3. Deformações e tensões. I. Demarzo, Mauro Augusto.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA

PRESSÃO LATERAL EM FÔRMAS PARA CONCRETO

Dissertação de mestrado defendida e aprovada, em 24 de setembro de 1997,
pela banca examinadora constituída pelos professores:



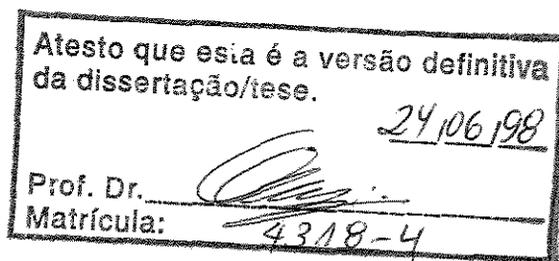
Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo - Orientador - FEC - UNICAMP



Prof. Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida - EPUSP



Prof. Dr. Gilson Battiston Fernandes - FEC - UNICAMP



DEDICATÓRIA

Aos meus pais José e Rosa, aos meus futuros
sogros Silvio e Conceição e ao meu noivo
Adriano da Silva.

AGRADECIMENTOS

Ao Bom Deus pela presença constante em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo, pela atenção sempre concedida, pelo constante incentivo e pelas diretrizes que me fizeram evoluir possibilitando a conclusão desta dissertação.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

Aos funcionários do laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pelo companheirismo e auxílio na execução dos ensaios necessários ao desenvolvimento deste trabalho

Ao meu noivo Adriano, pelo incentivo, amor e carinho sem limites no transcorrer deste trabalho.

Aos meus familiares, pela compreensão e apoio sempre concedido nos momentos mais difíceis.

Aos amigos Luísa Andréia Gachet Barbosa e Carlos Roberto Barbosa pela amizade e ajuda concedida quando eu mais precisava.

Um agradecimento muito especial à FAPESP - Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro concedido.

“A dádiva mais bela da natureza é a alegria de ver e compreender”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

| | páginas |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| DEDICATÓRIA | iii |
| AGRADECIMENTOS | iv |
| NOTAÇÕES | ix |
| LISTA DE FIGURAS | xiii |
| LISTA DE TABELAS | xvi |
| RESUMO | xvii |
| ABSTRACT | xviii |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 5 |
| 1.1 DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO FRESCO E ANALOGIA COM A MECÂNICA DOS SOLOS | 5 |
| 1.1.2 COEFICIENTE DE PRESSÃO LATERAL DO MATERIAL | 12 |
| 1.2 REOLOGIA DO CONCRETO FRESCO | 16 |
| 1.3 CONSIDERAÇÕES DE CARGAS E SOBRECARGAS NAS FÔRMAS | 20 |
| 1.3.1 CARGAS VERTICAIS E HORIZONTAIS | 21 |
| 1.3.2 PRESSÃO LATERAL DO CONCRETO FRESCO | 23 |
| 1.3.3 FATORES QUE INFLUEM SOBRE A PRESSÃO LATERAL | 24 |
| 1.4 O COMPORTAMENTO DA PRESSÃO COM A VIBRAÇÃO DO CONCRETO | 27 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 2 | 31 |
| 2.1 MÉTODOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DE PRESSÃO DO CONCRETO | 31 |
| 2.2 COMPARAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DE PRESSÃO DO CONCRETO | 47 |
| 2.2.1 MÉTODO DE OLSEN, ACI E CIRIA | 47 |
| 2.2.2 MÉTODO ACI, GARDNER, E HARRISON | 60 |
| 2.3 INSTRUMENTAÇÕES UTILIZADAS POR ORE E STRAUGHAN, E GARDNER PARA MEDIR PRESSÕES LATERAIS | 64 |
| CAPÍTULO 3 | 84 |
| 3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA ADOTADA NESTE TRABALHO | 84 |
| 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS | 84 |
| 3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO | 87 |
| 3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO | 87 |
| CAPÍTULO 4 | 92 |
| 4.1 RESULTADOS OBTIDOS | 92 |
| 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS | 102 |
| 4.2.1 RESULTADOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^2 | 102 |
| 4.2.1.1 CÁLCULO DOS EFEITOS | 104 |
| 4.2.1.2 INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DOS EFEITOS | 109 |
| 4.2.1.3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS | 110 |
| 4.2.1.4 MODELO ESTATÍSTICO | 116 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2 | OBTENÇÃO DE UMA EQUAÇÃO ESTIMADA PARA TODAS AS CAMADAS DA FÔRMA | 122 |
| | CAPÍTULO 5 | 126 |
| | CONCLUSÕES | 126 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 128 |
| | ANEXO I | 132 |
| | ANEXO II | 135 |
| | ANEXO III | 140 |

NOTAÇÕES

| | | |
|--------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A | = | efeito principal do abatimento; |
| A_i | = | coeficiente de inclinação linear, em função da velocidade; |
| C | = | coesão; |
| C' | = | coesão efetiva; |
| C_μ | = | quantidade de tensão coesiva; |
| C'_μ | = | parâmetro de coesão por unidade de área na direção l_1 ; |
| C_p | = | relação da porosidade provocada pela água em relação à massa de concreto (ratio of pore water head to concrete head); |
| %F | = | porcentagem de resíduos finos ou escória; |
| D | = | deflexão do apoio lateral das faces laterais da forma; |
| HP | = | potência do vibrador, 1HP = 0,746kW; |
| $H_{m\acute{a}x}$ | = | altura em que ocorre a pressão lateral máxima; |
| K | = | coeficiente de pressão lateral do solo; |
| K_0 | = | coeficiente de pressão lateral neutro, em função do tempo, temperatura e tensão; |
| L_1 e L_3 | = | cargas por contato nas direções l_1 e l_3 , respectivamente; |
| L_K | = | coeficiente de Lagrange; |
| Q | = | força sobre o corpo, normal à P; |
| R | = | velocidade de enchimento (velocidade de lançamento); |
| S | = | abatimento do concreto; |
| T | = | temperatura do concreto; |
| U | = | pressão nos poros; |
| V_a | = | concentração de volume de agregados; |
| $V_{a\acute{m}a}x$ | = | concentração máxima do volume de agregado; |
| V | = | efeito principal da velocidade; |
| VA | = | efeito de interação entre a velocidade e o abatimento; |

| | | |
|------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| c | = | constante de vibração; |
| d | = | menor dimensão da fôrma; |
| e | = | espessura da parede de concreto; |
| $f_1(h_c)$ | = | somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com as médias globais dos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma; |
| $f_2(h_c)$ | = | somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos principais da velocidade nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma; |
| $f_3(h_c)$ | = | somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos principais do abatimento nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma; |
| $f_4(h_c)$ | = | somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos de interação entre a velocidade e o abatimento nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma; |
| h | = | profundidade total da fôrma; |
| h_{ext} | = | altura da localização do extensômetro na fôrma, medida a partir do fundo; |
| h_f | = | altura da fase fluida do concreto; |
| h_i | = | profundidade de vibração; |
| h_m | = | altura do material retido; |
| h_s | = | relação entre o tempo de pega e a velocidade de lançamento; |
| h_c | = | altura de concreto na fôrma. |
| lanç. | = | altura de cada camada de concreto lançada na fôrma; |
| p_h | = | pressão lateral (pressão horizontal); |
| p_v | = | pressão vertical; |
| $p_{máx}$ | = | pressão lateral máxima; |
| p_A | = | pressão do concreto com o efeito arco; |
| p_H | = | pressão do concreto calculada como um fluido; |
| p_S | = | pressão do concreto com o limite de endurecimento; |
| q | = | carregamento de concreto; |
| q_u | = | resistência à compressão livre do material retido; |
| t | = | tempo de enchimento; |
| t_a | = | tempo após a adição da água; |

| | | |
|--------------------|---|------------------------------------------------------------------------|
| $\text{tg}\phi$ | = | coeficiente de atrito interno do solo; |
| $\text{tg}\phi'$ | = | coeficiente de atrito efetivo interno do solo; |
| $t_{\text{máx}}$ | = | tempo de endurecimento do concreto; |
| t_s | = | tempo de pega; |
| t_v | = | tempo de vibração; |
| γ_r | = | peso específico do material retido; |
| x_1 | = | codificação da velocidade de lançamento do concreto; |
| x_2 | = | codificação do abatimento do concreto; |
| $y(h_c, x_1, x_2)$ | = | valor estimado da pressão lateral em função de x_1 , x_2 e h_c ; |

| | | |
|--------------------------------------|---|-----------------------------------------------------|
| β_0 | = | valor populacional da média global; |
| β_1 | = | valor populacional do efeito principal, velocidade; |
| β_2 | = | valor populacional do efeito principal, abatimento; |
| β_{12} | = | valor populacional do efeito de interação; |
| ε_c | = | deformação normal no concreto; |
| ε_p | = | deformação normal sobre a pasta; |
| $\varepsilon_{1,2,3,4 \text{ e } 5}$ | = | deformações do compensado; |
| $\varepsilon_{\text{comp}}$ | = | deformação no compensado à flexão; |
| ε^* | = | erro aleatório; |
| ϕ_μ | = | ângulo de atrito do material com a parede; |
| γ | = | peso específico do material granular; |
| γ_f | = | peso específico da fase fluida do concreto; |
| γ_c | = | peso específico do concreto; |
| γ_c | = | peso específico do concreto; |
| γ_w | = | peso específico da água; |
| η | = | viscosidade; |
| η | = | média populacional; |
| μ | = | viscosidade plástica; |
| ν' | = | coeficiente de Poisson instantâneo; |

| | | |
|-----------------|---|----------------------------------------------|
| \dot{V} | = | velocidade cisalhante; |
| σ | = | tensão total; |
| σ' | = | tensão efetiva; |
| σ^2 | = | variância populacional; |
| σ_a | = | tensão normal sobre o agregado; |
| σ_c | = | tensão normal no concreto; |
| σ_{comp} | = | tensão normal obtida experimentalmente; |
| σ_{comp} | = | tensão no compensado à flexão; |
| σ_n | = | tensão normal total; |
| σ_p | = | tensão normal sobre a pasta; |
| τ | = | tensão cisalhante; |
| τ_0 | = | tensão cisalhante do escoamento; |
| τ' | = | tensão cisalhante efetiva; |
| τ_{0c} | = | tensão cisalhante de escoamento do concreto; |
| τ_{0p} | = | tensão cisalhante de escoamento da pasta; |

LISTA DE FIGURAS

FIGURA

- 1.1 - Forças sobre um plano inclinado.
- 1.2 - Plano - Corpo cúbico centrado cheio de esferas.
- 1.3 - Seção x-x do corpo cúbico centrado cheio de esferas.
- 1.4 - Mecanismo de colapso.
- 1.5 - Medida da Variação de K_0 com a tensão efetiva e o tempo. ALEXANDRIDIS e GARDNER(4).
- 1.6 - Variação Idealizada de K_0 com tensão efetiva e o tempo. GARDNER(13).
- 1.7 - Relação da velocidade cisalhante e tensão cisalhante, fluido Newtoniano. GARDNER (13).
- 1.8 - Relação de velocidade cisalhante e tensão cisalhante, fluido Bingham. GARDNER (13).
- 1.9 - Pressões laterais num reservatório contido por: (a) água e (b) concreto.
- 1.10 - Desenvolvimento da envoltória de Pressão Lateral. **A** = nível de concreto e **B** = profundidade do vibrador. GARDNER(13).
- 2.1 - Envoltória da Pressão Lateral de Projeto. RODIN(23).
- 2.2 à 2.6 - Pressão do concreto com a velocidade de lançamento. OLSEN(18).
- 2.7 à 2.11 - Pressão do concreto com o tempo de início de pega. OLSEN(18).
- 2.12 à 2.14 - Pressão do concreto com a velocidade de lançamento OLSEN(18).
- 2.15 - Comparação de dados experimentais da CIRIA - 1965 com as pressões calculadas pelo ACI. GARDNER(13).
- 2.16 - Comparação de dados experimentais da CIRIA - 1965 com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13).
- 2.17 - Comparação dos dados de concreto de cimento portland com as pressões calculadas pelo ACI. GARDNER(13).
- 2.18 - Comparação dos dados de concreto de cimento portland com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13).

- 2.19 - Comparação dos dados de concreto não convencional com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13).
- 2.20 - Diagrama dos Componentes da Célula. ORE e STRAUGHAM(20).
- 2.21 - Bomba, Medidor de Pressão e o circuito de entrada do tubo de distribuição. ORE, STRAUGHAM(20).
- 2.22 - Detalhe da fôrma mostrando a localização das Células. ORE e STRAUGHAM(20).
- 2.23 - Relação de pressão por altura para várias misturas. ORE STRAUGHAN(20).
- 2.24 - Relação entre Pressão/altura por tempo e velocidade de lançamento para concretos comuns e com aditivo redutor de água (w.r.a).
- 2.25 - Efeito de localização do esforço do vibrador sobre a relação entre pressão e altura para concreto comum e com aditivo redutor água.
- 2.26 - Vista da Célula Cambridge de Pressão em Terra.. ARTHUR e ROSCOE(5).
- 2.27 - Pressão desenvolvida em vários níveis de concreto na fôrma GARDNER e QUERESHI(10).
- 2.28 - Variação das Pressões Cisalhante e Lateral com a altura do concreto. GARDNER, QUERESHI(10).
- 3.1 - Subdivisão do painel lateral da fôrma, e localização dos extensômetros elétricos.
- 3.2 - Esquema de montagem da fôrma de viga para concreto.
- 3.3 - Modelo estático adotado para o cálculo da pressão de concreto.
- 3.4 - Vista geral, onde se observa a fôrma, os relógios comparadores para medir eventuais deslocamentos dos apoios, faixas laterais com extensômetros elétricos e os fios de ligação com a ponte de Wheatstone.
- 3.5 - Detalhe mostrando a parte interna da fôrma, e as fitas adesivas utilizadas para impedir o vazamento da nata de cimento.
- 3.6 - Enchimento parcial da fôrma durante o ensaio, e vibração das camadas de concreto.

- 3.7 - Flexão ocorrida nas faixas devido a pressão exercida pelo concreto fresco.
- 3.8 - Vibração da última camada de concreto e deformação final observada.
- 4.1a à 4.1e - As cinco fases do carregamento do primeiro ensaio.
- 4.2a à 4.2e - As cinco fases do carregamento do segundo ensaio.
- 4.3a à 4.3e - As cinco fases do carregamento do terceiro ensaio.
- 4.4a à 4.4e - As cinco fases do carregamento do quarto ensaio.
- 4.5 - Esquema dos efeitos principais (a) da velocidade, (b) do abatimento e da interação (c).
- 4.6 - Interpretação geométrica dos resultados da análise dos dados nas cinco camadas estudadas.
- 4.7 - Codificação das variáveis no planejamento 2^2 para as cinco camadas das fôrmas.

ANEXO I

- I.1 - Esquema do ensaio à flexão.
- I.2 - Relação entre carregamento e flecha obtida no ensaio.

LISTA DE TABELAS

TABELA

- 1.1 Resultados do teste de Ritchie;
- 2.1 Resultados do teste de Olsen(18);
- 2.2 Valores de K_S em função do abatimento e temperatura do concreto, Mascarenhas(17);
- 2.3 Pressão do concreto com variação do tempo de início de pega, Olsen(18);
- 2.4 Pressão do concreto com variação das alturas de parede, Olsen(18);
- 2.5 Pressão do concreto com variação das larguras de parede, Olsen(18);
- 2.6 Quantidades de materiais e propriedades das misturas usadas na segunda terceira e quarta fases dos ensaios de Ore e Straughan(20);
- 2.7 Resumo dos resultados de teste para o concreto com cinza volante. Ore (20);
- 2.8 Resumo dos resultados de teste para concreto comum e concreto com w.r.a (water reductor admixture), Ore e Straughan (20);
- 2.9 Dados dos Testes, Gardner e Quereshi (10);
- 3.1 Grandezas consideradas no ensaio desta pesquisa
- 4.1a à 4.1e Resultados do planejamento 2^2 em cada uma das camadas da fôrma dos 4 ensaios;
- 4.2a à 4.2e Variação da pressão com aumento da velocidade e abatimento fixo em cada camada;
- 4.3a à 4.3e Variação da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa em cada camada);
- 4.4a à 4.4e Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 das Tabelas de 4.1a até 4.1e, respectivamente, em cada camada;
- 4.5 Efeitos por unidade de x_1 e x_2 .

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se as pressões laterais causadas pelo lançamento do concreto fresco nas fôrmas. Analisou-se alguns fatores os quais influenciam no comportamento dessas pressões. Foram estudados vários trabalhos de pesquisadores que desenvolveram expressões para o cálculo de pressões laterais, onde o produto da densidade do concreto pela altura é considerada, em algumas expressões, como limite máximo dessa pressão.

Com os resultados dos ensaios, foi feita a análise estatística da influência das variáveis abatimento do concreto e velocidade de lançamento do concreto, no comportamento das pressões laterais, em várias alturas. Encontrou-se, então, uma expressão geral, em função dessas variáveis e da altura de concreto lançado. Avaliou-se a confiabilidade do ensaio proposto para determinação das pressões ao longo da altura da fôrma.

ABSTRACT

In this work the lateral pressures caused by placement of the fresh concrete in the formwork has been investigated. Some factors that have influenced the behaviour of these pressure were analysed. Several research works concerning equations for the lateral pressure calculation, which consider the density product of the concrete by the height as maximum limit of this pressure, were studied.

With the test results, it was statistically analyzed the influence of the variables slump and concrete pour rate, on the lateral pressure behaviour, in several heights. With these variables and the height of placed concrete, a general equation was found. The reliability of the proposed test to determine the pressures along the formwork height was analyzed.

As pesquisas nacionais e internacionais mostram que existem várias expressões para avaliar a pressão lateral exercida pelo concreto, dependendo do que se considera ser como variáveis principais que mais a influenciam. E a esse respeito não se chegou a um consenso.

No Brasil, as pesquisas relacionadas a fôrmas, são bastante recentes (10 anos), e poucas abordam, especificamente, a determinação de pressões laterais exercidas pelo concreto fresco.

Vários autores em diversos países, têm abordado o tema de forma genérica e empírica. Em 1978, o Instituto Americano do Concreto (ACI) publicou uma edição revisada das recomendações ACI-347-78 (1)*, considerando que a envoltória da pressão lateral de concreto fresco é 'hidrostática' a partir da superfície livre de concreto na fôrma, até atingir uma pressão máxima e depois permanece constante. Esta consideração ainda é aceita por muitos pesquisadores.

Durante o processo de mistura, a resistência cisalhante da massa de concreto parte de zero até um valor substancial, com o início da pega. Por causa desta baixa resistência cisalhante, o concreto está numa condição plástica ou de escoamento devendo ser contido numa fôrma rígida para desenvolver a forma desejada.

* A bibliografia foi colocada em ordem alfabética. O número que aparece entre parentêses representa a ordem sequencial na bibliografia.

Na execução de uma estrutura em concreto armado, além do aço e do concreto propriamente dito, é necessária a utilização de um conjunto de elementos que devem sustentar o concreto fresco até que ele adquira resistência para auto suporte. Este conjunto de elementos, geralmente considerado uma estrutura provisória, constitui o que se denomina por fôrmas, e é designado como molde, estrutura do molde, escoramento e acessórios.

De uma maneira geral, as fôrmas possuem três funções principais:

- dar forma ao concreto;
- proporcionar à superfície do concreto a textura requerida;
- suportar o concreto fresco, até que ele adquira capacidade auto-portante.

A fôrma para concreto afeta muito o custo total de uma obra, o qual varia, de acordo com a literatura, de 35% a 60% do valor total, dependendo do grau de complexidade. Portanto, deve-se atentar às condições da fôrma quanto à qualidade, segurança e economia:

- Qualidade: para se projetar e construir corretamente, obtendo, com o lançamento do concreto, o tamanho, a forma e o acabamento desejado.
- Segurança: para uma construção sólida, capaz de suportar todas as cargas de peso próprio e sobrecargas, sem que a estrutura entre em colapso, ou cause perigo para o trabalhador.
- Economia: para se construir com eficiência, economizando tempo e dinheiro.

A execução de fôrmas para o concreto armado, seja por sua influência sobre o resultado final do concreto, pelo seu custo ou pela complexidade em alguns casos, não deve e não pode ser improvisada. Ainda hoje, em algumas regiões do país, toda a responsabilidade de execução da fôrma recai sobre o mestre de carpintaria, que escolhe o material (madeira ou chapa compensada), tipos de pregos e detalhes construtivos. Mesmo nas pequenas construções, embora resolvido pelo mestre de obra em algumas circunstâncias, problemas genéricos tornam indispensáveis a esquematização dos detalhes das fôrmas e respectivos cálculos de estabilidade.

Um planejamento da fôrma inicia-se pela análise e estudo dos desenhos geométricos das estruturas a construir, através da escolha do esquema mais econômico para cada caso. Esta etapa é muitas vezes fornecida ao construtor através de uma proposta de um projetista ou firma especializada. Isto permite comparar os métodos alternativos, escolher a linha de planejamento a adotar, e ainda definir a programação propriamente dita do reaproveitamento.

Em todas as três condições acima, qualidade, segurança e economia, a carga sobre as fôrmas aparece como fator predominante. A quantidade de carga a ser aplicada depende da qualidade da fôrma e da quantidade de deformação que ela suporta. A segurança da fôrma também demanda um conhecimento da carga envolvida. Portanto, torna-se oportuno pesquisar as cargas de concreto fresco a que estão sujeitas as fôrmas, e determinar os fatores que as influenciam.

Neste trabalho, fez-se um estudo referente ao estado da arte e verificou-se que o comportamento mecânico do concreto fresco é muito similar a um solo coesivo. Analisou-se também um grande número de fórmulas com a consideração de

vários fatores que influenciam na pressão lateral do concreto sobre a superfície de uma fôrma. É óbvio que, como cada autor aborda determinados parâmetros como prioritários, acaba-se por ter resultados diferentes em muitos casos.

Esta pesquisa visa desenvolver ensaios, objetivando a determinação de pressões laterais do concreto fresco em fôrmas. Com as pressões determinadas experimentalmente, pode-se, através de um planejamento fatorial 2^2 , tomando-se como variáveis principais o abatimento do concreto e a velocidade de enchimento do concreto, verificar seus efeitos e interações sobre as pressões laterais, e a partir daí, sugerir uma formulação apropriada para o cálculo das pressões, segundo estes dois fatores.

Espera-se que este trabalho contribua para incentivar novas pesquisas no Brasil, relacionadas a pressões em fôrmas, já que, conforme pode-se verificar, as maiores investigações a respeito foram feitas no exterior.

A pesquisa contou com o apoio do acervo da biblioteca da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, e com as instalações, equipamentos e pessoal técnico do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil.

O desenvolvimento desta pesquisa contou com a colaboração da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, mediante concessão da bolsa de mestrado e reserva técnica para compra de materiais para os ensaios.

1.1 DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO FRESCO E ANALOGIA COM A MECÂNICA DOS SOLOS

Os autores A. ALEXANDRIDIS e N.J. GARDNER(4), em seu artigo, de 1981, relatam que o concreto fresco pode ser visualizado como partículas de agregados inertes, as quais são suspensas numa matriz deformável de pasta de cimento e bolhas de ar. Dado o tempo e as condições próprias do ambiente, a pasta de cimento é convertida através de um processo físico-químico entre os grãos de cimento e a água, numa massa homogênea de partículas.

Uma quantidade significativa de pesquisas visaram o conhecimento das propriedades mecânicas do concreto no estado sólido. Problemas tais como o bombeamento, trabalhabilidade, lançamento do concreto fresco e desenvolvimento da *Pressão Lateral em Fôrmas* são exemplos de temas pouco pesquisados no Brasil.

O concreto fresco, tal como o solo, é um sistema composto de partículas fragilmente interligadas e submergidas em um meio fluido. Possui resistência cisalhante resultante da interação entre resistência de atrito e a coesão entre o agregado e as partículas de cimento (Equação 1.2), durante a hidratação (Equação 1.3).

O desempenho mecânico do concreto fresco é muito similar a um solo coesivo, visto que ele possui coesão, atrito interno e pressão da água nos poros. Consequentemente, é interessante rever as teorias básicas que elucidam o comportamento deste sistema mecânico de partículas.

a) Tensão em um sistema mecânico de partículas

Segundo os pesquisadores ALEXANDRIDIS e GARDNER(4), o concreto fresco pode ser considerado um sistema mecânico de partículas, o qual transmite forças através dos vazios (pressão nos poros), de pontos de contato entre partículas (tensão efetiva), e seções transversais das partículas.

Terzaghi mostrou que, para um sistema mecânico de partículas, a tensão total em qualquer plano que não corta nenhuma partícula, é dada com exatidão suficiente pela equação seguinte:

$$\sigma = \sigma' + U \quad (1.1)$$

onde

σ = tensão total;

σ' = tensão efetiva;

U = pressão nos poros.

b) Teorias de resistência cisalhante

Teoria Mohr- Coulomb

A equação 1.2, de Coulomb, é a expressão conhecida e usada em mecânica dos solos para descrever a resistência cisalhante de um solo, sujeito a colapso.

$$\tau = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (1.2)$$

onde

τ = tensão cisalhante;

C = coesão;

σ_n = tensão normal total;

$\operatorname{tg}\phi$ = coeficiente de atrito interno do solo.

A prática em mecânica dos solos tem representado as condições de tensão no colapso como uma série de círculos de Mohr em um único sistema de eixos; a envoltória de tais círculos de tensão é conhecida como Envoltória de Mohr-Coulomb na ruptura. É importante notar que, na amostra saturada, a resistência cisalhante depende da tensão efetiva e não da tensão total e a equação de Coulomb deverá ser escrita em termos de parâmetros de tensão efetiva.

$$\tau' = C' + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg}\phi' \quad (1.3)$$

onde

τ' = tensão cisalhante efetiva;

C' = coesão efetiva;

σ'_n = tensão normal efetiva;

$\operatorname{tg}\phi'$ = coeficiente de atrito efetivo interno do solo.

Com a mudança de volume incluída nos parâmetros C' - ϕ' , a teoria de Mohr-Coulomb torna-se essencialmente uma boa ferramenta técnica. Uma vez que a mudança de volume depende do sistema de tensão adotado inicialmente, que difere entre os tipos de testes, valores universais C' - ϕ' não podem ser encontrados para um material de forma independente do método de teste adotado.

Teoria de ROWE

ROWE(24) expõe a seguinte teoria: Considere a força P necessária para mover um corpo ao longo de um plano inclinado de ângulo β , Figura 1.1.

As Figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 são obtidas da Equação de Rowe.

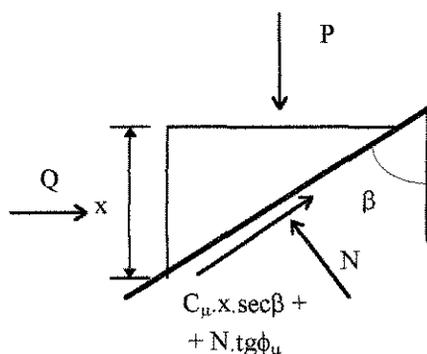


Figura 1.1 - Forças sobre um plano inclinado

Assumindo que o material possui componentes de atrito e coesão da resistência cisalhante, então, no instante do deslizamento, as forças podem ser equacionadas por:

$$\frac{P - C_{\mu} \cdot x}{Q + C_{\mu} \cdot x \cdot \text{tg} \beta} = \text{tg}(\phi_{\mu} + \beta) \quad (1.4)$$

onde

P = força;

C_μ = quantidade de tensão coesiva;

ϕ_μ = ângulo de atrito do material com a parede;

β = ângulo do plano inclinado em relação à vertical;

Q = força sobre o corpo, normal à força P .

Considere um sistema de esferas num corpo cúbico centrado como mostra a Figura 1.2.

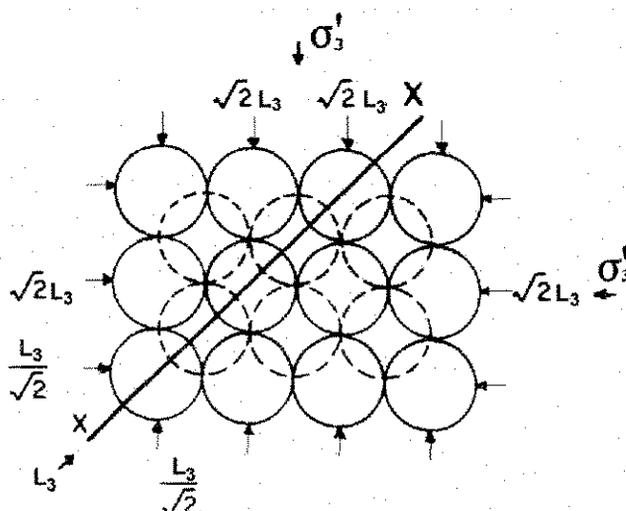


Figura 1.2 - Plano - Corpo cúbico centrado cheio de esferas

O movimento de uma esfera em relação a outra durante a aplicação de uma tensão deviatória pode levar a um deslizamento. Aplicando a Equação (1.4) num ponto de contato das esferas, a seguinte condição de deslizamento é obtida:

$$\frac{(L_1/4) - C'_\mu \cdot l_1 \cdot l_3}{(L_3/2) + C'_\mu \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \text{tg}\beta} = \text{tg}(\phi'_\mu + \beta) \quad (1.5)$$

onde

C'_μ = parâmetro de coesão por unidade de área na direção l_1 ;

L_1 e L_3 = cargas por contato nas direções l_1 e l_3 respectivamente.

Uma vez que $L_1 = \sigma'_1 \cdot l_3 \cdot l_3$ e $L_3 = \sigma'_3 \cdot l_1 \cdot l_3$, a Equação (1.5) pode ser reescrita em termos de tensões efetivas.

$$\frac{\sigma'_1 \cdot l_3 - 4C'_\mu \cdot l_1}{2\sigma'_3 \cdot l_1 + 4C'_\mu \cdot l_1 \cdot \text{tg}\beta} = \text{tg}(\phi'_\mu + \beta) \quad (1.6)$$

Notando que $\frac{2l_1}{l_3} = \text{tg}\alpha$ é um ângulo relacionado ao grupo de esferas (Figura 1.3) e

substituindo na Equação (1.6):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \cdot \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}(\phi'_\mu + \beta) + 2C'_\mu \cdot \text{tg}\alpha \cdot [1 + \text{tg}\beta \cdot \text{tg}(\phi'_\mu + \beta)] \quad (1.7)$$

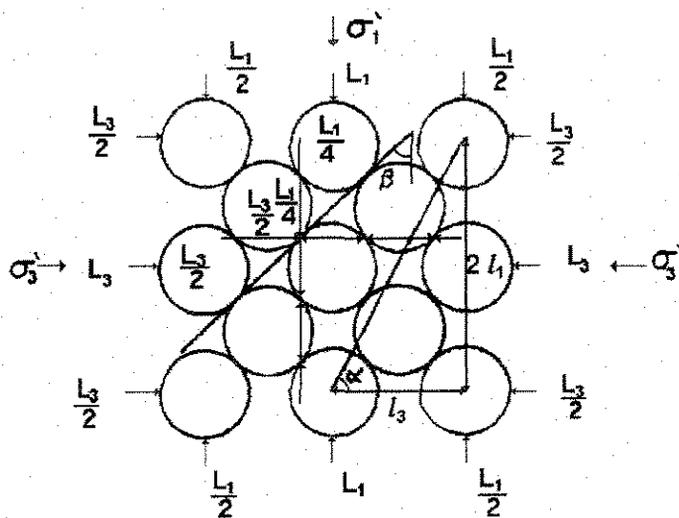


Figura 1.3 - Seção x-x

A Figura 1.4 mostra o mecanismo onde o colapso aparece.

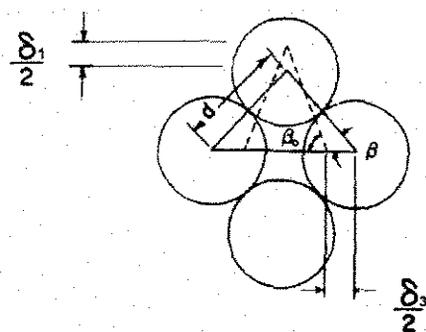


Figura 1.4 - Mecanismo de colapso

Considere δ_1 e δ_3 as deflexões resultantes de uma mudança de carga, β ângulo instantâneo e β_0 ângulo original do plano inclinado, respectivamente.

$$\delta_1 = 2d(\text{sen}\beta_0 - \text{sen}\beta) \quad (1.8a)$$

$$\delta_3 = 2d(\text{cos}\beta - \text{cos}\beta_0) \quad (1.8b)$$

porém

$$\delta'_1 = \frac{\partial \delta_1}{\partial \text{carga}} = 2d \text{cos}\beta \frac{\partial \beta}{\partial \text{carga}} \quad (1.8c)$$

$$\delta'_3 = \frac{\partial \delta_3}{\partial \text{carga}} = -2d \text{sen}\beta \frac{\partial \beta}{\partial \text{carga}} \quad (1.8d)$$

Assim sendo

$$\frac{\delta'_3}{\delta'_1} = \text{tg}\beta \quad (1.8e)$$

mas

$$\varepsilon'_3 = \frac{\delta'_3}{l_3} \quad (1.8f)$$

Conseqüentemente, em termos de deformação:

$$\frac{\varepsilon'_3}{\varepsilon'_1} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta = \nu' \quad (1.8g)$$

sendo: ν' = coeficiente de Poisson.

1.1.2 - COEFICIENTE DE PRESSÃO LATERAL DO MATERIAL

De acordo com a teoria da mecânica dos solos, a pressão lateral exercida sobre uma superfície vertical sem atrito por um material granular seco é proporcional à pressão vertical.

$$p_h = K \cdot p_v \quad (1.9)$$

$$p_v = \gamma \cdot h \quad (1.10)$$

onde:

p_h = pressão lateral;

K = coeficiente de pressão lateral do solo (material granular);

p_v = pressão vertical;

γ = peso específico do material granular;

h = altura de material granular.

O coeficiente de pressão lateral é função não somente do atrito interno do material, mas também do fato da pressão lateral ser ativa, passiva ou neutra.

Considera-se um coeficiente de pressão lateral ativo, K_a , quando uma superfície de sustentação lateral, submetida a uma pressão originada por um material retido, cede em uma certa quantidade que depende de suas características estruturais. Já com o coeficiente de pressão lateral passivo, K_p , ocorre o contrário: a superfície é que avança contra o material retido. Portanto o coeficiente ativo está relacionado à pressão ativa, assim como o coeficiente passivo, à pressão passiva. Pode-se dizer ainda, que o estado ativo é aquele que corresponde a uma distensão do material retido e o estado passivo o que corresponde a uma compressão.

Se um material está retido por um plano vertical imóvel, indeformável e sem atrito, tem-se um coeficiente de pressão lateral neutro (em repouso), K_0 quando, então, a pressão sobre o plano será horizontal e crescerá linearmente com a profundidade. Tais pressões denominam-se pressões no repouso. As pressões sobre estruturas que, por sua natureza essencialmente rígidas, não possam ou não devam sofrer deslocamentos apreciáveis, serão calculadas utilizando-se o coeficiente K_0 .

Se o concreto for vibrado até atingir um estado fluido e não apresentar ação ativa ou passiva, o coeficiente neutro K_0 será o apropriado.

Se o material granular for saturado com um fluido, a expressão deve ser modificada, levando-se em conta o valor da densidade fluida equivalente do material granular (γ_f).

$$p_v = \gamma_c \cdot h_c - \gamma_f \cdot h_f \quad (1.11)$$

$$p_h = K_0 \cdot p_v + \gamma_f \cdot h_f \quad (1.12)$$

onde:

K_0 = coeficiente de pressão lateral neutro, em função do tempo, temperatura e tensão;

h_c = altura de concreto ;

h_f = altura da fase fluida do concreto;

γ_f = densidade fluida equivalente do concreto;

γ_c = peso específico do concreto.

Quando as partículas de cimento do concreto fresco se hidratam, desenvolve-se uma estrutura cristalina de partículas capaz de conduzir um acréscimo de carga vertical. Com a hidratação do cimento gel, a densidade fluida equivalente (γ_f) se reduz, muda-se o coeficiente neutro da pressão lateral, e a pressão efetiva vertical, para a qual se aplica o coeficiente de pressão lateral, deverá ser alterada permitindo, assim, significativo contato entre as partículas.

ALEXANDRIDIS e GARDNER (4), mediram o coeficiente de pressão neutra do solo com o tempo de adição de água para a mistura. A Figura 1.6, obtida em GARDNER(13), é uma versão interpretada da Figura 1.5 que mostra uma variação mais lógica de K_0 em relação ao tempo e à tensão.

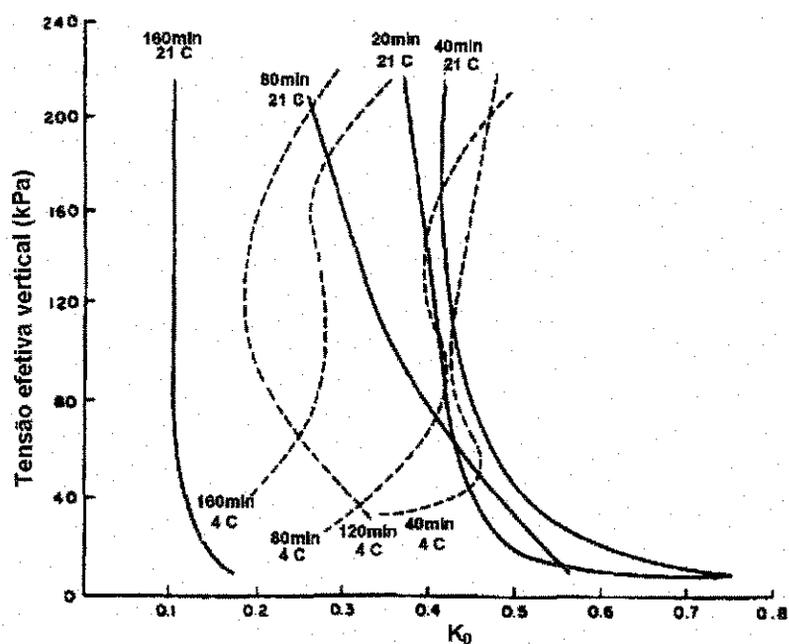


Figura 1.5 - Medida da Variação de K_0 com a tensão efetiva e o tempo.
ALEXANDRIDIS e GARDNER(4)

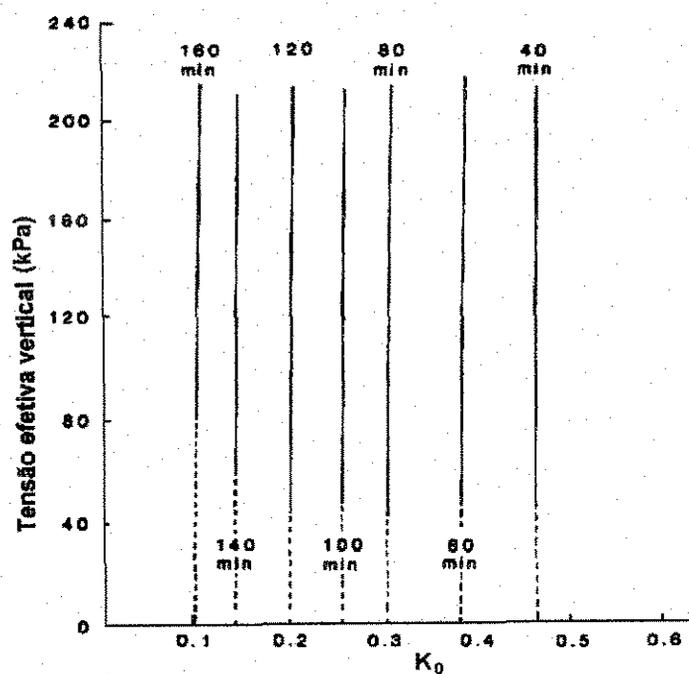


Figura 1.6 - Variação Idealizada de K_0 com tensão efetiva e o tempo.
GARDNER(13)

1.2 REOLOGIA DO CONCRETO FRESCO

É a ciência da deformação e escoamento da matéria. A reologia do concreto pode ser dividida entre reologia do escoamento e reologia do não escoamento. Reologia do escoamento tem importância no bombeamento do concreto. O concreto pode ser representado também como sendo um fluido Newtoniano ou um fluido Bingham. Um fluido Newtoniano tem a relação de tensão cisalhante para velocidade cisalhante (Figura 1.7).

