

ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E SUA INFLUENCIA  
EM RECALQUES DE EDIFICAÇÕES

Alexandre Duarte Gusmão

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Francisco Rezende Lopes

Francisco de Rezende Lopes, Ph.D.  
(Presidente)

Dirceu de Alencar Velloso

Prof. Dirceu de Alencar Velloso, Livre Docente

Fernando Emmanuel Barata

Prof. Fernando Emmanuel Barata, Prof. Titular

Nelson Aoki

Prof. Nelson Aoki, Eng. Civil

Paulo Eduardo Lima de Santa Maria

Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 1990

**GUSMÃO, ALEXANDRE DUARTE**

**Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua  
Influência em Recalques de Edificações  
[Rio de Janeiro]**

**1990**

**xxiii, 165 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 1990)**

**Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE**

**I. Interação Solo-Estrutura I. COPPE/UFRJ  
II. Título (Série)**

A todos meus amigos, em especial,  
Teresa e Jaime, meus pais.

"Se não houve frutos, valeu pela sombra das folhas;  
Se não houve folhas, valeu pela beleza das flores;  
Se não houve flores, valeu pela intenção da semente..."

(Henfil)

## AGRADECIMENTOS

A meus pais e irmãos, pelo apoio e motivação demonstrados durante todo o curso;

Ao Prof. Francisco de Rezende Lopes, pela sua orientação racional e objetiva, indispensável à realização deste trabalho. Agradeço também a sua confiança, amizade e otimismo durante todo este tempo;

Ao Prof. Jaime de Azevedo Gusmão Filho, pelas suas valiosas sugestões e cessão de inúmeros trabalhos sobre o tema estudado;

Ao Prof. Fernando Emmanuel Barata, pelo seu entusiasmo, sugestões e amizade. Fica aqui registrada a minha profunda admiração pelo mesmo;

Ao Prof. Nelson Aoki, pela sua grande colaboração no desenvolvimento deste trabalho, através da cessão de programas computacionais e inúmeras sugestões;

Aos professores Dirceu de Alencar Velloso e Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, pelas críticas construtivas e sugestões a este trabalho;

Ao Eng. Urbano Alonso, pela cessão de material sobre obras instrumentadas;

Ao Eng. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, pelo companheirismo, amizade e motivação durante todo o curso;

Aos professores Bernadete e Fernando Danziger, pelo incentivo e solidariedade durante este período;

Aos colegas de turma do curso de mestrado, pela amizade, apoio e troca de experiências;

Aos professores e funcionários da Área de Geotecnia da COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos e amizade, em especial ao Prof. Márcio S.S. Almeida, pela sua solidariedade quando da minha estada no Rio de Janeiro;

Aos professores e funcionários da Área de Solos e Fundações da Universidade Federal de Pernambuco, pela minha formação a nível de graduação e pelo apoio recebido. Em especial, agradeço ao Prof. José Fernando Thomé Jucá, responsável pela minha iniciação na Geotecnia;

A direção da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, pelo apoio recebido durante o curso;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro concedido durante todo o curso;

Ao desenhista Everaldo Paulo da Silva, pela elaboração final dos desenhos deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

**ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E SUA INFLUÊNCIA  
EM RECALQUES DE EDIFICAÇÕES**

**Alexandre Duarte Gusmão**

**Outubro de 1990**

**Orientador: Prof. Francisco de Rezende Lopes**

**Programa: Engenharia Civil**

O objetivo principal deste trabalho foi fazer uma análise qualitativa e quantitativa de fatores que influenciam o mecanismo de interação solo-estrutura em edificações, e a sua repercussão no desempenho das mesmas.

Através da utilização de um modelo proposto por POULOS (1975a), que considera a edificação (superestrutura + infra-estrutura + terreno de fundação) como um sistema único, foi feito um estudo paramétrico dos principais fatores influentes na interação solo-estrutura, tais como: rigidez relativa estrutura-solo; número de pavimentos da edificação; efeito dos primeiros pavimentos; presença de cintas; efeito tridimensional de pórtico; forma em planta da edificação; entre outros. Estes resultados são apresentados na forma de gráficos adimensionais, possibilitando uma melhor visualização da influência destes vários fatores.

A tese apresenta, ainda, uma coleta de dados de diversas obras monitoradas para acompanhamento de recalques. Através da proposição de uma metodologia para análise de recalques de edificações, são discutidos alguns efeitos da interação solo-estrutura, tais como: redistribuição de carga nos pilares e tendência à uniformização dos recalques. São também apresentados os resultados de uma análise de um caso real de obra utilizando-se o modelo proposto por POULOS (1975a), com a comparação entre os recalques estimados considerando-se ou não a interação solo-estrutura e os medidos.

As análises teóricas e de casos reais de obras comprovam a importância da consideração da interação solo-estrutura em projetos de edificações, podendo levar a projetos mais econômicos e seguros.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

A STUDY OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION AND ITS  
EFFECT ON THE SETTLEMENTS OF BUILDINGS

Alexandre Duarte Gusmão

October, 1990

Thesis Supervisor: Prof. Francisco de Rezende Lopes

Department: Civil Engineering

The aim of this work is to analyse the factors that control the mechanism of soil-structure interaction in buildings and their influence on the behaviour of them.

It makes use of Poulos's formulation (1975a) that considers the building as one system (superstructure plus understructure plus foundation subsoil). A parametric study was made of the main factors that influence on the soil-structure interaction, such as relative soil-structure rigidity, number of the floors of the building, effect of the first floors, presence of foundation beams, tridimensional effect of frame, building layout in plant, among others.

The results are shown in the form of non-dimensional graphics, that make possible a better understanding of the influence of these several factors.

The work also presents a data bank of several buildings which have been monitored to have their settlements measured. An methodology for analysis of building settlement is formulated to discuss some effects of soil-structure interaction as the redistribution of the column loads and the tendency to have more homogeneous settlements. One case history based on the Poulos's formulation (1975a) have its results shown allowing to compare predicted settlements with the measured ones.

Both the theoretical and the case histories study show the important role played by the soil-structure interaction into the building design conducting safer and more economical results.

## ÍNDICE

	pág.
<b>I. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
I.1. Considerações Gerais .....	1
I.2. Objetivos .....	6
I.3. Conteúdo dos Capítulos .....	6
<b>II. MOVIMENTOS DO TERRENO E FUNDAÇÃO .....</b>	<b>8</b>
II.1. Considerações Gerais .....	8
II.2. Definições de Movimentos de Fundação ....	9
II.2.1. Recalque Absoluto .....	9
II.2.2. Recalque Diferencial .....	9
II.2.3. Rotação .....	9
II.2.4. Inclinação .....	9
II.2.5. Rotação Relativa ou Distorção ii	ii
Angular .....	ii
II.2.6. Deflexão Relativa .....	ii
II.2.7. Razão de Deflexão .....	ii
II.3. Danos em Edificações Provocados por Recalques .....	12
II.3.1. Generalidades .....	12
II.3.2. Classificação dos Tipos de Danos Provocados por Recalques .....	12
II.3.3. Recalques e Danos Associados ...	13
<b>III. METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES .....</b>	<b>15</b>

III.i. Considerações Gerais .....	15
III.2. Revisão Bibliográfica .....	15
III.3. O Modelo Proposto por POULOS (1975a) ....	26
III.3.1. Generalidades .....	26
III.3.2. Interação Superestrutura-Fundação .....	27
III.3.3. Interação Solo-Fundação .....	28
III.3.4. Interação Solo-Estrutura .....	29
III.4. Programa Computacional para Análise de Interação Solo-Estrutura em Edificações ..	30
III.4.1. Generalidades .....	30
III.4.2. Estrutura Básica do Programa ...	32
 IV. ESTUDO PARAMÉTRICO DE FATORES INFLUENTES NA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA .....	35
IV.1. Considerações Gerais .....	35
IV.2. Modelagem da Estrutura .....	38
IV.3. Modelagem do Solo .....	40
IV.4. Análises Desprezando-se a Interação entre Elementos de Fundação .....	45
IV.4.1. Considerações Iniciais .....	45
IV.4.2. Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo na Grandeza dos Recalques .....	46
IV.4.3. Influência do Número de Pavimentos da Edificação .....	50
IV.4.4. Influência dos Primeiros Pavimentos da edificação .....	59
IV.4.5. Influência das Cintas .....	63

IV.4.6.	Influência do Efeito Tridimensional de Pórtico .....	68
IV.4.7.	Influência da Forma em Planta da Edificação .....	68
IV.5.	Análises Considerando-se a Interação entre Elementos de Fundação .....	74
IV.5.1.	Considerações Iniciais .....	74
IV.5.2.	Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo na Grandeza dos Recalques .....	74
IV.5.3.	Influência do Número de Pavimentos da Edificação .....	79
IV.5.4.	Influência da Profundidade da Fronteira Rígida .....	82
V.	METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DA RÍGIDEZ DA ESTRUTURA NOS RECALQUES ...	86
V.1.	Considerações Gerais .....	86
V.2.	O Método Proposto por MEYERHOF (1953) ...	86
V.3.	Exemplo de Aplicação .....	88
VI.	CASOS PRÁTICOS DOS EFEITOS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES .....	94
VI.1.	Introdução .....	94
VI.2.	Metodologia para Análise de Recalques de Obras Instrumentadas .....	95
VI.2.1.	Conceituação Inicial .....	95

VI.2.2. Definição de Parâmetros para Análise dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura .....	98
VI.2.3. Sobre o Efeito da Redistribuição de Carga nos Pilares .....	100
VI.2.4. Sobre o Efeito da Tendência à Uniformização dos Recalques ....	101
VI.3. Aplicação da Metodologia de Análise de Recalques a Casos de Obras .....	102
VI.3.1. Generalidades .....	102
VI.3.2. Caso 01 - Recife/PE .....	102
VI.3.3. Caso 02 - Santos/SP .....	115
VI.3.4. Caso 03 - Santos/SP .....	120
VI.3.5. Caso 04 - Santos/SP .....	125
VI.3.6. Caso 05 - Durban .....	129
VI.3.7. Caso 06 - Recife/PE .....	134
VI.3.8. Caso 07 - Recife/PE .....	134
VI.4. Efeito da Sequência Construtiva .....	135
VI.5. Aplicação da Metodologia Proposta por POULOS (1975a) a um Caso Real de Obra ...	137
VI.6. Aplicação da Metodologia Proposta por BARATA (1986) aos Casos de Obras Analisados .....	142
VII. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS ..	144
VII.1. Conclusões .....	144
VII.2. Sugestões para Futuras Pesquisas .....	147

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	149
APÉNDICE I .....	159
APÉNDICE II .....	164

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.	
<b>Figura I.1</b>	: Partes Constituintes de uma Edificação.....	2
<b>Figura I.2</b>	: Hipóteses Básicas do Projeto Estrutural e de Fundações.....	4
<b>Figura II.1</b>	: Definições de Movimentos de Fundação.....	10
<b>Figura II.2</b>	: Tipos de Recalques em Edificações e os Tipos de Danos Associados.....	14
<b>Figura III.1</b>	: Detalhe Esquemático do Modelo para Interação Solo-Estrutura em Edificações Proposto por MORRIS (1966).....	18
<b>Figura III.2</b>	: Fatores de Influência de Recalque para Radiers Retangulares sobre um Semi-Espaço Infinito Elástico e Homogêneo (FRASER e WARDLE, 1976)...	22
<b>Figura III.3</b>	: Detalhe Esquemático do Programa Computacional INTERA.....	31
<b>Figura IV.1</b>	: Classificação de Modelos de Comportamento Tensão-Deformação em Solos (MORGERNSTERN, 1975).....	41
<b>Figura IV.2</b>	: Simulação de uma Típica Curva Carga-Recalque através do Modelo Elástico Linear.....	43
<b>Figura IV.3</b>	: Detalhe Esquemático do Pórtico Plano Utilizado nas Análises do Estudo Paramétrico.....	47
<b>Figura IV.4</b>	: Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo no Recalque Absoluto – Pórtico Plano com Øi Pavimento....	48
<b>Figura IV.5</b>	: Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo no Recalque Diferencial – Pórtico Plano com Øi Pavimento.....	49