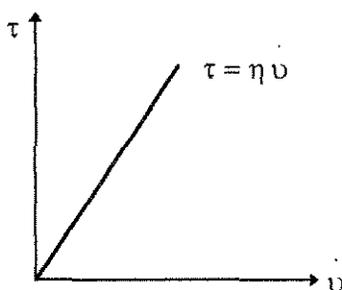


Figura 1.7 - Relação da velocidade cisalhante e tensão cisalhante em um fluido Newtoniano. GARDNER (13)

Um fluido Bingham não escoava a não ser que uma certa tensão cisalhante ao escoamento é excedida (Figura 1.8).

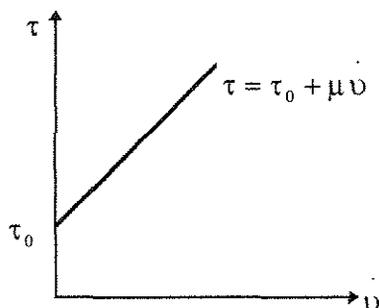


Figura 1.8 - Relação de velocidade cisalhante e tensão cisalhante em um fluido Bingham. GARDNER (13)

$$\text{Fluido Newtoniano: } \tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.13)$$

$$\text{Fluido Bingham: } \tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.14)$$

onde

τ = tensão cisalhante aplicada;

τ_0 = tensão cisalhante do escoamento;

η = viscosidade;

μ = viscosidade plástica.

$\dot{\gamma}$ = velocidade cisalhante;

HOBBS(15) estudou a influência da concentração do volume de agregado sobre a trabalhabilidade do concreto. A seguinte relação destina-se á análise do comportamento do concreto, levando-se em conta as propriedades do cimento e a concentração do volume de agregado utilizado.

$$\sigma_c = \sigma_a \cdot V_a + \sigma_p(1 - V_a) \quad (1.15)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p(1 - V_a) \quad (1.16)$$

onde

σ_c = tensão normal no concreto;

σ_a = tensão normal sobre o agregado;

σ_p = tensão normal sobre a pasta;

ε_c = deformação normal no concreto;

ε_p = deformação normal sobre a pasta;

V_a = concentração de volume de agregados.

A resistência cisalhante ao escoamento cresce com o aumento na concentração de volume de agregado; Equação (1.17).

$$\tau_{0c} = \tau_{0p} \left[1 + \frac{1,5 \cdot V_{a,max} \cdot V_a + V_a^2}{(V_{a,max} - V_a)} \right] \quad (1.17)$$

onde

τ_{0c} = tensão cisalhante de escoamento do concreto;

τ_{0p} = tensão cisalhante de escoamento da pasta;

$V_{a,máx}$ = concentração máxima do volume de agregado.

Hobbs adverte que, em altas concentrações de partículas, tornam-se difíceis análises rigorosas por causa de fatores tais como colisões, turbulência, movimento Browniano, rotação de partícula, pequenas forças de cisalhamento e imobilização do fluido suspenso dentro de conglomerados de partículas.

Em 1962, RITCHIE (22), em seu artigo sobre teste triaxial do concreto fresco, declarou que a trabalhabilidade de uma mistura de concreto é resultado das propriedades fundamentais reológicas da mistura fresca. Mediu diretamente o ângulo de atrito interno do concreto fresco usando o sistema tridimensional de tensão para o teste triaxial. Foi analisada uma variedade de misturas de concreto limitando entre alta e baixa trabalhabilidade. Testes triaxiais foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, numa taxa de deformação de 2,1% por minuto até que fosse observado colapso ou uma deformação que excedesse 20%. Foram usadas células de carga entre os limites de 35 a 420 kPa. Os

círculos de Mohr foram desenhados junto com o eixo principal obtendo-se o ângulo de atrito interno. A Tabela 1.1 sumariza os resultados de Ritchie.

Tabela 1.1
Resultados do teste de Ritchie

| Mistura | Trabalhabilidade | fator de compactação | fator água/cimento | abatimento (mm) | tempo de Vebe (s) | ângulo de atrito interno | coesão aparente (kPa) |
|---------|------------------|----------------------|--------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1:3 | baixo | 0,85 | 0,452 | 85 | 3,5 | 12° | 14 |
| | médio | 0,92 | 0,457 | 125 | 2,0 | 11° | 35 |
| | alto | 0,95 | 0,485 | 125 | 1,5 | 8° | 28 |
| 1:4,5 | baixo | 0,85 | 0,512 | 30 | 7,5 | 28° | 21 |
| | médio | 0,92 | 0,549 | 50 | 6,5 | 28° | 28 |
| | alto | 0,95 | 0,561 | 70 | 4,0 | 25° | 49 |
| 1:6 | baixo | 0,85 | 0,557 | 0 | 9,0 | 32° | 56 |
| | médio | 0,92 | 0,665 | 60 | 4,5 | 30° | 56 |
| | alto | 0,95 | 0,690 | 60 | 2,5 | * | * |
| 1:7,5 | baixo | 0,85 | 0,676 | 0 | 10,0 | 34° | 70 |
| | médio | 0,92 | 0,775 | 20 | 5,0 | 34° | 49 |
| | alto | 0,95 | 0,805 | 40 | 4,5 | * | * |

Ritchie concluiu que:

- Para misturas que possuem o mesmo fator de compactação, o ângulo de atrito interno aumenta quando a proporção agregado/cimento aumenta;
- Quando a relação água/cimento aumenta, o efeito lubrificante da camada de pasta entre o agregado aumenta resultando em decréscimo do valor de atrito interno.

Deve-se enfatizar que em suas pesquisas de Hobbs(15), e Ritchie(22), realizaram testes sem considerar a perda de água, porém, não efetuaram as medidas de pressão nos poros. Consequentemente, não puderam ser obtidos todos os resultados dos testes em termos de análise de tensões totais e uma tensão efetiva. Visto que os valores sem perda de água C e ϕ são dependentes das pressões nos poros, e estas, quando desenvolvidas sob condições de campo, diferem significativamente daquelas desenvolvidas no laboratório, é difícil estimar a aplicabilidade dos seus resultados de teste.

Convém observar que a temperatura tem grande influência sobre o endurecimento do concreto, porém, Ritchie não considerou o efeito da temperatura sobre o concreto fresco.

1.3 CONSIDERAÇÕES DE CARGAS E SOBRECARGAS NAS FÔRMAS

Conforme WALTER PFEIL(21), em seu livro “Cimbramentos”, no cálculo de fôrmas, quatro são as cargas principais a considerar:

a) Peso específico do concreto fresco

Normalmente adota-se $\gamma_c = 25 \text{kN/m}^3$

b) Peso próprio das fôrmas

A rigor, deveria ser considerado cada tipo de fôrma e seu material componente (madeira, aço, fibra, etc.). No caso das fôrmas de madeira, entretanto, e até mesmo em fôrmas mistas (madeira e aço), poderia ser estimado um peso próprio entre 400 e 600N/m^2 , que normalmente seria incluído na sobrecarga considerada.

c) Sobrecargas

São consideradas como sobrecargas por ocasião da concretagem, as cargas provenientes, de material estocado, trabalhadores e equipamentos. Algumas vezes, o implemento de equipamentos especiais, principalmente de vibradores e o lançamento, pode acrescer estas previsões, que são adotadas variando entre 2500 e 3750N/m^2 .

d) Pressão lateral do concreto

A pressão lateral também é tratada como carga horizontal. Devida ao concreto, é a solicitação aplicada sobre as superfícies laterais de uma fôrma. Sua intensidade depende de muitos fatores que serão enfocados neste trabalho.

1.3.1 CARGAS VERTICAIS E HORIZONTAIS

Segundo MASCARENHAS(17), em sua publicação “Considerações sobre projeto e execução de fôrmas e escoramentos”, de 1983, para a avaliação dos esforços que agem sobre as fôrmas, consideram-se as cargas verticais e horizontais, que, a depender do formato das formas, poderão originar solicitações inclinadas.

- **Cargas verticais**

Esses tipos de carregamento provêm dos pesos de materiais, de pessoas, equipamentos, etc., podendo ser divididos da seguinte maneira:

- a) Permanentes

- peso do concreto (simples ou armado);
- peso próprio de fôrmas;

- b) Sobrecarga de serviço

- pessoas (operários e supervisores);
- material auxiliar para a concretagem;
- materiais, como armaduras, por exemplo, estocados sobre as fôrmas durante certo período, equipamentos de protensão, etc.;
- efeitos dinâmicos: baldes de concreto, por exemplo, descarregando sobre as fôrmas.

- **Cargas horizontais**

Das solicitações horizontais que as fôrmas são submetidas destacam-se:

- a pressão lateral do concreto;
- a ação do vento, que poderá ser mais prejudicial às fôrmas quando ainda vazias;
- componentes de cargas inclinadas;
- choques acidentais, decorrentes, por exemplo, de movimentação com guas transportando armaduras, baldes de concreto, componentes de fôrmas de grandes dimensões, etc.

Sempre que se tenha a probabilidade de atuação de cargas especiais às formas, isto é, aquelas não incluídas nas classificações anteriores, as mesmas devem ser objeto de estudo específico, sobretudo quando localizadas.

1.3.2 PRESSÃO LATERAL DO CONCRETO FRESCO

A pressão do concreto fresco age de forma relevante sobre as superfícies laterais da fôrma.

MASCARENHAS(17) relatou que quando se lança o concreto numa fôrma, ele é contido pelas suas laterais, que impedem o seu abatimento sobre o plano inferior (fundo). Para reter a mistura, a fôrma necessita responder à pressão causada pela massa, que tende à posição de equilíbrio. Porém, ao se realizar o adensamento, esse repouso é perturbado por uma fluidificação da mistura, que passará a se comportar de modo semelhante a um líquido. Sabe-se que este, quando mantido num

reservatório, exerce pressão sobre as paredes laterais, cujo valor dependerá de sua massa volumétrica e da altura que atinge em relação ao fundo do recipiente.

Portanto o concreto agirá de modo similar, porém, não sendo a mistura inerte e nem homogênea, vários fatores podem fazer variar esse quadro, e a comparação não será válida com o passar do tempo desde o fim da vibração.

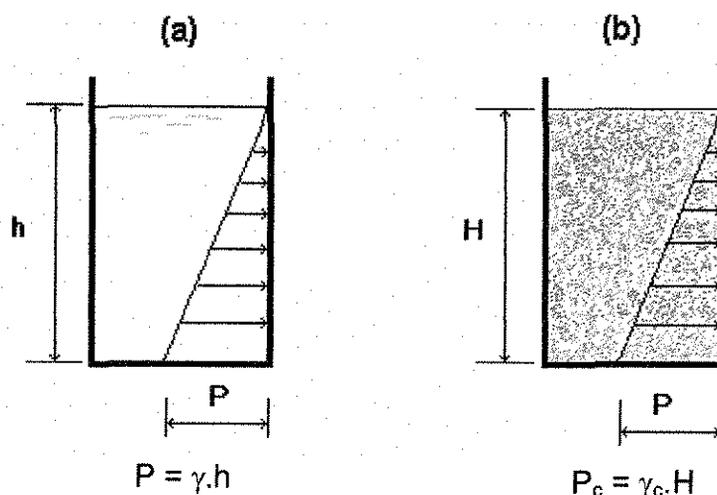


Figura 1.9 - Pressões laterais num reservatório contido por: (a) água e (b) concreto

Quando o concreto é lançado nas fôrmas provoca um choque nas mesmas; em seguida realiza-se um adensamento, manual ou mecânico, sucedendo-se a este, uma fase de pega do cimento até o endurecimento. Tais fases são importantes para o estudo da pressão lateral.

Segundo CALIL JR, C.(6), em “Fôrmas de madeira para concreto armado”, de 1995, muitos estudos e ensaios foram feitos para determinar uma fórmula de cálculo para pressão lateral que o concreto exerce sobre as fôrmas, mas os resultados obtidos têm diferido bastante entre si, em função das muitas variáveis que afetam o problema.

As pressões atuantes nas partes da fôrma são de difícil equacionamento, segundo o autor, pois dependem de diversos fatores os quais nem sempre são de fácil conhecimento.

1.3.3 FATORES QUE INFLUEM NA PRESSÃO LATERAL

- densidade ou massa volumétrica do concreto;
- abatimento do concreto;
- temperatura do concreto;
- menor dimensão da seção de concreto;
- altura do concreto acima do ponto considerado;
- velocidade de enchimento;
- tipo de adensamento, vibração.
- o aglomerante - sua natureza, dosagem e tempo de pega;
- os aditivos;
- os inertes;
- fator água/cimento;
- armaduras (seção, densidade, disposição);
- deformabilidade das fôrmas;
- estado das superfícies das fôrmas;
- absorção de água e permeabilidade das fôrmas;
- altura de lançamento do concreto nas fôrmas.

As considerações sobre os fatores mais importantes citados são:

- Densidade ou Massa Volumétrica (γ) - quando o concreto novo é vibrado, ele tende a se comportar como um líquido e a pressão lateral terá o valor correspondente ao produto da profundidade considerada, pela densidade do concreto. Se o elemento concretado for de concreto armado, devemos levar em consideração a densidade da armadura, pois a mesma tende a minimizar a atuação da pressão lateral do concreto sobre as faces da fôrma.
- Abatimento do Concreto - esse dado, hoje contestado por muitos tecnologistas do concreto, está relacionado com a consistência do concreto e sua relação água/cimento. Após a vibração, a mistura semi-líquida exercerá maior pressão quanto maior o seu abatimento.
- Temperatura do Concreto - relaciona-se, diretamente com o início da pega, e com o endurecimento, o que reduz a atuação das cargas do concreto.
- Menor Dimensão da Seção de Concreto (d) - com o início da pega, as peças de concreto relativamente estreitas têm no seu interior, o surgimento do efeito de arco, isto é, as camadas verticais laterais passam a suportar zonas arqueadas que deixam de colaborar para o crescimento da pressão abaixo desse nível. O Comité-Euro-Internacional du Beton (CEB) considera que para o valor $d \leq 500\text{mm}$ pode-se reduzir o valor da pressão lateral.

- Altura do Concreto acima do Ponto Considerado - pela justificativa do primeiro fator é possível avaliar a importância deste.
- Velocidade de concretagem: quando a velocidade é grande, a pressão lateral sobre a fôrma será máxima; e se baixa, as primeiras porções lançadas já poderão estar com a pega iniciada, dentro de certo tempo, o que reduz o valor da pressão do concreto.
- Tipo de Adensamento - as vibrações transmitidas ao concreto e às fôrmas provocam a fluidificação da mistura, o que vai proporcionar elevação da pressão lateral sobre as fôrmas.

Vale ressaltar que os impactos, devidos ao lançamento de certas alturas do concreto sobre as fôrmas, podem gerar aumentos da pressão lateral.

1.4 O COMPORTAMENTO DA PRESSÃO COM A VIBRAÇÃO DO CONCRETO

GARDNER e QUERESHI (10), em 1979, analisaram a variação da pressão lateral exercida pelo concreto fresco com a profundidade de imersão, duração e potência do vibrador.

A envoltória mais simples de pressão lateral que se possa imaginar é a pressão hidrostática pura, considerando o concreto como um fluido perfeito. Contudo, o concreto não é um fluido, e sim, uma massa particular que possui resistência cisalhante a qual aumenta com o tempo e o atrito entre a superfície da

fôrma e o concreto, que limita a pressão lateral. Conseqüentemente, as envoltórias de pressão lateral no projeto de fôrma são usualmente caracterizadas como hidrostáticas acima de uma certa profundidade da superfície livre, e depois disso constante no valor máximo para alguma profundidade que corresponda à pega do concreto.

O propósito da vibração é fluidificar o concreto para destruir sua capacidade de resistência cisalhante e o atrito entre o concreto e as paredes da fôrma.

A Figura 1.10 representa o enchimento de uma parede ou coluna. O concreto cobre profundidades sucessivas de um metro de altura, em etapas, e o vibrador é imerso um metro dentro do concreto após cada etapa.

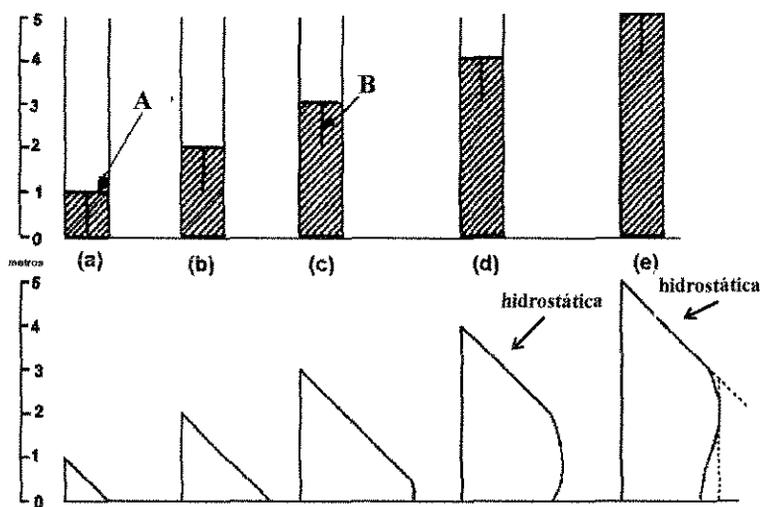


Figura 1.10 - Desenvolvimento da envoltória de Pressão Lateral. **A** = nível de concreto, e **B** = profundidade do vibrador. GARDNER(13)

Figura 1.10a) O Concreto cobre a altura inicial de um metro, e o vibrador é imerso até o fundo da fôrma. Ele é fluidificado e a pressão lateral caracteriza-se como hidrostática.

- Figura 1.10b) Mostra o segundo lançamento do concreto com um metro de altura, e a imersão do vibrador um metro dentro do concreto, o efeito do vibrador se estenderá abaixo dele, e dois metros de profundidade do concreto serão fluidificados, dando a pressão hidrostática.
- Figura 1.10c) Com o terceiro preenchimento em um metro de altura e o vibrador imerso um metro dentro, as primeiras porções de concreto do primeiro lançamento não será fluidificado e desenvolverá resistência cisalhante e atrito nas paredes. A pressão será menor do que a hidrostática.
- Figura 1.10d) A altura de concreto é novamente aumentada de um metro; utilizou-se o vibrador como anteriormente, mas o concreto mais abaixo desenvolveu significativa resistência cisalhante, determinando carga verticalmente e desenvolvendo atrito entre o concreto e a parede. Consequentemente, a pressão lateral alcança um máximo em alguma altura acima da base da fôrma.
- Figura 1.10e) Mostra que quando o concreto é lançado, a pressão lateral é hidrostática a partir da superfície livre, alcança o máximo e então decresce.

Se o concreto é completamente fluidificado, ele age como um fluido com uma pressão lateral igual à pressão vertical em qualquer profundidade. Contudo, inserir o vibrador somente a um metro do topo do concreto é uma prática normal. O concreto abaixo desta profundidade desenvolverá resistência cisalhante (coesão e

atrito interno), determinará e desenvolverá atrito na parede entre o concreto e a fôrma, reduzindo a carga efetiva e diminuindo a pressão lateral abaixo da pressão hidrostática.

A resistência do concreto depende do atrito interno e da coesão, que não varia somente com a deformação mas também como o grau de hidratação, que está associada a temperatura e ao tempo.

De acordo com GARDNER(13), em 1985, quando o concreto é vibrado, ele age como uma mistura homogênea com as propriedades de um fluido e densidade do concreto. Durante o processo de hidratação as partículas de areia e do cimento formam juntas uma estrutura frágil de partículas; a fase fluida do cimento gel torna-se menos densa e conseqüentemente a pressão fluida medida no poro é menor. Se por algum motivo agora a massa semi endurecida do concreto sofre dilatação, a pressão fluida pode tornar-se tensão de tração.

De acordo com os resultados de Gardner apresentados na figura 1.10, os maiores fatores que controlam a intensidade da pressão lateral são a profundidade de concreto vibrado e desenvolvimento, pelo concreto, da resistência cisalhante e coeficiente de atrito com a parede.

Deve-se levar em consideração que a pressão lateral sobre a fôrma é uma tensão total, usando-se a terminologia da mecânica dos solos, ou seja, a soma da tensão lateral imposta pela massa de partículas saturadas ou parcialmente saturadas mais a pressão da água livre. A quantidade de água livre existente em qualquer estágio após o lançamento, sob as condições descritas das tensões do concreto na fôrma, é desconhecida.

2.1 MÉTODOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DE PRESSÃO DO CONCRETO

Em 1952, RODIN(23) coletou e revisou dados experimentais publicados sobre pressão do concreto fresco contra as fôrmas, e concluiu que os maiores fatores que influenciam a pressão lateral são: velocidade de enchimento, vibração, consistência e proporção da mistura, temperatura do concreto, tempo de pega do concreto, e tamanho e forma da fôrma. Argumentou que, onde os vibradores externos são usados, a fôrma deve ser projetada para a pressão hidrostática de um líquido que tenha a mesma densidade que o concreto. Para o concreto internamente vibrado, Rodin propôs a envoltória da pressão lateral dada na Figura 2.1, onde $p_{máx}$ é dado pela equação abaixo para um concreto cujo peso específico seja de 24 kN/m³ e cujo traço de concreto é 1:2:4 com abatimento de 150mm numa temperatura de 21°C

$$H_{máx} = 1,63.R^{1/3} \quad (m) \quad (2.1)$$

$$p_{máx} = 23,4.H_{máx} \quad (kPa) \quad (2.2)$$

onde:

$H_{máx}$ = profundidade em que ocorre a Pressão Lateral Máxima (m);

$p_{máx}$ = pressão lateral máxima (kPa);

R = velocidade de enchimento (m/h).

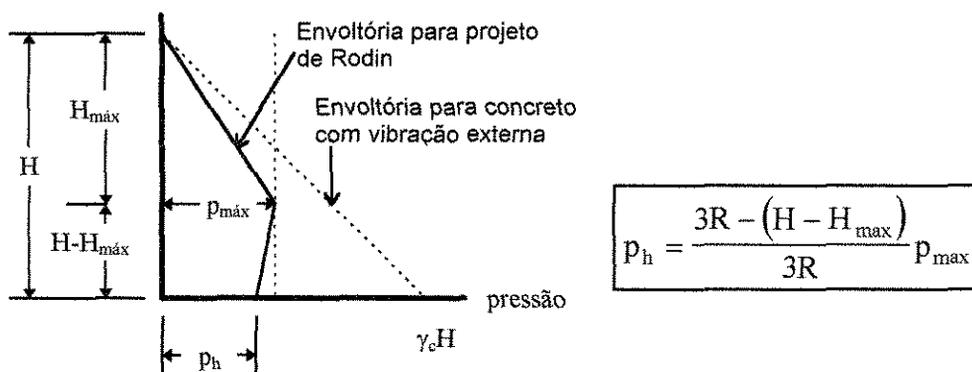


Fig.2.1 - Envoltória da Pressão Lateral de Projeto. RODIN(23).

De 1958 a 1978, um subcomitê formado pelo COMITÊ ACI-347, American Concrete Institute (1-2), coletou e analisou a literatura existente, incluindo dois trabalhos previamente descritos e adequados aos dados de projeto de fôrma. O comitê concluiu que as variáveis significantes que afetam a pressão lateral são:

- velocidade de enchimento;
- consistência do concreto;
- tamanho máximo de agregados;
- temperatura do concreto;
- nivelamento e permeabilidade da fôrma;
- tamanho e forma da fôrma;
- método de cura;
- método de enchimento;
- pressão da água nos poros;
- tipo de cimento; e
- profundidade de enchimento.

As variáveis consideradas na obtenção das fórmulas recomendadas foram:

- velocidade de enchimento do concreto;
- temperatura do concreto;
- efeito da vibração.

O Comitê propôs que para o projeto de fôrma, com a profundidade de imersão do vibrador menor do que 1,25m e o concreto com um abatimento menor do que 100mm, a envoltória da pressão lateral deve ser hidrostática a partir da superfície livre de concreto na fôrma até um valor limite dado pelas equações seguintes, e então constante neste valor limite.

O subcomitê utilizou dados obtidos de testes realizados por várias fábricas de fôrmas dos Estados Unidos, que utilizaram métodos de investigação e consideração de fatores similares.

As fórmulas recomendadas pelo Comitê ACI - 347 foram:

- Para paredes com R(velocidade de enchimento) < 2,14m/h

$$p_{\text{máx}} = 7,19 + \frac{785 \cdot R}{17,78 + T} \quad (\text{kPa}) \quad (2.3)$$

$p_{\text{máx}}$ não deve ultrapassar 23,5h ou 95,8 (kPa)

- Para paredes com $2,14 < R < 3$ m/h

$$p_{\text{máx}} = 7,19 + \frac{1155}{17,78 + T} + \frac{244R}{17,78 + T} \quad (\text{kPa}) \quad (2.4)$$

$p_{\text{máx}}$ não deve ultrapassar 23,5h ou 95,8 (kPa)

- Para paredes com $R > 3$ m/h

$$p_{\text{máx}} = 23,5h \quad (\text{kPa}) \quad (2.5)$$

$p_{\text{máx}}$ não deve ultrapassar 95,8 (kPa)

- Para colunas

$$p_{\text{máx}} = 7,19 + \frac{785R}{17,78 + T} \quad (\text{kPa}) \quad (2.6)$$

$p_{\text{máx}}$ não deve ultrapassar 23,5h ou 143,7 (kPa)

onde

h = profundidade total da fôrma, m

$p_{\text{máx}}$ = valor limite da pressão lateral, kPa

R = velocidade de enchimento, m/h

T = temperatura do concreto, °C

Em 1965, ADAM, BENNASR, e SANTOS DELGADO (3) conduziram testes de laboratório em uma fôrma grande de 3m de altura por 2,5m de largura com espessuras variáveis a fim de estudar o efeito, sobre a pressão lateral da fôrma, das seguintes variáveis: para o tipo de cimento, aditivos, tamanho de agregado, velocidade de enchimento, abatimento do concreto, e vibração. Consideraram como variáveis significativas:

- velocidade de enchimento;
- tipo de cimento;

- tamanho do agregado;
- aditivos;
- abatimento do concreto;
- vibração; e
- forma e tamanho da fôrma.

Os resultados deste estudo estão resumidos nas seguintes equações de pressão lateral :

Quando $R < 2$ m/hr

$$p_{\text{máx}} = 20 + 12R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} < 5^{\circ}\text{C} \quad (2.7)$$

$$p_{\text{máx}} = 20 + 10R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} = 15^{\circ}\text{C} \quad (2.8)$$

$$p_{\text{máx}} = 20 + 8R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} > 25^{\circ}\text{C} \quad (2.9)$$

Quando $R > 2$ m/h

$$p_m = 41 + 2R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} < 5^{\circ}\text{C} \quad (2.10)$$

$$p_m = 36 + 2R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} = 15^{\circ}\text{C} \quad (2.11)$$

$$p_m = 33 + 2R \quad (\text{kPa}); \quad \text{temperatura} > 25^{\circ}\text{C} \quad (2.12)$$

A CIRIA (CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION) patrocinou estudos em grande escala sobre pressões em fôrmas para concreto, os quais foram conduzidos pela Associação de Cimento e Concreto, e publicado em 1965 (7). Dessa investigação concluiu-se que a envoltória da pressão lateral foi afetada por:

- velocidade de enchimento;
- tipo de cimento;
- temperatura do concreto;
- trabalhabilidade do concreto;
- tamanho do agregado;
- história da vibração;
- atrito na fôrma; e
- tamanho e forma do elemento a ser concretado.

A CIRIA propôs um método de cálculo de pressão lateral que envolveu consideração de:

- velocidade de enchimento;
- temperatura do concreto;
- abatimento do concreto;
- dimensão mínima da fôrma; e
- continuidade da vibração.

O procedimento de cálculo da CIRIA, considerou ser hidrostática a envoltória da pressão lateral a partir da superfície livre de concreto na fôrma até uma pressão máxima ($p_{m\acute{a}x}$) limitada por dois fatores: endurecimento do concreto e flexão na parede (efeito arco). Limites arbitrários foram colocados sobre os valores máximos de $P_{m\acute{a}x}$.

Critério de Flexão na parede

$$p_{\text{máx}} = 14,37 + 0,094.d + 3,14.R > 35 \quad (\text{kPa}) \quad (2.13)$$

Critério de Endurecimento do concreto

$$p_{\text{máx}} = \frac{\gamma_c R t}{1 + c \left(\frac{t}{t_{\text{máx}}} \right)^4} + (4,6R - 1,89) > 35 \quad (\text{kPa}) \quad (2.14)$$

mas $p_{\text{máx}}$ não deve ultrapassar 24h ou 143,7 (kPa)

onde:

R = velocidade de enchimento (m/h);

d = menor dimensão da fôrma (mm);

h = altura total da fôrma (m);

t = tempo de enchimento (h);

$t_{\text{máx}}$ = tempo de endurecimento do concreto (h);

c = constante de vibração;

γ_c = peso específico do concreto.

e onde **c** e $t_{\text{máx}}$ foram definidos empiricamente em tabelas ($t_{\text{máx}}$ inclui efeito da temperatura do concreto).

Em 1974, OLSEN, SALEK, e PECK(19) divulgaram, num artigo sobre pressões laterais em fôrmas para concreto, os resultados da tese defendida por OLSEN em 1968(18) onde ele desenvolveu um método para prognosticar a pressão lateral do concreto fresco contra as fôrmas, utilizando o valor da resistência ao

cisalhamento do concreto fresco obtido a partir de testes triaxiais. Nos testes triaxiais, ele mediu e registrou as variações na resistência cisalhante do concreto fresco com o tempo. Então verificou as relações de tensão-deformação dos corpos de prova de concreto dos testes triaxiais para deformações, e correspondentes pressões impostas sobre as fôrmas.

Para avaliar a resistência cisalhante, Olsen realizou testes triaxiais sem perda de água, para tempos de início de pega (tempo após a adição de água para a mistura) variando entre 20 minutos a 180 minutos e pressões confinadas entre 140kPa e 560kPa.

Uma mistura padrão, tendo um traço de cimento/areia/agregado graúdo de 1,0:1,5:1,5, foi usado com uma relação água/cimento de 0,40. Os resultados dos testes triaxiais estão sumarizados na Tabela 2.1

Tabela 2.1
Resultados do teste de Olsen(18)

| tempo de início de pega (min) | coesão (kPa) | ângulo de atrito interno (graus) | atrito interno (minutos) |
|-------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------|
| 20 | 20 | 1° | 34' |
| 30 | 27 | 1° | 22' |
| 45 | 27 | 1° | 47' |
| 60 | 34 | 1° | 47' |
| 75 | 35 | 3° | 02' |
| 90 | 36 | 3° | 26' |
| 120 | 46 | 3° | 18' |
| 180 | 64 | 5° | 31' |

Dos resultados de Olsen, podem ser tiradas as seguintes conclusões gerais:

- Para tempos de início de pega baixos, as resistências cisalhantes do concreto fresco consistem principalmente da condição de coesão que possui a pasta de cimento;
- À medida que o tempo passa, a pasta de cimento torna-se menos plástica e a mobilidade das partículas do agregado diminui resultando no aumento do ângulo de atrito interno;
- A coesão aumenta constantemente com o tempo a medida que o cimento combina-se com a água para dar pega.

Os resultados deste estudo indicaram que, para velocidade de concretagem moderada, a pressão lateral máxima é menor do que a recomendada pelo ACI. Os métodos de Olsen e da CIRIA identificaram o tempo de início de pega, como o critério primordial na determinação da intensidade da pressão lateral. O método clássico para determinar a pressão lateral exercida contra paredes verticais é o uso da fórmula de Rankine:

$$p_h = wh_m - 2q_u \quad (2.15)$$

onde

p_h = pressão lateral;

w = peso específico do material retido;

h_m = altura do material retido;

q_u = resistência à compressão livre do material retido.

O conceito de Rankine não foi completamente aceito no caso de concreto em fôrmas verticais, devido a imposição, em fôrmas para concreto, dos limites de deformação das ligações (travejamentos). De acordo com OLSEN, a deformação no concreto depende da espessura da parede. Portanto, o termo q_u , na equação de Rankine, deverá ser modificado para representar a quantidade de deformação lateral que pode ocorrer no concreto úmido. Um método escolhido pelos pesquisadores, OLSEN, SALEK, e PECK(19), para determinar o valor da ‘compressão livre’ no concreto, foi o teste de cisalhamento triaxial.

Realizaram quase trezentos testes, usando uma mistura de concreto com um traço de 1,0:1,5:1,5: (cimento, areia e agregados) com a relação água-cimento de 0,4. Usou-se o cimento Tipo I, correspondente ao cimento Portland, e conduziram os testes em uma temperatura de 25°C. Os testes triaxiais foram realizados em oito diferentes períodos de tempo após a adição da água: 20, 30, 45, 75, 90, 120, e 180min, e quatro diferentes pressões confinadas: 140, 280, 420, e 560 kPa. Para cada combinação de pressão confinada e tempo, foram realizados, no mínimo, cinco testes.

Dos resultados dos testes triaxiais, deduziu-se:

$$p_{\max} = \left\{ 2145 - 9,8t + 223 \frac{A_i}{e} + 75h - \left[\left(2145 - 9,8t + 223 \frac{A_i}{e} + 75h \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. - \left(643,000h - 2950th - 86,600 \frac{A_i t}{e} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + P_{\text{vib}} \right\} 0,04882 \quad (2.16)$$

sendo

$$A_i = R/9 + 0,7 \quad \text{quando } R \leq 4,57\text{m/h}$$

$$A_i = R/40 + 2,0 \quad \text{quando } R > 4,57\text{m/h}$$

onde

$p_{\text{máx}}$ = pressão máxima do concreto, kPa;

t_a = tempo após a adição da água, min;

A_i = coeficiente de inclinação linear, em função da velocidade;

R = velocidade de enchimento, m/h;

e = espessura da parede de concreto;

h = altura da parede de concreto.

O termo p_{vib} é adicionado a expressão para a pressão adicional causada pela vibração do concreto.

$$p_{\text{vib}} = 100 + 300 \left[1 - \frac{e}{10} \right] \quad (2.17)$$

Em 1980, GARDNER (11) concluiu que o valor máximo da pressão lateral tem dependência de:

- a profundidade de vibração;
- velocidade de enchimento;
- temperatura do concreto;
- dimensão do elemento concretado; e
- abatimento do concreto(slump).

Gardner propôs que o valor limite $p_{\text{máx}}$ seja calculado por:

$$p_{\text{máx}} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400R^{1/2}}{18+T} + \frac{\text{slump} - 75}{10} \quad (\text{kPa}) \quad (2.18)$$

$$p_{\text{máx}} < 24h \quad (\text{kPa})$$

onde

$p_{\text{máx}}$ = pressão lateral máxima em kPa;

d = menor dimensão da fôrma, mm;

h = altura total da forma, m;

h_i = profundidade de imersão do vibrador, m;

HP = potência do vibrador (em cavalo vapor);

R = velocidade de enchimento, m/h;

T = temperatura do concreto, °C;

slump = abatimento do concreto em mm.

Em 1982, GARDNER (12) modificou a equação (2.18) para levar em conta o efeito de superplastificantes, substituindo o cimento por cinza volante Classe F. A equação (2.19), apresentada abaixo, que também pode ser usada para concreto de cimento com escórias, simplesmente substituindo porcentagem de escória por porcentagem de resíduos finos:

$$p_{\text{máx}} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \left(\frac{400R^{1/2}}{18+T} \right) \left(\frac{100}{100 + \%F} \right) + \frac{\text{slump} - 75}{10} \quad (2.19)$$

$$p_{\text{máx}} < 24h \quad (\text{kPa})$$

onde:

$\%F$ = porcentagem de resíduos finos ou escória;

Para poder avaliar-se o seu desempenho, montou-se a Tabela III.1, mostrada no anexo III, aonde aparecem vários valores obtidos, experimentalmente por Gardner (12), e calculados a partir da equação (2.19).

Na Tabela III.2, do anexo III, podemos verificar que os resultados obtidos pelas fórmulas do ACI estão próximos do valor limite hidrostático, exceto quando a velocidade de enchimento é baixa, portanto Gardner (12) afirma que a equação do ACI é conservativa.

Em 1985, GARDNER (13) apresentou o método de cálculo para fôrmas eliminando o termo cavalo vapor da Equação (2.19), assumindo $\frac{3}{4}$ de cavalo vapor por m de seção:

$$p_{\text{máx}} = 24h_i + \frac{d}{40} + \left(\frac{400R^{1/2}}{18 + T} \right) \left(\frac{100}{100 - \%F} \right) + \frac{\text{slump}}{10} \quad (\text{kPa}) \quad (2.20)$$

$$p_{\text{máx}} < 24h \quad (\text{kPa})$$

onde

d = menor dimensão da fôrma, mm;

HP = potência do vibrador (em cavalo vapor);

R = velocidade de enchimento, m/h;

T = temperatura do concreto em °C;

slump= abatimento do concreto em mm.