<b>Figura IV.6</b>	<b>: Variação dos Recalques Absolutos em Função de <math>K_{ss}</math> - Pórtico Plano com 01 Pavimento.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura IV.7</b>	<b>: Efeito da Interação Solo-Estrutura nos Recalques e Reações de Apoio de Edificações.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura IV.8</b>	<b>: Variação de RU em Função da Rígidez Relativa Estrutura-Solo - Pórtico com Diferentes Números de Pavimentos.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura IV.9</b>	<b>: Variação de RU em Função do Número de Pavimentos da Edificação com Diferentes Valores de <math>K_{ss}</math>.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura IV.10</b>	<b>: Comparação entre as Curvas Teóricas Obtidas e a Faixa Proposta por BARATA (1986) - <math>K_{ss} &lt; 0.04</math> .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura IV.11</b>	<b>: Comparação entre as Curvas Teóricas Obtidas e a Faixa Proposta por BARATA (1986) - <math>K_{ss} &gt; 0.02</math> .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura IV.12</b>	<b>: Modelo da Analogia da Viga-Parede (GOSHY, 1978).....</b>	<b>60</b>
<b>Figura IV.13</b>	<b>: Variação de FC em Função do Número de Pavimentos da Edificação para Diferentes Valores de <math>K_{ss}</math>.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura IV.14</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 01 Pavimento.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura IV.15</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 02 Pavimentos.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura IV.16</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 03 Pavimentos.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura IV.17</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 04 Pavimentos.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura IV.18</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 05 Pavimentos.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura IV.19</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 08 Pavimentos.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura IV.20</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 11 Pavimentos.....</b>	<b>67</b>

<b>Figura IV.21</b>	<b>: Efeito das Cintas no Valor de RU - Pórtico Plano com 15 Pavimentos.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura IV.22</b>	<b>: Detalhe Esquemático do Pórtico Espacial utilizado nas Análises do Estudo Paramétrico.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura IV.23</b>	<b>: Efeito Tridimensional de Pórtico no Valor de RU - Pórtico com 01 Pavimento.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura IV.24</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> para Diferentes Valores de <math>B/L</math> - Pórtico Longitudinal Periférico.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura IV.25</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> para Diferentes Valores de <math>B/L</math> - Pórtico Longitudinal Central.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura IV.26</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>B/L</math> para Diferentes Valores de <math>K_{ss}</math> - Pórtico Longitudinal Periférico.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura IV.27</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>B/L</math> para Diferentes Valores de <math>K_{ss}</math> - Pórtico Longitudinal Central.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura IV.28</b>	<b>: Variação de <math>W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (01 Pavimento).....</b>	<b>77</b>
<b>Figura IV.29</b>	<b>: Variação de <math>W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (05 Pavimentos).....</b>	<b>77</b>
<b>Figura IV.30</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (01 Pavimento).....</b>	<b>78</b>
<b>Figura IV.31</b>	<b>: Variação de <math>\Delta W_{max}</math> em Função de <math>K_{ss}</math> Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (05 Pavimentos).....</b>	<b>78</b>

<b>Figura IV.32</b>	: Variação de $\Delta W_{max}/W_{max}$ em Função de $K_{ss}$ Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (01 Pavimento).....	80
<b>Figura IV.33</b>	: Variação de $\Delta W_{max}/W_{max}$ em Função de $K_{ss}$ Considerando-se ou não a Interação entre Elementos de Fundação (05 Pavimentos).....	80
<b>Figura IV.34</b>	: Variação de RU em Função de $K_{ss}$ Considerando-se a Interação entre Elementos de Fundação.....	81
<b>Figura IV.35</b>	: Detalhe Esquemático do Perfil Utilizado para a Análise da Influência da Profundidade da Fronteira Rígida.....	83
<b>Figura IV.36</b>	: Variação de $W_{max}$ em Função de $K_{ss}$ para Diferentes Valores de $h/L$ - Pórtico Plano com 01 Pavimento.....	84
<b>Figura IV.37</b>	: Variação de $\Delta W_{max}$ em Função de $K_{ss}$ para Diferentes Valores de $h/L$ - Pórtico Plano com 01 Pavimento.....	84
<b>Figura IV.38</b>	: Variação de RU em Função de $K_{ss}$ para Diferentes Valores de $h/L$ - Pórtico Plano com 01 Pavimento.....	85
<b>Figura V.1</b>	: Variação de $\Delta W_{max}$ em Função de $K_{ss}$ para Edificações com Diferentes Números de Pavimentos.....	90
<b>Figura V.2</b>	: Comparação entre os Recalques Diferenciais Obtidos a partir do Método de POULOS (1975) e de MEYERHOF (1953) - $K_{ss} = 0.002$ .....	91
<b>Figura V.3</b>	: Comparação entre os Recalques Diferenciais Obtidos a partir do Método de POULOS (1975) e de MEYERHOF (1953) - $K_{ss} = 0.01$ .....	91

<b>Figura V.4</b>	: Comparação entre os Recalques Diferenciais Obtidos a partir do Método de Poulos (1975) e de Meyerhof (1953) - $K_{ss} = 0.04$ .....	92
<b>Figura VI.1</b>	: Exemplos de Deformadas Correspondentes aos Recalques Estimados e Medidos e suas Respectivas Curvas de Frequência.....	96
<b>Figura VI.2</b>	: Variação de Valores da Rígidez Relativa Estrutura-Solo e suas Curvas de Frequência de Recalques Correspondentes.....	99
<b>Figura VI.3</b>	: Perfil Geotécnico do Terreno de Fundação - Caso 01 (Antes do Melhoramento).....	104
<b>Figura VI.4</b>	: Forma e Localização das Cintas da Estrutura - Caso 01.....	106
<b>Figura VI.5</b>	: Comparação entre as Curvas de Isorecalques Estimadas Convencionalmente e as Medidas - Caso 01.....	108
<b>Figura VI.6</b>	: Esforços Normais nas Barras Horizontais do Pórtico Central da Estrutura Devido aos Recalques Medidos - Caso 01.....	110
<b>Figura VI.7</b>	: Comparação entre os Valores de AR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 01.....	112
<b>Figura VI.8</b>	: Comparação entre os Valores de DR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 01.....	112
<b>Figura VI.9</b>	: Comparação entre as Rotações Relativas Estimadas Convencionalmente e as Medidas - Caso 01.....	114
<b>Figura VI.10</b>	: Perfil Geotécnico do Terreno de Fundação - Caso 02.....	116

Figura VI.11	: Comparação entre as Curvas de Isorecalques Estimadas Convencionalmente e as Medidas - Caso 02.....	117
Figura VI.12	: Comparação entre os Valores de AR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 02.....	119
Figura VI.13	: Comparação entre os Valores de DR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 02.....	119
Figura VI.14	: Perfil Geotécnico do Terreno de Fundação - Caso 03.....	121
Figura VI.15	: Comparação entre as Curvas de Isorecalques Estimadas Convencionalmente e as Medidas - Caso 03.....	122
Figura VI.16	: Comparação entre os Valores de AR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 03.....	124
Figura VI.17	: Comparação entre os Valores de DR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 03.....	124
Figura VI.18	: Comparação entre as Curvas de Isorecalques Estimadas Convencionalmente e as Medidas - Caso 04.....	127
Figura VI.19	: Comparação entre os Valores de AR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 04.....	128
Figura VI.20	: Comparação entre os Valores de DR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 04.....	128
Figura VI.21	: Comparação entre os Valores de AR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 05.....	131

<b>Figura VI.22</b>	<b>: Comparação entre os Valores de AR Estimados com a Interação Solo-Estrutura e os Medidos - Caso 05.....</b>	<b>131</b>
<b>Figura VI.23</b>	<b>: Comparação entre os Valores de DR Estimados Convencionalmente e os Medidos - Caso 05.....</b>	<b>133</b>
<b>Figura VI.24</b>	<b>: Comparação entre os Valores de DR Estimados com a Interação Solo-Estrutura e os Medidos - Caso 05.....</b>	<b>133</b>
<b>Figura VI.25</b>	<b>: Influência da Sequência Construtiva no Valor de CVmed para Diferentes Edificações.....</b>	<b>136</b>
<b>Figura VI.26</b>	<b>: Influência da Sequência Construtiva no Valor de DRmed - Caso 01.....</b>	<b>138</b>
<b>Figura VI.27</b>	<b>: Comparação entre as Deformadas Correspondentes aos Recalques Estimados Convencionalmente, Estimados com Interação Solo-Estrutura e Medidos - Caso 01..</b>	<b>140</b>
<b>Figura VI.28</b>	<b>: Comparação entre a Faixa Proposta por BARATA (1986) e os Pontos Obtidos para Diferentes Edificações.....</b>	<b>143</b>
<b>Figura AII.i</b>	<b>: Detalhe Esquemático do Perfil Adotado para as Análises Considerando-se o Método Proposto por AOKI e LOPES (1975).....</b>	<b>165</b>

## SIMBOLOGIA

- $\sigma_v$  : Pressão vertical devida ao peso das terras  
 $\Delta\sigma_v$  : Acréscimo de pressão vertical devida à construção da edificação  
 $w$  : Recalque absoluto  
 $\Delta w$  : Recalque diferencial  
 $\theta$  : Rotação  
 $\omega$  : Inclinação ("tilting")  
 $\beta$  : Rotação relativa ou Distorção angular  
 $\delta$  : Deflexão relativa  
 $q$  : Pressão média aplicada à fundação  
 $t$  : Espessura do radier  
 $E_c$  : Módulo de elasticidade do concreto  
 $\mu_c$  : Coeficiente de Poisson do concreto  
 $E_s$  : Módulo de Young do solo  
 $\mu_s$  : Coeficiente de Poisson do solo  
 $B$  : Largura em planta da edificação  
 $L$  : Comprimento em planta da edificação  
 $h$  : Espessura da camada de solo compressível  
 $K$  : Rigidez relativa estrutura-solo (FRASER e WARDLE, 1976)  
 $I$  : Fator de influência de recalque  
 $\{V\}$  : Vetor das reações de apoio considerando-se a interação solo-estrutura  
 $\{V_o\}$  : Vetor das reações de apoio desprezando-se a interação solo-estrutura

(δ)	: Vetor dos deslocamentos dos apoios considerando-se a interação solo-estrutura
[SM]	: Matriz da estrutura
[FM]	: Matriz da Fundação
[IT]	: Matriz da interação solo-estrutura
Kss	: Rígidez relativa estrutura-solo (POULOS, 1975a)
l	: Vôo entre colunas
Iv	: Inércia à flexão das vigas da edificação
Kw	: Fator de recalque (POULOS, 1975a)
QV	: Carga vertical total aplicada dividida pelo número de vôos do pórtico
RU	: Razão de uniformização de recalques
ΔWint	: Recalque diferencial máximo estimado com a consideração da interação solo-estrutura
ΔWcon	: Recalque diferencial máximo estimado convencionalmente
Q	: Carga vertical
Qtrab	: Carga vertical de trabalho
Qult	: Carga vertical máxima suportada pela fundação sem haver ruptura do terreno
Bf	: Largura da sapata
Lf	: Comprimento da sapata
Ip	: Inércia à flexão dos pilares
Ic	: Inércia à flexão das cintas
W̄	: Recalque absoluto médio
Wmax	: Recalque absoluto máximo
ΔWmax	: Recalque diferencial máximo