O método desenvolvido por GARDNER, para cálculo da pressão lateral em fôrmas, foi recomendado pela “Canadian Standards Association” CSA S269-M92**

**Fonte - <http://www.genie.uottawa.ca/profs/jgardner/gardner.htm>

Em 1980, a DIN 18218 (8) apresentou uma série de equações para calcular as pressões laterais de concreto internamente vibrado para vários tipos de concreto numa temperatura de 15°C.

- mistura densa

$$p_{\text{máx}} = 21 + 5.R \quad (\text{kPa}) \quad (2.21)$$

- mistura leve

$$p_{\text{máx}} = 19 + 10.R \quad (\text{kPa}) \quad (2.22)$$

- mistura fluida

$$p_{\text{máx}} = 18 + 14.R \quad (\text{kPa}) \quad (2.23)$$

- concreto líquido

$$p_{\text{máx}} = 17 + 17.R \quad (\text{kPa}) \quad (2.24)$$

onde R = velocidade de enchimento, m/h.

Para ajustar as temperaturas do concreto, diferentes de 15°C, a pressão limite deve ser aumentada 3% por cada grau abaixo de 15°C e reduzida 3% por cada grau acima de 15°C para uma redução de 30%. Fatores são dados para justificar o uso de aditivos retardantes.

Em 1983, MASCARENHAS (17) relatou que quando o concreto feito com cimento Portland não possui aditivos ou outros elementos estranhos ao mesmo, a pressão poderá ser estimada pelas expressões (2.25) ou (2.26) ou ainda (2.27), onde a

densidade considerada pelo autor é de $\gamma = 24\text{kN/m}^3$. Observou ainda, segundo as instruções do CEB, que quando a densidade diferir sensivelmente daquele valor, o resultado obtido deverá ser multiplicado pela relação entre esta densidade e aquela (γ).

Igualmente, o valor apurado deve ser aumentado de 10kN/m^2 , caso a altura de lançamento do concreto seja 2m ou maior.

A pressão a ser considerada será a menor entre as obtidas pelas expressões seguintes:

- pressão hidrostática (pressão do concreto como fluido)

$$p_H = 24 \cdot h \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.24)$$

- limite de endurecimento

$$p_s = 24 \cdot R \cdot K_s + 5 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.25)$$

onde: R = velocidade de concretagem, m/h;

h = altura de concreto;

K_s um coeficiente dependente do abatimento do concreto e de sua temperatura, de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 2.2

Valores de K_s em função do abatimento e temperatura do concreto(17)

| Abatimento (mm) | Temperatura do concreto (°C) | | | | | |
|--------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 25 | 1,45 | 1,10 | 0,80 | 0,60 | 0,45 | 0,35 |
| 50 | 1,90 | 1,45 | 1,10 | 0,80 | 0,60 | 0,45 |
| 75 | 2,35 | 1,80 | 1,35 | 1,00 | 0,75 | 0,55 |
| 100 | 2,75 | 2,10 | 1,60 | 1,15 | 0,90 | 0,65 |

Se a dimensão mínima (d) da seção de concreto é de 500mm ou menor, uma terceira fórmula será usada, para calcular o efeito de arco:

- Efeito de arco.

$$p_a = 3.R + \frac{d}{10} + 15 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.26)$$

d = menor dimensão da seção de concreto, mm

E assim, a pressão será a menor entre as três vindas das expressões anteriores.

2.2 COMPARAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DE PRESSÃO DO CONCRETO

2.2.1 MÉTODO DE OLSEN, ACI E CIRIA

Olsen calculou as pressões do concreto usando as fórmulas do ACI(1) e da CIRIA(7), a fim de compará-las com as calculadas com seu método, a partir da Equação 2.16. Convém lembrar que somente um tipo de mistura de concreto foi usado, e nenhum teste protótipo foi realizado. Portanto, todas as comparações entre o método proposto por OLSEN(18), com aquelas do ACI e da CIRIA, tiveram alcances limitados. Para usar estes métodos, foi necessário estabelecer alguns valores para tornar as equações coerentes com as condições de teste do novo método. Para o método CIRIA foram corrigidas a mistura do concreto e a temperatura. Nas fórmulas do ACI, foi incluída a temperatura de 24°C. Em seguida Olsen combinou e analisou, separadamente, três fatores: tempo de início de pega, largura e altura da parede de concreto.

a) Variação dos tempos de início de pega

Para entender a influência do tempo de início de pega inicial isoladamente, foram construídas paredes com 3,66m de altura e 30,5cm de largura. Olsen utilizou velocidade de enchimento entre 0,61m/h à 5,5m/h. Os resultados obtidos estão relacionados na Tabela 2.3, e as pressões foram plotadas como uma função de

velocidade de enchimento para cada tempo de início de pega nas Figuras 2.2 à 2.6. Conforme pode-se verificar na Tabela 2.3, quando o tempo de início de pega foi zero, as pressões desenvolvidas pelo método de Olsen e o método CIRIA foram maiores do que pelo método ACI. De um outro modo, para um tempo de pega inicial maior do que 40 minutos, as pressões do método de Olsen e da CIRIA foram menores do que as do ACI. Notou-se também que, para quase todos os tempos de início de pega, os métodos de Olsen e da CIRIA se aproximaram, com exceção quando a velocidade de enchimento foi superior a 4,27m/h em 3,66 m de parede. Segundo Olsen, o método do ACI foi deficiente ao não considerar o fator tempo de início de pega. Contudo, este fator foi considerado indiretamente pelo ACI como sendo 20 minutos.

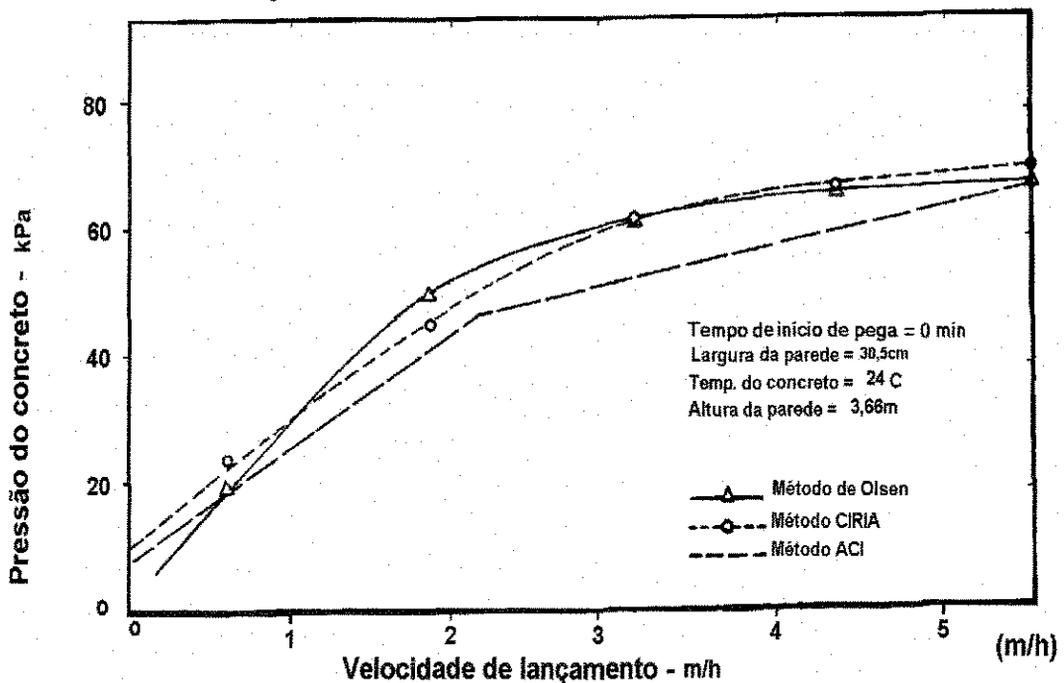
Na figura 2.4, gráfico com tempo de início de pega de 20 minutos, a fórmula do ACI se ajustou muito bem com o método de Olsen e da CIRIA. Contudo para tempos de início de pega maiores de 30 minutos, os quais são mais comuns em projeto de concreto, o método ACI mostra pressões superestimadas.

Tabela 2.3

Pressão do concreto com variação do tempo de início de pega

| Velocidade enchimento | Pressão (kPa) | Tempo de início de pega (min) | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 0,61m/h | ACI ¹ | 19,04 | 19,04 | 19,04 | 19,04 | 19,04 |
| | M.O ² | 19,97 | 17,53 | 15,08 | 12,64 | 10,20 |
| | CIRIA ³ | 24,51 | 23,92 | 22,46 | 20,46 | 18,11 |
| 1,83m/h | ACI | 42,47 | 42,47 | 42,47 | 42,47 | 42,47 |
| | M.O | 53,12 | 45,79 | 38,47 | 31,15 | 23,82 |
| | CIRIA | 44,71 | 42,91 | 38,57 | 32,46 | 25,48 |
| 3,05m/h | ACI | 53,75 | 53,75 | 53,75 | 53,75 | 53,75 |
| | M.O | 63,12 | 58,05 | 52,12 | 45,45 | 37,54 |
| | CIRIA | 63,47 | 61,90 | 54,68 | 44,52 | 32,90 |
| 4,27m/h | ACI | 61,07 | 61,07 | 61,07 | 61,07 | 61,07 |
| | M.O | 65,22 | 59,76 | 53,65 | 46,67 | 38,76 |
| | CIRIA | 67,37 | 67,37 | 67,37 | 56,53 | 40,28 |
| 5,5m/h | ACI | 68,35 | 68,35 | 68,35 | 68,35 | 68,35 |
| | M.O | 68,74 | 62,88 | 56,39 | 51,50 | 40,81 |
| | CIRIA | 71,28 | 71,28 | 71,28 | 68,59 | 47,65 |

FONTE - OLSEN, 1968. p.69

¹ American Concrete Institute² Método de Olsen³ Construction Industry Research and Information AssociationFigura 2.2 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
OLSEN(18)

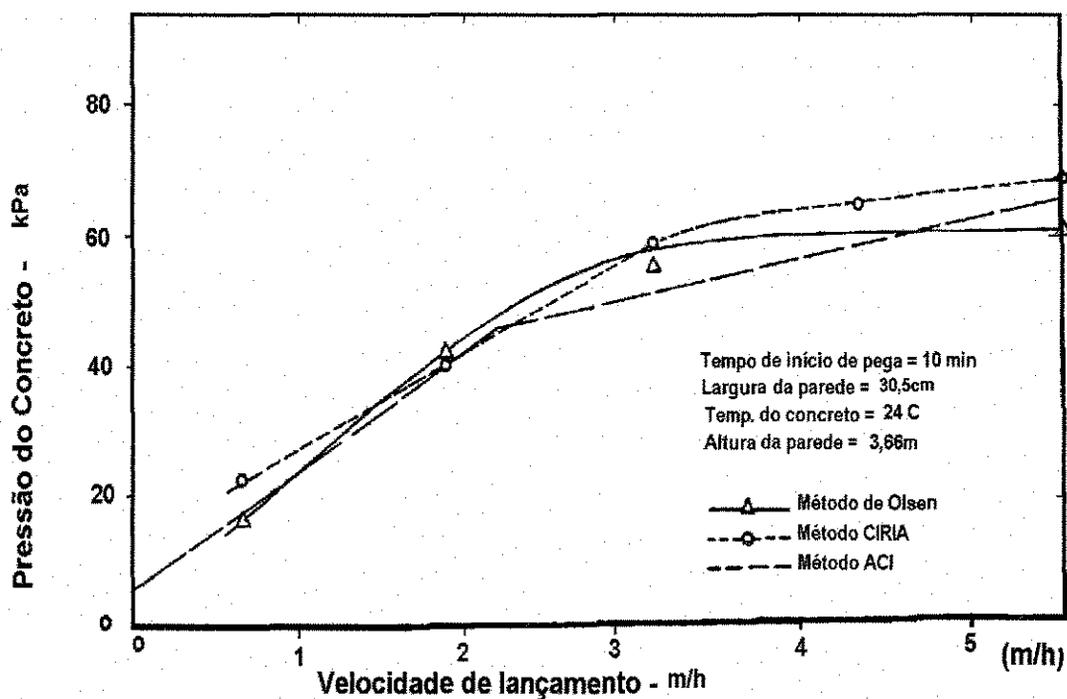


Figura 2.3 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
OLSEN(18)

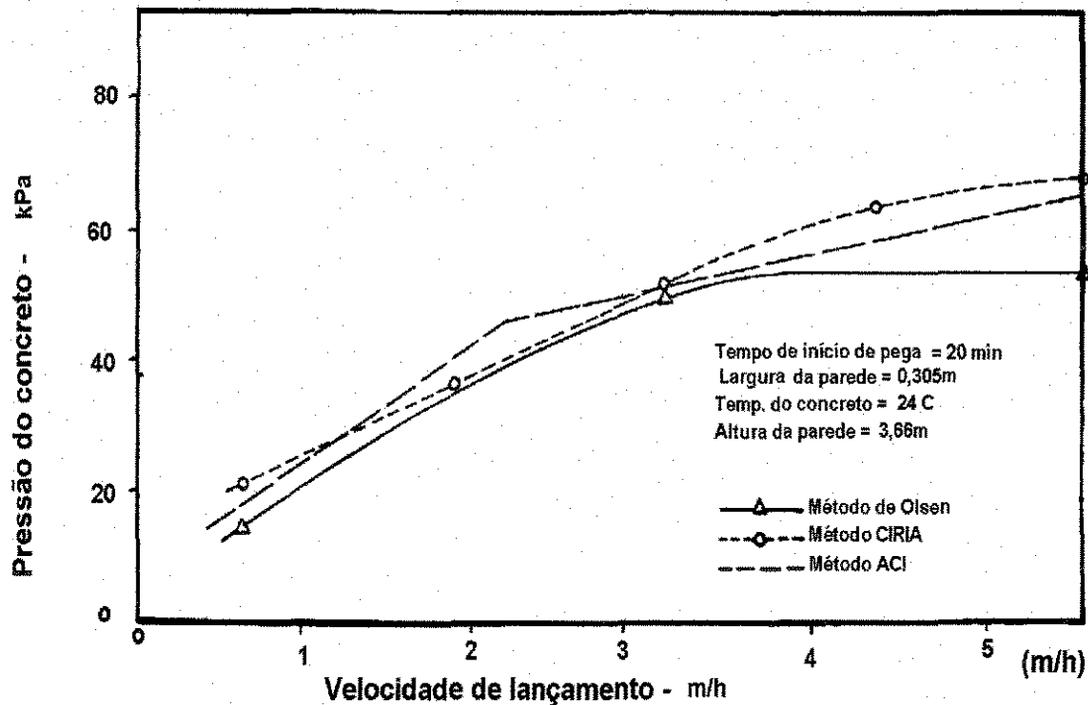


Figura 2.4 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
OLSEN(18)

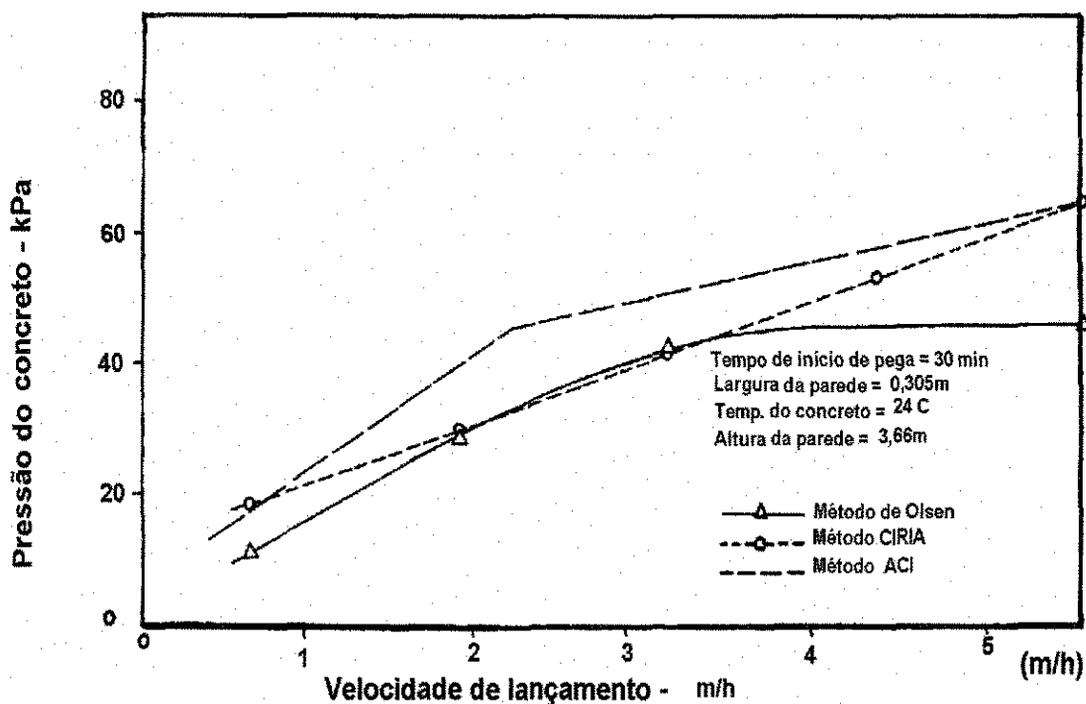


Figura 2.5 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
OLSEN(18)

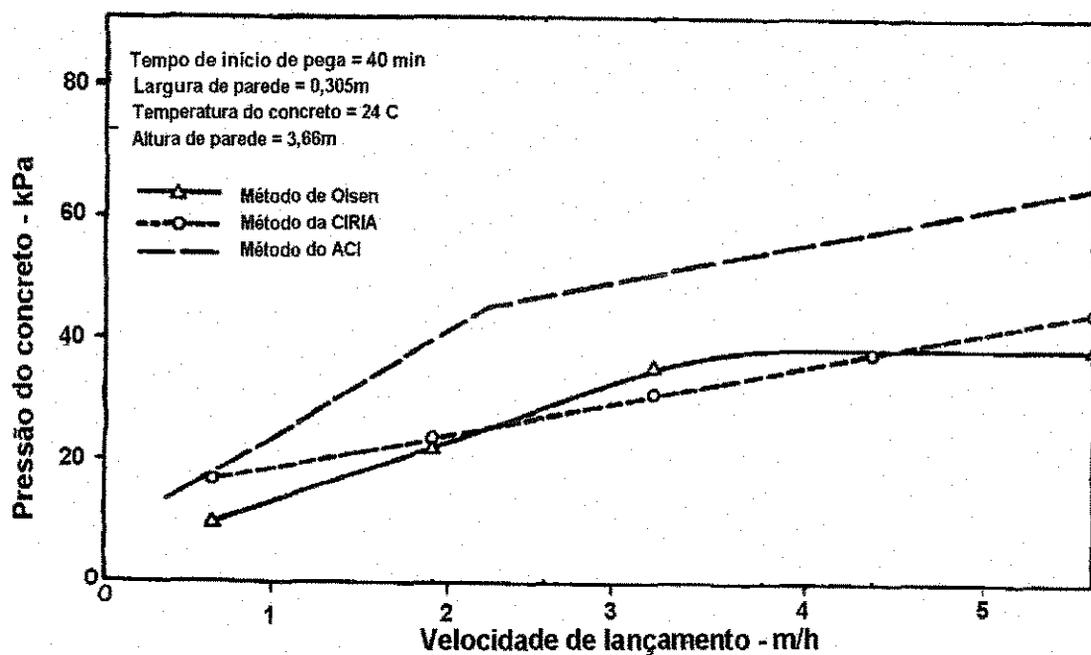


Figura 2.6 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
OLSEN(18)

Usando os mesmos resultados as pressões foram plotadas com relação ao tempo de início de pega para cada uma das velocidades de enchimento. A intenção foi estabelecer o tempo de início de pega que dá a melhor correlação entre os métodos para cada velocidade de enchimento. Estes gráficos são mostrados nas Figuras de 2.7 à 2.11. Uma correlação bem ajustada entre o método proposto e o da CIRIA, foi observada para velocidades de 1,83m/h (Figura 2.8) e 3,05m/h (Figura 2.9), e tempos de início de pega entre 20 e 30 minutos. Por esta razão, um tempo de início de pega de 20 minutos foi escolhido como sendo representativo e foi usado nas análises dos outros fatores.

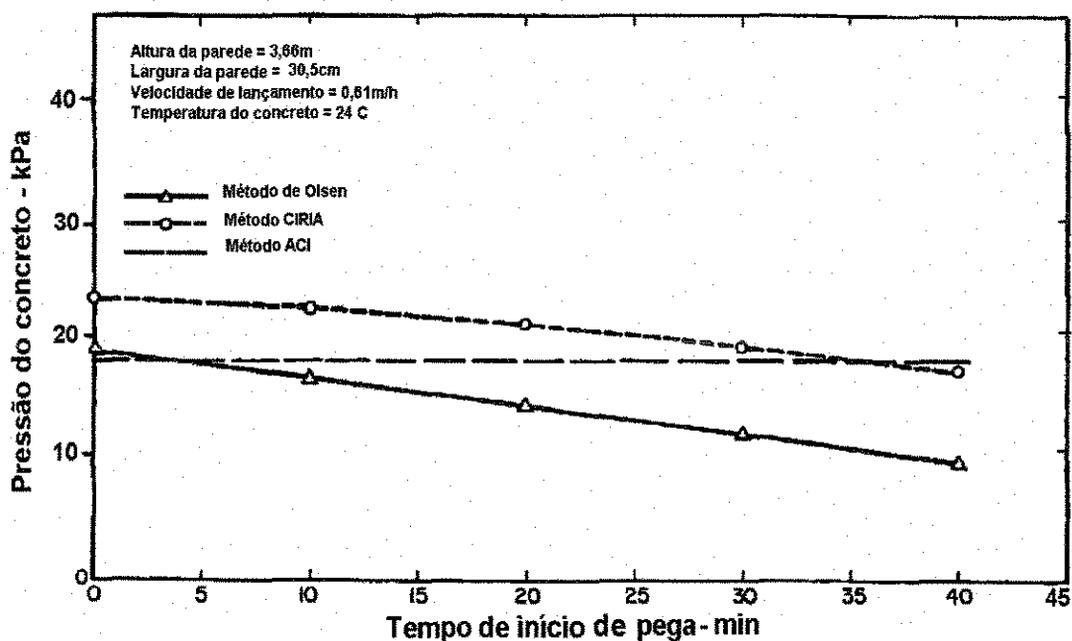


Figura 2.7 - Pressão do concreto com o tempo de início de pega.
OLSEN(18)

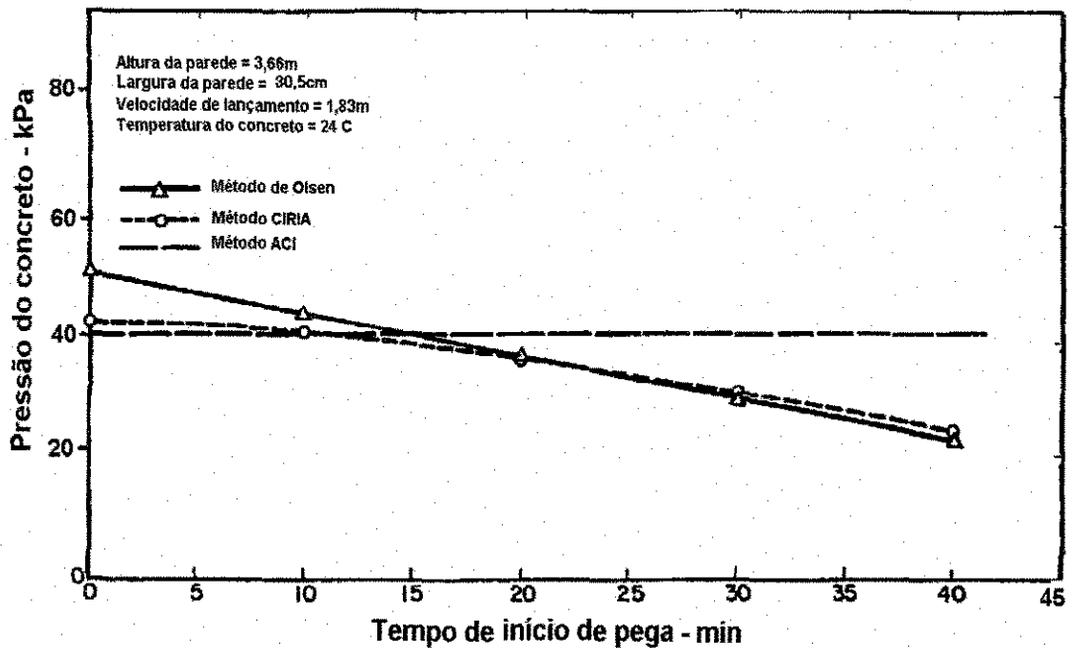


Figura 2.8 - Pressão do concreto com o tempo de início de pega.
OLSEN(18)

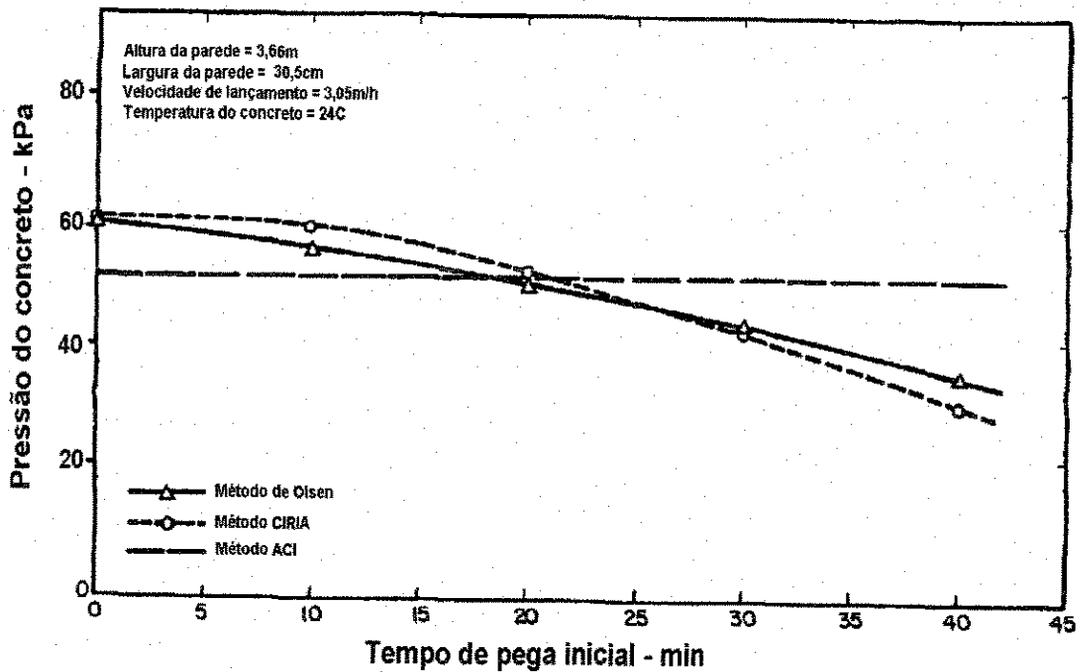


Figura 2.9 - Pressão do concreto com o tempo de início de pega.
OLSEN(18)

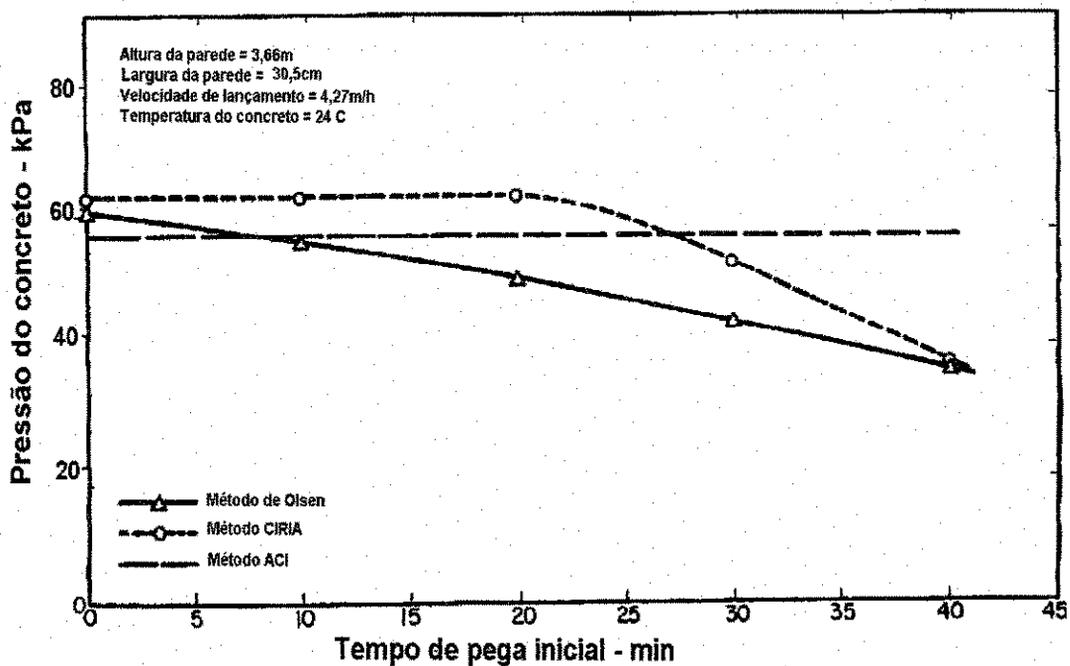


Figura 2.10 - Pressão do concreto com o tempo de início de pega.
OLSEN(18)

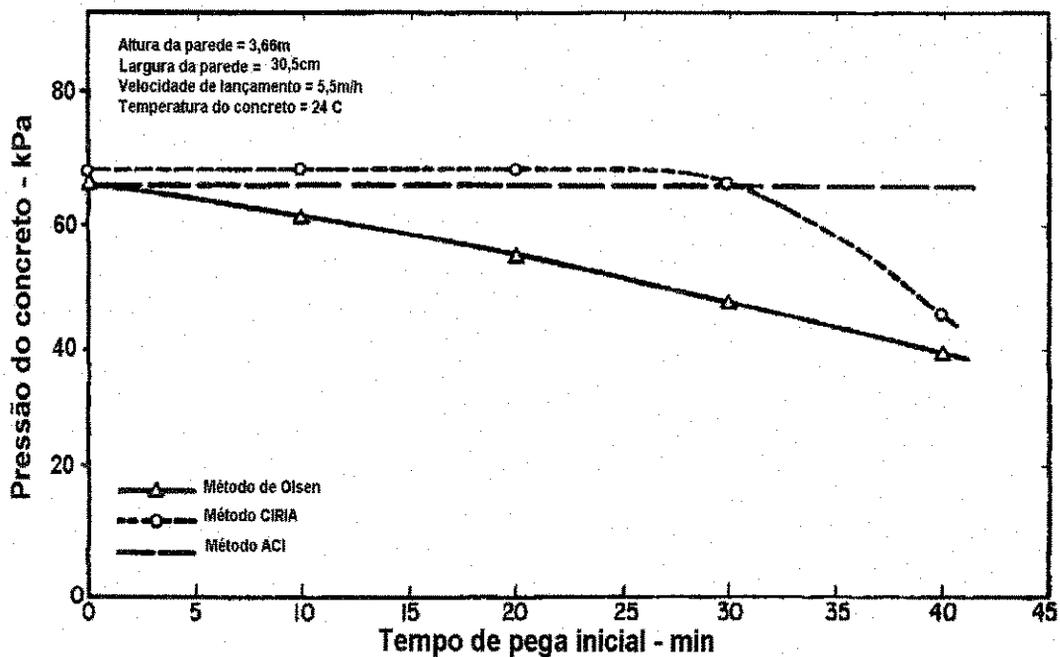


Figura 2.11 - Pressão do concreto com o tempo de pega inicial. OLSEN(18)

b) Variação das alturas de parede

Para se analisar como as alturas afetam nas pressões, cinco diferentes alturas foram pesquisadas (1,83m; 3,05; 3,66; 4,88; 6,10), com um tempo de início de pega de 20 minutos, uma largura de parede de 30,5cm e velocidades de enchimento de 0,61m/h à 5,5m/h. Os resultados deste programa são vistos na Tabela 2.4. Na Figura 2.12, as pressões são dadas em função da velocidade de enchimento para uma altura de 1,83m. Convém observar que usando a densidade de concreto de 24kN/m^3 com a altura de 1,83m, obtém-se uma pressão máxima de 43,92kPa, pelo método ACI. O método CIRIA dá um valor maior devido ao uso do vibrador. Nota-se que o proposto por Olsen dá pressões na ordem de 2/3 do caso hidrostático, que é devido ao endurecimento do concreto.

Sobre a Figura 2.13, as pressões das alturas de 3,05m; 3,66m; 4,88m; 6,10m foram todas plotadas em função da velocidade de enchimento para todos os métodos. Nos métodos ACI e CIRIA, nenhuma distinção foi feita para as diferente alturas, porém as pressões do método proposto por Olsen diferiu decididamente para altas velocidades. Para velocidades de lançamento abaixo de 2,5m/h, todos os três métodos deram resultados muito similares. Acima de 2,5 m/h, a altura começa a influenciar sobre as pressões obtidas pelo método proposto e esta influência torna-se maior à medida que a velocidade aumenta. Através do gráfico 2.13, fica claro que para paredes muito altas (6,10m), a pressão do concreto é considerada maior do que as pressões dos métodos ACI e CIRIA. Isto é causado pela suposição de 20 minutos de tempo de início de pega, considerando que o usual é mais de 30 minutos.

Tabela 2.4

Pressão do concreto com variação das alturas de parede. OLSEN(18)

| Velocidade enchimento | Pressão (kPa) | Altura de parede (m) | | | | |
|-----------------------|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1,83 | 3,05 | 3,66 | 4,88 | 6,10 |
| 0,61m/h | ACI | 19,04 | 19,04 | 19,04 | 19,04 | 19,04 |
| | M.O | 15,08 | 15,08 | 15,08 | 15,08 | 15,08 |
| | CIRIA | 22,46 | 22,46 | 22,46 | 22,46 | 22,46 |
| 1,83m/h | ACI | 42,47 | 42,47 | 42,47 | 42,47 | 42,47 |
| | M.O | 28,02 | 38,47 | 38,47 | 38,47 | 38,47 |
| | CIRIA | 38,57 | 38,57 | 38,57 | 38,57 | 38,57 |
| 3,05m/h | ACI | 43,94 | 53,75 | 53,75 | 53,75 | 53,75 |
| | M.O | 29,83 | 45,84 | 52,19 | 61,95 | 65,61 |
| | CIRIA | 50,87 | 54,68 | 54,68 | 54,68 | 54,68 |
| 4,27m/h | ACI | 43,94 | 61,07 | 61,07 | 61,07 | 61,07 |
| | M.O | 29,83 | 45,84 | 53,65 | 70,50 | 80,89 |
| | CIRIA | 53,70 | 64,44 | 64,44 | 64,44 | 64,44 |
| 5,5m/h | ACI | 43,94 | 68,35 | 68,35 | 68,35 | 68,35 |
| | M.O | 29,83 | 45,84 | 56,39 | 71,03 | 89,97 |
| | CIRIA | 53,70 | 71,28 | 71,28 | 71,28 | 71,28 |

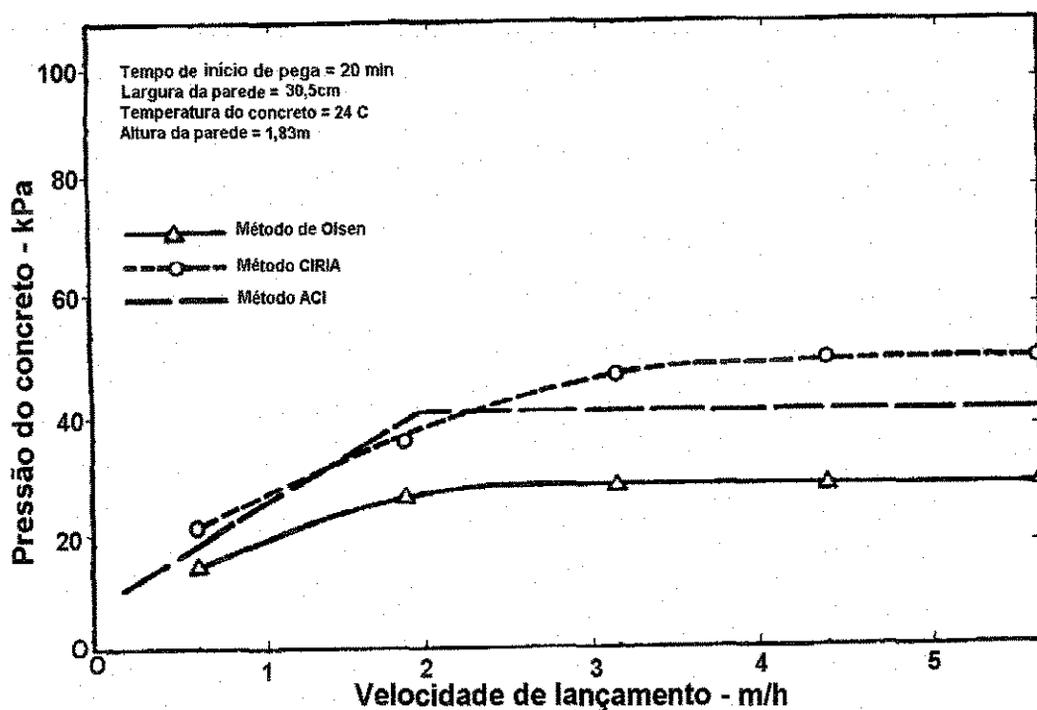


Figura 2.12 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento OLSEN(18)

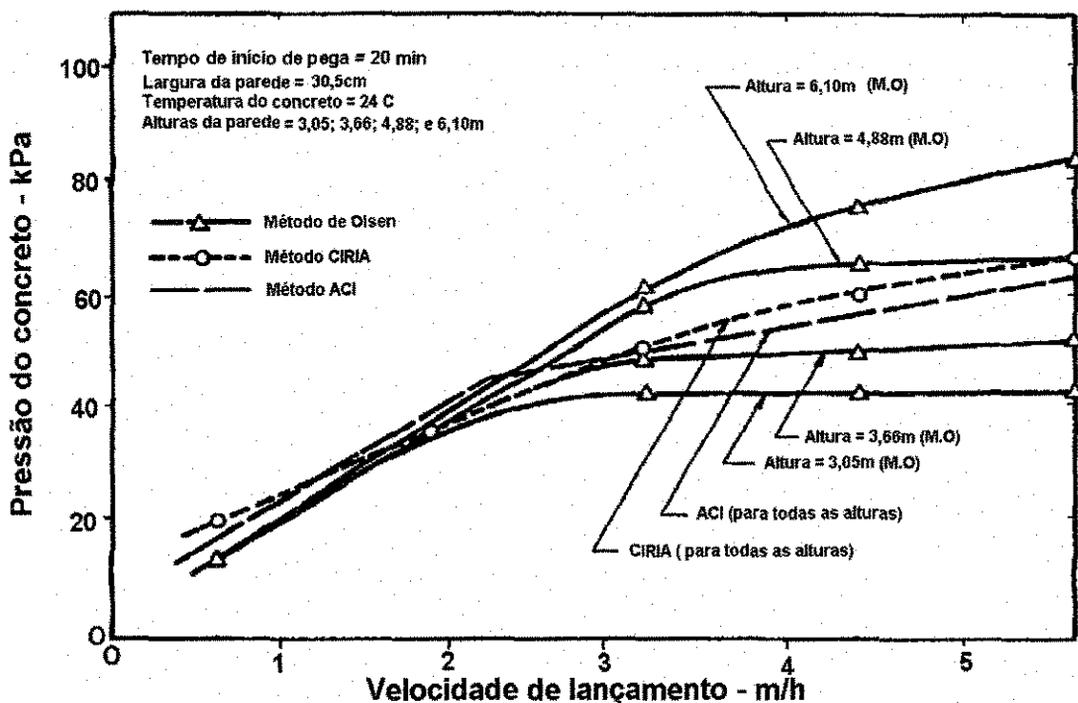


Figura 2.13 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento.
 OLSEN(18)

c) Variação das larguras de parede

No método proposto, Olsen assumiu que a largura de parede teve influência na determinação da pressão do concreto com relação a resistência cisalhante desenvolvida. Quando todos os outros fatores foram considerados constantes, a deformação do concreto, causada pela deflexão da face da fôrma, foi maior em uma parede estreita do que em uma larga. Isto, sucessivamente, gera um maior valor de deformação vertical, e, portanto, uma grande resistência cisalhante. O método CIRIA também considera a largura de parede como influente, contudo, ele indica como causa a flexão entre as faces da fôrma. Por causa disto, a influência sobre a pressão

foi um tanto diferente no método proposto e no CIRIA. Já o método ACI, não considerou a largura da parede na obtenção de suas fórmulas.