FC	: Fator de contribuição à uniformização dos recalques
H	: Altura da edificação
Kv	: Rígidez média das vigas
Kl	: Rígidez média das colunas inferiores
Ku	: Rígidez média das colunas superiores
Ipl	: Inércia à flexão das colunas inferiores
Ipu	: Inércia à flexão das colunas superiores
FRE	: Fator de rigidez equivalente
ΔWmaxm	: Recalque diferencial máximo estimado segundo a metodologia proposta por MEYERHOF (1953)
ΔWmaxp	: Recalque diferencial máximo estimado segundo a metodologia proposta por POULOS (1975a)
W <sub>est</sub>	: Recalque absoluto médio estimado
W <sub>med</sub>	: Recalque absoluto médio medido
AR	: Fator de recalque absoluto
DR	: Fator de recalque diferencial
CV	: Coeficiente de variação
K'	: Flexibilidade de mola do elemento de fundação

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

### I.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

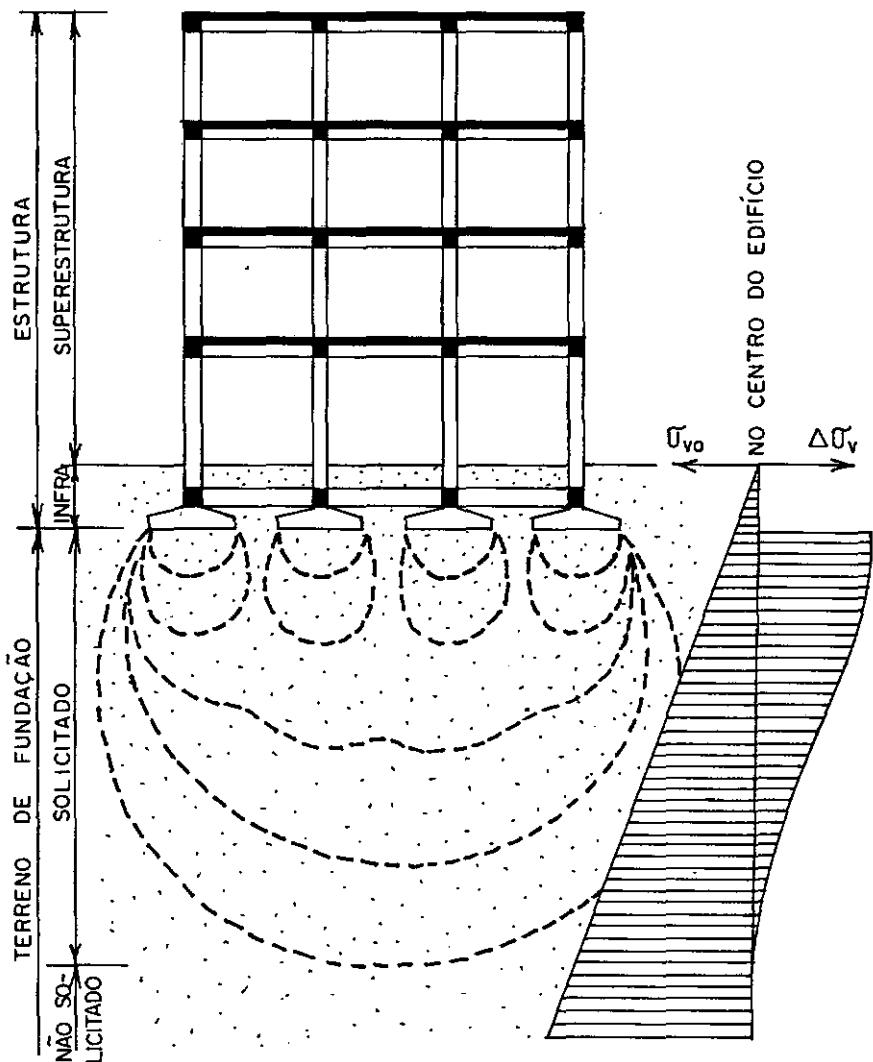
As modernas teorias de análise estrutural consideram as edificações como sendo constituídas por três partes: superestrutura, infra-estrutura e terreno de fundação (fig.I.1).

A superestrutura corresponde à parte da edificação que será utilizada após a sua construção, e é composta por paredes, lajes, vigas e pilares.

A infra-estrutura é a parte constituída pelos elementos que transferem o carregamento da superestrutura para o terreno de fundação e pelo cintamento. Tem como principal função garantir à edificação a compatibilização entre as cargas da superestrutura e a resistência do terreno de fundação, proporcionando uma segurança à ruptura da fundação e assegurando deformações que não comprometam a estabilidade, funcionalidade e estética da edificação.

O terreno de fundação é a parte que tem como objetivo absorver os esforços desenvolvidos na superestrutura.

O desempenho de uma edificação é na realidade governado pela interação entre estas três partes, num mecanismo denominado de interação solo-estrutura. Acontece, porém, que na prática esta interação é comumente desprezada, com os projetos de



$\sigma_{vo}$  = PRESSÃO VERTICAL PRÉ-EXISTENTE

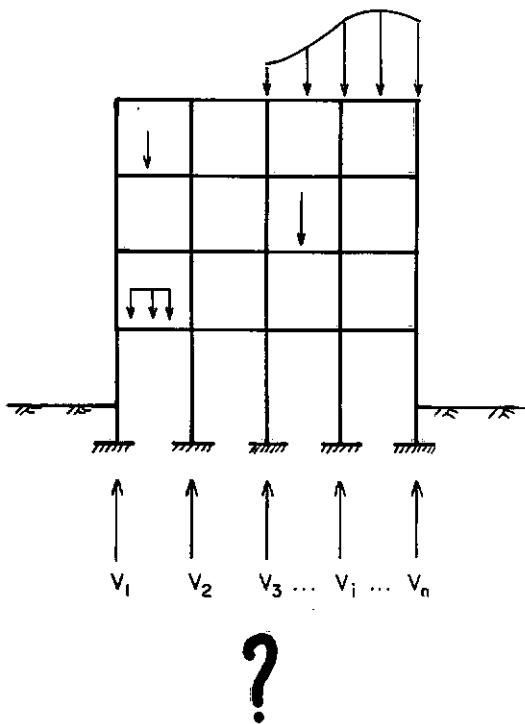
$\Delta \sigma_v$  = ACRÉSCIMO DE PRESSÃO VERTICAL

FIG. I.1 - PARTES CONSTITUINTES DE UMA EDIFICAÇÃO.

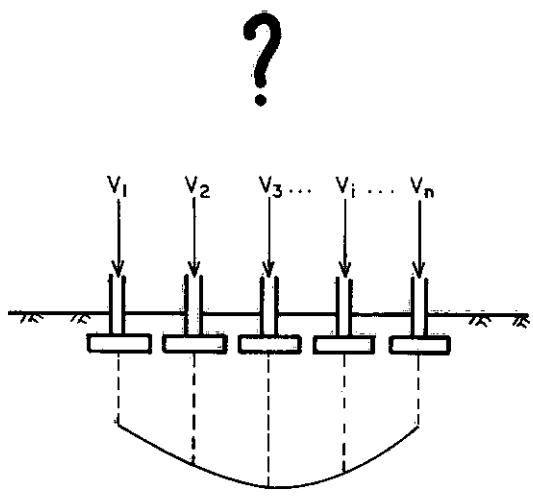
fundações e estrutural sendo desenvolvidos sem se levar em consideração tal mecanismo.

No caso do projeto estrutural, o mesmo é desenvolvido admitindo-se a hipótese dos apoios da edificação serem indeslocáveis, com o cálculo das cargas na fundação e o dimensionamento dos elementos estruturais sendo feitos com base nesta hipótese. Por outro lado, o projeto de fundações é desenvolvido levando-se em consideração apenas as cargas na fundação (obtidas a partir do projeto estrutural) e as propriedades do terreno de fundação, com os recalques sendo estimados com base na hipótese de que cada elemento de fundação possa se deslocar independentemente dos demais. Com isto é criado um verdadeiro "fossos" entre o terreno de fundação e a estrutura (fig. I.2). É evidente que nesta situação são desprezados os efeitos do mecanismo de interação solo-estrutura, provocados pela deformação do terreno de fundação. Esta deformação é consequência da mudança no estado de tensões pré-existente no terreno de fundação, em decorrência da construção da edificação.

Um dos efeitos provocados pela interação solo-estrutura é uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, em especial as cargas nos pilares (MEYERHOF, 1953; CHAMECKI, 1955 e 1958; POULOS, 1975a; AOKI, 1987). Esta redistribuição depende, entre outras coisas, da rigidez relativa estrutura-solo e da deformada de recalques da edificação. Deve-se ter muito cuidado com esta redistribuição, pois ela pode provocar o aparecimento de danos na superestrutura, como observa GUSMÃO (1987). E



PROJETO ESTRUTURAL



PROJETO DE FUNDAÇÕES

**FIG. I.2 - HIPÓTESES BÁSICAS DO PROJETO CONVENCIONAL  
ESTRUTURAL E DE FUNDAÇÕES .**

conhecido, por exemplo, o caso de prédios (em Santos-SP e Recife-PE) que apresentaram esmagamento de pilares periféricos, devido à sobrecarga proveniente da redistribuição de carga nos mesmos.

Uma outra consequência importante decorrente deste efeito, é que a solidariedade existente entre os elementos da estrutura confere à mesma uma considerável rigidez, restringindo o movimento relativo entre os apoios e fazendo com que os recalques diferenciais sejam menores que os estimados convencionalmente, resultando numa deformada de recalques com uma curvatura menor que a prevista. Outro problema é que depois de estimadas convencionalmente, as distorções angulares são comparadas com valores limites para aparecimento de danos em edificações largamente difundidos na literatura técnica, como os propostos por SKEMPTON e MACDONALD (1956), POLSHIN e TOKAR (1957), BJERRUM (1963), entre outros. E acontece que todos estes valores limites estão baseados em observações de obras monitoradas, ou seja, nestes valores está embutido o efeito da interação solo-estrutura. Consequentemente, não é coerente comparar tais valores com os obtidos através do procedimento tradicional de estimativa de recalques, como observa BARATA (1986). A consideração da interação solo-estrutura pode viabilizar projetos de fundação que não seriam aceitos por uma análise convencional.

## I.2. OBJETIVOS

Como será visto nos próximos capítulos, inúmeros fatores influenciam o mecanismo de interação solo-estrutura. Este trabalho tem primordialmente como objetivo fazer uma análise qualitativa e quantitativa destes fatores no desempenho de edificações.

Uma análise teórica, feita através de um estudo paramétrico, revela a importância dos principais fatores que influenciam esta interação.

A partir de uma metodologia proposta para análise de recalques de obras instrumentadas, é feita uma avaliação dos resultados de alguns casos reais de obras, no sentido de se revelar alguns efeitos da interação solo-estrutura no desempenho de edificações que foram projetadas convencionalmente. É apresentada, também, a comparação entre os recalques teóricos obtidos com base na metodologia proposta por Poulos (1975) e os medidos em um caso real de obra.

## I.3. CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

No capítulo II é feita uma sucinta apresentação da conceituação utilizada para descrição dos movimentos do terreno e fundação, e dos tipos de danos em edificações associados a recalques.

No capítulo III é apresentada uma revisão bibliográfica sobre métodos para consideração da interação solo-estrutura em edificações. É detalhadamente

apresentado um destes métodos, o qual é utilizado em um estudo paramétrico dos principais fatores influentes nesta interação. É também apresentado um programa computacional, desenvolvido tanto para o estudo paramétrico como para a aplicação a um caso real de obra.

No capítulo IV são apresentados os resultados do desenvolvimento de um estudo paramétrico dos principais fatores influentes na interação solo-estrutura em edificações.

No capítulo V é apresentada uma metodologia que possibilita a substituição, em análises de interação solo-estrutura, da edificação real por uma outra mais simples com rigidez equivalente, facilitando bastante as análises. É também apresentado um exemplo de aplicação.

No capítulo VI é apresentada uma metodologia para análise de recalques de obras instrumentadas. Em função desta metodologia é feita uma avaliação de alguns efeitos da interação solo-estrutura no desempenho de 07 (sete) diferentes casos reais de edificações. Faz-se, ainda, uma aplicação da metodologia proposta por POULOS (1975) a um caso real de obra.

No capítulo VII são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para futuras pesquisas.

## CAPÍTULO II - MOVIMENTOS DO TERRENO E FUNDAÇÃO

### II.i. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A interação solo-estrutura, como já foi dito, pode apresentar uma grande influência nos movimentos de fundações de edificações. Uma análise da literatura sobre recalques de fundação revela, no entanto, uma extensa variedade de símbolos e terminologias para descrição de movimentos de fundação (BURLAND et alii, 1977). Com o objetivo de tentar resolver satisfatoriamente este problema, é necessário adotar um conjunto claro e consistente de definições que descrevam os tipos de movimentos de fundação.

BURLAND e WROTH (1974) propuseram um conjunto de definições baseadas em um certo número de pontos discretos com deslocamentos conhecidos ou estimados. Os autores ressaltam, contudo, que quando os detalhes da fundação e da superestrutura não são especificados, a forma precisa da deformada entre os pontos observados pode não ser conhecida. Neste trabalho será adotado o conjunto de definições sugerido por estes autores, o qual é descrito a seguir.

## II.2. DEFINIÇÕES DE MOVIMENTOS DE FUNDAÇÃO

### II.2.1. Recalque Absoluto ( $W$ )

É o deslocamento vertical descendente de um ponto discreto da fundação (fig. II.1-a). O recalque absoluto máximo é representado por  $W_{max}$ . Se o deslocamento vertical for para cima, denomina-se de levantamento.

### II.2.2. Recalque Diferencial ( $\Delta W$ )

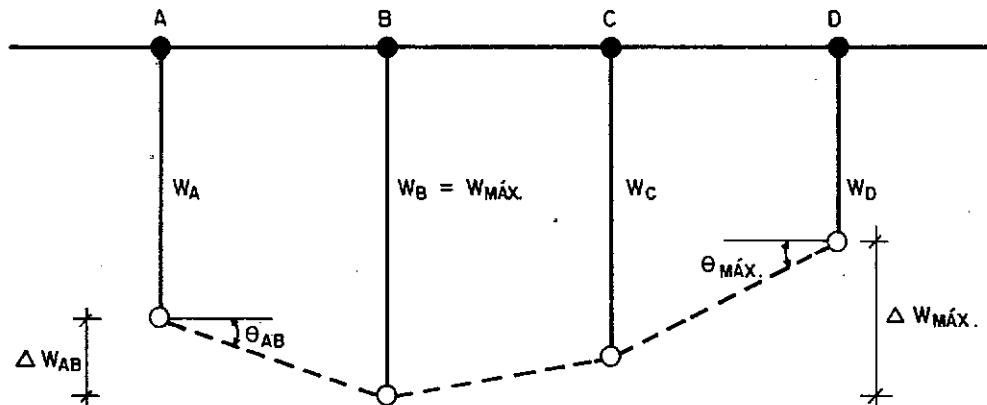
É a diferença entre os recalques absolutos de dois diferentes pontos e indica o movimento relativo entre os mesmos. O recalque diferencial máximo é representado por  $\Delta W_{max}$  (fig. II.1-a).

### II.2.3. Rotação ( $\theta$ )

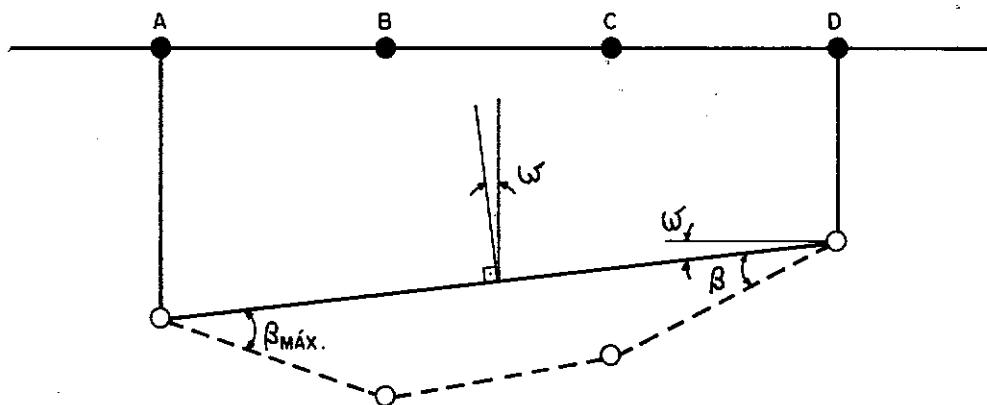
É usada para descrever a mudança de gradiente da reta unindo dois pontos quaisquer da fundação ou do terreno (fig. II.1-a).

### II.2.4. Inclinação ( $\omega$ )

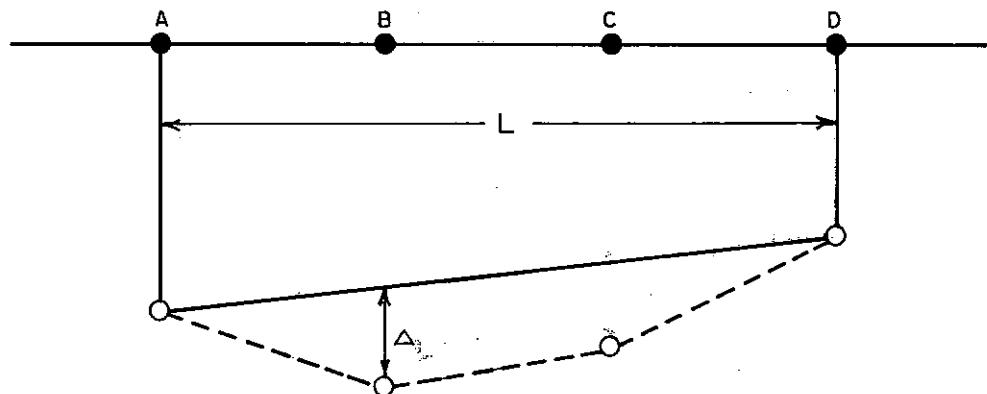
Descreve a rotação de corpo rígido da estrutura (ou de uma parte bem definida dela), ou ainda, a mudança de gradiente da reta que une dois pontos extremos da estrutura. No caso de uma fundação contínua, como por exemplo um radier, o valor da inclinação é mais facilmente



a) DEFINIÇÕES DE RECALQUE ABSOLUTO , RECALQUE DIFERENCIAL E ROTAÇÃO .



b) DEFINIÇÕES DE INCLINAÇÃO E ROTAÇÃO RELATIVA .



c) DEFINIÇÃO DE DEFLEXÃO RELATIVA .

FIG. II. 1 - DEFINIÇÕES DE MOVIMENTOS DE FUNDAÇÃO .

calculado. No caso de fundações não-contínuas, tais como sapatas isoladas, este cálculo torna-se mais complicado (fig. II.i-b).

#### II.2.5. Rotação Relativa ou Distorção Angular ( $\beta$ )

Descreve a rotação de uma reta unindo dois diferentes pontos de uma edificação, descontada a inclinação da mesma. No caso da inclinação ser nula, o seu valor coincide com o da rotação ( $\theta$ ). Ressalta-se que o conceito de "distorção angular" foi inicialmente sugerido por SKEMPTON e MACDONALD (1956). A máxima rotação relativa é representada por  $\beta_{max}$  (fig. II.i-b).

#### II.2.6. Deflexão Relativa ( $\Delta$ )

É o deslocamento vertical máximo em relação a uma reta que une dois pontos de referência (geralmente os dois pontos extremos da edificação).

#### II.2.7. Razão de Deflexão ( $\Delta/L$ )

É a razão entre a deflexão relativa e a distância (L) entre os dois pontos de referência.

Algumas outras definições, bem como a convenção de sinais, não serão aqui apresentadas por não serem objeto de estudo deste trabalho. Ressalta-se, ainda, que as definições anteriormente apresentadas se referem a

deformações no plano, podendo serem aplicadas com adaptações ao caso tridimensional.

### II.3. DANOS EM EDIFICAÇÕES PROVOCADOS POR RECALQUES

#### II.3.1. Generalidades

Dois critérios devem sempre nortear um projeto de fundações: (i) deve ser assegurada a segurança da fundação, tanto do ponto de vista do solo quanto do elemento estrutural; (ii) e deve ser assegurado um desempenho satisfatório para a edificação nas condições de trabalho, ou seja, as deformações do terreno de fundação não devem provocar danos à obra.

#### II.3.2. Classificação dos Tipos de Danos Provocados por Recalques

Os danos em edificações provocados por recalques podem ser classificados em estéticos, funcionais e estruturais.

Os danos estéticos são aqueles que afetam apenas o aspecto da obra, não comprometendo seu uso ou estabilidade. São exemplos de danos estéticos: fissuras em paredes de alvenaria que funcionam apenas como elementos de vedação; pequeno desaprumo da edificação devido a rotação de corpo rígido ("tilting").

Os danos funcionais são aqueles que afetam o uso da edificação. São exemplos deste tipo de dano:

dificuldade de abrir portas e janelas; problemas com elevadores; danos às ligações com o exterior (tubulações de esgoto, rampas, escadas); desaprumo acentuado; problemas de drenagem.

Os danos estruturais são aqueles que afetam os elementos estruturais e podem, dependendo da sua extensão, causar a ruína da edificação. São exemplos deste tipo de dano: trincas em vigas, lajes e pilares; trincas em alvenarias estruturais.

### **II.3.3. Recalques e Danos Associados**

A deformação do terreno de fundação pode conduzir a 03 (três) situações: recalques uniformes, recalques desuniformes sem distorção e recalques desuniformes com distorção. Os tipos de danos podem ser associados de forma esquemática a estas três situações de acordo com a figura (II.2).

Diversos critérios para avaliação quanto ao aparecimento de danos em edificações são disponíveis, destacando-se, entre outros, os propostos por SKEMPTON e MACDONALD (1956); POLSHIN e TOKAR (1957); BJERRUM (1963); BURLAND e WROTH (1974); BURLAND et alii (1977); KLEPIKOV (1989).

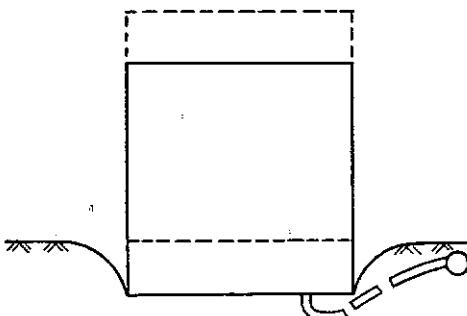
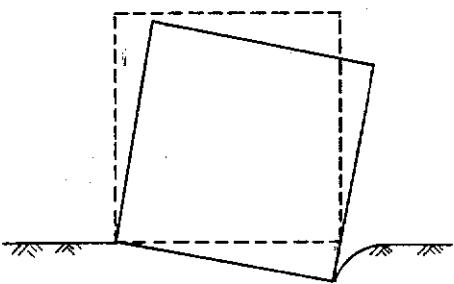
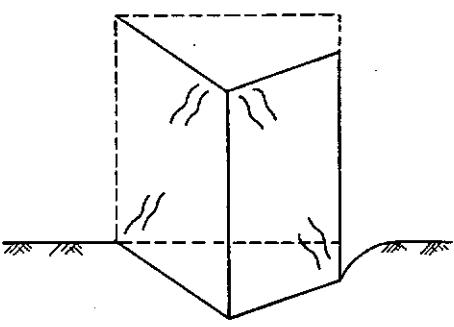
TIPO DE RECALQUE	DANOS ASSOCIADOS
<p>UNIFORME</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DANOS ARQUITETÔNICOS (ESTÉTICOS E FUNCIONAIS), DEPENDENDO DA GRANDEZA DOS RECALQUES.</li> <li>- DANOS ÀS LIGAÇÕES COM O EXTERIOR (INSTALAÇÕES, RAMPA, ESCADAS, ETC)</li> </ul>
<p>DESUNIFORME SEM DISTORÇÃO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DANOS ARQUITETÔNICOS: DESAPRUMO EM PRÉDIOS ALTOS.</li> </ul>
<p>DESUNIFORME COM DISTORÇÃO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DANOS ARQUITETÔNICOS: FISSURAÇÃO, DISTORÇÃO DE VÃOS;</li> <li>- DANOS ESTRUTURAIS: FISSURAS EM VIGAS, ETC.</li> </ul>

FIG. II. 2-TIPOS DE RECALQUES EM EDIFICAÇÕES E OS TIPOS DE DANOS ASSOCIADOS ( LOPES, 1988 )

## CAPÍTULO III - METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES

### III.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como já foi dito no primeiro capítulo, poucos são os casos de edificações no Brasil em que a interação solo-estrutura foi considerada para fins de projeto, apesar da sua importância.