Na tabela 2.5 são dados um resumo para larguras de parede de 20,0cm, 30,5cm, 40,6cm. O tempo de início de pega foi de 20 minutos e a altura da parede 4,88m. A velocidade de enchimento está novamente entre 0,61m/h e 5,5m/h. Na Figura 2.14, os mesmos resultados são mostrados graficamente. Como pode ser verificado, o método CIRIA admite qualquer largura de parede até uma velocidade de 2,74m/h. A escolha da pressão no método CIRIA depende de dois critérios, o da flexão e do endurecimento (equações 2.13 e 2.14), e elas não estão integradas. Portanto, somente quando o critério de flexão governa é que a largura influencia na pressão. A intensidade relativa da pressão obtida a partir dos três métodos concordam muito bem, quando se considera 20 minutos como tempo de início de pega.

Ainda observando a Figura 2.14, com uma velocidade de 0,61m/h, para o método de Olsen, pode-se pensar que tenha ocorrido um erro, porque uma parede de 20,0cm de largura teve uma pressão maior do que uma parede mais larga, porém isto se deve ao fator de intensificação da vibração (Equação 2.17) em paredes estreitas sendo proporcionalmente maior do que o causado pela velocidade de enchimento.

Tabela 2.5. OLSEN(18)

| Velocidade de enchimento | Pressão (kPa) | Largura de parede (cm) | | |
|--------------------------|---------------|------------------------|-------|-------|
| | | 20,0 | 30,5 | 40,6 |
| 0,61m/h | ACI | 19,04 | 19,04 | 19,04 |
| | M.O | 17,18 | 15,09 | 12,89 |
| | CIRIA | 22,46 | 22,46 | 22,46 |
| 1,83m/h | ACI | 42,47 | 42,47 | 42,47 |
| | M.O | 33,49 | 38,47 | 43,40 |
| | CIRIA | 38,57 | 38,57 | 38,57 |
| 3,05m/h | ACI | 53,75 | 53,75 | 53,75 |
| | M.O | 53,51 | 61,95 | 67,52 |
| | CIRIA | 53,70 | 54,68 | 54,68 |
| 4,27m/h | ACI | 61,07 | 61,07 | 61,07 |
| | M.O | 62,83 | 70,50 | 77,33 |
| | CIRIA | 57,61 | 67,37 | 70,74 |
| 5,50m/h | ACI | 68,35 | 68,35 | 68,35 |
| | M.O | 65,66 | 71,03 | 77,33 |
| | CIRIA | 61,51 | 71,28 | 81,04 |

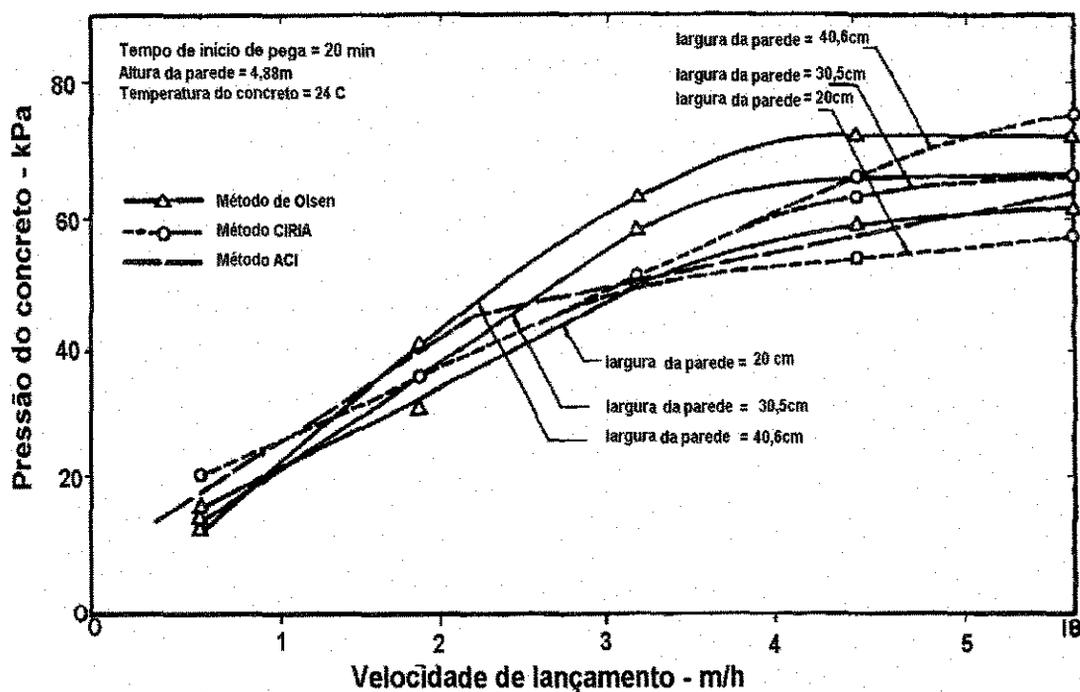


Figura 2.14 - Pressão do concreto com a velocidade de enchimento. OLSEN(18)

2.2.2 MÉTODO ACI, CIRIA, GARDNER, E HARRISON

Entre 1960 e 1962 a CIRIA foi a responsável pelos mais vastos dados de campo, e os usou na criação do Método CIRIA(7). GARDNER (11-12), GARDNER e HO (9), e GARDNER e QUERESHI (10) pesquisaram as pressões nas fôrmas, utilizando concreto de cimento Portland, concreto de cimento Portland com superplastificante, e concreto com cinza volante (fly ash). Os resultados de HARRISON (14) incluíram concreto de cimento Portland, concreto de cimento Portland com superplastificante, concretos de cimento com escória parcial (partial slag), e concreto de cimento com escórias.

O método de pressão em fôrmas do ACI(1) e a equação (2.19) de GARDNER(13), foram comparados com dados experimentais. Para usar a equação (2.19) com os resultados da CIRIA e de Harrison, assumiu-se que o vibrador foi imerso um metro dentro do concreto, e a dimensão mínima da fôrma de 500mm.

Para a ilustração gráfica, os dados experimentais foram agrupados entre os dados da CIRIA de 1965, os dados do concreto de cimento Portland de Gardner e Harrison, e os dados de cimento não Portland de Gardner e Harrison.

O método do ACI e o método proposto por Gardner, foram comparados aos dados de campo da CIRIA nas Figuras 2.15 e 2.16. Os resultados experimentais, com as pressões medidas menores do que 30kPa, foram descartadas com base nas pressões que também foram baixas para o concreto vibrado. Os mais recentes resultados de concreto de cimento Portland de Gardner e Harrison foram comparados

ao método ACI e a equação (2.19) nas Figuras 2.17 e 2.18. A equação (2.19) foi comparada aos concretos de cimento não convencional na Figura 2.19.

O método ACI não se aplica a concretos muito diferentes do concreto de cimento Portland e assim não é comparado com resultados experimentais de cimento não Portland.

Pela observação das Figuras 2.15 a 2.19 o método proposto por Gardner possui menos pontos com dados não conservativos do que o método ACI para concretos de cimento Portland. O método de Gardner também mostra um bom ajuste para cimento Portland com superplastificante, cinzas volantes, ou concreto de cimento com escórias.

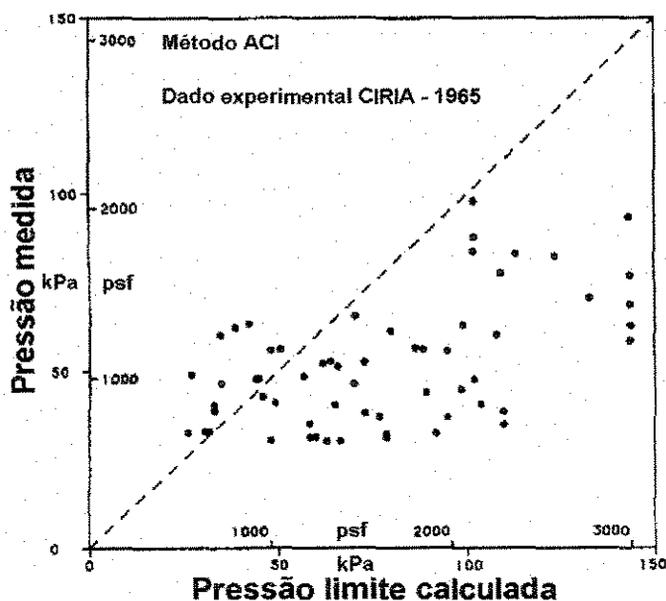


Figura 2.15 - Comparação de dados experimentais da CIRIA - 1965 com as pressões calculadas pelo ACI. GARDNER(13)

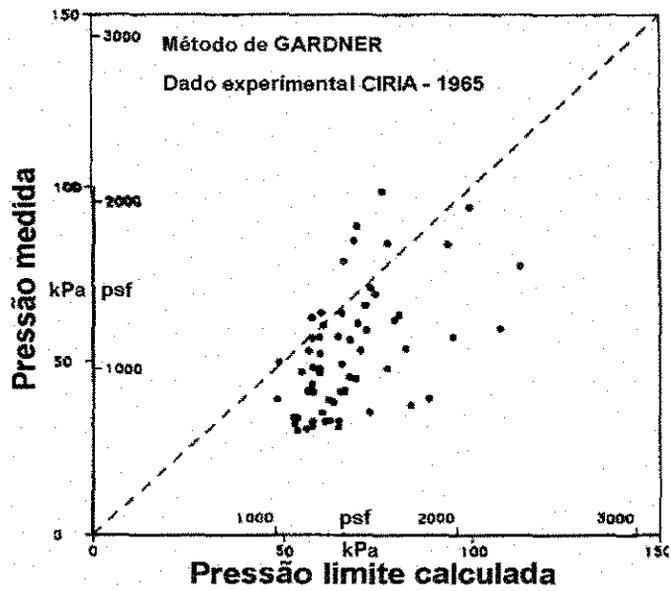


Figura 2.16 - Comparação de dados experimentais da CIRIA - 1965 com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13)

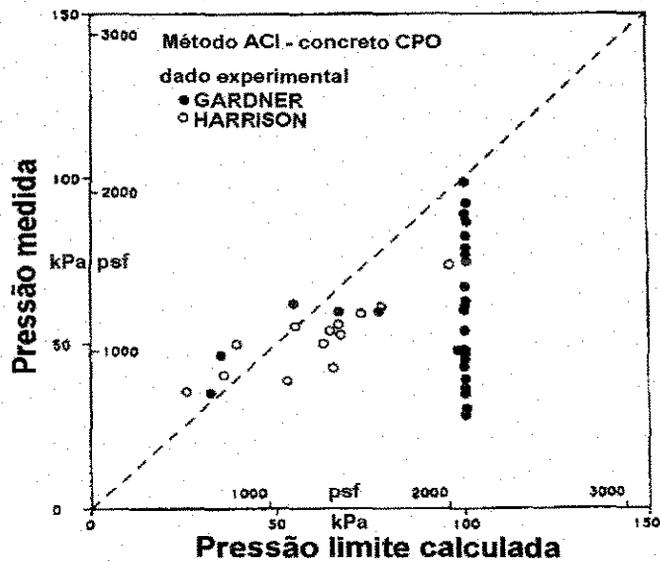


Figura 2.17 - Comparação dos dados de concreto de cimento Portland com as pressões calculadas pelo ACI. GARDNER(13)

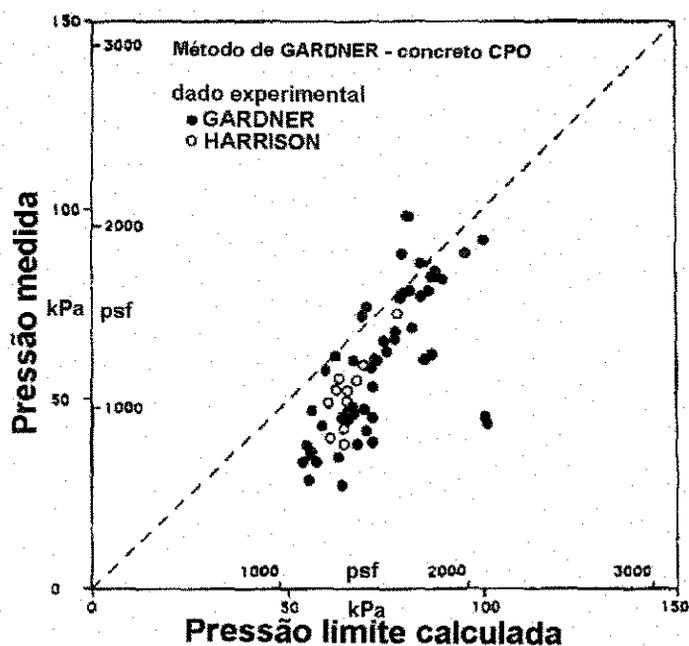


Figura 2.18 - Comparação dos dados de concreto de cimento Portland com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13)

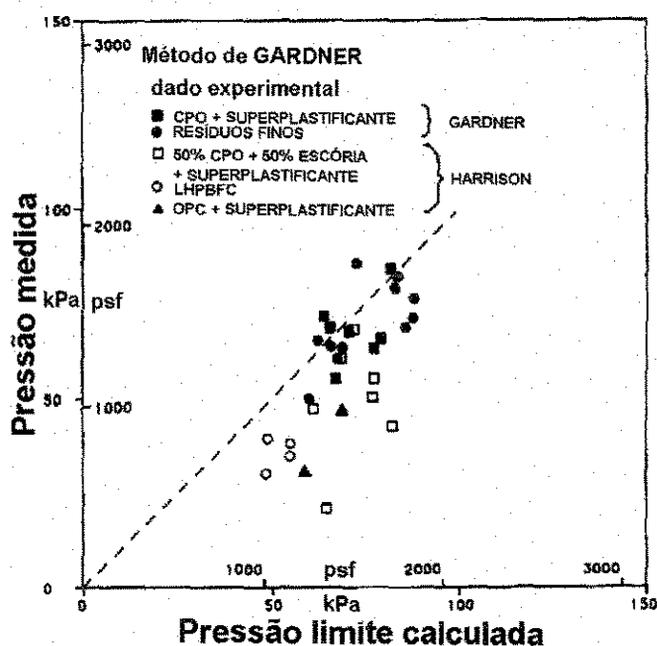


Figura 2.19 - Comparação dos dados de concreto não convencional com as pressões calculadas por Gardner, equação (2.19). GARDNER(13)

2.3 INSTRUMENTAÇÕES UTILIZADAS POR ORE E STRAUGHAN, E GARDNER PARA MEDIR PRESSÕES LATERAIS

- Células de Pressão à óleo

Em 1968, ORE e STRAUGHAN(20), experimentalmente, estudaram o efeito da hidratação do cimento sobre a pressão limite na fôrma. Concluíram que a vibração é o mais importante dos fatores considerandos. Utilizaram a célula a óleo, Figura 2.20, para medir a pressão do concreto fresco.

A célula consiste de 2 componentes hidráulicos separados por um diafragma plástico de pressão. Um dos componentes é um reservatório cheio de óleo entre duas placas finas de aço flexíveis e ligadas por um tubo até a câmara de pressão. O outro componente, o circuito hidráulico, consiste de uma linha de entrada, filtro, orifício de passagem e uma linha de passagem. O óleo no reservatório e a câmara de pressão são acionados através do enchimento do tubo fechado com uma leve pré-pressão que age sobre o diafragma para manter o orifício de passagem fechado sob a condição 'sem carga'.

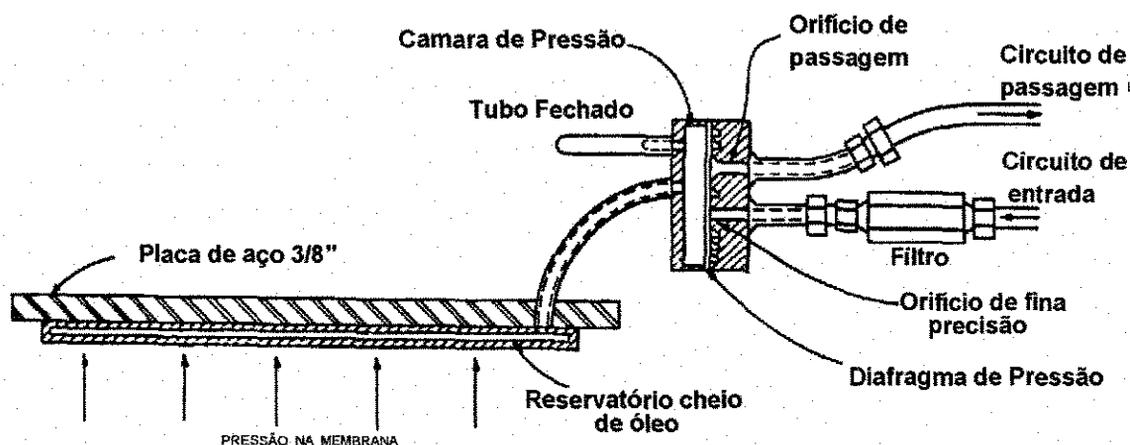


Figura 2.20- Diagrama dos Componentes da Célula. ORE e STRAUGHAM(20)

Em funcionamento, a pressão da membrana começa a agir sobre a face exposta do reservatório de óleo e é transmitida para o diafragma através da câmara de pressão. Uma vez que o fluido é incompressível, o volume do reservatório e da câmara de pressão permanecem constantes. Para determinar a pressão exercida pela membrana, uma mistura de óleo e querosene é bombeada através de uma entrada lateral do circuito hidráulico numa pressão levemente maior do que a pressão do reservatório sobre o diafragma. Nesta pressão, medida pelo medidor na linha de entrada, a mistura óleo-querosene escoar através do orifício de passagem para dentro da linha de passagem. Esta pressão no medidor, menos a leitura inicial 'sem carga', reflete a pressão da membrana agindo sobre a célula com uma precisão de $\pm 0,1\text{N/cm}^2$. Uma leitura 'sem carga' é obtida de cada célula antes que o teste inicie. A Figura 2.21 e 2.22 mostram a bomba, o medidor de pressão e o circuito de entrada do tubo de distribuição usados nessa pesquisa. Segundo o pesquisador, deve-se ter extremos cuidados durante a instalação e operação das células para evitar a entrada

de substância estranha no circuito hidráulico. Uma partícula insignificante de sujeira depositada entre o diafragma e o orifício de passagem tornará a célula inoperante.

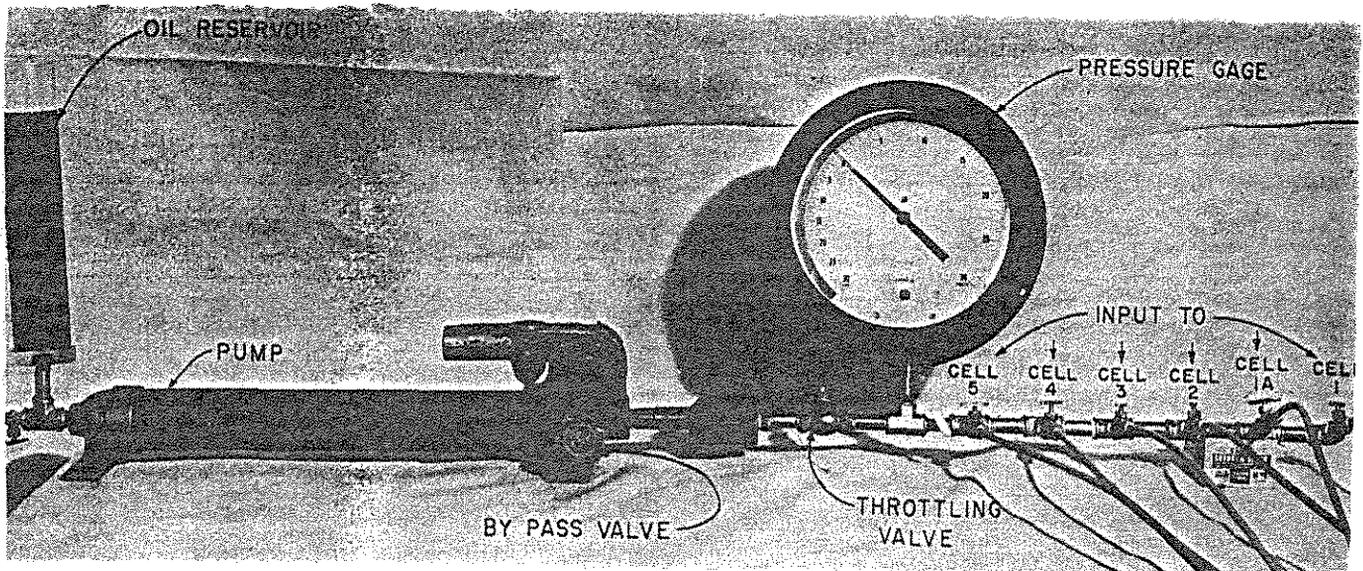


Figura 2.21 - Bomba, Medidor de Pressão e o Circuito de Entrada do tubo de distribuição. ORE, STRAUGHAM(20).

Foram feitos testes de calibração com as células, enchendo de água a câmara de pressão. Obteve-se uma leitura inicial igual a zero a qual representou a pré-pressão da célula, perda de atrito e a carga d'água hidrostática sobre a célula. Cuidadosamente regulou-se a pressão de ar e foram então aplicados sobre a câmara incrementos de $0,7\text{N/cm}^2$. Foi usada uma pressão total adicional de $10,5\text{N/cm}^2$, aproximadamente 50% maior do que a pressão máxima esperada pela configuração particular dos pesquisadores se o concreto normal ou de cinza volante (fly-ash-crete) permanecesse completamente fluido no tempo requerido para encher a fôrma. Vários testes mostraram ser as células confiáveis para o limite mínimo de precisão do fabricante ($0,1\text{N/cm}^2$) os quais foram satisfatórios para o propósito dos

pesquisadores. Testes adicionais do controle de calibração foram feitos durante o programa de testes com as células instaladas na fôrma.

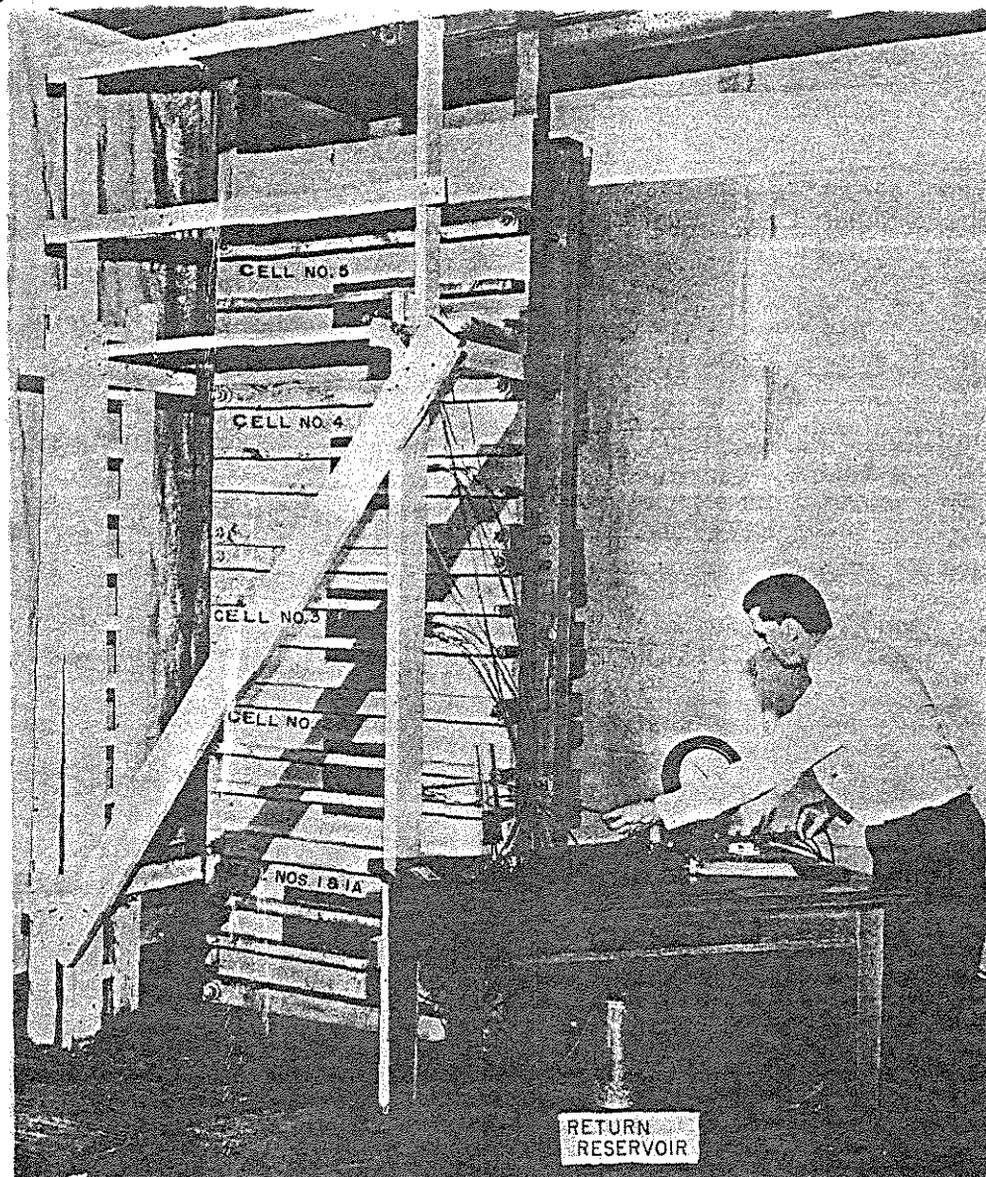


Figura 2.22 - Detalhe da fôrma mostrando a localização das Células. ORE e STRAUGHAM(20).

Estes testes foram feitos com o enchimento das fôrmas com água, comparando as leituras obtidas com as pressões hidrostáticas calculadas em cada célula.

As células foram instaladas na fôrma com 0,30m de largura, 0,91m de largura por 3,05m de altura, como mostra a figura 2.22, construída de madeira

compensada de qualidade naval, com um espaçamento de 53,3cm de centro a centro começando com uma par de células centradas a 30,5cm da base da fôrma. As faces das células ficaram rentes com o lado de fora da fôrma. Foi colocada uma célula em cada ponto, sendo que no ponto da base colocaram-se duas células para obter leituras duplas na região de pressão máxima da fôrma. A instalação final das células de pressão foi feita depois de várias tentativas preliminares para encontrar um apoio satisfatório sobre o qual se instalariam as células. Um apoio que provou ser muito satisfatório foram placas de aço com largura de 9,5mm, em que as células ficaram instaladas por uma fina camada de resina adesiva epóx.

Ore e Straughan utilizaram nessa pesquisa o cimento do tipo II, cimento de baixa alcalinidade. O início de pega da pasta de cimento ocorreu depois de 3 horas e 50 minutos, e o fim de pega, em 6 horas e 45 minutos. Também utilizou-se nessa pesquisa, pozolana e cinza volante (fly ash).

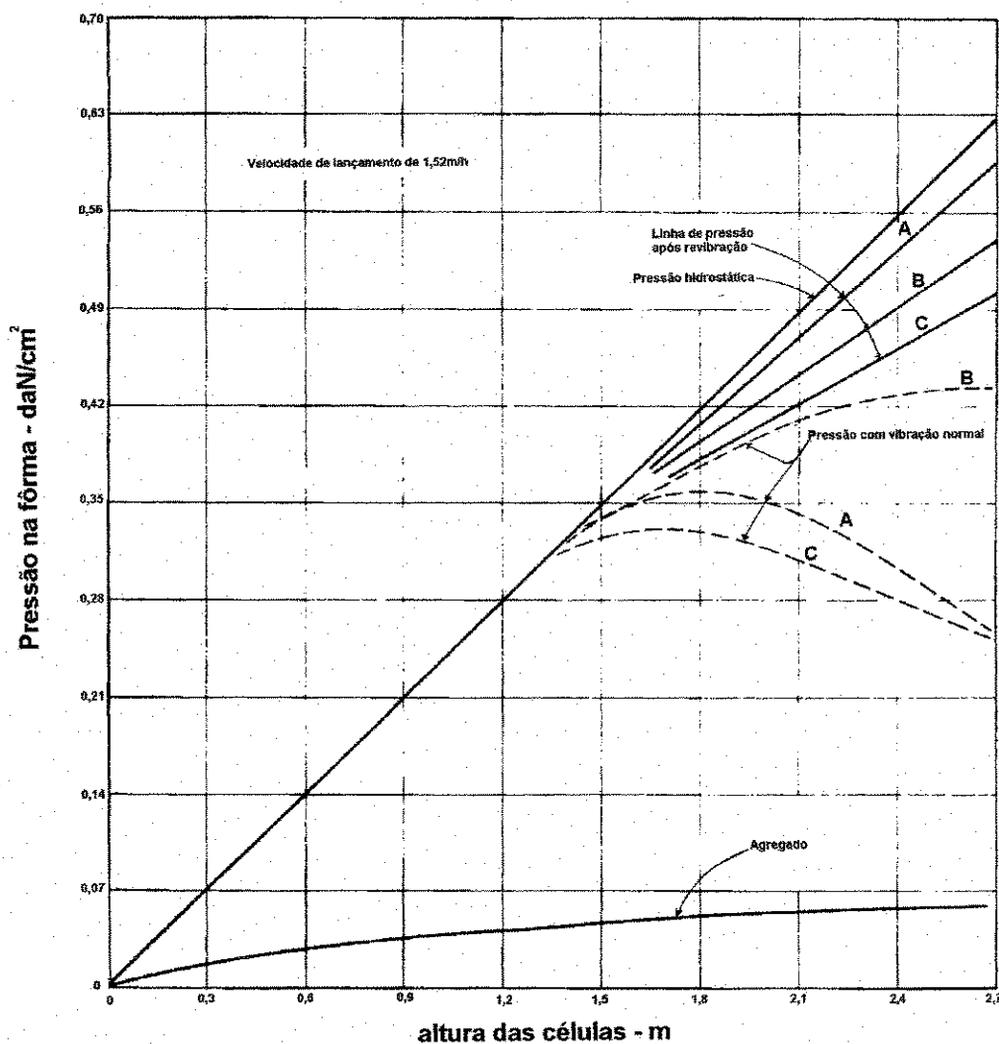
O trabalho que está sendo comentado consistiu de quatro caminhos:

1. Foram realizados cinco testes para se estudar o efeito de agregados graúdos com areia grossa.
2. Foram feitos três testes usando uma mistura não hidratada (fly ash-crete) consistindo de cinza volante, areia, agregado graúdo, água e agente incorporador de ar.
3. Foi usado, em três testes, concreto com 307kg/m^3 de cimento para determinar o efeito da hidratação do cimento sobre as pressões na fôrma.

4. Realizaram dois testes usando um aditivo redutor de água, tipo lignina, em concreto contendo 307kg/m^3 . A quantidade de aditivo sólido redutor de água utilizado foi de 0,3% por peso de cimento.

Realizaram primeiramente os cinco testes para se estudar o efeito de agregados graúdos misturados com areia grossa.

Na Fig.2.23 foram plotadas e registradas as pressões máximas exercidas sobre a fôrma pelo agregado, que atingiu $0,06\text{daN/cm}^2$. Após o teste, retirou-se a face frontal da fôrma e pôde-se verificar que houve segregação do agregado graúdo no fundo da fôrma, isto é, ele deslocou-se com o seu próprio peso. Segundo os pesquisadores isto indicou que quando foi permitida uma pequena pressão lateral, o efeito arco também foi permitido. Isto não ocorreu quando os vazios entre as partículas de agregados graúdos foram parcialmente preenchidos com areia úmida. Com o preenchimento dos vazios com a areia, ao se retirar a face frontal da fôrma, verificou-se boa consolidação.



A - Concreto comum; **B** - Concreto com cinza volante; **C** - Concreto com aditivo redutor de água (w.r.a).

Figura 2.23 - Relação de pressão por altura para várias misturas. ORE STRAUGHAN(20)

A partir destes testes, ficou evidente que o atrito e o entrosamento entre as partículas de agregado graúdo impediram o desenvolvimento de pressões maiores que $0,06 \text{ daN/cm}^2$. Há outros fatores que podem influenciar no efeito do agregado sobre pressões em fôrmas os quais não foram suficientemente pesquisados. O

formato das partículas de agregados, seja angular ou arredondadas, pode influenciar sobre a intensidade de pressão.

A Tabela 2.6 mostra as quantidades de materiais e propriedades das misturas usadas na segunda terceira e quarta fase destes testes

Tabela 2.6

| Tipo de mistura | Propriedades do concreto fresco | | | | quantidades de materiais (daN/m ³) | | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-------------|----------------------------------|---------|------------------------------------------------|------|-----|-------|------|
| | T°C °C | slump mm | γ_c daN/m ³ | % ar | água | cim. | c.v | areia | a.gr |
| concreto com cinza volante | 20 | 97 | 2292 | 5,0 | 112 | — | 238 | 648 | 1297 |
| concreto comum | 21 | 76 | 2340 | 4,8 | 143 | 517 | — | 632 | 1262 |
| concreto com w.r.a | 21 | 81 | 2377 | 4,0 | 131 | 521 | — | 647 | 1293 |

c.v = cinza volante; a. gr. = agregado graúdo; cim = cimento; w.r.a = aditivo redutor de água (water reducing admixture).

Os pesquisadores notaram que ocorreu uma diferença muito pequena entre os pesos específicos dos três tipos de concreto: concreto com cinza volante, concreto comum e concreto com aditivo redutor de água. Isto devido a pouca necessidade de água quando se usa a cinza volante no lugar do cimento. A quantidade de água utilizada nos concretos foi para produzir um abatimento de 76 à 102mm com volume de ar incorporado de $4,5 \pm 1\%$. Observou-se que a trabalhabilidade dos concretos foi igual nos vários casos.

Foi admitido para as misturas um peso específico de 2307 daN/m³. Então 0,30m de altura correspondente à 0,07 daN/cm², momento em que a mistura se comportou como um fluido. Esta relação teórica foi plotada na Fig.2.23 como uma

linha de pressão hidrostática. Os desvios a partir desta linha são interpretados como comportamento não fluido.

A Fig.2.23 mostra as pressões médias de concreto com cinza volante, concreto comum, e concreto com aditivos redutor de água, versus profundidade de concreto abaixo do centro da célula.

As pressões médias foram calculadas pelos pesquisadores a partir de dados contidos nas tabelas 2.7 e 2.8. A pressão exercida por cada umas das diferentes misturas de concreto passa a ter valores ligeiramente menores após a vibração. Ainda na Fig.2.23, as linhas sólidas representam pressões desenvolvidas quando as misturas foram revibradas para toda a profundidade da fôrma, em vários tempos, o que ocorreu entre 0 e 2 horas após ter sido completado o lançamento.