Segundo BURLAND et alii (1977), é importante se fazer a distinção entre os dois maiores passos em uma análise de interação solo-estrutura: o primeiro, e o mais importante do ponto de vista prático, é a estimativa da grandeza dos recalques e, consequentemente, a deformada de recalques da edificação. Esta informação é usada para uma avaliação quanto ao surgimento de danos e escolha do tipo de fundação da edificação; o segundo, e que requer uma avaliação mais criteriosa, é o cálculo da real distribuição de cargas e esforços na estrutura. Neste trabalho será dada uma maior ênfase à influência da interação solo-estrutura em recalques de edificações.

### III.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos métodos para análises de interação solo-estrutura têm sido publicados, especialmente nos últimos vinte anos, com o advento de técnicas numéricas e com o uso de computadores. Segundo POULOS (1981), há uma

grande necessidade do desenvolvimento de métodos que possam ser utilizados em microcomputadores, onde a principal preocupação deve ser quanto à viabilidade da capacidade de memória dos mesmos.

Em 1953, MEYERHOF publicou um trabalho que é considerado uma das primeiras tentativas de se avaliar os efeitos da interação solo-estrutura em edificações. A análise apresentada baseia-se na teoria da elasticidade tanto para o solo quanto para a estrutura, sendo, no entanto, fornecidas poucas informações a respeito deste modelo. São apresentados diversos gráficos que mostram os efeitos da rigidez relativa estrutura-solo e da forma em planta da fundação nos recalques (absolutos e diferenciais) e momentos fletores na fundação. O autor sugere também fórmulas que permitem substituir a edificação real por uma outra mais simples com rigidez equivalente, simplificando as análises de interação solo-estrutura (ver capítulo V).

CHAMECKI (1955) publicou um trabalho onde apresenta uma metodologia para análises de interação solo-estrutura que, segundo o autor, obedece em tudo ao que é ortodoxo na engenharia estrutural e de fundações. A partir das reações de apoio da estrutura considerada como indeslocável e dos coeficientes de transferência de carga (que é a reação de apoio adicional devido a um recalque unitário de um apoio qualquer), o método requer uma análise iterativa, até que haja convergência das reações de apoio e recalques. Este trabalho é considerado uma das primeiras tentativas de se modelar o mecanismo de

interação solo-estrutura em edificações.

MORRIS (1966) apresenta um método para análises de interação solo-estrutura de pórticos espaciais com fundações do tipo sapatas isoladas. Para simular o comportamento do terreno de fundação, o autor admite nos apoios a presença de molas (para caracterizar o efeito elástico) e amortecedores (para caracterizar o efeito viscoso), como mostra esquematicamente a figura (III.i). Alguns exemplos ilustrativos indicam alguns aspectos relacionados ao desempenho de estruturas com suportes visco-elásticos e, segundo o autor, tal modelo é indicado para estudos paramétricos.

LEE e HARRISON (1970) apresentam soluções baseadas na hipótese de Winkler e em técnicas analíticas simples, para a análise de estruturas com fundações do tipo vigas ou radiers. Os autores observam que, na falta de uma lei fundamental de tensão-deformação para os solos, é necessário recorrer a modelos matematicamente simples, e que apesar das reconhecidas limitações da hipótese de Winkler, esta hipótese é bastante aceitável em alguns casos, particularmente no caso de fundações com baixa rigidez relativa.

LEE e BROWN (1972) apresentam um método para análise de estruturas aporticadas com fundações do tipo radier. Neste modelo são considerados os efeitos da superestrutura, infra-estrutura e terreno de fundação no cálculo das cargas e recalques dos apoios. Os autores apresentam diversos gráficos onde são feitas comparações entre os resultados calculados convencionalmente e os

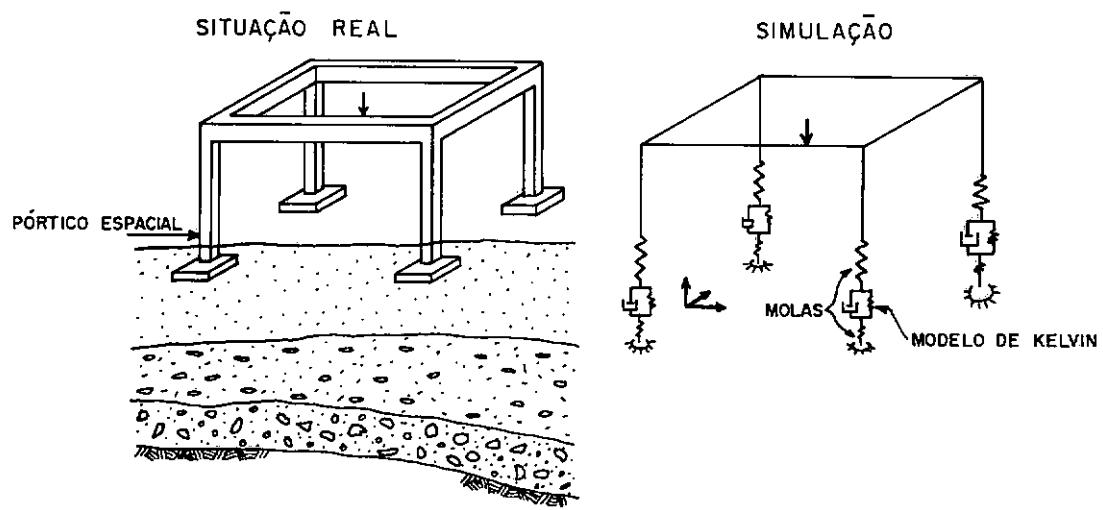


FIG. III.1 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO MODELO P/ INTERAÇÃO SOLO - ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES PROPOSTO POR MORRIS (1966).

obtidos através do método proposto.

KING e CHANDRASEKARAN (1974) apresentam um método baseado em elementos finitos para análise de problemas de interação solo-estrutura sob condições de deformação plana, no qual são considerados os efeitos da rigidez da superestrutura e infra-estrutura. Este método é usado para se estudar os efeitos da interação solo-estrutura em um pórtico plano com dois vãos e com fundações do tipo radier, assente em um meio contínuo elástico.

WOOD e LARNACH (1974) descrevem um método para estimativa dos recalques e reações de apoio de um sistema único solo-estrutura, bem como tensões resultantes desta interação na superestrutura. A estrutura é modelada a partir de elementos finitos, enquanto o solo é tratado como um meio contínuo em que a formulação de Boussinesq é aplicada. Os autores apresentam os resultados da análise de um radier assente em um depósito de solo que exibe características de tensão-deformação não-lineares, e é feito um estudo da variação da pressão de contato para diferentes tipos de carregamento do radier.

WOOD e LARNACH (1975) apresentam um método em que a interação entre a estrutura e o terreno de fundação é considerada. A estrutura analisada é um pórtico com fundação do tipo sapatas isoladas ou radier, modelada através de elementos finitos. O solo é modelado através da formulação de Boussinesq (meio contínuo elástico) com superposição dos efeitos. Os autores apresentam ainda uma aplicação do método para o caso de um pórtico plano com

fundação do tipo radier e sapatas isoladas, e são feitas comparações entre os valores de recalques diferenciais, cargas nos apoios e pressões de contato na fundação obtidos a partir do método e os propostos por outros métodos.

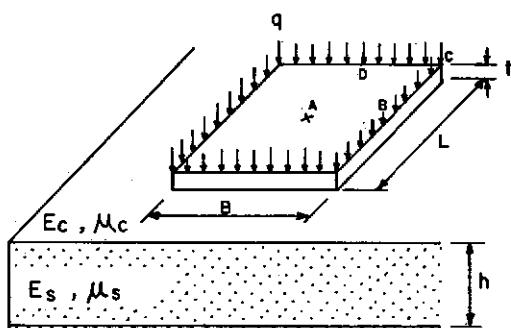
LEE (1975) apresenta uma discussão de análises de interação solo-estrutura para o caso de edificações com fundações do tipo sapatas isoladas, estacas e radiers. No caso das sapatas isoladas, as análises são feitas através da introdução de uma barra vertical fictícia embaixo de cada apoio, com características que simulem o comportamento carga-recalque da fundação. São feitas também análises considerando-se ou não a influência do carregamento de sapatas adjacentes no recalque de uma dada sapata. No caso das fundações do tipo radier, são apresentadas análises comparando-se os resultados obtidos para pórticos planos e espaciais a partir de diferentes modelos de comportamento tensão-deformação do solo. Por fim, o autor apresenta uma comparação entre os resultados teóricos obtidos para a análise de interação solo-estrutura de uma plataforma para armazenamento de óleo, e os medidos através do monitoramento da obra.

POULOS (1975a) apresenta, de uma forma bastante didática, uma metodologia geral para estimativa do recalque de uma fundação, na qual a superestrutura, fundação e terreno de fundação são tratados como um sistema único. Na realidade esta metodologia é semelhante à proposta por CHAMECKI (1955), sendo desenvolvida, no

entanto, na forma matricial. É feita uma revisão de algumas soluções baseadas na teoria da elasticidade para a estimativa de recalques e necessárias à análise de interação solo-estrutura. Para o caso de um pórtico plano, o autor apresenta uma série de análises para mostrar o efeito da interação solo-estrutura nos recalques absolutos e diferenciais para cada tipo de fundação, consideração da interação entre sapatas para fins de recalques, consideração do deslocamento horizontal do pórtico, e número de pavimentos do pórtico.

FRASER e WARDLE (1976) apresentam uma análise de radiers retangulares uniformemente carregados assentes em um semi-espacô elástico e homogêneo, baseada no método dos elementos finitos. Diversas soluções na forma de gráficos permitem a determinação do recalque absoluto no centro, meio dos bordos e cantos do radier, e também os recalques diferenciais (fig. III.2). Estes resultados são apresentados em função de um parâmetro de rigidez relativa estrutura-solo definido pelos autores. O trabalho apresenta, ainda, um procedimento que permite levar em consideração a heterogeneidade do terreno de fundação. É importante ressaltar que neste trabalho não é considerada a rigidez da superestrutura, mas somente a da fundação (radier). BURLAND et alii (1977) observam, no entanto, que no caso de análises preliminares se pode estimar a rigidez da superestrutura pelo método proposto por MEYERHOF (1953) e considerar um radier de rigidez equivalente à da superestrutura.