Tabela 2.7

Resumo dos resultados de teste para o concreto com cinza volante. ORE (20)

| Célula n | h ft | 19-05-66 | | | 09-09-66 | | | 25-09-66 | | | $P_{v\text{média}}$ |
|----------|---------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|---------------------|
| | | P_v | P_{av} | t | P_v | P_{av} | t | P_v | P_{av} | t | |
| 1 e 1A | 0,30 | 0,06 | 0,08 | 0:00 | 0,07 | 0,07 | 0:00 | 0,07 | 0,07 | 0:00 | 0,07 |
| 2 | 0,38 | 0,07 | — | 0:00 | 0,08 | 0,08 | 0:00 | 0,09 | 0,09 | 0:00 | 0,09 |
| 3 | 0,46 | 0,11 | 0,10 | 0:00 | 0,11 | 0,09 | 0:00 | 0,10 | 0,10 | 0:00 | 0,10 |
| 4 | 0,53 | 0,12 | — | 0:00 | 0,14 | 0,13 | 0:00 | 0,11 | 0,11 | 0:00 | 0,12 |
| 5 | 0,60 | 0,13 | — | 0:00 | 0,14 | 0,13 | 0:00 | 0,14 | 0,13 | 0:00 | 0,13 |
| | | 0,13* | — | 0:05 | 0,14* | — | 0:10 | 0,14* | — | 0:15 | 0,14* |
| 1 e 1A | 0,90 | 0,17 | — | 1:00 | 0,21 | 0,20 | 1:00 | 0,21 | 0,21 | 1:00 | 0,20 |
| 2 | 0,99 | 0,22 | 0,29 | 0:05 | 0,22 | 0,20 | 0:05 | 0,23 | 0,22 | 0:05 | 0,22 |
| 3 | 1,07 | 0,23 | 0,22 | 0:55 | 0,25 | 0,25 | 0:55 | 0,23 | 0,23 | 0:55 | 0,24 |
| 4 | 1,14 | 0,25 | — | 0:05 | 0,25 | 0,24 | 0:05 | 0,26 | 0,25 | 0:05 | 0,25 |
| | | 0,25* | — | 0:10 | 0,27* | — | 0:10 | 0,26* | — | 0:20 | 0,26* |
| 1 e 1A | 1,50 | 0,27 | 0,25 | 1:05 | 0,34 | — | 1:05 | 0,35 | — | 1:05 | 0,32 |
| 2 | 1,60 | 0,36 | 0,35 | 1:00 | 0,36 | 0,34 | 1:00 | 0,34 | — | 1:00 | 0,35 |
| 3 | 1,67 | 0,34 | — | 1:00 | 0,38 | 0,38 | 1:00 | 0,38 | 0,38 | 1:00 | 0,37 |
| | | 0,34* | — | 1:05 | 0,38* | — | 1:10 | 0,39* | — | 1:15 | 0,37* |
| 1 e 1A | 2,10 | 0,39 | — | 2:00 | 0,44 | 0,43 | 2:00 | 0,39 | — | 2:00 | 0,41 |
| 2 | 2,21 | 0,42 | — | 1:05 | 0,46 | 0,45 | 1:05 | 0,40 | — | 1:05 | 0,43 |
| | | 0,42* | — | 1:10 | 0,49* | — | 1:15 | 0,48* | — | 1:20 | 0,48* |
| 1 e 1A | 2,7 | 0,45 | — | 2:05 | 0,47 | 0,46 | 2:05 | 0,39 | — | 2:05 | 0,44 |
| | | 0,53* | — | 2:10 | 0,50* | — | 2:15 | 0,50* | — | 2:20 | 0,54* |

obs: h = altura de concreto na célula
 P_v = pressão durante vibração, daN/cm²
 P_{av} = pressão após vibração, daN/cm²
t = tempo decorrido, h e min.
* = pressão durante revibração, daN/cm²

Tabela 2.8

Resumo dos resultados de teste para concreto comum e concreto com w.r.a (water reductor admixture). ORE e STRAUGHAN (20).

| célula n ^o | h ft | concreto comum 25-10-66 | | | | concreto comum 27-10-66 | | | | concreto comum 01-11-66 | | | | concreto com w.r.a 03-11-66 | | | | concreto com w.r.a 08-11-66 | | | | | | | |
|-----------------------|---------|----------------------------|-----------------|------|-------------------|----------------------------|-----------------|------|-------------------|----------------------------|-----------------|------|-------------------|--------------------------------|-----------------|------|-------------------|--------------------------------|-----------------|------|-------------------|-------|------|------|------|
| | | P _v | P _{av} | t | R _v /h | P _v | P _{av} | t | R _v /h | P _v | P _{av} | t | R _v /h | P _v | P _{av} | t | R _v /h | P _v | P _{av} | t | R _v /h | | | | |
| 1+1A (média) | 0,39 | 0,08 | 0,07 | 0:00 | 0,23 | 0,07 | 0,07 | 0:00 | 0,23 | 0,07 | 0,07 | 0:00 | 0,23 | 0,07 | 0,08 | 0:00 | 0,23 | 0,08 | 0,08 | 0:00 | 0,23 | 0,08 | 0,08 | 0:00 | 0,23 |
| 2 | 0,38 | 0,09 | 0,09 | 0:00 | 0,23 | 0,09 | 0,09 | 0:00 | 0,23 | 0,09 | 0,08 | 0:00 | 0,23 | 0,08 | 0,08 | 0:00 | 0,23 | 0,08 | 0,07 | 0:45 | 0,23 | 0,07 | 0:45 | 0,23 | |
| 3 | 0,40 | 0,11 | 0,10 | 0:00 | 0,23 | 0,10 | 0,10 | 0:00 | 0,23 | 0,12 | 0,11 | 0:00 | 0,23 | 0,10 | 0,09 | 0:35 | 0,23 | 0,10 | 0,09 | 0:00 | 0,23 | 0,09 | 0:00 | 0,23 | |
| 4 | 0,53 | 0,11 | 0,09 | 1:00 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0:50 | 0,21 | 0,12 | 0,08 | 0:00 | 0,23 | 0,10 | 0,07 | 0:00 | 0,23 | 0,11 | 0,07 | 0:00 | 0,23 | 0,10 | 0:00 | 0,23 | |
| 5 | 0,60 | 0,12 | 0,12 | 0:00 | 0,19 | 0,13 | 0,12 | 0:00 | 0,21 | 0,15 | 0,13 | 0:00 | 0,23 | 0,14 | 0,13 | 0:00 | 0,23 | 0,13 | 0,13 | 0:00 | 0,21 | 0,13 | 0:00 | 0,21 | |
| | | 0,12* | 0,05 | 0:19 | 0,19 | 0,12* | 0:05 | 0,19 | 0,19 | 0,10 | 0:30 | 0,17 | 0,14 | 0,10 | 0:55 | 0,17 | 0,14 | 0,10 | 0:55 | 0,17 | 0,11 | 1:45 | 0,18 | 0,18 | |
| | | | 0,10 | 0:30 | 0,17 | | 0:11 | 0:18 | 0,18 | 0,09 | 1:00 | 0,16 | 0,10 | 1:55 | 0,16 | 0,10 | 1:55 | 0,16 | 0,11 | 1:45 | 0,18 | 0,11 | 1:45 | 0,18 | |
| | | | 0,10 | 1:00 | 0,17 | | 0:11 | 0:18 | 0,18 | 0,08 | 2:00 | 0,13 | 0,13* | 0,12 | 2:00 | 0,22 | 0,12* | 0,12 | 2:00 | 0,22 | 0,12* | 1:55 | 0,21 | 0,21 | |
| | | | 0,09 | 1:30 | 0,16 | | 0:10 | 1:40 | 0,17 | 0,08 | 2:15 | 0,12 | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | 0,09 | 1:55 | 0,16 | 0,10* | 2:05 | 0,19 | 0,17 | — | — | — | | | | | | | | | | | | | |
| 1+1A (média) | 0,90 | 0,21 | 0,21 | 1:00 | 0,23 | 0,21 | 0,20 | 1:00 | 0,23 | 0,21 | 0,21 | 0:05 | 0,23 | 0,21 | 0,20 | 0:05 | 0,23 | 0,15 | 0,15 | 1:00 | 0,23 | 0,15 | 0,15 | 1:00 | 0,23 |
| 2 | 0,99 | 0,23 | 0,22 | 0:10 | 0,23 | 0,22 | 0:22 | 0:10 | 0,23 | 0,24 | 0,15 | 0:55 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0:55 | 0,23 | 0,15 | 0,15 | 0:05 | 0,23 | 0,15 | 0:05 | 0,23 | |
| 3 | 1,07 | 0,18 | — | 0:50 | 0,23 | 0,24 | 0,22 | 0:50 | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0:05 | 0,23 | 0,24 | 0,20 | 0:05 | 0,23 | 0,24 | 0,22 | 0:55 | 0,23 | 0,24 | 0,22 | 0:55 | 0,23 |
| 4 | 1,14 | 0,26 | 0,25 | 0:10 | 0,23 | | | | | 0,26 | 0,25 | 0:55 | 0,23 | 0,26 | 0,18 | 0:45 | 0,17 | 0,18 | 0:45 | 0,17 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 | |
| | | | | | | | | | | 0,26 | 0,25 | 1:23 | 0,15 | 0,26 | 0,25 | 0:55 | 0,23 | 0,26 | 0,25 | 0:55 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 |
| | | | | | | | | | | 0,26 | 0,25 | 1:55 | 0,15 | 0,26 | 0,25 | 1:55 | 0,15 | 0,26 | 0,25 | 1:55 | 0,15 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 |
| | | | | | | | | | | 0,26 | 0,25 | 2:55 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 2:55 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 2:55 | 0,12 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 |
| | | | | | | | | | | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 |
| | | | | | | | | | | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,26 | 0,25 | 3:10 | 0,12 | 0,24 | 0,23 | 0:05 | 0,21 |
| 1+1A (média) | 1,50 | 0,35 | 0,34 | 1:10 | 0,23 | 0,35 | 0,34 | 1:10 | 0,23 | 0,35 | 0,35 | 1:00 | 0,23 | 0,32 | 0,32 | 1:00 | 0,21 | 0,35 | 0,35 | 1:05 | 0,23 | 0,35 | 1:05 | 0,23 | |
| 2 | 1,60 | 0,36 | — | 1:00 | 0,23 | 0,31 | 0,31 | 1:00 | 0,19 | 0,35 | 0,35 | 1:00 | 0,22 | 0,32 | 0,31 | 1:00 | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 1:00 | 0,19 | 0,30 | 1:00 | 0,19 | |
| 3 | 1,67 | 0,36 | 0,36 | 1:00 | 0,22 | 0,37 | 0,36 | 1:00 | 0,22 | 0,37 | 0,37 | 1:00 | 0,22 | 0,35 | 0,35 | 1:00 | 0,21 | 0,35 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | |
| | | 0,36* | — | 1:05 | 0,22 | 0,37* | — | 1:05 | 0,22 | 0,37 | 0,37 | 1:00 | 0,22 | 0,35 | 0,35 | 1:00 | 0,21 | 0,35 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | |
| | | | 0,33 | 1:30 | 0,20 | 0,35 | 0,35 | 1:30 | 0,21 | 0,37 | 0,37 | 1:00 | 0,22 | 0,35 | 0,35 | 1:00 | 0,21 | 0,35 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | 0,36 | 1:10 | 0,21 | |
| | | | 0,32 | 2:00 | 0,19 | 0,32 | 0,32 | 2:00 | 0,19 | 0,37 | 0,37 | 1:30 | 0,20 | 0,35 | 0,35 | 1:55 | 0,18 | 0,30 | 0,30 | 1:30 | 0,17 | 0,30 | 1:30 | 0,17 | |
| | | | 0,30 | 2:30 | 0,18 | 0,32 | 0,32 | 2:30 | 0,18 | 0,37 | 0,37 | 2:00 | 0,19 | 0,35 | 0,35 | 2:55 | 0,16 | 0,22 | 0,22 | 2:50 | 0,13 | 0,22 | 2:50 | 0,13 | |
| | | | 0,30 | 2:55 | 0,18 | 0,32 | 0,32 | 2:45 | 0,19 | 0,37 | 0,37 | 3:00 | 0,16 | 0,36* | 0,33 | 3:00 | 0,21 | 0,33* | 0,33 | 3:00 | 0,21 | 0,33* | 3:00 | 0,21 | |
| | | | 0,30 | 3:00 | 0,22 | 0,37* | — | 3:05 | 0,22 | 0,37 | 0,37 | 3:15 | 0,16 | 0,36* | 0,33 | 3:15 | 0,21 | 0,33* | 0,33 | 3:15 | 0,21 | 0,33* | 3:15 | 0,21 | |
| 1+1A (média) | 2,10 | 0,26 | — | 2:00 | 0,12 | 0,27 | 0,26 | 2:00 | 0,12 | 0,32 | 0,32 | 1:05 | 0,15 | 0,25 | 0,23 | 1:05 | 0,12 | 0,31 | 0,31 | 2:00 | 0,12 | 0,31 | 2:00 | 0,12 | |
| 2 | 2,21 | 0,48 | 0,47 | 1:10 | 0,22 | 0,33 | 0,33 | 1:00 | 0,15 | 0,34 | 0,34 | 1:30 | 0,12 | 0,31 | 0,22 | 1:45 | 0,11 | 0,33 | 0,33 | 1:05 | 0,12 | 0,33 | 1:05 | 0,12 | |
| | | 0,48* | — | 1:15 | 0,22 | 0,46* | — | 1:15 | 0,21 | 0,36 | 0,36 | 1:55 | 0,16 | 0,31 | 0,22 | 1:55 | 0,14 | 0,33 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | |
| | | | 0,43 | 1:40 | 0,19 | 0,47 | 0,47 | 1:55 | 0,18 | 0,36 | 0,36 | 2:25 | 0,16 | 0,31 | 0,22 | 2:50 | 0,12 | 0,33 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | |
| | | | 0,41 | 2:10 | 0,18 | 0,41 | 0,41 | 2:55 | 0,17 | 0,36 | 0,36 | 2:55 | 0,16 | 0,31 | 0,22 | 3:50 | 0,11 | 0,33 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | 0,33 | 1:30 | 0,13 | |
| | | | 0,35 | 2:40 | 0,16 | 0,37 | 0,37 | 3:15 | 0,17 | 0,36 | 0,36 | 3:15 | 0,16 | 0,31 | 0,22 | 4:00 | 0,21 | 0,33* | 0,33 | 2:50 | 0,12 | 0,33 | 2:50 | 0,12 | |
| | | | 0,35 | 3:05 | 0,16 | 0,41* | — | 3:15 | 0,19 | 0,36 | 0,36 | 4:10 | 0,14 | 0,40* | 0,44 | 4:00 | 0,21 | 0,33* | 0,33 | 3:00 | 0,17 | 0,33 | 3:00 | 0,17 | |
| | | | 0,50* | 3:10 | 0,22 | 0,41* | — | 3:15 | 0,19 | 0,36 | 0,36 | 4:10 | 0,14 | 0,40* | 0,44 | 4:15 | 0,21 | 0,33* | 0,33 | 3:00 | 0,17 | 0,33 | 3:00 | 0,17 | |
| 1+1A (média) | 2,70 | 0,26 | 0,25 | 2:10 | 0,09 | 0,26 | 0,26 | 2:10 | 0,09 | 0,25 | 0,25 | 2:00 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 2:00 | 0,07 | 0,31 | 0,31 | 2:05 | 0,11 | 0,31 | 2:05 | 0,11 | |
| | | 0,62* | — | 2:15 | 0,22 | 0,60* | 0,60 | 2:15 | 0,22 | 0,25 | 0,25 | 2:30 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 2:55 | 0,07 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |
| | | | 0,48 | 2:40 | 0,17 | 0,55 | 0,55 | 2:55 | 0,18 | 0,26 | 0,26 | 3:00 | 0,08 | 0,20 | 0,20 | 3:55 | 0,07 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |
| | | | 0,47 | 3:10 | 0,17 | 0,49 | 0,49 | 3:55 | 0,18 | 0,26 | 0,26 | 4:00 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 4:20 | 0,08 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |
| | | | 0,47 | 3:40 | 0,17 | 0,53* | — | 4:15 | 0,17 | 0,26 | 0,26 | 4:15 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 4:20 | 0,08 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |
| | | | 0,49 | 4:05 | 0,17 | 0,53* | — | 4:15 | 0,17 | 0,26 | 0,26 | 4:15 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 4:20 | 0,08 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |
| | | | 0,60* | 4:10 | 0,22 | 0,53* | — | 4:15 | 0,17 | 0,26 | 0,26 | 4:15 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 4:20 | 0,08 | 0,31 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | 0,31 | 2:30 | 0,11 | |

onde h = altura de concreto na célula
P_v = pressão durante a vibração, daN/cm²
P_{av} = pressão após a vibração, daN/cm²
t = tempo decorrido, hora e minuto
w.r.a = aditivo redutor de água
* pressão durante revibração, daN/cm²

Durante o procedimento regular de lançamento, a pressão desenvolvida pelo concreto com cinza volante atingiu aproximadamente 0,34daN/cm² e em seguida

desviou-se, porém não diminuiu. Ao atingir 2,70m de altura foi registrada na célula uma pressão de 0,44daN/cm² (Fig.2.23).

A pressão do concreto comum atingiu 0,32daN/cm² antes que desviasse. Após atingir um valor de aproximadamente 0,37daN/cm², a pressão recuou para 0,26daN/cm² sobre uma altura de 2,70m (Figura 2.23).

As pressões desenvolvidas pelo concreto com aditivo redutor de água (w.r.a concrete) foram similares àquelas desenvolvidas pelo concreto sem aditivos, mas foram ligeiramente menores (Figura 2.23).

Para melhor ilustrar as pressões desenvolvidas durante o procedimento normal de lançamento, e também durante a revibração dos concretos, a relação de pressão por altura (p/h) e a altura de concreto nas duas células mais baixas da fôrma foram plotadas como ordenadas, enquanto o tempo decorrido foi plotado como abscissa, conforme gráficos superior e inferior da Fig.2.24. Quando a relação p/h foi igual a 0,23, isto significou que o concreto, influenciado pela vibração, agiu como um fluido. A relação menor do que 0,23 indicou que o concreto sobre tratamento normal não se comportou como um fluido.

Pode ser notado que, como mostrado na Fig.2.23, o concreto normal, com aditivo redutor de água, e aquele com cinza volante se comportaram como um fluido com a vibração normal até uma altura de 1,46m onde o lançamento atingiu as duas células localizadas na parte lateral mais baixa da fôrma.

Neste ponto, a menor porção de concreto normal, com aditivo, e com cinza volante atingiram um estado semi-sólido aonde somente parte do acréscimo de

pressão exercida pela altura adicional foi transmitida às células mais baixas da fôrma. Uma vez que isto ocorreu quando o cimento na camada de concreto mais baixa hidratou-se em aproximadamente 1 hora, e o concreto com cinza volante não possuía cimento, parece pouco provável que a hidratação tenha sido a causa da diminuição da pressão na fôrma. É mais provável que o agregado estivesse entrosado e ligado entre as duas faces da fôrma. Se isto for verdade, o principal efeito do agregado submetido ao tratamento usado neste teste foi limitar a magnitude da pressão lateral.

A hidratação do cimento quando afetada pela temperatura e composição química, tem sido considerada um fator importante no limite de pressão do concreto na fôrma.

Nesses testes, isto mostrou que logo depois de ocorrido o entrosamento dos agregados, a hidratação do cimento atuou para limitar o aumento da pressão do concreto na fôrma como mostrado pela diferença no comportamento entre o concreto com cinza volante e os outros concretos. Entretanto, como mostrado na Fig.2.24, a relação p/h foi duplicada quando dois concretos foram revibrados em 2 horas e 15 minutos e novamente em 4 horas e 15 minutos (aproximadamente) e dois concretos com aditivo redutor de água foram revibrados em torno de 4 horas após o primeiro lançamento. Este tempo decorrido coincidiu aproximadamente com o início de pega da pasta de cimento de 3 horas e 50 minutos. Isto também significou que as mudanças de métodos de vibração, quer intensional ou acidental, pode causar uma falha na fôrma não esperada no projeto. Portanto, as vibrações de acordo com os

pesquisadores devem ser coerentes com as limitações de pressões que forem impostas no projeto de fôrmas.

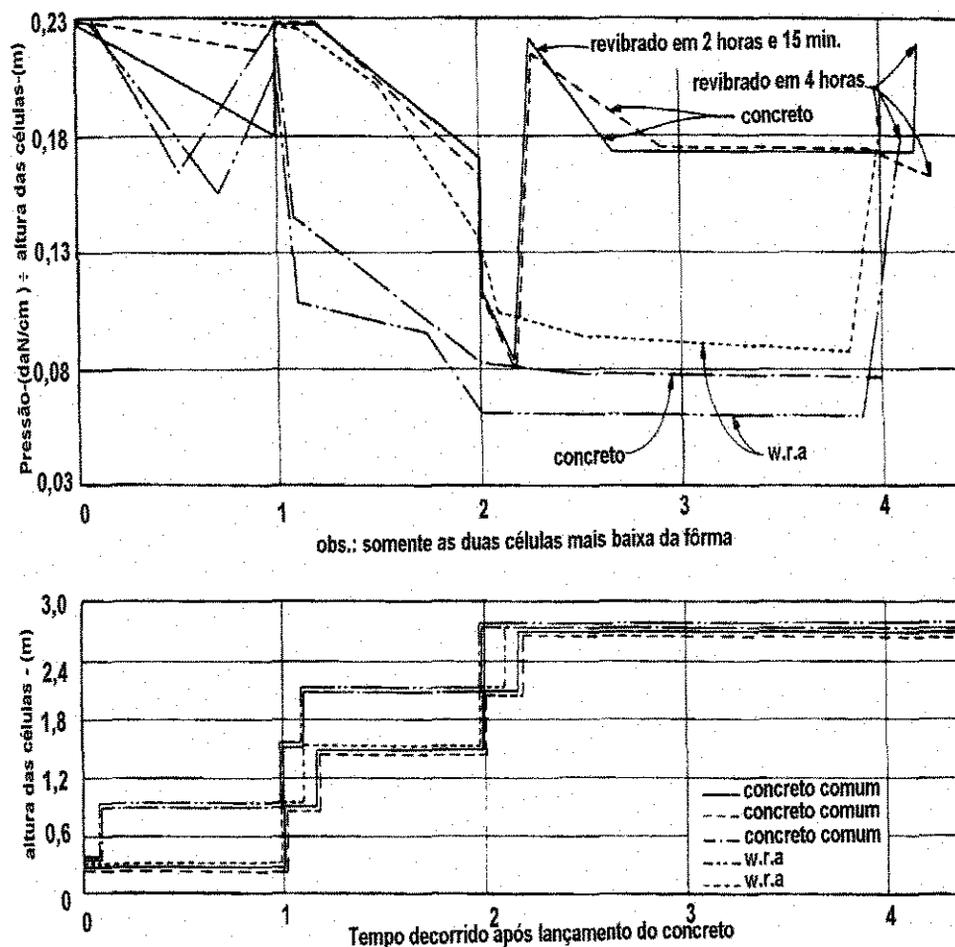


Figura 2.24 - Relação entre pressão/altura por tempo e velocidade de enchimento para concretos comuns e com aditivo redutor de água (w.r.a). ORE e STRAUGHAN (20)

A Fig.2.25 mostra resultados em que a relação de pressão por altura na célula foi plotada contra a distância entre a célula e o vibrador. A relação pressão por altura (p/h) nos levam ao valor hidrostático $p/h=0,23$ quando o vibrador estiver de 0,76m à 0,91m da célula. Esta redução continuou numa velocidade rápida quando a distância do vibrador a partir da célula aumentou até que um valor médio de $p/h =$

0,08 foi alcançado. Quando os concretos foram revibrados, registraram-se valores de p/h limitando de 0,16 à 0,225. A magnitude destes valores de p/h revibrados foi um tanto dependente do período de tempo que transcorreu entre o lançamento e a revibração. Isto veio, contudo, confirmar que a magnitude e a localização da vibração foi importante no desenvolvimento da pressão na fôrma em paredes estreitas. O efeito do impacto de carregamento sobre a pressão na fôrma não foi observado durante os testes, primariamente, devido a altura relativamente baixa da fôrma usada.

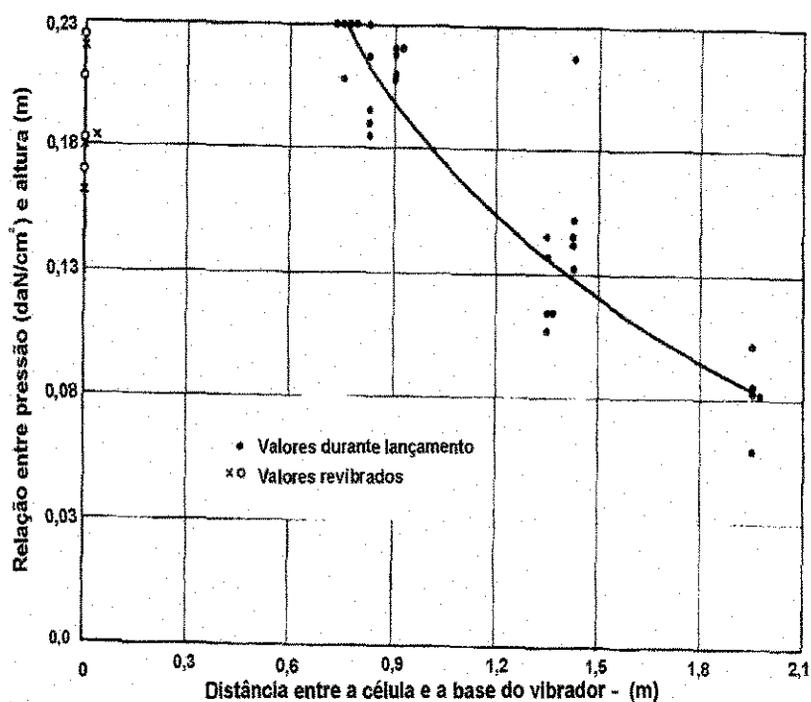


Figura 2.25 - Efeito de localização do esforço do vibrador sobre a relação entre pressão e altura para concreto comum e com aditivo redutor água. ORE e STRAUGHAN (20)

Os resultados desta investigação revelaram que o entrosamento e o efeito arco dos agregados foram os fatores primordiais para limitar o desenvolvimento de

pressão na fôrma. A hidratação do cimento foi o outro fator que limitou a pressão. Contudo, aproximadamente 4 horas após o primeiro lançamento, a revibração para profundidade total aumentou substancialmente a pressão na fôrma.

Os concretos com cinza volante desenvolveram pressões maiores que os outros concretos nas alturas estudadas.

A hidratação do cimento quando afetada por um redutor de água, agente retardante de pega, tem seu efeito minorado sobre as pressões desenvolvidas. As pressões do concreto com aditivo redutor de água foram ligeiramente menores.

Ore e Straughan afirmaram que a duração, intensidade e localização do vibrador são mais importantes que qualquer outro fator considerado no desenvolvimento de pressões na fôrma.

- **Célula Cambridge de Pressão em Terra**

N.J.GARDNER e A.R.QUERESHI (10) tiveram como objeto de estudo a determinação do efeito da potência do vibrador, duração de vibração e profundidade de imersão do vibrador sobre a pressão lateral exercida pelo concreto fresco. Dimensões da fôrma, velocidade de enchimento, proporções de concreto e slump foram mantidos nominalmente constantes e a temperatura foi medida.

A pesquisa consistiu do lançamento do concreto sob condições “controladas” dentro de uma fôrma instrumentada de 4,6m de profundidade, 0,91m de largura e 0,28m entre as faces, e da medida da pressão lateral. A pressão lateral

foi medida por cinco Células Cambridge montadas a 0,31m, 0,92m, 1,52m, 2,13m e 2,74m respectivamente acima da base da fôrma.

A fôrma era constituída por uma caixa de aço, com as extremidades inicialmente livres, que eram fixadas assim que um carrinho de mistura pronta descarregasse diretamente dentro dela. Ela foi construída tão rigidamente, tanto quanto possível, para minimizar seu movimento e conseqüentemente maximizar a pressão lateral. Similarmente, para maximizar a pressão lateral, o atrito na parede foi reduzido revestindo a fôrma com uma fina camada de polietileno.

A célula de pressão desenvolvida por ARTHUR e ROSCOE (5), na qual pôde-se medir as componentes normal e tangencial da pressão, foi escolhida pelos pesquisadores para este estudo visto que pôde ser feita e calibrada “em casa” e por causa da experiência de uso existente no território de Ottawa-Canadá.

Basicamente a célula é projetada de maneira que a face da placa se apoie em finas membranas que são rígidas em suas próprias direções e flexíveis na direção transversal, sendo que os carregamentos são medidos por strain-gauges sobre as membranas. A célula é mostrada na figura 2.26. Uma pressão na direção normal causa deformação nas membranas nessa direção, e uma tensão cisalhante desenvolve deformação nas membranas colocadas na direção do cisalhamento. As deformações axiais nas membranas foram medidas por extensômetros elétricos de resistência montados em ambos os lados das membranas e ligados em série.

Placas de face circular Plexiglas foram usadas para transmitir as pressões do concreto para as células de carga. As placas Plexiglas foram unidas às células de

carga e passadas através de furos ajustados na fôrma. As faces das placas foram ajustadas para estarem niveladas com a face interna da fôrma.

Foram executados testes para checagem da calibração na fôrma pela pressão hidrostática fornecida pela água contida numa grande bolsa de polietileno localizada na fôrma.

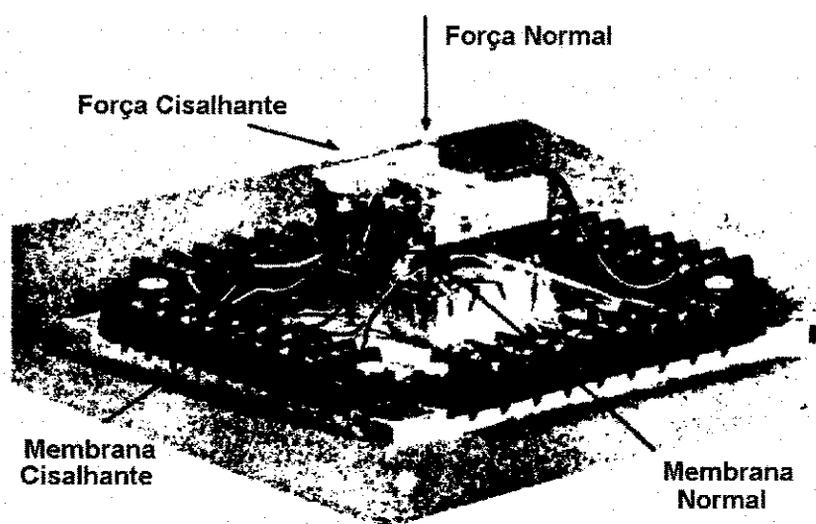


Figura 2.26 - Vista da Célula Cambridge de Pressão em Terra.. ARTHUR e ROSCOE(5).

O procedimento do teste consistiu em zerar as leituras de deformação de todos os extensômetros das cinco células, depois lançar o concreto fresco do carrinho para dentro da fôrma numa velocidade de 6,1m/h. A fôrma foi cheia em oito estágios, em intervalos de 0,61m para os primeiros 4,27m e então o último 0,31m. O concreto foi vibrado em todos os estágios usando o referido vibrador, para a imersão e duração especificada a uma profundidade particular. Foi registrada a temperatura do laboratório e da mistura de concreto. O abatimento do concreto foi medido no começo, no meio e no final do lançamento. Em todos os intervalos de 0,61m, depois

do concreto ter sido vibrado, foram registradas as leituras dos extensômetros para ambas as pressões cisalhante e normal.

Os dados dos testes realizados pelos pesquisadores e as medidas das pressões máximas são apresentados na Tabela 2.9

Tabela 2.9

Dados dos Testes. GARDNER e QUERESHI (10)

| Teste N° | T (°C) | HP | R m/h | t _v (min.) | h _i (m) | abatimento do concreto (mm) | P _{máx} (kPa) |
|----------|--------|-----|-------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 21,7 | 1 | 6,1 | 0,5 | 0,61 | 65 | 35,4 |
| 2 | 23,3 | 1 | 6,1 | 2,5 | 0,61 | 65 | 38,3 |
| 3 | 21,7 | 1 | 6,1 | 3,5 | 0,61 | 65 | 57,4 |
| 4 | 25,6 | 1 | 6,1 | 5,0 | 0,61 | 65 | 34,7 |
| 5 | 21,7 | 1 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 65 | 45,0 |
| 6 | 23,9 | 1 | 6,1 | 2,5 | 1,00 | 65 | 45,5 |
| 7 | 22,2 | 1 | 6,1 | 3,5 | 1,00 | 75 | 46,0 |
| 8 | 20,0 | 1 | 6,1 | 5,0 | 1,00 | 70 | 46,7 |
| 9 | 22,8 | 2,5 | 6,1 | 0,5 | 0,61 | 65 | 53,3 |
| 10 | 18,3 | 2,5 | 6,1 | 2,5 | 0,61 | 75 | 62,3 |
| 11 | 16,7 | 2,5 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 65 | 61,1 |
| 12 | 12,8 | 2,5 | 6,1 | 2,5 | 1,00 | 75 | 82,1 |
| 13 | 8,9 | 1 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 65 | 66,1 |
| 14 | 12,2 | 2,5 | 6,1 | 2,5 | 0,61 | 75 | 98,2 |
| 15 | 8,3 | 2,5 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 75 | 88,1 |
| 16 | 18,9 | 1 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 60 | 47,9 |
| 17 | 13,9 | 1 | 6,1 | 0,5 | 1,00 | 65 | 45,2 |

T = temperatura;

HP = potência do vibrador, 1HP = 0,746kW;

R = velocidade de enchimento;

t_v = tempo de vibração;

h_i = profundidade de imersão do vibrador;

P_{máx} = medida da pressão máxima.

Uma envoltória típica de pressão lateral medida é dada na Figura 2.27 para o teste 6 (Tabela 2.9). Todas as envoltórias de pressão lateral apresentam as características gerais ilustradas nesta figura.

Dados complementares do teste 6 :

- Resistência característica do concreto, 27,6 MPa;
- Resistência média do concreto, 30,6 MPa;
- abatimento médio do concreto, 64 mm;
- Largura da fôrma, 279 mm;
- Temperatura do concreto, 23,9 °C;
- Temperatura ambiente, 22,8 °C;

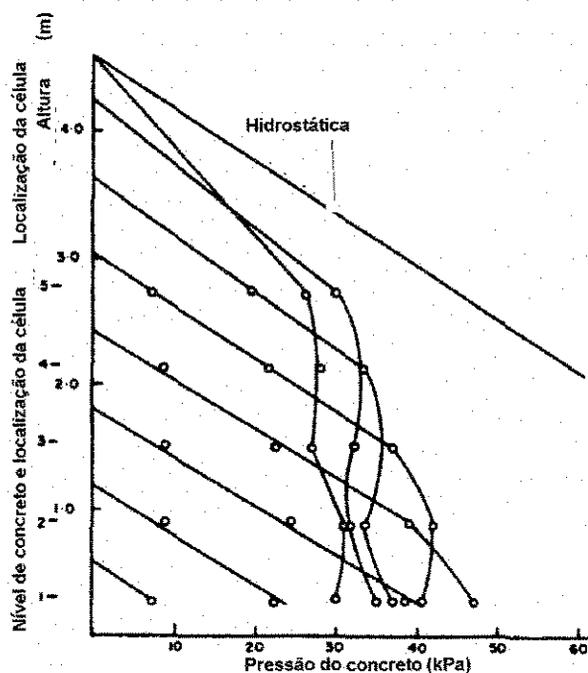


Figura 2.27 - Pressão desenvolvida em vários níveis de concreto na fôrma
GARDNER e QUERESHI(10)

A mesma informação foi plotada contra a altura do concreto na Figura 2.28.

Esta figura também mostra as pressões cisalhantes medidas.

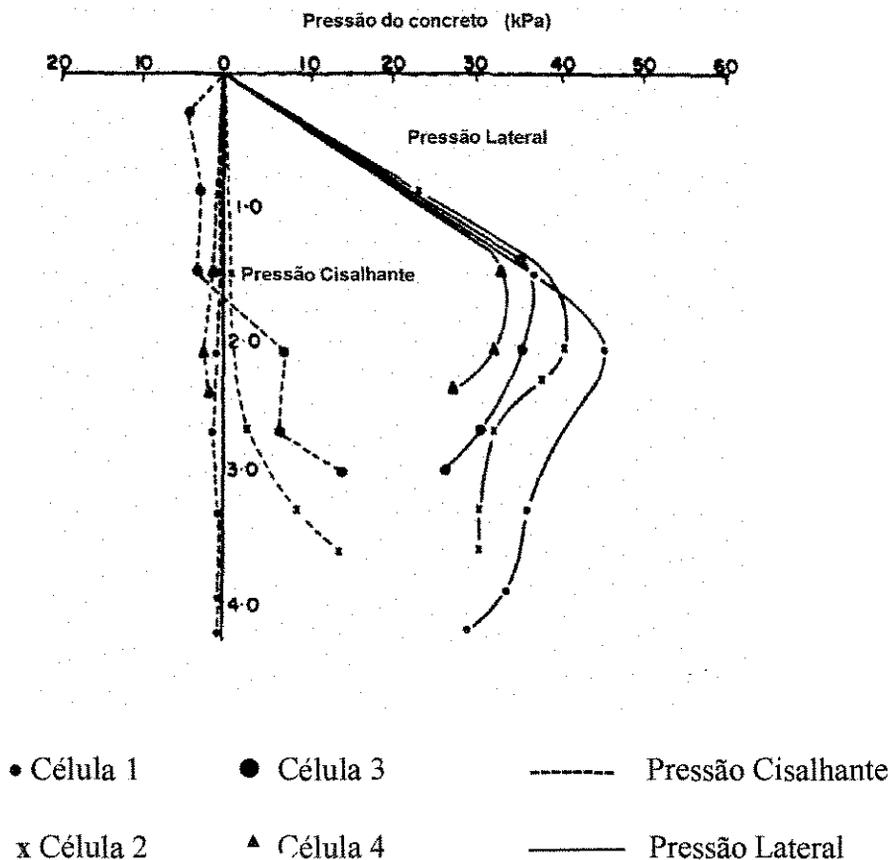


Figura 2.28 - Variação das Pressões Cisalhante e Lateral com a altura do concreto.

GARDNER, QUERESHI(10)

Devido ao problema para se manter em operação um grande número de extensômetros, as forças cisalhantes não foram medidas na maioria dos testes. É interessante notar, que com a altura, a pressão lateral é inicialmente hidrostática e a pressão cisalhante é zero. Quando o efeito da vibração diminui, desenvolve-se atrito cisalhante e a pressão lateral decresce abaixo da pressão hidrostática. Isto está de acordo com as hipóteses desenvolvidas anteriormente.

3.1 MÉTODO ADOTADO NESTE TRABALHO

O método de teste desenvolvido neste trabalho, consiste da utilização de equipamentos e técnicas usadas na medição de deformações a partir do emprego de extensômetros elétricos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, da área de estruturas.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Utilizou-se, para a montagem, chapas de madeira compensada comum para fôrmas sem a preocupação com o acabamento final das faces, mesmo porquê este trabalho engloba apenas o comportamento do concreto fresco.

A opção inicialmente escolhida para a determinação das pressões seguiu o seguinte procedimento:

Na montagem da fôrma, os painéis das superfícies laterais foram divididos, no sentido do comprimento, em 5 partes iguais, tendo os painéis 52,5cm de altura, 1,06m de comprimento, e espessura de 17mm. Em cada parte do painel, foi instalado, no centro da face externa, um extensômetro elétrico de fio com resistência de 120Ω e constante característica, $K = 1,99$. A estanqueidade da fôrma, entre as

frestas originadas pela divisão do painel, foi garantida com a utilização de uma fita plástica adesiva. A fôrma foi montada com as dimensões de 32,4cm de largura, 52,5cm de altura (subdivididas em 5 partes iguais), e 106cm de comprimento (Figura 3.1).

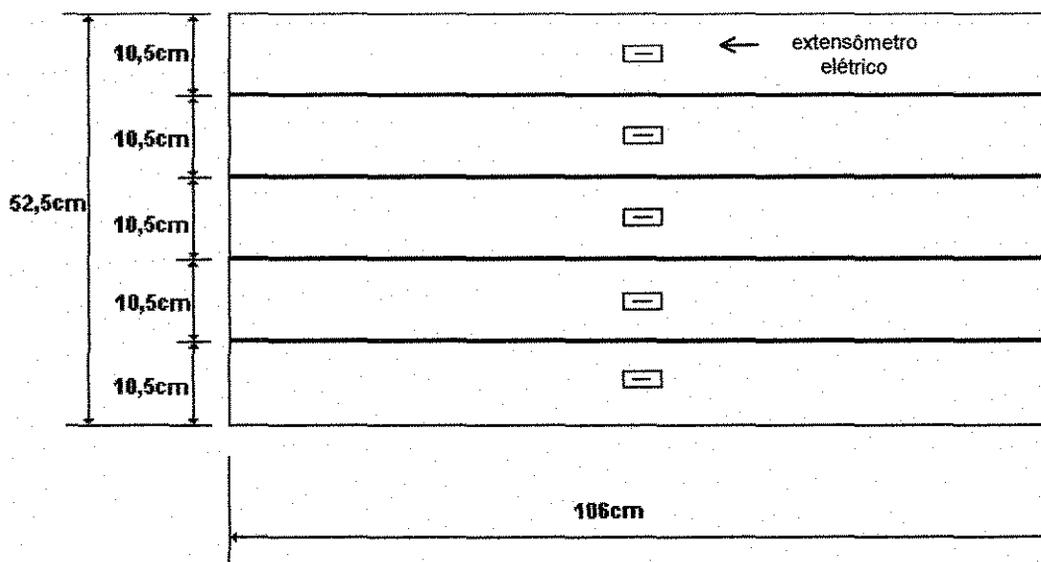


Figura 3.1 - Subdivisão do painel lateral da fôrma, e localização dos extensômetros elétricos.

Utilizou-se concreto de uso geral com cimento Portland sem aditivos, traço de 1:2:3 e composição em peso por metro cúbico:

- brita 1 = 110kg
- brita 2 = 110kg
- areia (seca) = 150kg
- cimento = 80kg

Foram realizados experimentos com o traço de concreto dado anteriormente. Os fatores velocidade de enchimento e abatimento do concreto

(slump) foram escolhidos como variáveis a serem estudadas pois, segundo a literatura pesquisada, são considerados importantes na variação da intensidade de pressão. Na Tabela 3.1, pode-se verificar as grandezas utilizadas.

Tabela 3.1
Grandezas consideradas no ensaio

| abatimento do concreto | velocidade de enchimento |
|------------------------|--------------------------|
| 75mm | 1,58m/h |
| 100mm | 1,58m/h |
| 75mm | 0,25m/h |
| 100mm | 0,25m/h |

Para o adensamento foi empregado um vibrador de imersão com potência de 2 HP.

Uma ponte de Wheatstone foi utilizada para quantificar as deformações, das superfícies laterais da fôrma, captadas pelos extensômetros elétricos. Instalou-se quatro relógios comparadores nos sarrafos laterais que serviam de apoio para os painéis verticais a fim de medir eventuais deslocamentos nos apoios (Figura 3.2).

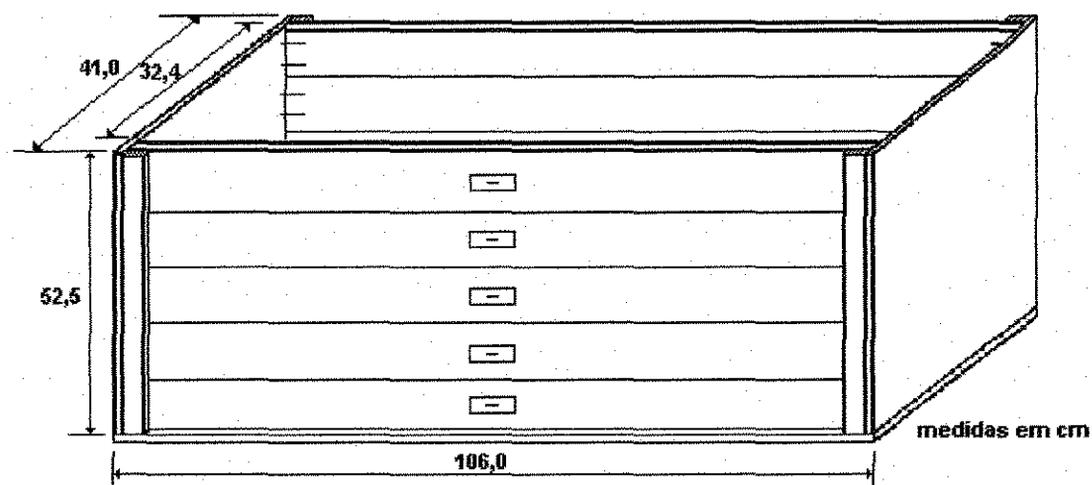


Figura 3.2 - Esquema de montagem da fôrma para os ensaios.

3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO

O ensaio iniciou-se com a preparação do concreto, instante em que o tempo inicial da mistura foi registrado após a adição da água. Terminada a preparação do concreto, procedeu-se, imediatamente, ao lançamento das camadas correspondentes às divisões das superfícies laterais da fôrma, com o tempo sempre sendo registrado. O vibrador foi imerso após cada camada lançada, e na seqüência faziam-se as medições das deformações. E assim, sucessivamente, foram registradas as deformações de cada parte do painel, após cada camada lançada e vibrada. A profundidade de vibração foi igual à altura de cada camada lateral, e o tempo de vibração se prolongou por um período de aproximadamente 0,5min.

O propósito das divisões do painel lateral em 5 faixas de 10,5cm de altura foi de que houvesse, durante o carregamento de concreto na fôrma, individualidade das deformações ao longo da altura da fôrma.

3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Como já mencionado anteriormente, utilizou-se uma fôrma com 52,5cm de altura, 32,4cm de largura e 106cm de comprimento com espessura de 17mm. Sua capacidade volumétrica era de $0,18\text{m}^3$.

O concreto lançado na fôrma exerceu pressões sobre suas superfícies laterais, as quais sofreram deformações registradas pelos extensômetros elétricos situados externamente, no centro de cada segmento, como mostra a figura 3.2. As

deformações medidas foram devidas à flexão da chapa de madeira. Portanto, para obter o valor da pressão lateral que o concreto exerceu, – o objetivo deste trabalho –, utilizou-se as fórmulas apresentadas a seguir.

$$\sigma_{\text{comp.}} = E_{\text{comp.}} \cdot \varepsilon_{\text{comp.}} \quad (3.1)$$

onde o índice “comp” significa compensado.

Logo, a partir de um ensaio de flexão, obteve-se o valor do módulo de elasticidade da chapa de madeira compensada, $E_{\text{comp.}}$, utilizada no ensaio proposto. O resultado deste ensaio de flexão, é apresentado no Anexo I deste trabalho.

Aplicando a Equação (3.1), com a deformação da superfície lateral da chapa originada pelo carregamento de concreto fresco, durante o ensaio, obteve-se a tensão.

Para determinar a pressão que o concreto fresco exercerá na fôrma, considere-se o modelo estático adotado para o cálculo da pressão do concreto mostrada na figura 3.3

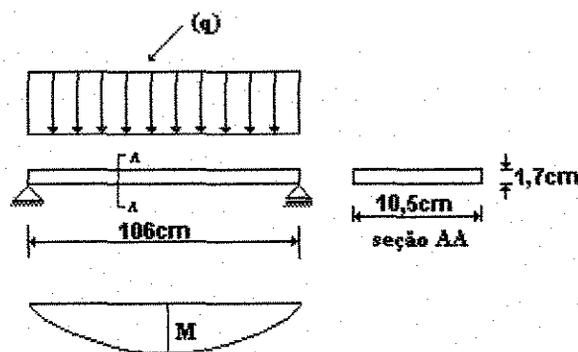


Figura 3.3 - Modelo estático adotado para o cálculo da pressão de concreto.

Nesta figura, o valor de “q” é o carregamento distribuído por unidade de comprimento referente ao concreto fresco sobre a fôrma. Então, a tensão na seção média de uma faixa genérica ao longo da altura da fôrma pode ser obtida por (Eq. 3.2):

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{ql^2}{8}}{\frac{bd^2}{6}} = \frac{3}{4} \frac{ql^2}{bd^2} = \sigma_{\text{comp.}} \quad (3.2)$$

onde:

σ_{comp} é a tensão normal obtida experimentalmente

O valor de “q” é estimado considerando-se uma pressão “p” agindo uniformemente sobre toda a faixa multiplicada pela altura “b” da faixa (Eq. 3.3):

$$q = p.b \quad (3.3)$$

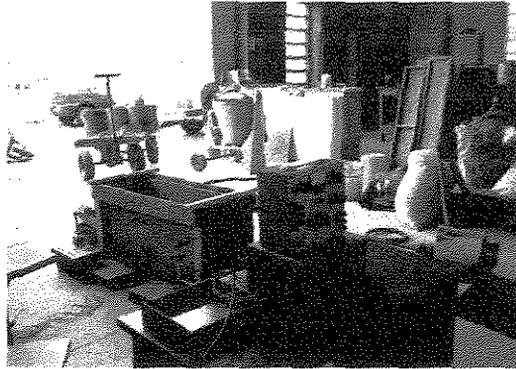
onde:

$b = 10,5\text{cm}$; $d = 1,7\text{cm}$; $l = 106\text{cm}$ e $p =$ pressão que o concreto exerce na superfície lateral da fôrma.

Portanto:

$$p = 3,4295 \times 10^{-4} \sigma_{\text{comp.}} \quad \left(\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \right) \quad (3.4)$$

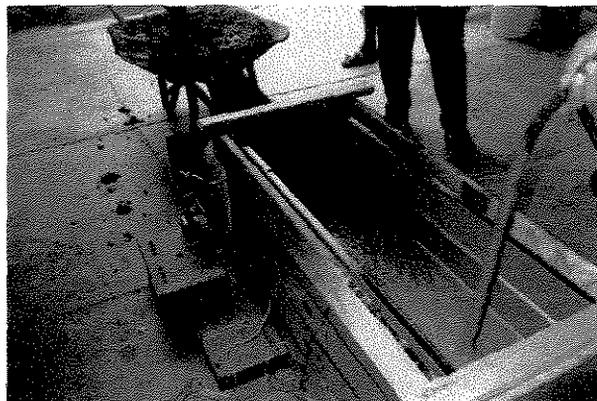
A seguir pode-se observar algumas das fotos obtidas nos ensaios:



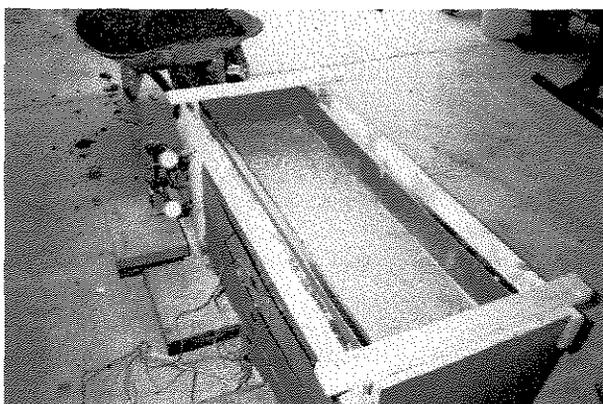
3.4 - Vista geral, onde se observa a fôrma, os relógios comparadores para medir eventuais deslocamentos dos apoios, faixas laterais com extensômetros elétricos e os fios de ligação com a ponte de Wheatstone.



3.5 - Detalhe mostrando a parte interna da fôrma, e as fitas adesivas utilizadas para impedir o vazamento da nata de cimento.



3.6 - Enchimento parcial da fôrma durante o ensaio, e vibração das camadas de concreto.



3.7 - Flexão ocorrida nas faixas devido a pressão exercida pelo concreto fresco.



3.8 - Vibração da última camada de concreto e deformação final observada.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS

As pressões laterais foram obtidas através da Equação 3.4, e representadas nas Figuras de 4.1a a 4.4e. No Anexo II (Tabelas II.1a até II.4c) encontram-se os dados coletados e as pressões obtidas, conforme metodologia adotada.

a) Primeiro Ensaio

Obs: Nos gráficos, os valores numéricos ao lado de quadrinhos com cor, representam o valor final da pressão obtida no respectivo ensaio, e quanto mais forte a cor, maior será a pressão obtida naquele nível.

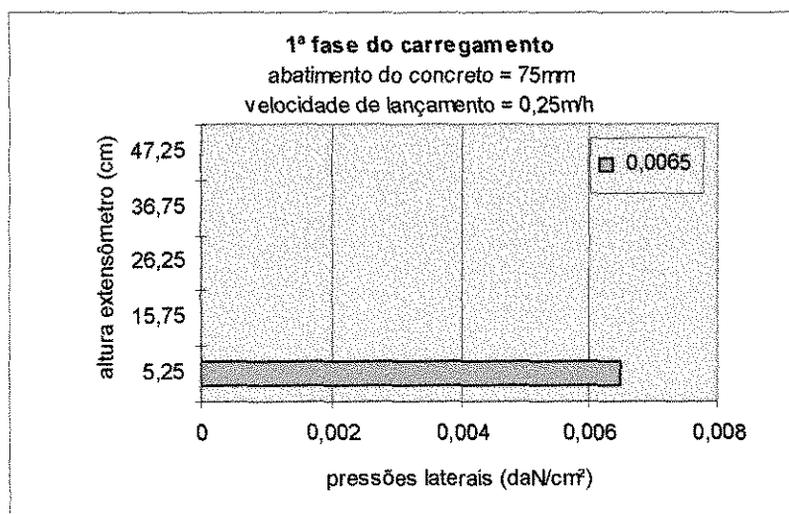


Figura 4.1a

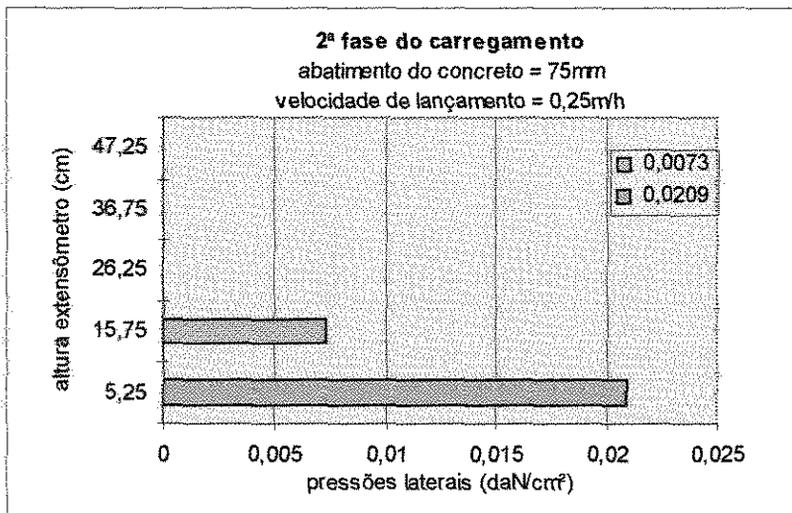


Figura 4.1b

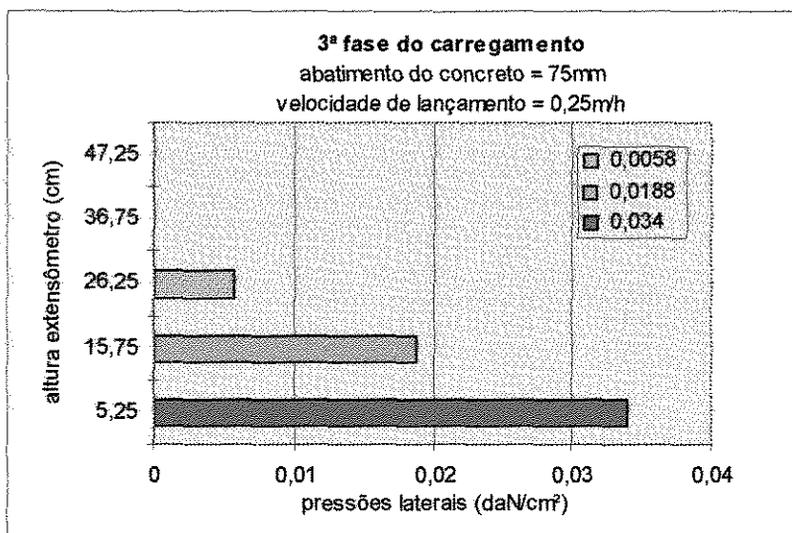


Figura 4.1c

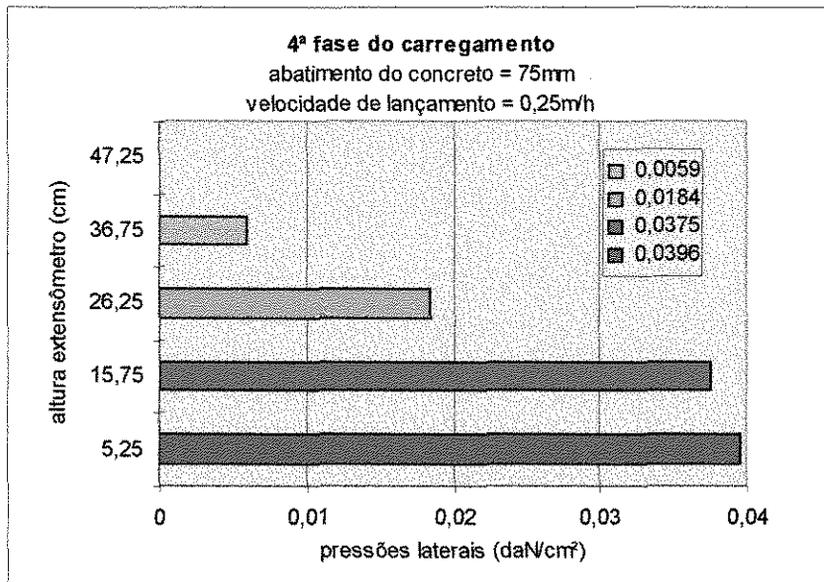


Figura 4.1d

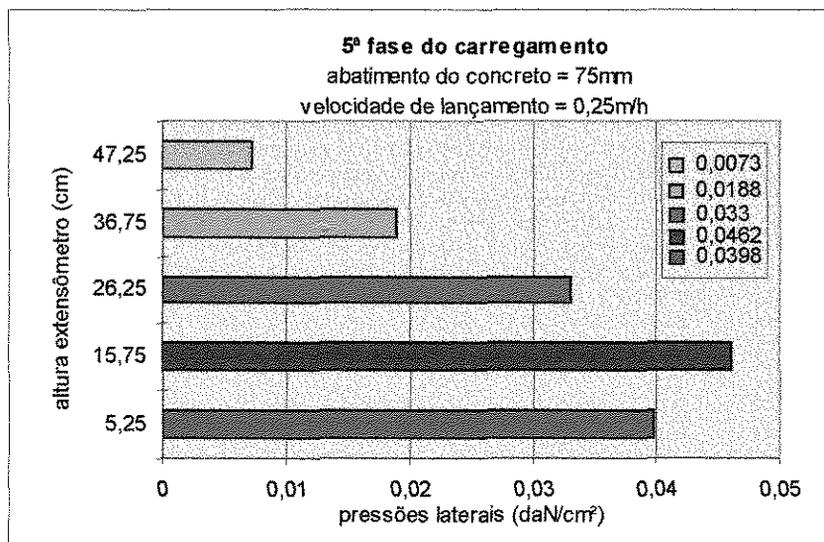
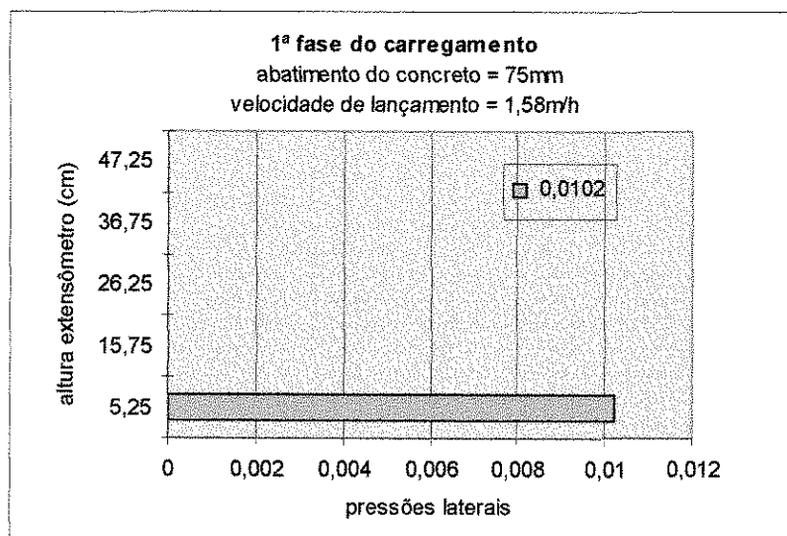
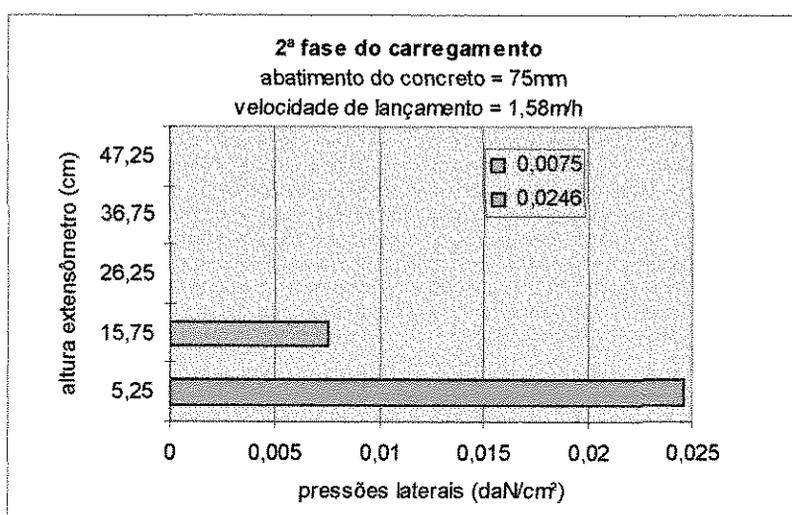


Figura 4.1e

b) Segundo ensaio*Figura 4.2a**Figura 4.2b*

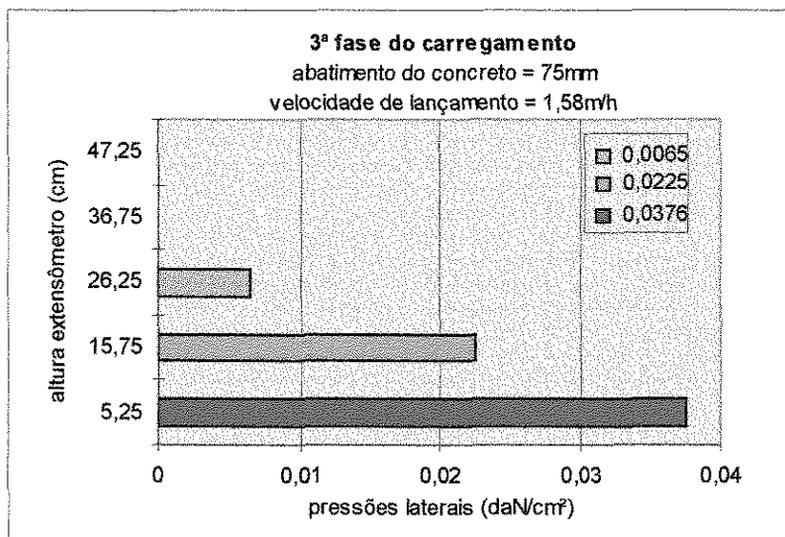


Figura 4.2c

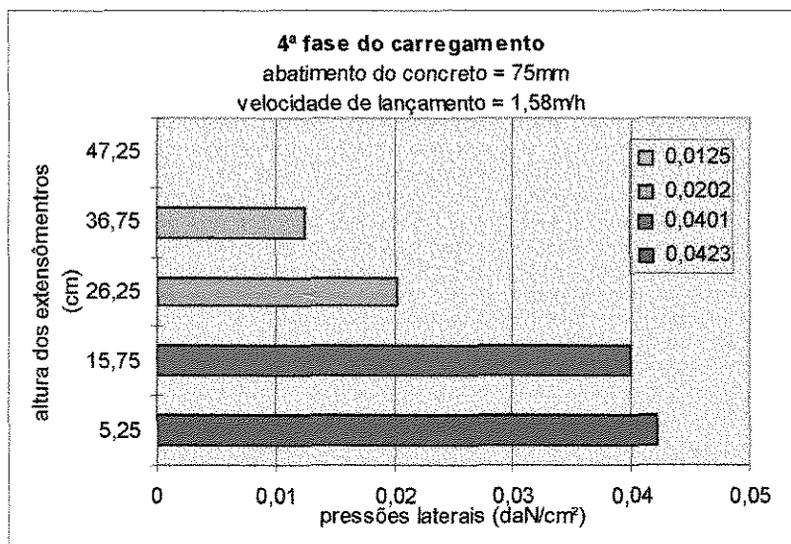


Figura 4.2d

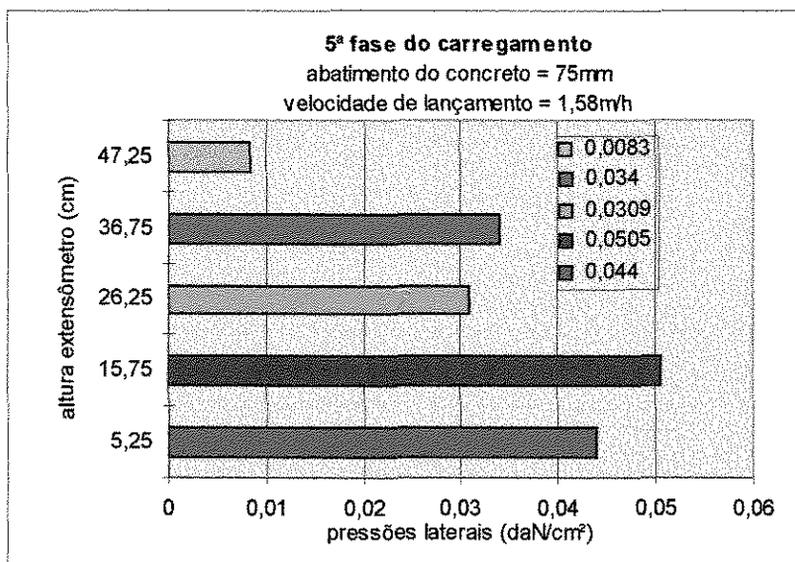


Figura 4.2e

c) Terceiro ensaio

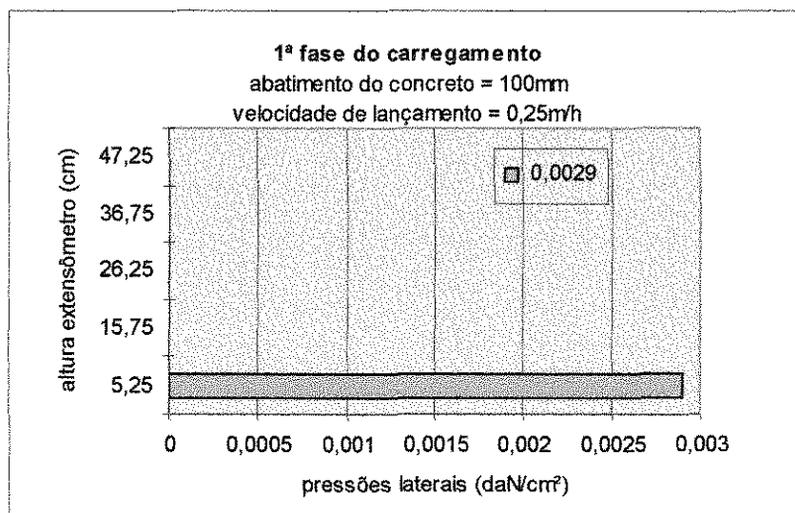


Figura 4.3a

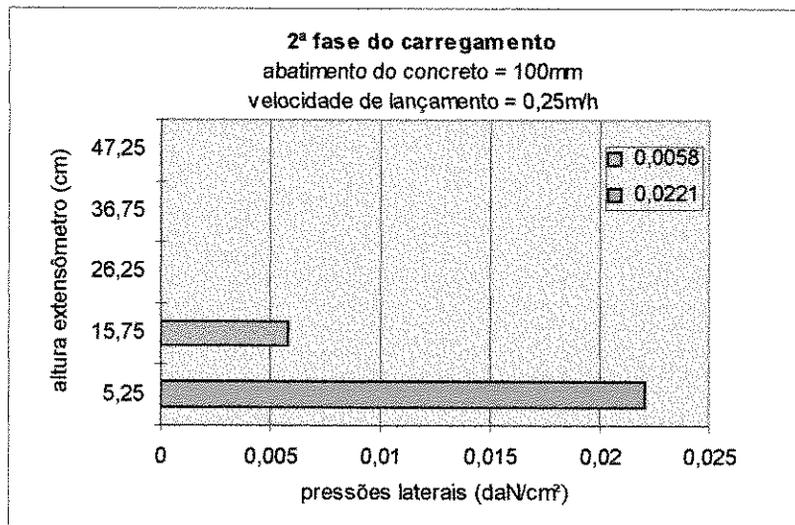


Figura 4.3b

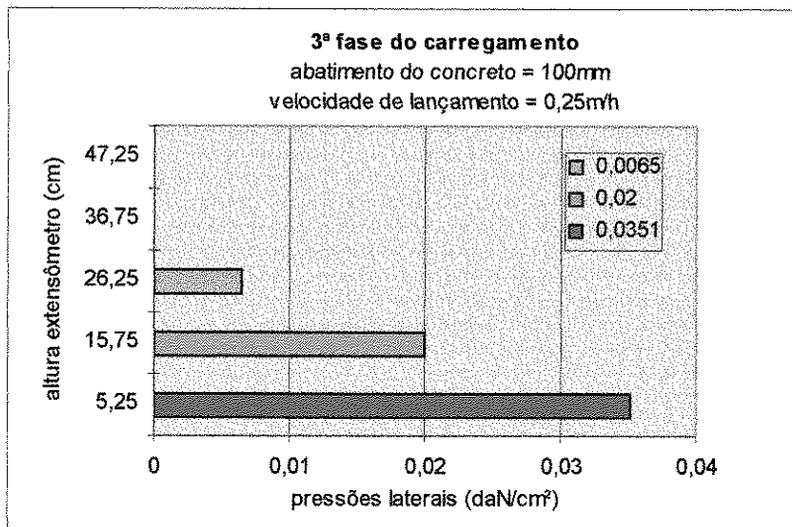


Figura 4.3c

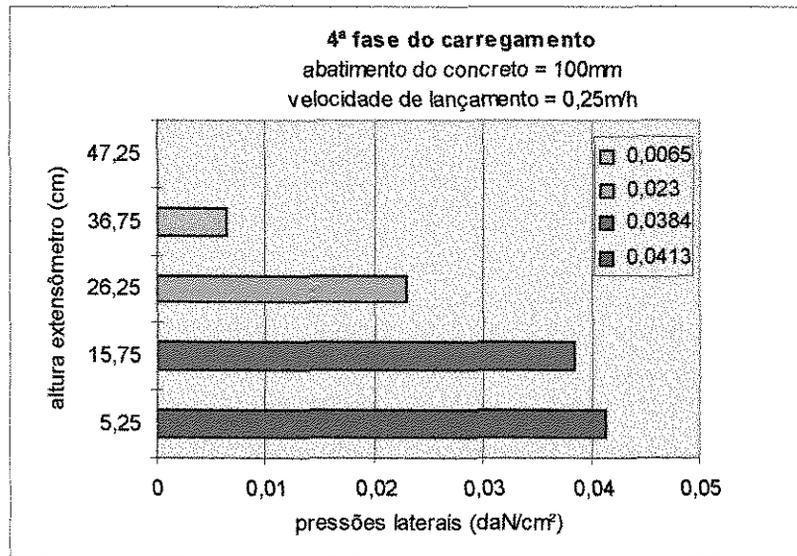


Figura 4.3d

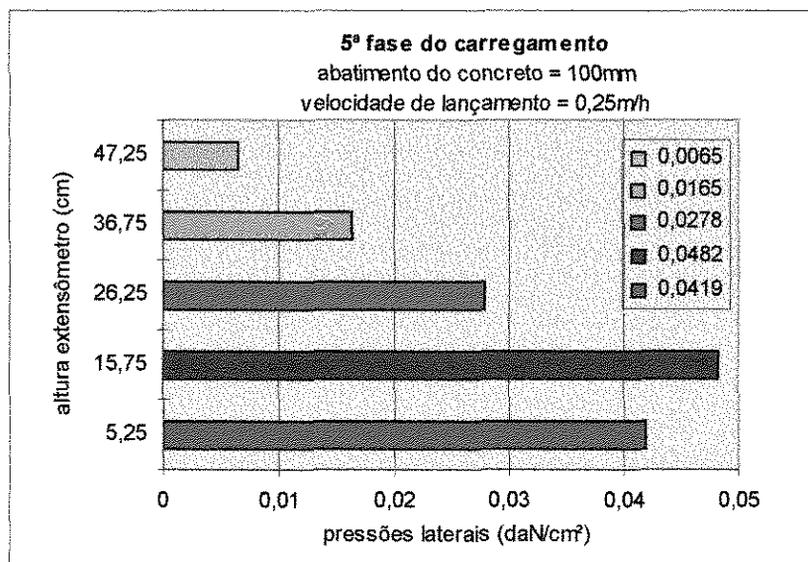
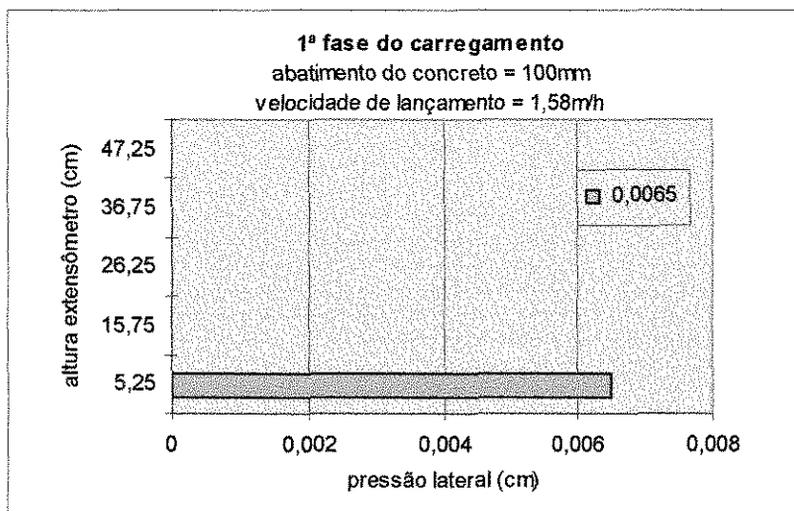
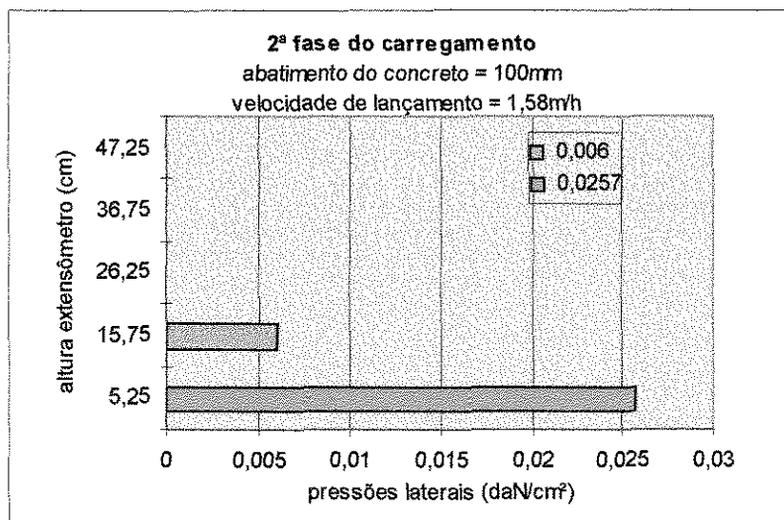


Figura 4.3e

d) Quarto ensaio*Figura 4.4a**Figura 4.4b*

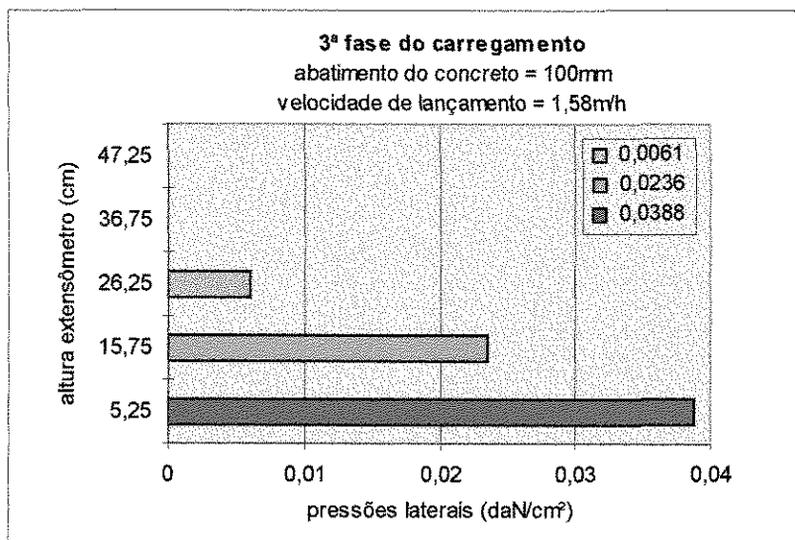


Figura 4.4c

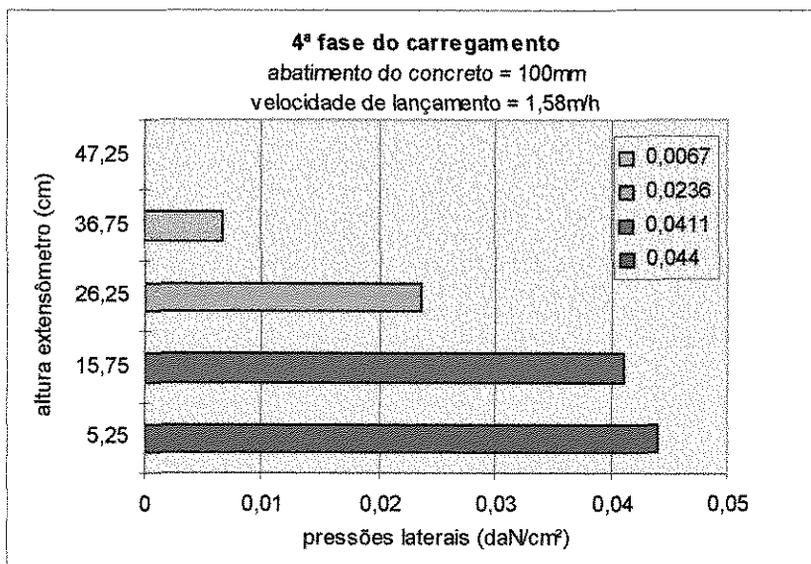


Figura 4.4d

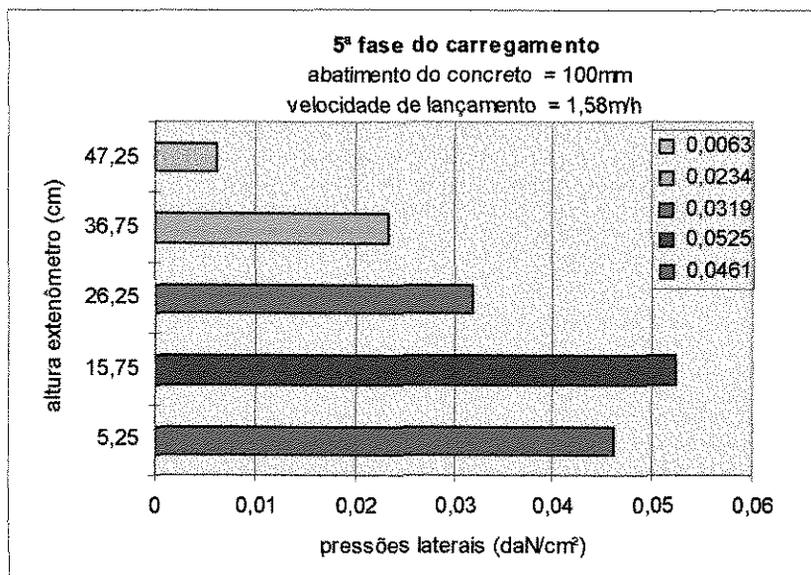


Figura 4.4e

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.2.1 RESULTADOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^2

Um planejamento fatorial 2^2 , consiste em se analisar o comportamento do resultado de um ensaio em função de dois fatores, sendo que cada fator possui dois níveis. Neste trabalho, determinou-se as pressões em função do fator velocidade de enchimento do concreto nos níveis de 0,25m/h e 1,58m/h, e do fator abatimento do concreto (slump) nos níveis de 75mm e 100mm.