MAJID e CUNNELL (1976) apresentam um



$$K = \frac{4}{3} \cdot \frac{E_c \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I^3}{E_s \cdot (1 - \mu_c^2) \cdot B^3}$$

$$W = q \cdot B \cdot \frac{(1 - \mu_s^2)}{E_s} \cdot I$$

ONDE : I = FATOR DE INFLUÊNCIA DE RECALQUE

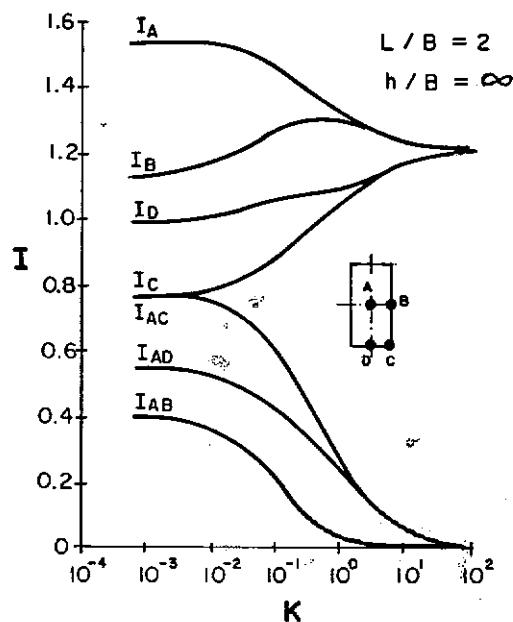
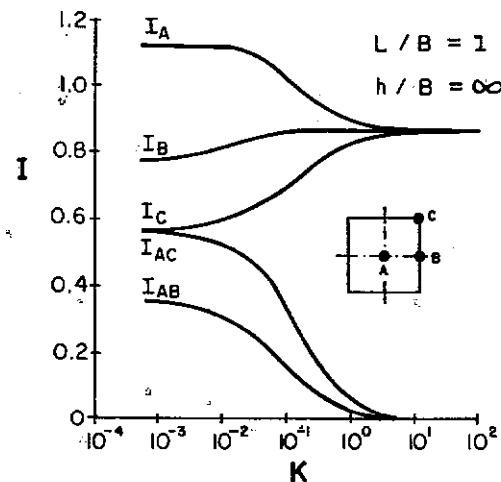


FIG. III.2 - FATORES DE INFLUÊNCIA DE RECALQUE P/ RADIERES RETANGULARES SOBRE UM SEMI-ESPAÇO INFINITO ELÁSTICO E HOMOGÊNEO (FRASER E WARDLE, 1976)

excelente trabalho em que são apresentados detalhadamente os resultados teóricos e experimentais do carregamento de pórticos de pequenas dimensões. Os autores apresentam um método que permite a análise de interação solo-estrutura para qualquer tipo de fundação. O comportamento não-linear do solo pode inclusive ser levado em consideração nas análises. Através do ensaio em laboratório de três diferentes tipos de pórticos (plano e espaciais) e do estudo teórico dos mesmos, são feitas diversas análises no sentido de se evidenciar a influência de alguns fatores na interação solo-estrutura, tais como: recalque diferencial das fundações; não-linearidade do comportamento tensão-deformação do solo; interação entre os elementos de fundação; redistribuição de tensões no solo e na estrutura; e interação entre as diversas partes da estrutura. A comparação entre os resultados teóricos e os obtidos experimentalmente revela uma excelente aproximação.

JAIN et alii (1977) apresentam um método que possibilita a consideração dos efeitos da interação solo-estrutura em recalques de edifícios altos. Este método é iterativo e separa a estrutura nas direções longitudinal e transversal, reduzindo a ordem das matrizes dos cálculos e fazendo com que a convergência seja rapidamente atingida. É apresentado um exemplo ilustrativo de um prédio com nove pavimentos em que são feitas comparações entre os resultados obtidos a partir do método proposto, e os obtidos através de uma análise convencional.

KING (1977) apresenta uma revisão do problema da interação solo-estrutura para fundações do tipo de radier e a sua simulação através do método dos elementos finitos. É feita uma breve descrição dos procedimentos analíticos para o caso de estruturas no plano e no espaço. O autor apresenta ainda uma discussão sobre diversos modelos de comportamento tensão-deformação de solos.

BURAGOHAIN et alii (1977) analisam a interação solo-estrutura em pórticos com fundações do tipo estacas. É apresentado o desenvolvimento teórico de um método e é feita uma aplicação numérica para o caso de um pórtico espacial com três pavimentos, onde são feitas considerações a respeito de redistribuição de esforços e cargas na superestrutura e tendência à uniformização dos recalques.

UNGUREANU et alii (1977) apresentam um método para análises de interação solo-estrutura para o caso de pórticos com fundações do tipo viga, com o terreno de fundação podendo ser modelado através da hipótese de Winkler ou como um semi-espacô elástico e homogêneo. É apresentada ainda uma aplicação numérica do método para um pórtico plano com cinco pavimentos.

KING e CHANDRASEKARAN (1977) apresentam um método para análise de interação solo-estrutura em pórticos com fundações do tipo radier assente em depósitos de argilas sobredensadas. É apresentada, também, uma aplicação numérica para o caso de um pórtico espacial com múltiplos pavimentos, e os resultados são comparados com

métodos que utilizam elementos finitos para modelagem do terreno de fundação .

BROWN (1977) apresenta um método que permite levar em consideração o efeito de creep do solo em análises de interação solo-estrutura. Para o caso de um pórtico plano com um pavimento e com fundação do tipo viga, são apresentados os resultados de uma aplicação numérica do método, com ênfase ao efeito do creep do solo na variação do recalque diferencial, momento fletor na superestrutura e carga vertical das colunas periféricas.

DEMENECHI (1981) apresenta um método para análise de interação solo-estrutura para o caso de estruturas reticuladas com fundações contínuas (vigas ou radiers). Tal método se baseia no método da rigidez, que é utilizado em análise matricial de estruturas.

VILADKAR e PRAKASH (1987) apresentam um método para análises de interação solo-estrutura em que cada apoio é substituído por um sistema de molas, no sentido de se simular os seus deslocamentos (translação e rotações). Com o objetivo de aferir o método proposto, foi instrumentado e experimentado um pórtico plano com pequenas dimensões. A comparação entre os resultados teóricos e experimentais, segundo os autores, comprova a aplicabilidade do método a problemas reais.

AOKI (1987) apresenta um modelo simples de transferência de carga vertical de uma estaca isolada sujeita a carga axial de compressão em um meio elástico estratificado. Através de um procedimento iterativo, podem ser obtidas as cargas e os recalques finais para cada

estaca. É apresentado ainda o caso da análise de um silo pré-moldado com fundação do tipo estacas, construído em dois diferentes tipos de terreno de fundação, havendo uma grande diferença quanto aos seus desempenhos.

### III.3. O MÉTODO PROPOSTO POR POULOS (1975a)

#### III.3.1. Generalidades

A metodologia considerada neste trabalho para o desenvolvimento de um estudo paramétrico dos fatores influentes na uniformização de recalques de edificações, é a proposta por POULOS (1975a). Esta metodologia possibilita uma análise tridimensional da fundação, combinada com uma análise da interação superestrutura-fundação na qual a rigidez relativa estrutura-solo é considerada.

Embora neste trabalho tenham sido analisadas estruturas aporticadas com fundações superficiais do tipo sapatas isoladas, o método pode também ser aplicado a fundações superficiais combinadas ou fundações profundas.

Nos métodos convencionais de análises de recalques, as cargas na fundação são tratadas como grandezas conhecidas; porém, numa análise em que é considerada a interação solo-estrutura, estas cargas são incógnitas. Esta análise com interação requer o desenvolvimento de dois conjuntos de equações:

- (a) As equações que se referem ao comportamento da superestrutura e da fundação, em termos de cargas externas aplicadas e reações na fundação desconhecidas (chamadas de equações de "interação superestrutura-fundação").
- (b) As equações do comportamento da fundação e do solo, em termos de reações na fundação desconhecidas e propriedades do solo (chamadas de equações de "interação solo-fundação").

### III.3.2. Interação Superestrutura-Fundação

A equação que governa a interação superestrutura-fundação é:

$$\{V\} = \{V_0\} + [SM]\{\delta\} \quad (\text{III.1})$$

Onde:  $\{V\}$  = Vetor das reações de apoio considerando-se a interação solo-estrutura;

$\{V_0\}$  = Vetor das reações de apoio considerando-se os apoios como indeslocáveis, ou seja, calculado convencionalmente;

$\{\delta\}$  = Vetor dos deslocamentos (translações e rotações) dos apoios considerando-se a interação solo-estrutura;

[SM] = Matriz de rigidez da estrutura, que relaciona as reações de apoio adicionais a deslocamentos unitários dos mesmos.

No caso mais geral, haverá 06 (seis) componentes de reação e 06 (seis) componentes de deslocamento para cada apoio, sendo 03 (três) forças e 03 (três) momentos, e 03 (três) translações e 03 (três) rotações, respectivamente. Então, para uma estrutura com n apoios, tem-se os vetores  $(V)$ ,  $(V_o)$  e  $(\delta)$  de ordem  $6n$ , e a matriz [SM] como quadrada de ordem  $6n$ . Em muitos casos, no entanto, algumas destas componentes de reação e deslocamento podem ser desprezadas, como será visto mais adiante.

O vetor  $(V_o)$  pode ser calculado a partir de uma análise estrutural tradicional na qual os apoios não recalcam, e é função do tipo de estrutura e do carregamento aplicado. A matriz [SM] pode ser calculada a partir de uma análise semelhante, em que sejam obtidas as reações de apoio adicionais devido a deslocamentos unitários impostos aos mesmos. Neste estágio os vetores  $(V)$  e  $(\delta)$  permanecem como incógnitas.

### III.3.3. Interação Solo-Fundação

A equação que governa a interação solo-fundação é:

$$\{ \delta \} = [FM]\{ V \} \quad (\text{III.2})$$

Onde:  $[FM]$  = Matriz de flexibilidade da fundação, que relaciona os deslocamentos dos apoios a carregamento unitário dos mesmos.

A matriz  $[FM]$  é da mesma ordem que  $[SM]$  e seus elementos podem ser obtidos a partir de uma análise de interação solo-fundação, dependendo do tipo da fundação, natureza das reações de apoio e propriedades de deformação do terreno. Ressalta-se que os deslocamentos de um apoio podem não depender apenas do seu carregamento, mas também do carregamento dos demais apoios, ou seja, os elementos fora da diagonal principal da matriz  $[FM]$  podem ser não-nulos.

### III.3.4. Interacção Solo-Estrutura

Combinando-se as equações (III.1) e (III.2), tem-se :

$$\{ V \} = \{ V_0 \} + [SM][FM]\{ V \}; \quad (\text{III.3})$$

$$\therefore \{ V_0 \} = \{ V \} - [SM][FM]\{ V \}; \quad (\text{III.4})$$

$$\therefore \{ V_0 \} = [I - [SM][FM]]\{ V \}; \quad (\text{III.5})$$

$$\therefore \{ V_0 \} = [IT]\{ V \} \quad (\text{III.6})$$

Onde:  $I$  = Matriz identidade.

A partir da equação (III.6) pode-se obter o vetor ( $V$ ). A aplicação dos resultados na equação (III.2) leva à determinação do vetor ( $\delta$ ).

A equação (III.6) é a que governa a interação solo-estrutura e pode ser aplicada a qualquer tipo de estrutura com qualquer tipo de fundação, assente em qualquer tipo de terreno. Se o comportamento do solo e/ou do material da estrutura for não-linear, uma solução iterativa desta equação será necessária.

### III.4. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES

#### III.4.1. Generalidades

Com o objetivo de servir de subsídio a um estudo paramétrico dos fatores influentes na interação solo-estrutura em edificações, foi desenvolvido pelo autor um programa computacional para resolução da equação (III.6), proposta pelo método de Poulos (1975a). Este programa, denominado de INTERA foi desenvolvido na linguagem BASIC e pode ser implantado em qualquer microcomputador da linha PC.