A partir dos valores de pressões da quinta fase do carregamento dos quatro ensaios, conforme Figuras 4.1e, 4.2e, 4.3e, e 4.4e, obteve-se as Tabelas 4.1a até 4.1e, as quais forneceram os resultados do planejamento fatorial 2^2 . Com essas tabelas estudou-se os efeitos nas pressões devidos às variáveis velocidade de enchimento do concreto e abatimento do concreto.

Tabela 4.1a

Resultados do planejamento 2² na primeira camada da fôrma de todos os ensaios

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0398 |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0440 |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0419 |
| 4 | 1,58 | 100 | 0,0461 |

Tabela 4.1b

Resultados do planejamento 2² na segunda camada da fôrma de todos os ensaios

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0462 |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0505 |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0482 |
| 4 | 1,58 | 100 | 0,0525 |

Tabela 4.1c

Resultados do planejamento 2² na terceira camada da fôrma de todos os ensaios

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0330 |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0309 |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0278 |
| 4 | 1,58 | 100 | 0,0319 |

Tabela 4.1d

Resultados do planejamento 2² na quarta camada da fôrma de todos os ensaios

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0188 |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0340 |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0165 |
| 4 | 1,58 | 100 | 0,0234 |

Tabela 4.1e

Resultados do planejamento 2² na quinta camada da fôrma de todos os ensaios

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0073 |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0083 |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0065 |
| 4 | 1,58 | 100 | 0,0063 |

4.2.1.1 CÁLCULO DOS EFEITOS

Identificou-se no planejamento fatorial 2², o nível superior com o sinal (+) e o nível inferior com o sinal (-). Aos ensaios 2 e 4 das Tabelas de 4.1a a 4.1e, correspondeu-se o nível (+) da velocidade de enchimento, enquanto que os ensaios 1 e 3 foram identificados como nível (-). Ainda, nessas Tabelas, admitiu-se que o nível (+) indicou o abatimento de 100mm e o nível (-), o abatimento de 75mm.

Para representar o *efeito da velocidade como principal*, usou-se a letra **V**, e sendo y_i a pressão obtida no i -ésimo ensaio, calculou-se **V** através da Equação (4.1a).

$$V = 1/2(y_2 + y_4) - 1/2(y_1 + y_3) \quad (4.1a)$$

Como y_2 e y_4 pertencem ao nível (+) e y_1 e y_3 pertencem ao nível (-) do fator velocidade, pode-se interpretar o *efeito principal V* como sendo a diferença entre a resposta média no nível superior e a resposta média no nível inferior desse fator. Usando uma nova notação para ambas as parcelas da Equação (4.1a), fica-se com:

$$V = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (4.1b)$$

- Para a primeira camada: $V = 0,00420$;
- Para a segunda camada: $V = 0,00430$;
- Para a terceira camada: $V = 0,00100$;
- Para a quarta camada: $V = 0,01105$;
- Para a quinta camada: $V = 0,00040$.

Tendo em vista, agora, o abatimento do concreto, com a mesma escolha de sinais feita anteriormente, o nível superior correspondeu aos ensaios 3 e 4 e o inferior, aos ensaios 1 e 2. Portanto, o *efeito principal do abatimento* (\mathbf{A}) será de acordo com a Equação:

$$\mathbf{A} = 1/2(y_3 + y_4) - 1/2(y_1 + y_2) \quad (4.2a)$$

ou simplesmente:

$$\mathbf{A} = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (4.2b)$$

Para cada camada da fôrma, obteve-se um efeito principal do abatimento do concreto. Utilizando-se a equação (4.2a), tem-se:

- Para a primeira camada: $\mathbf{A} = 0,0021$;
- Para a segunda camada: $\mathbf{A} = 0,0020$;
- Para a terceira camada: $\mathbf{A} = - 0,0021$;
- Para a quarta camada: $\mathbf{A} = - 0,00645$;
- Para a quinta camada: $\mathbf{A} = - 0,0014$.

De acordo com as Tabelas 4.2a a 4.2e, pode-se verificar a ocorrência, ou não, do *efeito de interação* entre as variáveis “velocidade de enchimento do concreto” e “abatimento do concreto”.

No livro “Planejamento e Otimização de Experimentos”(25), os autores afirmam que as variáveis interagem quando o efeito de uma delas depende do nível da outra. A existência da interação torna incorreta a análise isolada do efeito de um único fator. Os efeitos dos dois fatores devem ser interpretados conjuntamente, para que a interação entre eles fique claramente evidenciada. Quando o efeito de uma das variáveis é o mesmo para os dois níveis da outra, não há interação entre elas, isso ocorreu na primeira e segunda camada da fôrma (Tabelas 4.2a, 4.2b, 4.3a e 4.3b). Contudo, de acordo com os autores, faz sentido tomar a diferença entre elas como uma medida da interação entre os fatores **V** e **A**. Sendo que, a *metade* da diferença é que é, por convenção, o efeito de interação entre os fatores.

Representou-se o efeito de interação como $V \times A$, ou simplesmente **VA**. Logo, a partir da Equação 4.3, tem-se:

$$VA = 1/2 \{(y_4 - y_3) - (y_2 - y_1)\} \Rightarrow VA = 1/2 \{(y_1 + y_4) - (y_2 + y_3)\} \quad (4.3)$$

- Para a primeira camada: $VA = 0$;
- Para a segunda camada: $VA = 0$;
- Para a terceira camada $VA = 0,0031$;
- Para a quarta camada $VA = - 0,00415$;
- Para a quinta camada $VA = - 0,0006$.

Examinou-se as Equações 4.1, 4.2a e 4.3, e observou-se que tanto os efeitos principais quanto os efeitos de interação foram calculados utilizando-se todas as pressões registradas nas tabelas de 4.1a a 4.1e. Cada um dos efeitos, é a diferença de duas médias. Metade das pressões pertenceu a uma média enquanto a metade restante aparece na outra média. Não houve portanto informações ociosas no planejamento.

Tabela 4.2a

Variação da pressão, com aumento da velocidade e abatimento fixo (1ª camada).

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0042 |
| 2 | 1,58 | 75 | |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0042 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.2b

Variação da pressão, com aumento da velocidade e abatimento fixo (2ª camada).

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0043 |
| 2 | 1,58 | 75 | |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0043 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.2c

Variação da pressão, com aumento da velocidade e abatimento fixo (3ª camada).

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | - 0,0021 |
| 2 | 1,58 | 75 | |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0041 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.2d

Varição da pressão, com aumento da velocidade e abatimento fixo (4ª camada).

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0152 |
| 2 | 1,58 | 75 | |
| 3 | 0,25 | 100 | 0,0069 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.2e

Varição da pressão, com aumento da velocidade e abatimento fixo (5ª camada).

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0010 |
| 2 | 1,58 | 75 | |
| 3 | 0,25 | 100 | -0,0002 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.3a

Varição da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa (1ª camada)

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,0021 |
| 3 | 0,25 | 100 | |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0021 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.3b

Varição da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa (2ª camada)

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | 0,002 |
| 3 | 0,25 | 100 | |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,002 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.3c

Variação da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa (3ª camada)

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | - 0,0052 |
| 3 | 0,25 | 100 | |
| 2 | 1,58 | 75 | 0,0010 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.3d

Variação da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa (4ª camada)

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | - 0,0023 |
| 3 | 0,25 | 100 | |
| 2 | 1,58 | 75 | - 0,0106 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

Tabela 4.3e

Variação da pressão, com o aumento do abatimento e a velocidade fixa (5ª camada)

| Ensaio | Velocidade de enchimento (m/h) | abatimento do concreto (mm) | variação da pressão medida (daN/cm ²) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 0,25 | 75 | - 0,0008 |
| 3 | 0,25 | 100 | |
| 2 | 1,58 | 75 | - 0,0020 |
| 4 | 1,58 | 100 | |

4.2.1.2 INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DOS EFEITOS

A interpretação geométrica dos efeitos calculados anteriormente pode ser representada pelo planejamento experimental num sistema cartesiano em que cada eixo corresponde a um fator. Para o planejamento fatorial estudado, tem-se apenas

dois fatores, e o espaço definido por eles é um plano, no qual os quatro ensaios ocupam os vértices de um quadrado [Figura 4.5]. Atribuiu-se sinais algébricos aos ensaios de acordo com as Equações 4.1, 4.2a, e 4.3, os efeitos principais podem ser encarados como contrastes, isto é, diferenças médias - entre valores situados em arestas opostas e perpendiculares ao eixo do fator em questão, como mostram as Figuras 4.5(a) e 4.5(b). O efeito de interação [Figura 4.5(c)] correspondeu ao contraste entre as duas diagonais do quadrado, sendo que considerou-se positiva a diagonal que liga o ensaio (--) ao ensaio (++)).

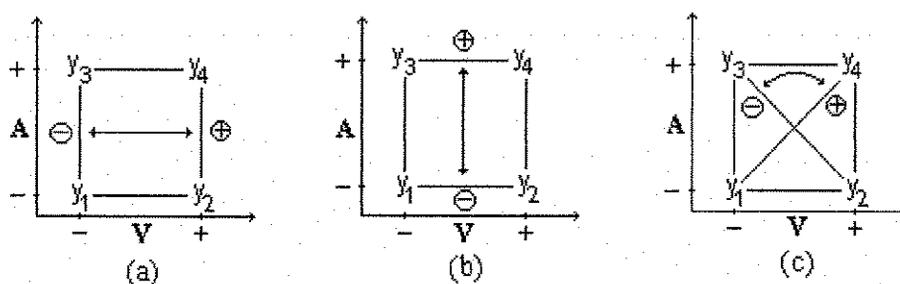


Figura 4.5 - Esquema dos efeitos principais (a) da velocidade, (b) do abatimento e da interação (c).

4.2.1.3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

O resultado da análise dos dados das Tabelas 4.1a a 4.1e, foram reunidos nas Tabelas 4.4a a 4.4e, respectivamente. Incluiu-se nelas a pressão média global entre os quatros ensaios.

Tabela 4.4a

Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 da Tabela 4.1a (1ª camada)

| | Estimativa |
|---------------------|------------|
| média global: | 0,04295 |
| Efeitos principais | |
| V | 0,0042 |
| A | 0,0021 |
| Efeito de interação | |
| VA | 0 |

Tabela 4.4b

Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 da Tabela 4.1b (2ª camada)

| | Estimativa |
|---------------------|------------|
| média global: | 0,04935 |
| Efeitos principais | |
| V | 0,0043 |
| A | 0,0020 |
| Efeito de interação | |
| VA | 0 |

Tabela 4.4c

Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 da Tabela 4.1c (3ª camada)

| | Estimativa |
|---------------------|------------|
| média global: | 0,0309 |
| Efeitos principais | |
| V | 0,0010 |
| A | - 0,0021 |
| Efeito de interação | |
| VA | 0,0031 |

Tabela 4.4d

Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 da Tabela 4.1d (4ª camada)

| | Estimativa |
|---------------------|------------|
| média global: | 0,023175 |
| Efeitos principais | |
| V | 0,01105 |
| A | - 0,00645 |
| Efeito de interação | |
| VA | - 0,00415 |

Tabela 4.4e

Efeitos calculados para o planejamento fatorial 2^2 da Tabela 4.1e (5ª camada)

| | Estimativa |
|---------------------|------------|
| média global: | 0,0071 |
| Efeitos principais | |
| V | 0,0004 |
| A | - 0,0014 |
| Efeito de interação | |
| VA | - 0,0006 |

A existência de um efeito de interação significativo indica que os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente. A melhor forma de interpretar isso é traçar um diagrama contendo as respostas médias em todas as combinações de níveis das variáveis(25). Os diagramas estão representados nas Figuras 4.6. Examinando esses diagramas conclui-se que:

- **Diagrama 1** (Figura 4.6a - 1ª camada)

1. A elevação da velocidade de enchimento de 0,25m/h para 1,58m/h, tanto para o abatimento do concreto de 75mm como para 100mm, aumentou a pressão em 0,0042daN/cm².

2. O aumento do abatimento de 75mm para 100mm, tanto para a velocidade de 0,25m/h como para 1,58m/h, aumentou a pressão em 0,0021daN/cm².
3. A maior pressão do concreto, registrada nos quatro ensaios, sobre a primeira camada da fôrma foi de 0,0461daN/cm², obtida com o maior abatimento (100mm), e a maior velocidade de enchimento do concreto (1,58m/h).

- **Diagrama 2** (Figura 4.6b - 2ª camada)

1. A elevação da velocidade de 0,25m/h para 1,58m/h, tanto para o abatimento de 75mm como para 100mm, aumentou a pressão em 0,0043daN/cm².
2. O aumento do abatimento de 75mm para 100mm, tanto para a velocidade de 0,25m/h como para a de 1,58m/h, aumentou a pressão em 0,0020daN/cm².
3. A maior pressão do concreto registrada nos ensaios sobre a segunda camada da fôrma foi de 0,0525daN/cm², obtida com o maior abatimento (100mm) e a maior velocidade (1,58m/h).

- **Diagrama 3** (Figura 4.6c - 3ª camada)

1. A elevação da velocidade de 0,25m/h para 1,58m/h com o abatimento de 75mm, reduziu a pressão em 0,0021daN/cm², enquanto para o abatimento de 100mm, a pressão aumentou em 0,0041daN/cm².
2. A mudança do abatimento de 75mm para 100mm, com a velocidade de enchimento do concreto de 0,25m/h, reduziu a pressão em 0,0052daN/cm², ao passo que, para a velocidade de 1,58m/h houve um aumento de 0,001daN/cm².

3. A maior pressão do concreto sobre a terceira camada da fôrma foi obtida com o abatimento do concreto de 75mm e velocidade de 0,25m/h sendo ela de 0,0330daN/cm².

- **Diagrama 4** (Figura 4.6d- 4^a camada)

1. A elevação da velocidade de 0,25m/h para 1,58m/h com o abatimento de 75mm, aumentou a pressão em 0,0152daN/cm², enquanto para o abatimento de 100mm, a pressão aumentou em 0,0069daN/cm².
2. A mudança do abatimento de 75mm para 100mm, com a velocidade de enchimento do concreto de 0,25m/h, reduziu a pressão em 0,0023daN/cm², ao passo que, para a velocidade de 1,58m/h houve uma redução de 0,0106daN/cm².
3. A maior pressão do concreto sobre a quarta camada da fôrma foi obtida com o abatimento do concreto de 75mm e velocidade de 1,58m/h sendo ela de 0,0340daN/cm².

- **Diagrama 5** (Figura 4.6e - 5^a camada)

1. A elevação da velocidade de 0,25m/h para 1,58m/h com o abatimento de 75mm, aumentou a pressão em 0,001daN/cm², enquanto para o abatimento de 100mm, a pressão reduziu em 0,0002daN/cm².
2. A mudança do abatimento de 75mm para 100mm, com a velocidade de enchimento do concreto de 0,25m/h, reduziu a pressão em 0,0008daN/cm², ao passo que, para a velocidade de 1,58m/h houve uma redução de 0,002daN/cm².

3. A maior pressão do concreto sobre a quinta camada da fôrma foi obtida com o abatimento do concreto de 75mm e velocidade de 1,58m/h sendo ela de 0,0083daN/cm².

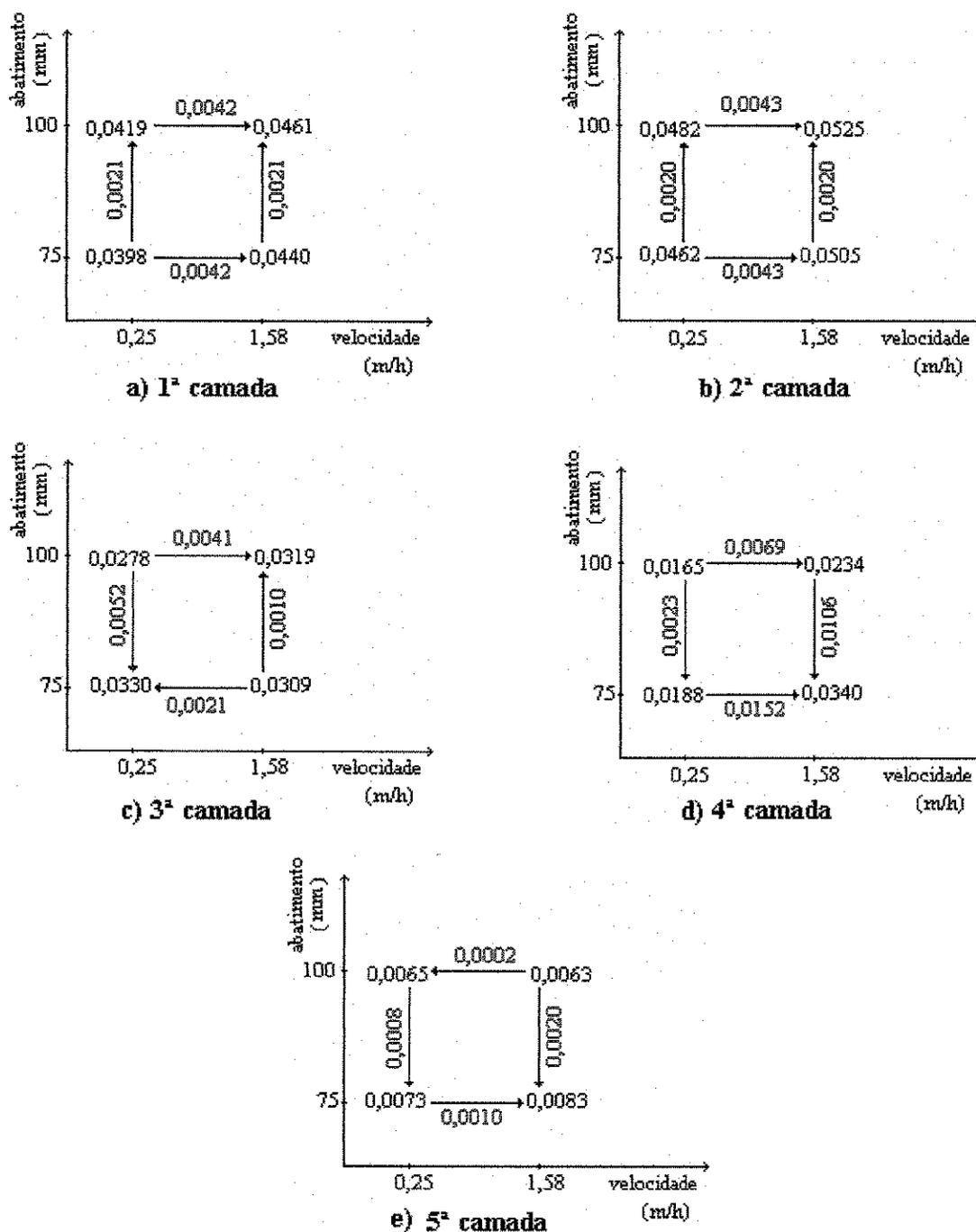


Figura 4.6 - Interpretação geométrica dos resultados da análise dos dados nas cinco camadas estudadas.

4.2.1.4 MODELO ESTATÍSTICO

Para realizar a codificação das variáveis “velocidade de enchimento do concreto” e “abatimento do concreto”, basta subtrair de cada uma delas o valor médio e dividir o resultado pela metade da diferença entre o valor superior e o valor inferior (25). Isso será feito tanto para a variável velocidade como para o abatimento. O valor médio da velocidade foi 0,915m/h e do abatimento, 87,5mm.

- variável velocidade: codificando 0,25m/h para -1.

$$\frac{(0,25 - 0,915)}{\left(\frac{1,58 - 0,25}{2}\right)} = -1 \quad (4.4)$$

- variável velocidade: codificando 1,58m/h para +1.

$$\frac{(1,58 - 0,915)}{\left(\frac{1,58 - 0,25}{2}\right)} = +1 \quad (4.5)$$

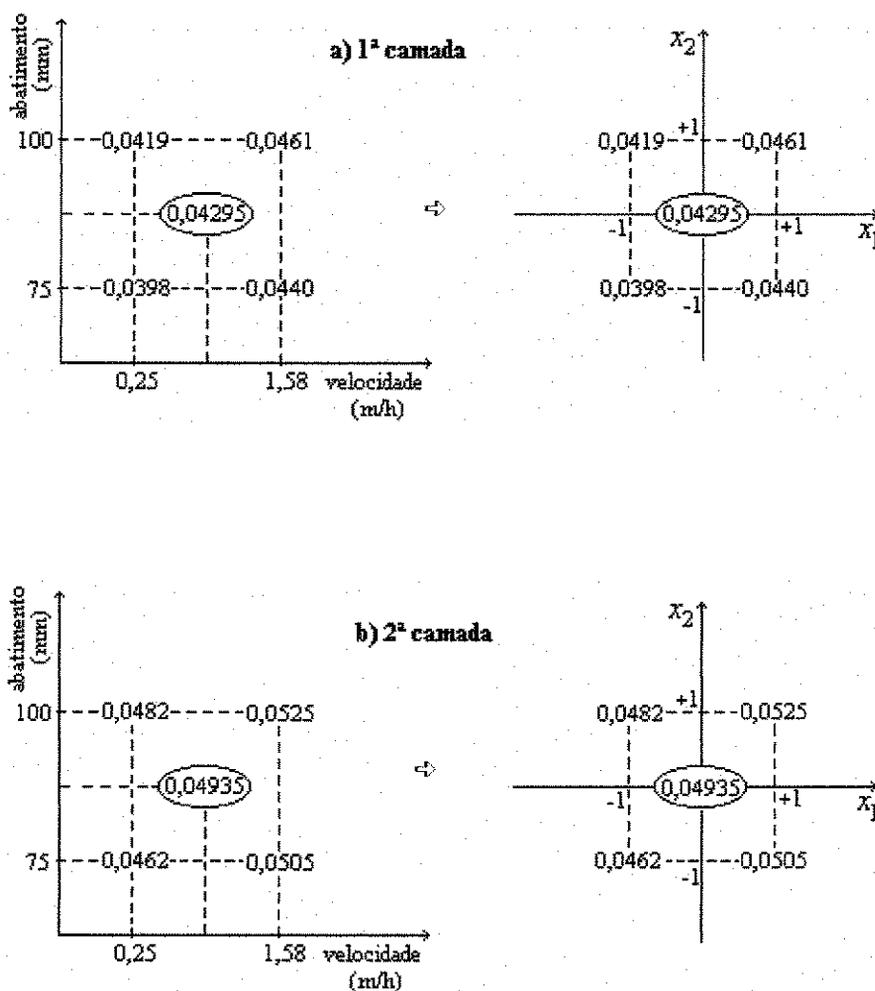
- variável abatimento: codificando 75mm para -1.

$$\frac{(75 - 87,5)}{\left(\frac{100 - 75}{2}\right)} = -1 \quad (4.6)$$

- variável abatimento: codificando 100mm para +1

$$\frac{(100 - 87,5)}{\left(\frac{100 - 75}{2}\right)} = +1 \quad (4.7)$$

Essa codificação das variáveis, significa colocar a origem do eixo das velocidades e dos abatimentos no valor intermediário, 0,915m/h para a velocidade e 87,5mm para o abatimento, e dar a esses valores uma nova escala. A Figura 4.7, ilustra graficamente essa transformação, em que as variáveis velocidade e abatimento passam a ser chamadas depois de codificadas, de x_1 e x_2 , respectivamente. A resposta hipotética correspondente à origem do novo sistema, que esta localizada no centro do planejamento(Figura 4.7), é a média de todas as pressões observadas nas camadas da fôrma para os quatro ensaios.



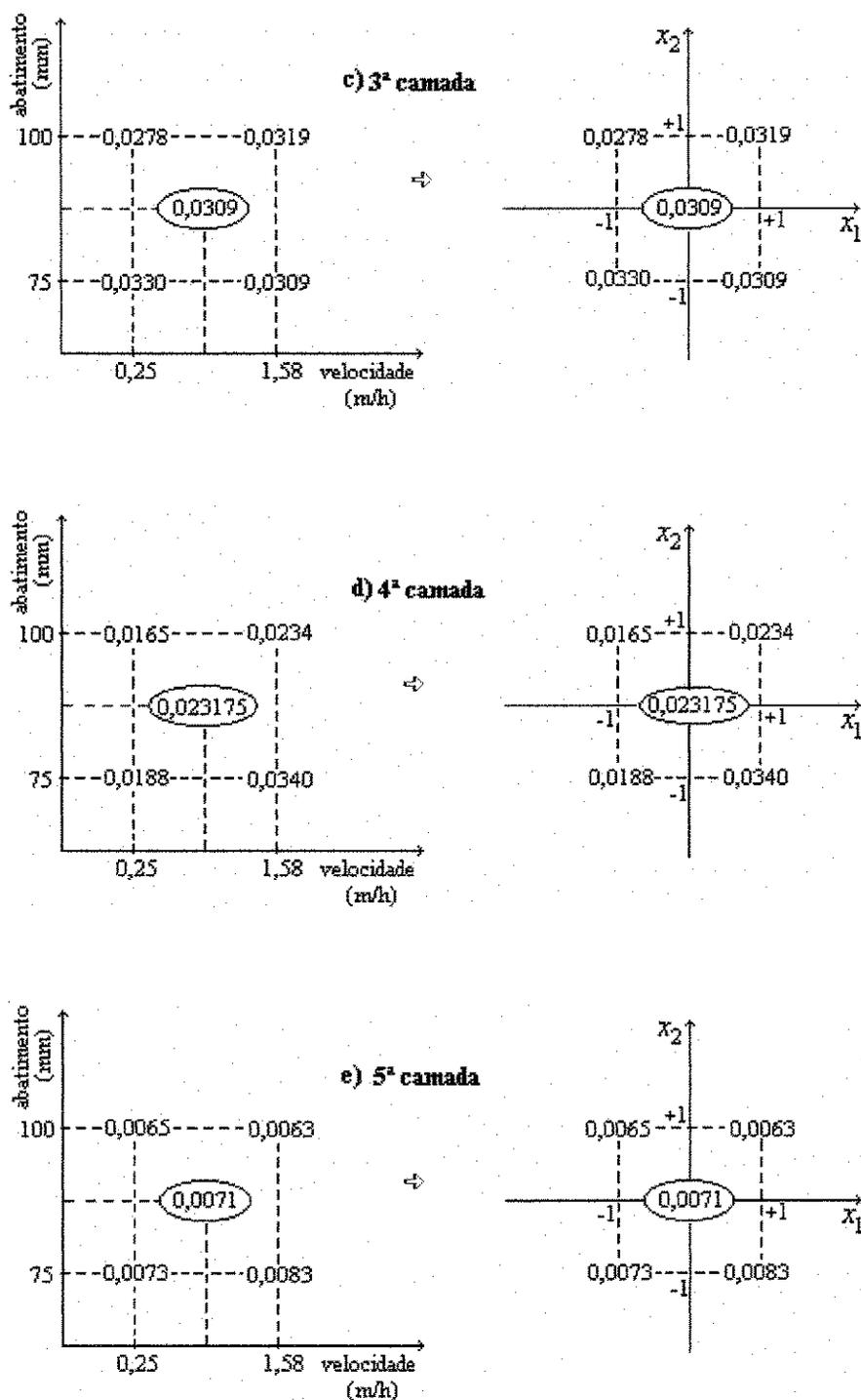


Figura 4.7 - Codificação das variáveis no planejamento 2^2 para as cinco camadas das fôrmas.

Com a codificação, cada efeito passa a corresponder sempre à variação de duas unidades do fator correspondente, já que o nível do fator varia de -1 para +1.

Isso quer dizer que os efeitos *por unidade* de x_1 e x_2 são a metade dos efeitos principais que calculamos por meio das Equações 4.1a, 4.2a e 4.3.

Na Tabela 4.5 temos os efeitos por unidade de x_1 e x_2 , que serão utilizados na especificação do modelo estatístico que servirá de base para a análise dos dados do planejamento.

Tabela 4.5

Efeitos por unidade de x_1 e x_2

| camada | M | V | A | VA |
|--------|----------|----------|------------|------------|
| 1ª | 0,04295 | 0,00210 | 0,00105 | 0 |
| 2ª | 0,04935 | 0,00215 | 0,00100 | 0 |
| 3ª | 0,03090 | 0,00050 | - 0,00105 | 0,00155 |
| 4ª | 0,023175 | 0,005525 | - 0,003225 | - 0,002075 |
| 5ª | 0,00710 | 0,00020 | - 0,00070 | - 0,00030 |

Em um modelo estatístico a resposta observada no nível (x_1 e x_2) é considerada como uma variável aleatória $y(x_1, x_2)$, que se distribui em torno de uma certa média populacional $\eta(x_1, x_2)$, com uma certa variância populacional $\sigma^2(x_1, x_2)$.

Contudo tem-se:

$$y(x_1, x_2) = \eta(x_1, x_2) + \varepsilon^*(x_1, x_2) \quad (4.8)$$

onde $\varepsilon^*(x_1, x_2)$ representa o erro aleatório com que as observações flutuam em torno da média populacional correspondente à combinação de níveis definida pelos valores x_1 e x_2 .

Num planejamento fatorial 2^2 nosso modelo postula que a média populacional $\eta(x_1, x_2)$ é representada adequadamente pela expressão:

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2, \quad (4.9)$$

onde β_0 representa o valor populacional da média global das respostas e β_1 , β_2 , e β_{12} que representam os valores populacionais dos dois efeitos principais e do efeito de interação por unidade de x_1 e x_2 .

Como neste trabalho realizou-se uma observação individual para cada um dos quatro ensaios, substituindo a Equação (4.9) na Equação (4.8), pode-se representar:

$$y(x_1, x_2) = \eta(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2,$$

a menos de um erro aleatório $\varepsilon^*(x_1, x_2)$. Esta descrição é válida para os vértices do planejamento.

Precisaríamos realizar um número infinito de experimentos para determinar os valores exatos dos β 's. Obviamente o que podem ser calculados a partir dos quatro ensaios serão apenas estimativas desses valores. Contudo, a Equação (4.10a) com símbolos latinos torna-se:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = \hat{\eta}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2. \quad (4.10b)$$

O acento circunflexo em y é mais uma convenção tipográfica, para indicar o que não se trata de um valor populacional e sim de uma estimativa. Neste trabalho os valores correspondentes a b_0 , b_1 , b_2 , e b_{12} , são a média global, variável velocidade como efeito principal, variável abatimento como efeito principal e efeito de interação entre as variáveis, respectivamente.

Utilizando-se da Equação (4.10b), obteremos a estimativa dada pelo modelo usado nos quatro ensaios, com um valor populacional da pressão em cada camada.

Para os quatro ensaios, obteve-se as equações relacionadas a seguir:

1. Primeira camada:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 0,04295 + 0,00210x_1 + 0,00105x_2 \quad (4.11a)$$

2. Segunda camada:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 0,04935 + 0,00215x_1 + 0,00100x_2 \quad (4.11b)$$

3. Terceira camada:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 0,03090 + 0,00050x_1 - 0,00105x_2 + 0,00155x_1x_2 \quad (4.11c)$$

4. Quarta camada:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 0,023175 + 0,005525x_1 - 0,003225x_2 - 0,002075x_1x_2 \quad (4.11d)$$

5. Quinta camada:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 0,0071 + 0,0002x_1 - 0,0007x_2 - 0,0003x_1x_2 \quad (4.11e)$$

As Equações (4.11a) até (4.11e) nos dão os valores estimados de pressões, para as cinco camadas, dos modelos utilizados nos quatro ensaios. Estando elas em função das variáveis velocidade de enchimento do concreto (x_1) e abatimento do concreto (x_2). As variáveis x_1 e x_2 foram codificadas para variarem de -1 para +1, conforme Equações (4.4) e (4.5), para velocidades de 0,25m/h e 1,58m/h respectivamente, e Equações (4.6) e (4.7), para os abatimentos de 75mm e 100mm respectivamente.

Essa codificação pode ser melhor entendida na Figura 4.7, que mostra os vértices do planejamento (valores de pressões) obtidos pelas Equações (4.11a) até (4.11e), substituindo-se nelas os níveis correspondentes de x_1 e x_2 .

4.2.2 OBTENÇÃO DE UMA EQUAÇÃO GERAL DE PRESSÃO LATERAL

Obteve-se uma equação geral para o cálculo estimativo da pressão lateral, em função da velocidade de enchimento do concreto, do abatimento do concreto e da altura em relação ao fundo da fôrma, do ponto médio das camadas, aplicando-se o conceito de interpolação de Lagrange.

$$L_k(h_c) = \frac{(h_c - a)(h_c - b)(h_c - c)(h_c - d)}{(e - a)(e - b)(e - c)(e - d)} \quad (4.12)$$

k variando de 1 a 5

onde L_k = coeficiente de Lagrange; h_c = altura da camada de concreto, e a, b, c, d, e, são parâmetros da expressão associados à altura do ponto médio das várias camadas.

Quando a = 15,75cm, b = 26,25cm, c = 36,75cm, d = 47,25cm e, e = 5,25cm, tem-se:

$$L_1(h_c) = \frac{h_c^4 - 126h_c^3 + 5677,875h_c^2 - 107659,125h_c + 717908,379}{291721,5}$$

Quando a = 5,25cm, b = 26,25cm, c = 36,75cm, d = 47,25cm e, e = 15,75cm, tem-se:

$$L_2(h_c) = \frac{-h_c^4 + 115,5h_c^3 - 4520,25h_c^2 + 66274,031h_c - 239302,793}{72930,375}$$

Quando a = 5,25cm, b = 15,75cm, c = 36,75cm, d = 47,25cm e, e = 26,25cm, tem-se:

$$L_3(h_c) = \frac{h_c^4 - 105h_c^3 + 3583,125h_c^2 - 43410,938h_c + 143581,676}{48620,25}$$

Quando $a = 5,25\text{cm}$, $b = 15,75\text{cm}$, $c = 26,25\text{cm}$, $d = 47,25\text{cm}$ e, $e = 36,75\text{cm}$, tem-se:

$$L_4(h_c) = \frac{-h_c^4 + 94,5h_c^3 - 2866,5h_c^2 + 32124,094h_c - 102558,34}{72930,375}$$

Quando $a = 5,25\text{cm}$, $b = 15,75\text{cm}$, $c = 26,25\text{cm}$, $d = 36,75\text{cm}$ e, $e = 47,25\text{cm}$, tem-se:

$$L_5(h_c) = \frac{h_c^4 - 84h_c^3 + 2370,375h_c^2 - 25467,75h_c + 79767,598}{291721,5}$$

A equação geral da pressão lateral será:

$$y(h_c, x_1, x_2) = (f_1(h_c)) + (f_2(h_c))x_1 + (f_3(h_c))x_2 + (f_4(h_c))x_1x_2, \quad (4.13)$$

onde:

$y(h_c, x_1, x_2)$ = valor estimado da pressão lateral em função de x_1 , x_2 e h_c ;

$f_1(h_c)$ = somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com as médias globais dos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma;

$f_2(h_c)$ = somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos principais da velocidade nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma;

$f_3(h_c)$ = somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos principais do abatimento nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma;

$f_4(h_c)$ = somatória do produto dos $L_k(h_c)$ com os efeitos de interação entre a velocidade e o abatimento nos quatro ensaios para as 5 camadas da fôrma;

x_1 = codificação para a velocidade;

x_2 = codificação para o abatimento;

h_c = altura da camada de concreto.

$$f_1(h_c) = L_1(h_c).0,04295 + L_2(h_c).0,04935 + L_3(h_c).0,03090 + L_4(h_c).0,023175 + L_5(h_c).0,0071$$

$$f_1(h_c) = -1,873 \times 10^{-7} h_c^4 + 2,086 \times 10^{-5} h_c^3 - 7,988 \times 10^{-4} h_c^2 + 1,099 \times 10^{-2} h_c + 4,372 \times 10^{-3}$$

$$f_2(h_c) = L_1(h_c).0,0021 + L_2(h_c).0,00215 + L_3(h_c).0,0005 + L_4(h_c).0,005525 + L_5(h_c).0,0002$$

$$f_2(h_c) = -8,707 \times 10^{-8} h_c^4 + 8,52 \times 10^{-6} h_c^3 - 2,711 \times 10^{-4} h_c^2 + 3,149 \times 10^{-3} h_c - 8,125 \times 10^{-3}$$

$$f_3(h_c) = L_1(h_c).0,00105 + L_2(h_c).0,001 - L_3(h_c).0,00105 - L_4(h_c).0,003225 - L_5(h_c).0,0007$$

$$f_3(h_c) = 1,011 \times 10^{-8} h_c^4 - 5,795 \times 10^{-7} h_c^3 + 2,148 \times 10^{-6} h_c^2 + 9,930 \times 10^{-5} h_c + 5,457 \times 10^{-4}$$

$$f_4(h_c) = L_1(h_c).0 + L_2(h_c).0 + L_3(h_c).0,00155 - L_4(h_c).0,002075 - L_5(h_c).0,0003$$

$$f_4(h_c) = 5,93 \times 10^{-8} h_c^4 - 5,950 \times 10^{-6} h_c^3 + 1,934 \times 10^{-4} h_c^2 - 2,272 \times 10^{-3} h_c + 7,413 \times 10^{-3}$$

Substituindo $f_1(h_c)$, $f_2(h_c)$, $f_3(h_c)$, $f_4(h_c)$ na Equação (4.13), obteve-se:

$$\begin{aligned} y(h_c, x_1, x_2) = & -1,873 \times 10^{-7} h_c^4 + 2,086 \times 10^{-5} h_c^3 - 7,988 \times 10^{-4} h_c^2 + 1,099 \times 10^{-2} h_c + \\ & + 4,372 \times 10^{-3} + (-8,707 \times 10^{-8} h_c^4 + 8,52 \times 10^{-6} h_c^3 - 2,711 \times 10^{-4} h_c^2 + \\ & + 3,149 \times 10^{-3} h_c - 8,125 \times 10^{-3}) x_1 + (1,011 \times 10^{-8} h_c^4 - 5,795 \times 10^{-7} h_c^3 + \\ & + 2,148 \times 10^{-6} h_c^2 + 9,93 \times 10^{-5} h_c + 5,457 \times 10^{-4}) x_2 + (5,93 \times 10^{-8} h_c^4 + \\ & - 5,95 \times 10^{-6} h_c^3 + 1,934 \times 10^{-4} h_c^2 - 2,272 \times 10^{-3} h_c + 7,413 \times 10^{-3}) x_1 x_2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Sabendo que x_1 e x_2 são as variáveis codificadas da velocidade e do abatimento respectivamente, utilizando-se das Equações (4.4) e (4.5) para velocidade e (4.6) e (4.7) para o abatimento, fez-se o caminho inverso:

$$x_1 = \frac{R - 0,915}{0,665} \Rightarrow x_1 = 1,50R - 1,376 \quad (4.15)$$

$$x_2 = \frac{S - 87,5}{12,5} \Rightarrow x_2 = 0,08S - 7 \quad (4.16)$$

para o efeito da interação entre as variáveis x_1 e x_2

$$x_1 x_2 = (1,50R - 1,376)(0,08S - 7) \quad (4.17)$$

Substituindo os valores de x_1 e x_2 na Equação 5.14, encontrou-se a equação geral para o cálculo da pressão lateral.

$$\begin{aligned} y(h_c, R, S) = p = & -1,873 \times 10^{-7} h_c^4 + 2,086 \times 10^{-5} h_c^3 - 7,988 \times 10^{-4} h_c^2 + 1,099 \times 10^{-2} h_c + \\ & + 4,372 \times 10^{-3} + (-8,707 \times 10^{-8} h_c^4 + 8,52 \times 10^{-6} h_c^3 - 2,711 \times 10^{-4} h_c^2 + \\ & + 3,149 \times 10^{-3} h_c - 8,125 \times 10^{-3})(1,50R - 1,376) + (1,011 \times 10^{-8} h_c^4 - 5,795 \times 10^{-7} h_c^3 + \\ & + 2,148 \times 10^{-6} h_c^2 + 9,93 \times 10^{-5} h_c + 5,457 \times 10^{-4})(0,08S - 7) + (5,93 \times 10^{-8} h_c^4 + \\ & - 5,95 \times 10^{-6} h_c^3 + 1,934 \times 10^{-4} h_c^2 - 2,272 \times 10^{-3} h_c + 7,413 \times 10^{-3})(1,50R - 1,376)(0,08S - 7) \end{aligned} \quad (4.18)$$

onde:

$y(h_c, R, S) = p$ = pressão lateral calculada, daN/cm²;

h_c = altura da camada de concreto na fôrma, cm;

R = velocidade de enchimento do concreto, m/h;

S = abatimento do concreto, mm.

Mudando a unidade de medida de daN/cm² para N/m² da Equação (4.18), temos:

$$\begin{aligned} y(h_c, R, S) = & -0,01873h_c^4 + 2,0858h_c^3 - 79,876h_c^2 + 1099,4h_c + 437,16 + (-0,008707h_c^4 + 0,85196h_c^3 + \\ & - 27,107h_c^2 + 314,85h_c - 812,5).(1,50R - 1,376) + (0,00101h_c^4 - 0,05795h_c^3 + 0,21482h_c^2 + \\ & + 9,93h_c + 54,569).(0,08S - 7) + (0,00593h_c^4 - 0,59497h_c^3 + 19,335h_c^2 - 227,17h_c + \\ & + 741,33).(1,50R - 1,376).(0,08S - 7) \end{aligned} \quad (4.19)$$

CONCLUSÕES

Pode-se concluir, a partir dos estudos feito por OLSEN(18) e GARDNER(13), que o método de cálculo do ACI-347 (1) é muito limitado, se aplica somente em concretos de cimento Portland, com tempo de início de pega de 20 minutos. Enquanto a equação de Olsen para concreto de cimento Portland leva em consideração as variações de tempo de início de pega, de altura e largura de parede, a de Gardner além de tudo isso é aplicável a concretos de cimento não Portland. Contudo, dos métodos de cálculo apresentados neste trabalho, o que melhor se aplica é o de Gardner que foi recomendado pela CSA S269-M-92 (Canadian Standards Association). Então, a Equação (2.19), desenvolvida por Gardner, é mais confiável do que o método ACI, e pode ser usada com a mesma confiança para concretos de cimento portland, concreto com superplastificante, com cinza volante e concreto de cimento com escória. Gardner concluiu que, para o projeto de fôrma proposto por ele, a envoltória da pressão lateral será tomada como hidrostática a partir da superfície livre até um valor limite, e, a partir daí como constante igual ao valor limite. A pressão lateral limite aumenta com o aumento da densidade do concreto, abatimento do concreto, cinza volante ou conteúdo de escória, aditivos, velocidade de enchimento, vibração, e redução de temperatura.

Já, a partir dos resultados obtidos de ensaios realizados neste trabalho, observou-se que na quinta fase do carregamento (Figuras 4.1e, 4.2e, 4.3e, e 4.4e) a maior pressão medida foi na segunda camada de baixo para cima. Pode-se pensar, porém, que o painel da primeira camada (a de baixo) após receber as quatro camadas restantes aumentou o seu atrito com o fundo da fôrma, dificultando assim a deformação, enquanto no painel da segunda camada ela continuou a crescer.

Conforme a literatura pesquisada, com o aumento do abatimento do concreto a pressão cresce, e com a redução da velocidade de enchimento a pressão diminui. Portanto, nos experimentos realizados em algumas faixas isso não ocorreu, mas pode-se justificar que certamente a madeira compensada utilizada nestas faixas poderia estar com defeitos no seu interior, tornando-as assim menos resistentes.

Pesquisas posteriores são sugeridas:

- a) para o método de ensaio: utilizar madeiras compensadas de resistências semelhantes; colar os extensômetros dos dois lados da fôrma, trabalhando-se assim com a média das pressões;
- b) para as fôrmas: variar as dimensões, e espaçamentos de gravatas;
- c) para o concreto: variar em mais pontos as grandezas adotadas, bem como escolher outras que possam ser consideradas importantes.
- d) pesquisar outros elementos: pilares, lajes, caixas d'água, escadas suspensas, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ACI Committee 347. Recommended practice for concrete formwork. **Amerian Concrete Institute**, Detroit, 37p, 1978.
- (2) ACI Committee 347 (formely ACI Committee 622). Pressures on Formwork. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.55, n.2, p. 173-190, Aug.1958.
- (3) ADAM, M., BENNASR, M., SANTOS DELGADO, H., Poussée du Béton Frais sur les Coffrages. **Annales: Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (Paris)**, n.207-208, serie Béton (78), Mar.-Apr. 1965, p. 403-423.
- (4) ALEXANDRIDIS, A., GARDNER, N.J. Mechanical behaviour of fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v.11, n.3, p.323-339, May 1981.
- (5) ARTHUR, J.R.F., ROSCOE, K.H. An earth pressure all for the measurement of normal and shear stresses. **Civil Engineering and Public Works Review**, v.56, n.659, p.765-770, 1961 apud GARDNER, N.J., QUERESHI, A.R. Internal vibration and the lateral pressure exerted by fresh concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v.6, n.4, p.592-600, Dec.1979.
- (6) CALIL Jr, Carlito. Fôrmas de Madeira para Concreto Armado. **Publicação: Escola de Engenharia de São Carlos - USP**, 1995.

- (7) CIRIA **Construction Industry Research and Information Association**. The Pressure of Concrete on Formwork. CIRIA Research Report n.1, London, 1965, 42 p.
- (8) DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V., Berlin. DIN 18218: Pressure of concrete on vertical formwork (Frischbeton auf lotrechte schalungen). Berlin, 1980, 4p.
- (9) GARDNER, N.J., HO, P.T.J. Lateral pressure of fresh concrete. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.76, n.7, p.809-820, July 1979.
- (10) GARDNER, N.J., QUERESHI, A.R. Internal vibration and the lateral pressure exerted by fresh concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v.6, n.4, p.592-600, Dec.1979.
- (11) GARDNER, N. J. Pressure of Concrete Against Formwork.. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.77, n 4, July-Aug. 1980, p. 279-286.
- (12) GARDNER, N. J. The Effect of Superplasticizer and Fly-ash on Formwork Pressures. **Forming Economical Concrete Buildings**, Portland Cement Association, Skokie, 1982, p. 21.1-21.12.
- (13) GARDNER, N.J. Pressure of concrete on formwork- A Review. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.82-69, p.744-753, sept.-oct. 1985.
- (14) HARRISON, T.A. Pressure on vertical formwork when concrete is placed in wide sections. **Research Report n.2, Cement and Concrete Association**, Wexham Springs, 30p, Mar.1983 apud GARDNER, N.J. Pressure of concrete on formwork- A Review. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.82-69, p.744-753, sept.-oct. 1985.

- (15) HOBBS, D.W. Influence of aggregate volume concentration upon the Workability of concrete and some predictions from the viscosity-elasticity analogy. **Magazine of Concrete Research**, London, v.28, n.97, p.191-202, Dec. 1976 apud GARDNER, N.J., QUERESHI, A.R. Internal vibration and the lateral pressure exerted by fresh concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v.6, n.4, p.592-600, Dec.1979.
- (16) KENNEDY, D.J.L., GRADY, D.R., DOZZI, S.P. Limit State Design of wooden formwork for concrete walls. In: PREPARING FOR CONSTRUCTION IN THE 21ST CENTURY CONSTR. CONGR.91, 1991, Cambridge. **Construction Congress'91**. New York: ASCE, 1991. p.65-70.
- (17) MASCARENHAS, A.C.Q., Considerações sobre Projeto de Fôrmas e Escoramentos. **Publicação**: Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia - UFBA, 1983.
- (18) OLSEN, R.H. Lateral pressure of concrete on formwork. Oklahoma: Oklahoma State University, 1968. 122p. (Ph.D Thesis).
- (19) OLSEN, R.H., SALEK, F., PECK, C.F. Lateral Pressures of Concrete on Formwork. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v. 71, n.7, July 1974, p. 358-361.
- (20) ORE, Elwood L., and STRAUGHAM, J. J. Effect of Cement Hydration on Concrete Form Pressure. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.65, n. 2, Feb. 1968, p. 111-120.
- (21) PFEIL, W. **Cimbramentos**. Rio de Janeiro:Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1987.

- (22) RITCHIE, A.G.B. The triaxial testing of fresh concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.14, n.40, p.37-42, Mar. 1962 apud ALEXANDRIDIS, A., GARDNER, N.J. Mechanical behaviour of fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v.11, n.3, p.323-339, May 1981.
- (23) RODIN, S., Pressure of Concrete on Formwork, Proceedings, Institution of Civil Engineers (London), v.1, part 1 n.6, Nov. 1952, p. 709-746 apud GARDNER, N.J. Pressure of concrete on formwork- A Review. **ACI JOURNAL, Proceedings**, v.82-69, p.744-753, sept.-oct. 1985.
- (24) ROWE, P.W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. **Proceedings of the Royal Society Series A**, v.269, 1962, p.500-527 apud ALEXANDRIDIS, A., GARDNER, N.J. Mechanical behaviour of fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v.11, n.3, p.323-339, May 1981.
- (25) SCARMINIO, I.S., BARROS NETO, B., BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Editora da Unicamp, 1995. 299p.
- (26) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, São Paulo. **NBR 7190**, Projeto de Estruturas de Madeira. São Paulo, 1996.

I ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO PAINEL DE MADEIRA COMPENSADA

I.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Utilizou-se uma viga retirada de uma placa de compensado para fôrma, com dimensões de largura 10,5cm, altura 1,7cm e comprimento de 50cm.

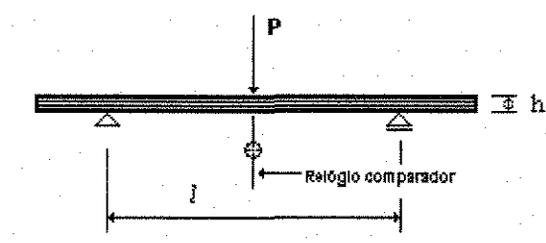


Figura I.1 - Esquema do ensaio à flexão

O apoio foi feito deixando-se um vão de 20cm. Um carregamento progressivo foi aplicado, com estágios de carga para leitura da deformação feitos de 60 em 60 daN. A flecha foi medida através de dois relógios comparadores com medidas dadas em centésimos de milímetros. A Figura I.1 representa o esquema adotado para ensaio. Devido à viga ter uma largura de 10,5cm, optou-se por colocar dois relógios para efetuar a medida da flecha, um de cada lado. Assim poder-se-ia obter a flecha do ponto médio.

O experimento foi realizado através de 6 ensaios, utilizando o mesmo escalonamento de cargas.

I.2 DADOS OBTIDOS

Após o ensaio analisou-se os dados obtidos, os quais estão sintetizados na Tabela I.1, onde aparecem as flechas médias obtidas das leituras dos dois relógios comparadores.

Tabela I.1: Dados resultantes do ensaio à flexão

| flecha (mm) | P(daN) |
|-------------|--------|
| 0 | 0 |
| 0,625 | 100 |
| 1,065 | 160 |
| 1,475 | 220 |
| 1,875 | 280 |
| 2,285 | 340 |
| 2,795 | 400 |

A partir dos dados da Tabela I.1, foi possível obter-se o gráfico mostrado na Figura

I.2

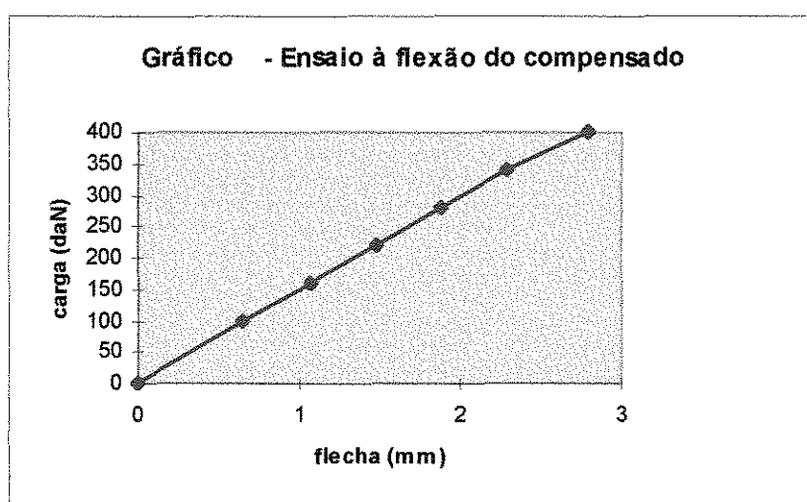


Figura I.2 - Relação entre carregamento e flecha obtida no ensaio.

Neste trabalho, optou-se por se fazer uma aproximação do compensado considerando-o como se fosse madeira maciça. A bibliografia tem demonstrado que essa aproximação é aceitável.

Com os dados da Tabela I.1, através de regressão linear, obteve-se o coeficiente angular e conseqüentemente o módulo de elasticidade do compensado, $E_{\text{comp.}}$, utilizando a equação da flecha para este caso:

$$f = \frac{Pl}{48EI} + \text{parcela da cortante} \quad (\text{I.1})$$

desprezou-se a parcela da cortante. Então:

$$E = \frac{l^3}{48I} \left(\frac{P}{f} \right) \quad (\text{I.2})$$

Da regressão linear, tem-se:

$$b = \frac{P}{f} = 144,25 \text{ daN} / \text{mm} \quad (\text{I.3})$$

Logo, substituindo-se os dados na equação [I.2], obtém-se:

$$E = 5,6 \times 10^4 \text{ daN/m}^2 \text{ ou } 5,6 \times 10^6 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{I.4})$$

ANEXO II**PRIMEIRO ENSAIO**

O abatimento do concreto no primeiro ensaio foi de 75mm e a velocidade de enchimento igual a 0,25m/h.

Tabela II.1a

Dados coletados no 1º ensaio

| h_{ext} (cm) | lanç. (cm) | tempo (min.) | ϵ_1 ‰ | ϵ_2 ‰ | ϵ_3 ‰ | ϵ_4 ‰ | ϵ_5 ‰ | D ₁ (mm) | D ₂ (mm) | D ₃ (mm) | D ₄ (mm) |
|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,25 | 10,5 | 25 | 0,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 |
| 15,75 | 21,0 | 50 | 1,09 | 0,38 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0 | 0,07 | 0,03 |
| 26,25 | 31,5 | 75 | 1,77 | 0,98 | 0,30 | 0 | 0 | 0,32 | 0,10 | 0,28 | 0,14 |
| 36,75 | 42,0 | 100 | 2,06 | 1,95 | 0,96 | 0,31 | 0 | 0,75 | 0,41 | 0,63 | 0,37 |
| 47,25 | 52,5 | 125 | 2,07 | 2,41 | 1,72 | 0,96 | 0,38 | 1,07 | 0,74 | 0,08 | 0,52 |

Tabela II.1b

Deformação e tensão do compensado à flexão no 1º ensaio.

| tempo (min) | ϵ_1 ‰ | σ_1 daN/cm ² | ϵ_2 ‰ | σ_2 daN/cm ² | ϵ_3 ‰ | σ_3 daN/cm ² | ϵ_4 ‰ | σ_4 daN/cm ² | ϵ_5 ‰ | σ_5 daN/cm ² |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0,34 | 19,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 1,09 | 61,04 | 0,38 | 21,28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 1,77 | 99,12 | 0,98 | 54,88 | 0,30 | 16,80 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 2,06 | 115,36 | 1,95 | 109,20 | 0,96 | 53,76 | 0,31 | 17,36 | 0 | 0 |
| 125 | 2,07 | 115,92 | 2,41 | 134,96 | 1,72 | 96,32 | 0,96 | 54,88 | 0,38 | 21,28 |

Tabela II.1c

Pressões finais nas 5 fases do carregamento de concreto, 1º ensaio

| σ_1 daN/cm | P ₁ daN/cm ² | σ_2 daN/cm ² | P ₂ daN/cm ² | σ_3 daN/cm ² | P ₃ daN/cm ² | σ_4 daN/cm ² | P ₄ daN/cm ² | σ_5 daN/cm ² | P ₅ daN/cm ² |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19,04 | 0,0065 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 61,04 | 0,0209 | 21,28 | 0,0073 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 99,12 | 0,0340 | 54,88 | 0,0188 | 16,80 | 0,0058 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 115,36 | 0,0396 | 109,20 | 0,0375 | 53,76 | 0,0184 | 17,36 | 0,0059 | 0 | 0 |
| 115,92 | 0,0398 | 134,96 | 0,0463 | 96,32 | 0,0330 | 54,88 | 0,0188 | 21,28 | 0,0073 |

SEGUNDO ENSAIO

O abatimento do concreto no segundo ensaio foi de 75mm e a velocidade de enchimento igual a 1,58m/h.

TABELA II.2a

Dados coletados no 2º ensaio

| h_{ext} (cm) | lanç. (cm) | tempo (min.) | ε_1 ‰ | ε_2 ‰ | ε_3 ‰ | ε_4 ‰ | ε_5 ‰ | D ₁ (mm) | D ₂ (mm) | D ₅ (mm) | D ₄ (mm) |
|-------------------|---------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,25 | 10,5 | 4 | 0,53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 0,12 | 0,09 | 0,09 |
| 15,75 | 21,0 | 8 | 1,28 | 0,39 | 0 | 0 | 0 | 0,11 | 0,31 | 0,19 | 0,38 |
| 26,25 | 31,5 | 12 | 1,96 | 1,17 | 0,34 | 0 | 0 | 0,09 | 0,66 | 0,34 | 0,83 |
| 36,75 | 42,0 | 16 | 2,20 | 2,09 | 1,05 | 0,65 | 0 | 0,85 | 0,94 | 0,40 | 1,21 |
| 47,25 | 52,5 | 20 | 2,29 | 2,63 | 1,61 | 1,77 | 0,43 | 0,75 | 1,11 | 0,59 | 1,48 |

Tabela II.2b

Deformação e tensão do compensado à flexão no 2º ensaio.

| tempo (min) | ε_1 ‰ | σ_1 daN/cm ² | ε_2 ‰ | σ_2 daN/cm ² | ε_3 ‰ | σ_3 daN/cm ² | ε_4 ‰ | σ_4 daN/cm ² | ε_5 ‰ | σ_5 daN/cm ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0,53 | 29,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1,28 | 71,68 | 0,39 | 21,84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1,96 | 109,76 | 1,17 | 65,52 | 0,34 | 19,04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 2,20 | 123,20 | 2,09 | 117,04 | 1,05 | 58,80 | 0,65 | 36,40 | 0 | 0 |
| 20 | 2,29 | 128,24 | 2,63 | 147,28 | 1,61 | 90,16 | 1,17 | 99,12 | 0,43 | 24,08 |

Tabela II.2c

Pressões finais nas cinco fases de carregamento de concreto, 2º ensaio

| σ_1 daN/cm | P ₁ daN/cm ² | σ_2 daN/cm ² | P ₂ daN/cm ² | σ_3 daN/cm ² | P ₃ daN/cm ² | σ_4 daN/cm ² | P ₄ daN/cm ² | σ_5 daN/cm ² | P ₅ daN/cm ² |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29,68 | 0,0102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 71,68 | 0,0246 | 21,84 | 0,0075 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 109,76 | 0,0376 | 65,52 | 0,0225 | 19,04 | 0,0065 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 123,20 | 0,0423 | 117,04 | 0,0401 | 58,80 | 0,0202 | 36,40 | 0,0125 | 0 | 0 |
| 128,24 | 0,0440 | 147,28 | 0,0505 | 90,16 | 0,0309 | 99,12 | 0,0340 | 24,08 | 0,0083 |

TERCEIRO ENSAIO

O abatimento do concreto no terceiro ensaio foi de 100mm e a velocidade de enchimento igual a 0,25m/h.

Tabela II.3a

Dados coletados no 3º ensaio

| h_{ext} (cm) | lanç. (cm) | tempo (min.) | ϵ_1 ‰ | ϵ_2 ‰ | ϵ_3 ‰ | ϵ_4 ‰ | ϵ_5 ‰ | D_1 (mm) | D_2 (mm) | D_3 (mm) | D_4 (mm) |
|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,25 | 10,5 | 25 | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,10 | -0,09 | 0,11 | 0,27 |
| 15,75 | 21,0 | 50 | 1,15 | 0,30 | 0 | 0 | 0 | -0,11 | -0,28 | 0,33 | 0,42 |
| 26,25 | 31,5 | 75 | 1,83 | 1,04 | 0,34 | 0 | 0 | 0,02 | 0,34 | 0,63 | 0,53 |
| 36,75 | 42,0 | 100 | 2,15 | 2,00 | 1,20 | 0,35 | 0 | 0,46 | -0,48 | 0,90 | 0,63 |
| 47,25 | 52,5 | 125 | 2,18 | 2,51 | 1,45 | 0,86 | 0,34 | 0,76 | 0,05 | 1,17 | 0,92 |

Tabela II.3b

Deformação e tensão do compensado à flexão no 3º ensaio.

| tempo (min) | ϵ_1 ‰ | σ_1 daN/cm ² | ϵ_2 ‰ | σ_2 daN/cm ² | ϵ_3 ‰ | σ_3 daN/cm ² | ϵ_4 ‰ | σ_4 daN/cm ² | ϵ_5 ‰ | σ_5 daN/cm ² |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0,15 | 8,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 1,15 | 64,40 | 0,30 | 16,80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 1,83 | 102,48 | 1,04 | 58,24 | 0,34 | 19,04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 2,15 | 120,40 | 2,00 | 112,06 | 1,20 | 67,20 | 0,35 | 19,06 | 0 | 0 |
| 125 | 2,18 | 122,08 | 2,51 | 140,56 | 1,45 | 81,20 | 0,86 | 48,16 | 0,34 | 19,04 |

Tabela II.3c

Pressões finais nas 5 fases do carregamento de concreto, 3º ensaio

| σ_1 daN/cm | p_1 daN/cm ² | σ_2 daN/cm ² | p_2 daN/cm ² | σ_3 daN/cm ² | p_3 daN/cm ² | σ_4 daN/cm ² | p_4 daN/cm ² | σ_5 daN/cm ² | p_5 daN/cm ² |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8,40 | 0,0029 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 64,40 | 0,0221 | 16,80 | 0,0058 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 102,48 | 0,0351 | 58,24 | 0,0200 | 19,04 | 0,0065 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 120,40 | 0,0413 | 112,06 | 0,0384 | 67,20 | 0,0230 | 19,06 | 0,0065 | 0 | 0 |
| 122,08 | 0,0419 | 140,56 | 0,0482 | 81,20 | 0,0278 | 48,16 | 0,0165 | 19,04 | 0,0065 |

QUARTO ENSAIO

O abatimento do concreto no quarto ensaio foi de 100mm e a velocidade de enchimento igual a 1,58m/h.

Tabela II.4a

Dados coletados no 4º ensaio

| h_{ext} (cm) | lanç. (cm) | tempo (min.) | ϵ_1 ‰ | ϵ_2 ‰ | ϵ_3 ‰ | ϵ_4 ‰ | ϵ_5 ‰ | D_1 (mm) | D_2 (mm) | D_3 (mm) | D_4 (mm) |
|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5,25 | 10,5 | 4 | 0,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,20 | 0,10 | 0,07 | 0,03 |
| 15,75 | 21,0 | 8 | 1,34 | 0,31 | 0 | 0 | 0 | 0,14 | 0,14 | 0,09 | 0,05 |
| 26,25 | 31,5 | 12 | 2,02 | 1,23 | 0,32 | 0 | 0 | 0,15 | 0,34 | 0,02 | 0,25 |
| 36,75 | 42,0 | 16 | 2,29 | 2,14 | 1,23 | 0,35 | 0 | 0,44 | 0,74 | 0,20 | 0,58 |
| 47,25 | 52,5 | 20 | 2,40 | 2,73 | 1,66 | 1,22 | 0,33 | 0,72 | 1,13 | 0,63 | 0,92 |

Tabela II.4b

Deformação e tensão do compensado à flexão no 4º ensaio.

| tempo (min) | ϵ_1 ‰ | σ_1 daN/cm ² | ϵ_2 ‰ | σ_2 daN/cm ² | ϵ_3 ‰ | σ_3 daN/cm ² | ϵ_4 ‰ | σ_4 daN/cm ² | ϵ_5 ‰ | σ_5 daN/cm ² |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0,34 | 19,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1,34 | 75,04 | 0,31 | 17,36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 2,02 | 113,12 | 1,23 | 68,88 | 0,32 | 17,92 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 2,29 | 128,24 | 2,14 | 119,84 | 1,23 | 68,88 | 0,35 | 19,60 | 0 | 0 |
| 20 | 2,40 | 134,40 | 2,73 | 152,88 | 1,66 | 92,96 | 1,22 | 68,32 | 0,33 | 18,48 |

Tabela II.4c

Pressões finais nas 5 fases do carregamento de concreto, 4º ensaio

| σ_1 daN/cm | P_1 daN/cm ² | σ_2 daN/cm ² | P_2 daN/cm ² | σ_3 daN/cm ² | P_3 daN/cm ² | σ_4 daN/cm ² | P_4 daN/cm ² | σ_5 daN/cm ² | P_5 daN/cm ² |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19,04 | 0,0065 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75,04 | 0,0257 | 17,36 | 0,0060 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 113,12 | 0,0388 | 68,88 | 0,0236 | 17,92 | 0,0061 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 128,24 | 0,0440 | 119,84 | 0,0411 | 68,88 | 0,0236 | 19,60 | 0,0067 | 0 | 0 |
| 134,40 | 0,0461 | 152,88 | 0,0524 | 92,96 | 0,0319 | 68,32 | 0,0234 | 18,48 | 0,0063 |

Nas tabelas anteriores, a notação utilizada tem o seguinte significado:

D = deflexão do apoio lateral das faces laterais da forma, mm;

$\varepsilon_{1,2,3,4 \text{ e } 5}$ = deformações do compensado, ‰;

h_{ext} = altura média de cada camada do painel da fôrma, cm;

lanç. = altura de cada camada de concreto lançada na fôrma, cm.

Tabela III.1 - Dados de ensaio do método de Gardner, pressões medidas pelo pesquisador e pressões calculadas com sua Equação (2.19)

| Temperatura do concreto (°C) | Slump (mm) | dimensão mínima da fôrma (mm) | Velocidade de enchimento (m/h) | Potência do vibrador (HP) | Duração de vibração (min.) | Profundidade de imersão do vibrador (m) | Pressão lateral máxima medida (kPa) | Pressão lateral máxima calculada (kPa) |
|------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 18 | 75 | 533 | 6,1 | 2,5 | 0,5 | 1,00 | 76,6 | 78,8 |
| 21 | 80 | 533 | 12,2 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 83,8 | 87,7 |
| 14 | 70 | 279 | 6,1 | 1 | 0,5 | 1,00 | 38,4 | 72,1 |
| 20 | 70 | 533 | 6,1 | 1 | 0,5 | 1,00 | 38,8 | 68,5 |
| 19,5 | 75 | 533 | 6,1 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 77,8 | 77,7 |
| 16,5 | 75 | 533 | 6,1 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 78,3 | 80,0 |
| 16 | 70 | 533 | 3,05 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 58,7 | 71,5 |
| 8 | 50 | 533 | 6,1 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 62,3 | 86,9 |
| 29 | 55 | 533 | 5,5 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 47,2 | 69,4 |
| 24 | 75 | 533 | 1,52 | 2,5 | 2,5 | 1,00 | 45,5 | 63,1 |
| 22 | 80 | 292 | 3,05 | 1 | 2,5 | 1,00 | 58,7 | 60,0 |
| 27 | 80 | 292 | 12,2 | 1 | 2,5 | 1,00 | 60,4 | 73,1 |
| 28 | 80 | 292 | 1,52 | 1 | 2,5 | 1,00 | 34,2 | 52,8 |
| 27 | 225 | 292 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 65,7 | 78,5 |
| 28 | 235 | 292 | 12,2 | 1 | 0 | 1,00 | 63,9 | 87,9 |
| 21 | 225 | 292 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 83,8 | 81,9 |
| 27,5 | 190 | 292 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 75,4 | 74,8 |
| 25 | 220 | 279 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 88,1 | 79,2 |
| 22 | 80 | 279 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 59,9 | 66,9 |
| 19,5 | 100 | 279 | 36,6 | 1 | 2,5 | 1,00 | 92,1 | 108,8 |
| 8 | 115 | 279 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 86,2 | 83,7 |
| 10 | 70 | 279 | 9,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 77,1 | 84,3 |
| 10 | 90 | 279 | 9,75 | 1 | 2,5 | 1,00 | 82,6 | 87,8 |
| 8 | 90 | 279 | 3,05 | 1 | 2,5 | 1,00 | 74,1 | 70,1 |
| 7,3 | 75 | 279 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 77,8 | 80,8 |
| 7,3 | 85 | 279 | 1,52 | 1 | 2,5 | 1,00 | 61,2 | 62,2 |
| 4,5 | 75 | 279 | 6,1 | 1 | 2,5 | 1,00 | 77,8 | 85,6 |
| 24,4 | 65 | 279 | 6,1 | 1 | 0,5 | 0,61 | 29,4 | 54,7 |

Tabela III.2 - Comparação entre as pressões medidas e calculadas por Gardner a partir da sua equação proposta(2.19) e, pelas equações do ACI(2.3 a 2.6), da CIRIA(2.13 e 2.14). Utilizou-se os mesmos dados da Tabela III.1.

| T (°C) do concreto | Slump (mm) | d (mm) | R (m/h) | Pressão medida por Gardner(kPa) | Equação (2.13) CIRIA (kPa) | Equação (2.14) CIRIA (kPa) | Equação ACI (kPa) | Equação Gardner (kPa) |
|-----------------------|---------------|-----------|------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 18 | 75 | 533 | 6,1 | 76,6 | 83,6 | 91,4 | 141,1 | 78,8 |
| 21 | 80 | 533 | 12,2 | 83,8 | 102,8 | 81,7 | 143,7 | 87,7 |
| 14 | 70 | 279 | 6,1 | 38,4 | 59,8 | 92,4 | 143,7 | 72,1 |
| 20 | 70 | 533 | 6,1 | 38,8 | 83,6 | 89,0 | 134,0 | 68,5 |
| 19,5 | 75 | 533 | 6,1 | 77,8 | 83,6 | 90,7 | 135,9 | 77,7 |
| 16,5 | 75 | 533 | 6,1 | 78,3 | 83,6 | 92,4 | 143,7 | 80,0 |
| 16 | 70 | 533 | 3,05 | 58,7 | 74,0 | 77,5 | 78,1 | 71,5 |
| 8 | 50 | 533 | 6,1 | 62,3 | 83,6 | 93,0 | 143,7 | 86,9 |
| 29 | 55 | 533 | 5,5 | 47,2 | 81,7 | 56,2 | 99,5 | 69,4 |
| 24 | 75 | 533 | 1,52 | 45,5 | 69,2 | 56,6 | 35,8 | 63,1 |
| 22 | 80 | 292 | 3,05 | 58,7 | 51,4 | 63,3 | 67,4 | 60,0 |
| 27 | 80 | 292 | 12,2 | 60,4 | 80,1 | 81,3 | 143,7 | 73,1 |
| 28 | 80 | 292 | 1,52 | 34,2 | 47,9 | 47,9 | 33,3 | 52,8 |
| 27 | 225 | 292 | 6,1 | 65,7 | 61,0 | | 114,2 | 78,5 |
| 28 | 235 | 292 | 12,2 | 63,9 | 80,1 | | 143,7 | 53,7 |
| 21 | 225 | 292 | 6,1 | 83,8 | 61,0 | | 130,7 | 81,9 |
| 27,5 | 190 | 292 | 6,1 | 75,4 | 61,0 | | 113,0 | 74,8 |
| 25 | 220 | 279 | 6,1 | 88,1 | 59,8 | | 119,2 | 79,2 |
| 22 | 80 | 279 | 6,1 | 59,9 | 59,8 | 97,4 | 127,6 | 66,9 |
| 19,5 | 100 | 279 | 36,6 | 92,1 | | | 143,7 | 108,8 |
| 8 | 115 | 279 | 6,1 | 86,2 | 59,8 | 93,3 | 143,7 | 83,7 |
| 10 | 70 | 279 | 9,1 | 77,1 | 69,2 | 87,7 | 143,7 | 84,3 |
| 10 | 90 | 279 | 9,75 | 82,6 | 71,2 | 86,5 | 143,7 | 87,8 |
| 8 | 90 | 279 | 3,05 | 74,1 | 50,2 | 97,7 | 100,1 | 70,1 |
| 7,3 | 75 | 279 | 6,1 | 77,8 | 59,8 | 93,3 | 143,7 | 80,8 |
| 7,3 | 85 | 279 | 1,52 | 61,2 | 47,9 | 76,1 | 55,1 | 62,2 |
| 4,5 | 75 | 279 | 6,1 | 77,8 | 59,8 | 93,1 | 143,7 | 85,6 |
| 24,4 | 65 | 279 | 6,1 | 29,4 | 59,8 | 78,8 | 120,8 | 54,7 |

Tabela III.3 - Análise estatística feita por Gardner para a comparação de resultados experimentais com métodos teóricos de projeto.

| Dado experimental | Método teórico | Nº de obs. | média | σ | N.C. 95% | CC | CCE | EAI |
|----------------------------------|----------------|------------|-------|----------|----------|------|------|------|
| CIRIA 65 | ACI | 61 | 0,77 | 0,36 | 5,82 | 0,53 | 0,49 | 0,61 |
| | Gardner | 61 | 0,77 | 0,36 | 5,82 | 0,53 | 0,49 | 0,35 |
| cimento portland | ACI | 64 | 0,64 | 0,25 | 4,29 | 0,24 | 0,46 | 0,66 |
| | Gardner | 66 | 0,78 | 0,18 | 2,09 | 0,63 | 0,88 | 0,29 |
| cimento com cinza volante | ACI | — | — | — | — | — | — | — |
| | Gardner | 11 | 0,93 | 0,11 | 1,37 | 0,67 | 0,98 | 0,12 |
| cimento com escória | ACI | — | — | — | — | — | — | — |
| | Gardner | 11 | 0,69 | 0,17 | 2,60 | 0,53 | 0,75 | 0,45 |
| concreto com. superplastificante | ACI | — | — | — | — | — | — | — |
| | Gardner | 9 | 0,87 | 0,19 | 1,93 | 0,65 | 0,95 | 0,19 |

Através de uma análise estatística, onde os parâmetros relativos considerados foram a média e o desvio padrão (σ) da relação de pressões medida/calculada, 95% de limite de confiança de pressões calculada/medida, coeficiente de correlação (CC), coeficiente de correlação especial (CCE), e erro absoluto integral (EAI) da pressão medida para a calculada, Gardner (13) concluiu que a sua equação é mais confiável do que a do método ACI e pode ser usada com igual confiança para concretos de cimento Portland, com superplastificante, com cinza volante, e de escória. Na Tabela III.3 temos o resultado dessa análise estatística. O coeficiente de correlação especial e o erro absoluto integral são somente indicadores do bom ajustamento e foram usados somente para comparar a apropriação das duas fórmulas, de Gardner e ACI.