A partir de dois subprogramas, um para análise estrutural e determinação do vetor ( $V_0$ ) e da matriz [ $SM$ ], e outro para a análise de recalques e determinação da matriz [ $FM$ ], monta-se o sistema previsto na equação (III.6). O sistema é resolvido através do método da eliminação de Gauss, obtendo-se, então, os

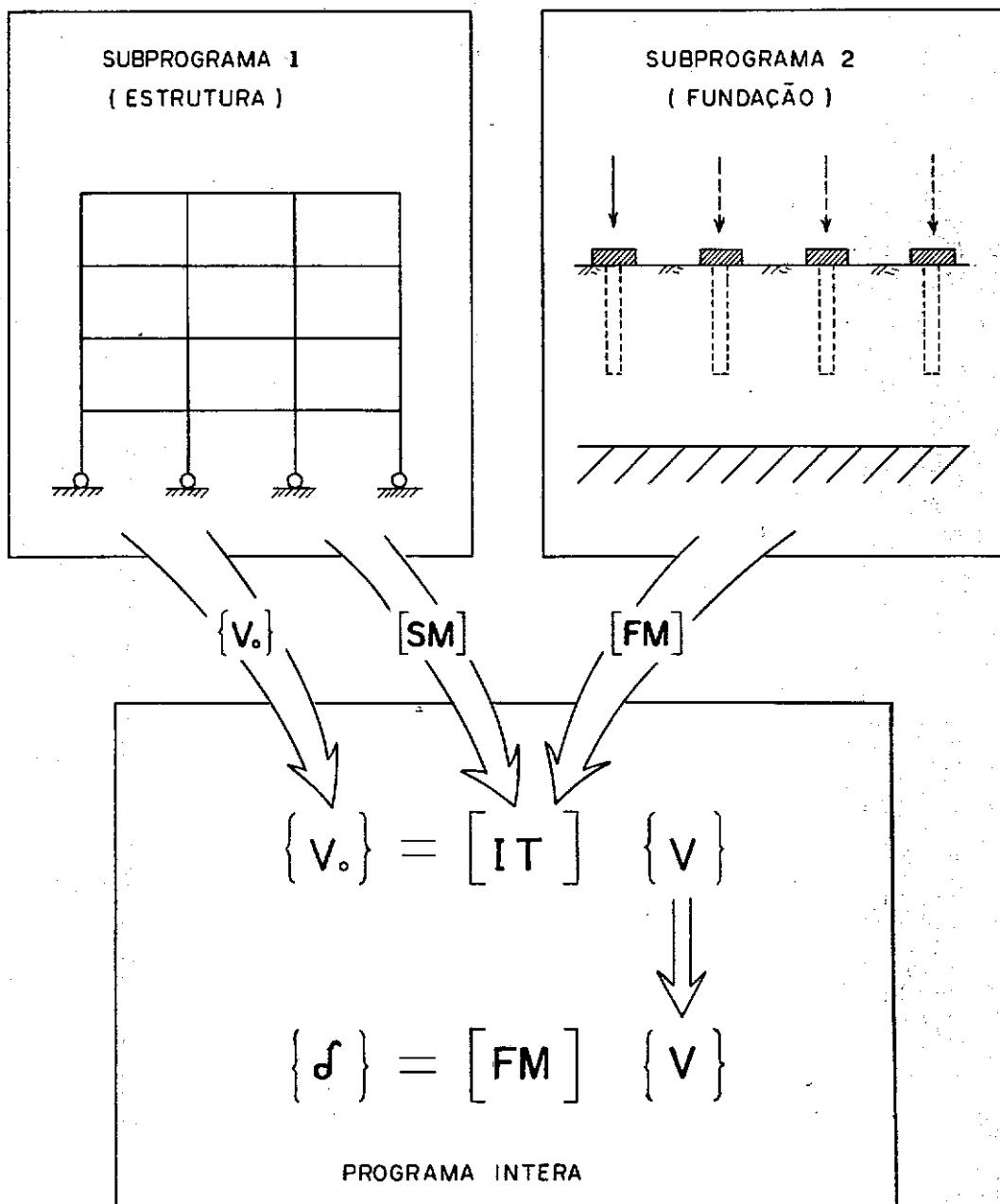


FIG. III. 3 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL INTERA .

vetores ( $\mathbf{V}$ ) e ( $\delta$ ) (fig. III.3).

Para a determinação de ( $\mathbf{V}_0$ ) e [ $\mathbf{SM}$ ] foi utilizado o programa computacional "SAFE - Structural Analysis by Finite Elements", também implantado em microcomputadores da linha PC. Este programa, baseado no método dos elementos finitos, permite a análise de estruturas em duas ou três dimensões, e é fácil e rápido de ser usado.

Para a determinação da matriz [ $\mathbf{FM}$ ] foram utilizados dois diferentes métodos para estimativa de recalques, dependendo de se considerar ou não a influência do carregamento de um apoio no recalque dos demais, como será visto no item (IV.3).

#### III.4.2. Estrutura Básica do Programa

A estrutura básica do programa INTERA consiste na entrada de dados, montagem e resolução do sistema de equações, e apresentação dos resultados.

- A entrada de dados do programa pode ser feita através de três opções: via teclado, via teclado com geração de arquivo e via arquivo. Estes dados são classificados em dois tipos: dados da estrutura (número de apoios e elementos de ( $\mathbf{V}_0$ ) e [ $\mathbf{SM}$ ]) e dados do solo (Módulo de Young e elementos de [ $\mathbf{FM}$ ] );

- A montagem do sistema de equações depende do número de apoios da estrutura, e é feita utilizando-se conceitos de álgebra matricial;

- A resolução do sistema de equações é feita

através do método da eliminação de Gauss, onde a determinação dos elementos incógnitos é procedida através de cálculos iterativos;

- A apresentação dos resultados pode ser feita através da tela do monitor do microcomputador e/ou através de impressoras na forma de planilhas. Nesta planilha são apresentados os dados da estrutura e do solo, e para cada apoio os valores das reações e recalques considerando-se ou não a interação solo-estrutura (tabela III.1).

A utilização do programa é extremamente simples e não requer do usuário um conhecimento da linguagem de programação, pois o mesmo é auto-explicativo. A sua listagem encontra-se apresentada no apêndice I.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
COPPE - PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL  
AREA DE GEOTECNIA

ANALISE DE INTERACAO SOLO-ESTRUTURA - METODO DE POULOS(1975)

**((DADOS GERAIS))**

ARQUIVO DE DADOS DA ESTRUTURA:TESE01.EST  
ARQUIVO DE DADOS DO SOLO:TESE01.SOL  
ESTRUTURA:PORTICO PLANO TIPO 01 - 1o. PAVIMENTO  
NUMERO DE APOIOS DA ESTRUTURA: 6  
MODULO DE YOUNG DO SOLO (tf/m<sup>2</sup>):7324.00

**((REACOES E RECALQUES))**

APOIO	REACOES DE APOIO(tf)		RECALQUES(mm)	
	CONVENCIONAL	COM INTERACAO	CONVENCIONAL	COM INTERACAO
1	132.80	137.99	4.53	4.71
2	319.80	312.40	10.92	10.66
3	297.40	299.61	10.15	10.23
4	297.40	299.61	10.15	10.23
5	319.80	312.40	10.92	10.66
6	132.80	137.99	4.53	4.71

**Tabela III.i ~ Planilha de apresentação dos resultados resultados do programa INTERA.**

## CAPÍTULO IV - ESTUDO PARAMÉTRICO DE FATORES INFLUENTES INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

### IV.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Dentre as áreas de pesquisas de interação solo-estrutura em edificações, o desenvolvimento de estudos paramétricos tem sido uma das que mais tem avançado nos últimos vinte anos. A maioria destes estudos têm sido desenvolvidos baseados em simples idealizações do comportamento do solo, tais como modelos elásticos e elastoplásticos. Apesar da simplicidade destes modelos, os resultados destes estudos representam uma inestimável contribuição ao desenvolvimento de anteprojetos, atuando no sentido de dar ao projetista um sentimento físico do problema, além de influenciar decisivamente na escolha dos parâmetros envolvidos, como observa POULOS (1981).

Baseando-se neste princípio de se dar um maior subsídio à compreensão do mecanismo de interação solo-estrutura em edificações, é que foi desenvolvido um estudo paramétrico dos principais fatores envolvidos neste mecanismo. As análises são divididas em função da consideração ou não da interação entre elementos de fundação.

Segundo MEYERHOF (1953), enquanto os recalques absolutos são importantes nos casos de análises da funcionalidade da edificação e são pouco influenciados pela rigidez da estrutura, os recalques diferenciais

dependem não apenas dos fatores que governam os recalques absolutos, mas também do tipo e rigidez da estrutura. São por isto mais difíceis de serem estimados e são também mais importantes, pois podem afetar a estabilidade da edificação sob carga de trabalho. Diante disto, é que será dada neste estudo paramétrico uma maior ênfase aos efeitos da interação solo-estrutura sobre os recalques diferenciais.

Para a compreensão deste estudo, alguns parâmetros necessitam ser definidos. Alguns destes parâmetros apresentam diferentes definições. As definições aqui apresentadas são as propostas por POULOS (1975a).

#### - Rrigidez Relativa Estrutura-Solo (K<sub>ss</sub>)

$$K_{ss} = \frac{Ec \cdot Iv}{Es \cdot l^4} \quad (IV.1)$$

Onde: Ec = Módulo de elasticidade do material da estrutura;

Iv = Inércia à flexão das vigas da edificação;

Es = Módulo de Young do solo;

l = Vôo entre colunas.

#### - Fator de Recalque (K<sub>w</sub>)

$$K_w = \frac{Es \cdot l}{QV} \quad (IV.2)$$

Onde:  $QV$  = Carga vertical total aplicada dividida pelo número de vãos do pórtico.

Ao multiplicar-se os recalques pelo fator de recalque, os mesmos tornam-se grandezas adimensionais (POULOS, 1975a).

#### - Razão de Uniformização de Recalques (RU)

$$RU = \frac{\Delta W_{int}}{\Delta W_{con}} \quad (IV.3)$$

Onde:  $\Delta W_{int}$  = Recalque diferencial máximo estimado levando-se em consideração a interação solo-estrutura;

$\Delta W_{con}$  = Recalque diferencial máximo estimado convencionalmente, ou seja, desprezando-se a interação solo-estrutura.

Na realidade, como observam WOOD e LARNACH (1975), quem governa o desempenho da edificação é a rigidez relativa entre o terreno de fundação e a estrutura, isto é, uma estrutura assente em rocha pode se comportar como flexível, enquanto a mesma estrutura assente em uma argila mole pode se comportar como rígida.

O quadro (IV.1) apresenta uma indicação de como os casos extremos de rigidez da estrutura e do solo

repercuteem nos parâmetros acima definidos e no desempenho da edificação.

Observa-se que se  $K_{ss}$  tender a zero, a edificação se comportará como flexível e as reações de apoio tenderão a ser aquelas obtidas através do procedimento convencional do cálculo estrutural, ou seja,  $\{V\} \cong \{V_0\}$ . Neste caso a interação solo-estrutura pouco influenciará os recalques diferenciais e, consequentemente, o valor de  $R_U$  tenderá para a unidade.

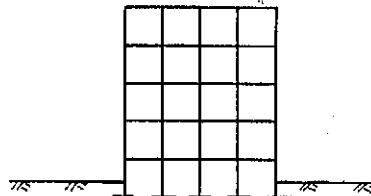
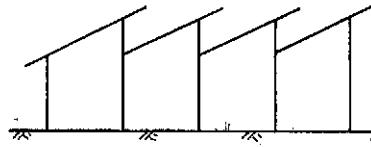
No caso de  $K_{ss}$  tender a um valor elevado, há uma grande tendência à uniformização dos recalques, com o valor de  $R_U$  tendendo para zero.

É importante observar, no entanto, que um baixo valor de  $R_U$  não significa necessariamente um baixo valor do recalque diferencial, mas uma grande diferença em relação ao valor estimado convencionalmente.

#### IV.2. MODELAGEM DA ESTRUTURA

As estruturas analisadas são aporticadas com fundações do tipo sapatas isoladas, sujeitas apenas a cargas verticais e estáticas. Estas estruturas são modeladas como reticuladas, constituídas por "membros", que são elementos em que uma de suas dimensões é muito maior que as demais. Os pontos de interseção dos membros, assim como os pontos de apoio e extremidades livres dos membros, são denominados de "nós". No caso dos pórticos, os "nós" entre os membros são ligações rígidas.

Como já foi visto, as análises estruturais

ESTRUTURA	PARÂMETRO	TERRENO DE FUNDAÇÃO	
		ARGILA MOLE	AREIA MUITO COMPACTA
 RÍGIDA	K <sub>ss</sub>	MUITO ELEVADO	ELEVADO
	W̄	ELEVADO	MUITO BAIXO
	ΔW <sub>MAX</sub>	F ( K <sub>ss</sub> , W̄ )	MUITO BAIXO
	R <sub>U</sub>	PRATICAMENTE NULO	F ( K <sub>ss</sub> )
 FLEXÍVEL	K <sub>ss</sub>	BAIXO	MUITO BAIXO
	W̄	ELEVADO	MUITO BAIXO
	ΔW <sub>MAX</sub>	F ( K <sub>ss</sub> , W̄ )	MUITO BAIXO
	R <sub>U</sub>	F ( K <sub>ss</sub> )	PROXIMO DA UNIDADE

QUADRO IV, 1 - VARIAÇÃO DA RIGIDEZ DA ESTRUTURA E DO TERRENO DE FUNDAÇÃO  
E SUA REPERCUSSÃO NO DESEMPENHO DA EDIFICAÇÃO.

para determinação de ( $V_0$ ) e [ $SM$ ] foram baseadas no método dos elementos finitos, utilizando-se para tal o programa "SAFE - Structural Analysis by Finite Elements".

Com o objetivo de se simplificar as análises foram adotadas algumas hipóteses:

(i) Os apoios (ligações dos pilares com as fundações) são considerados nós rotulados, ou seja, admite-se que as fundações possam sofrer rotação;

(ii) O carregamento é vertical, simétrico e uniformemente distribuído nas vigas;

(iii) As rigidezes das paredes e lajes não são consideradas;

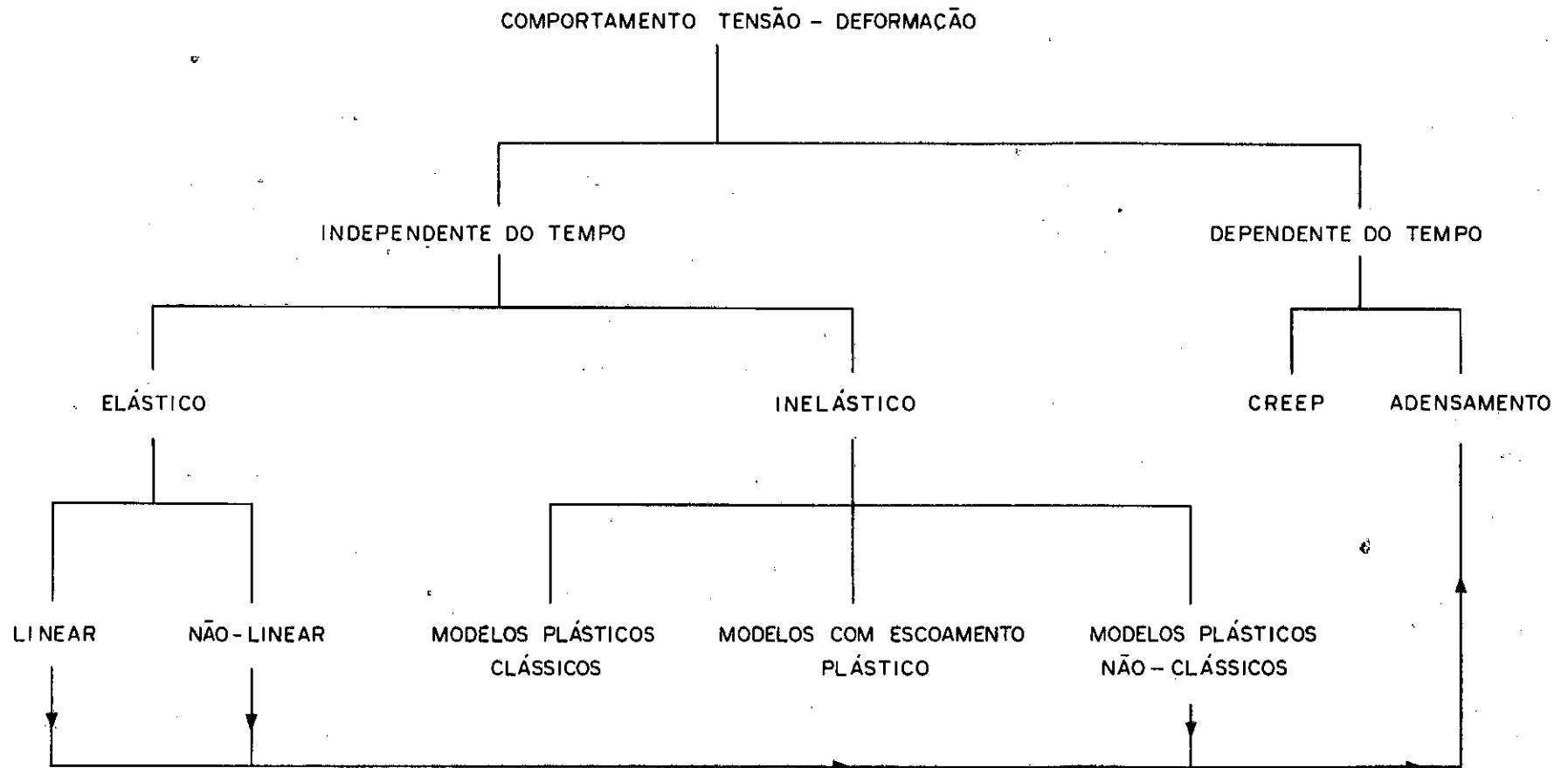
(iv) As propriedades dos materiais estruturais não variam com o tempo;

Em consequência de (i) e (ii), as reações de apoio e deslocamentos são verticais e horizontais.

#### IV.3. MODELAGEM DO SOLO

Como já foi visto no item IV.1, os estudos analíticos para avaliação de problemas de interação solo-estrutura devem levar em consideração as propriedades de deformação e a resistência do terreno de fundação e a rigidez e resistência da estrutura. No caso do terreno de fundação, isto requer a adoção de um modelo para simular o seu comportamento tensão-deformação-tempo. A figura (IV.1) apresenta uma classificação destes modelos proposta por MORGERNSTERN (1975).

O comportamento tensão-deformação de um solo

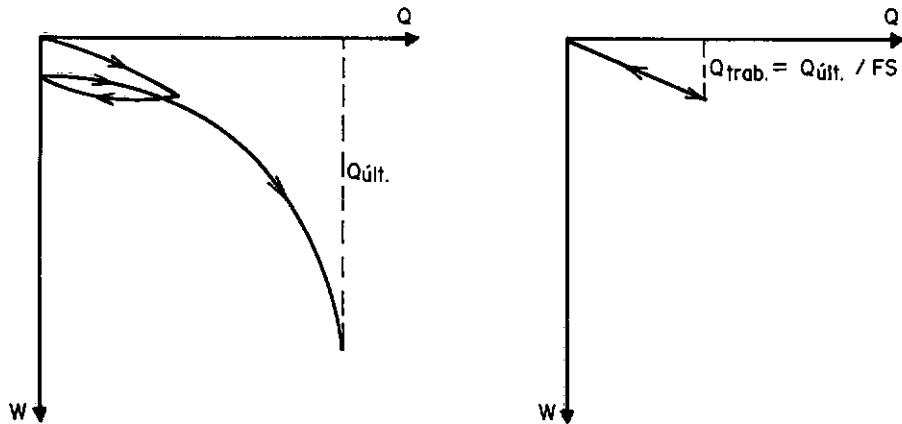


**FIG. IV. 1-CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TENSÃO - DEFORMAÇÃO EM SOLOS  
( MORGERNSTERN, 1975 )**

é, em geral, marcadamente não-linear, irreversível e com propriedades dependentes do tempo. No caso de um terreno de fundação, ainda devem ser considerados os aspectos da heterogeneidade e anisotropia. Então, qualquer tipo de procedimento para análise de problemas de interação solo-estrutura que envolva todas estas características, torna-se na prática muito complexo e, muitas vezes, inviável.

No desenvolvimento do estudo paramétrico apresentado neste trabalho, o solo foi modelado como um material elástico linear. É reconhecido que a hipótese de linearidade e reversibilidade de deformações para o caso de massas do solo não é nunca rigorosamente satisfeita. Apesar das suas limitações, ela é a mais simples idealização do comportamento do solo, reduzindo consideravelmente o trabalho analítico no estudo de determinados casos. CHEN e SNITBHAN (1977) observam que a adoção desta hipótese pode levar a obtenção de significativas informações para muitos problemas práticos envolvendo interação solo-estrutura, que de outra maneira seriam intratáveis. Poulos (1981) coloca que este modelo se mostra satisfatório no sentido de se obter uma base para o desenvolvimento de estudos paramétricos de problemas de interação solo-estrutura. MORGENSEN (1975) observa também que para o caso de análises com fatores de segurança elevados, o modelo elástico linear pode levar a previsões de recalques bastante acuradas (fig. IV.2).

É admitida no estudo paramétrico a hipótese de que as propriedades de deformação do solo são lineares,



- CURVA CARGA-RECALQUE TÍPICA PARA  
UMA FUNDAÇÃO SUPERFICIAL .

- MODELO ELÁSTICO LINEAR .

FIG. IV.2 - SIMULAÇÃO DE UMA TÍPICA CURVA CARGA-RECALQUE  
ATRAVÉS DO MODELO ELÁSTICO LINEAR .

inclusive independentes do tempo.

Na primeira parte do estudo paramétrico, são feitas análises desprezando-se a interação entre os elementos de fundação, ou seja, o recalque de cada sapata depende exclusivamente do seu carregamento. Isto equivale a se ter uma mola representando o comportamento da sapata. Isto significa, ainda, que todos os elementos fora da diagonal principal de [FM] são nulos. Na determinação dos elementos de [FM] foi utilizado um método de estimativa de recalques de sapatas sobre um meio elástico baseado na fórmula:

$$W = q \cdot B_f \cdot \frac{i - \mu_s^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_d \quad (\text{IV.4})$$

Onde:  $q$  = Pressão média aplicada;

$B_f$  = Largura da sapata;

$L_f$  = Comprimento da sapata;

$D$  = Profundidade da sapata;

$\mu_s$  = Coeficiente de Poisson do solo;

$I_s$  = Fator de forma (função de  $L_f/B_f$ );

$I_d$  = Fator de embutimento (função de  $D/B_f$ ).

Os parâmetros do solo podem ser estimados para uso na prática através de correlações com ensaios "in situ", como as propostas por BARATA (1984) e BOWLES (1987). Para este estudo paramétrico foram adotados valores para  $E_s$  e  $I_s$  que conduzem à faixa de  $0,001 < K_{ss} < 1$ . Ainda, para definição das molas que representam o

comportamento das sapatas, adotou-se:

$$\mu_s = 0,30$$

$$I_s = 0,95$$

$$I_d = i$$

$$B_f = L_f = 3,5m$$

Dai resulta de que a flexibilidade (inverso da rigidez) será:

$$K' = \frac{W}{\theta} = \frac{i - \mu_s^2}{E_s} \cdot \frac{i}{L_f} \cdot I_s \cdot I_d;$$

$$K' \approx \frac{0,250}{E_s} \quad (\text{m/KN}) \quad (\text{IV.5})$$

(Es em KN/m<sup>2</sup>)

Na segunda parte do estudo paramétrico, as análises levam em consideração a interação entre os elementos de fundação, com a determinação dos elementos de [FM] sendo feita com base no método proposto por AOKI e LOPES (1975), que pode ser visto no apêndice II.

#### IV.4. ANÁLISES DESPREZANDO-SE A INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

##### IV.4.1. Considerações Iniciais

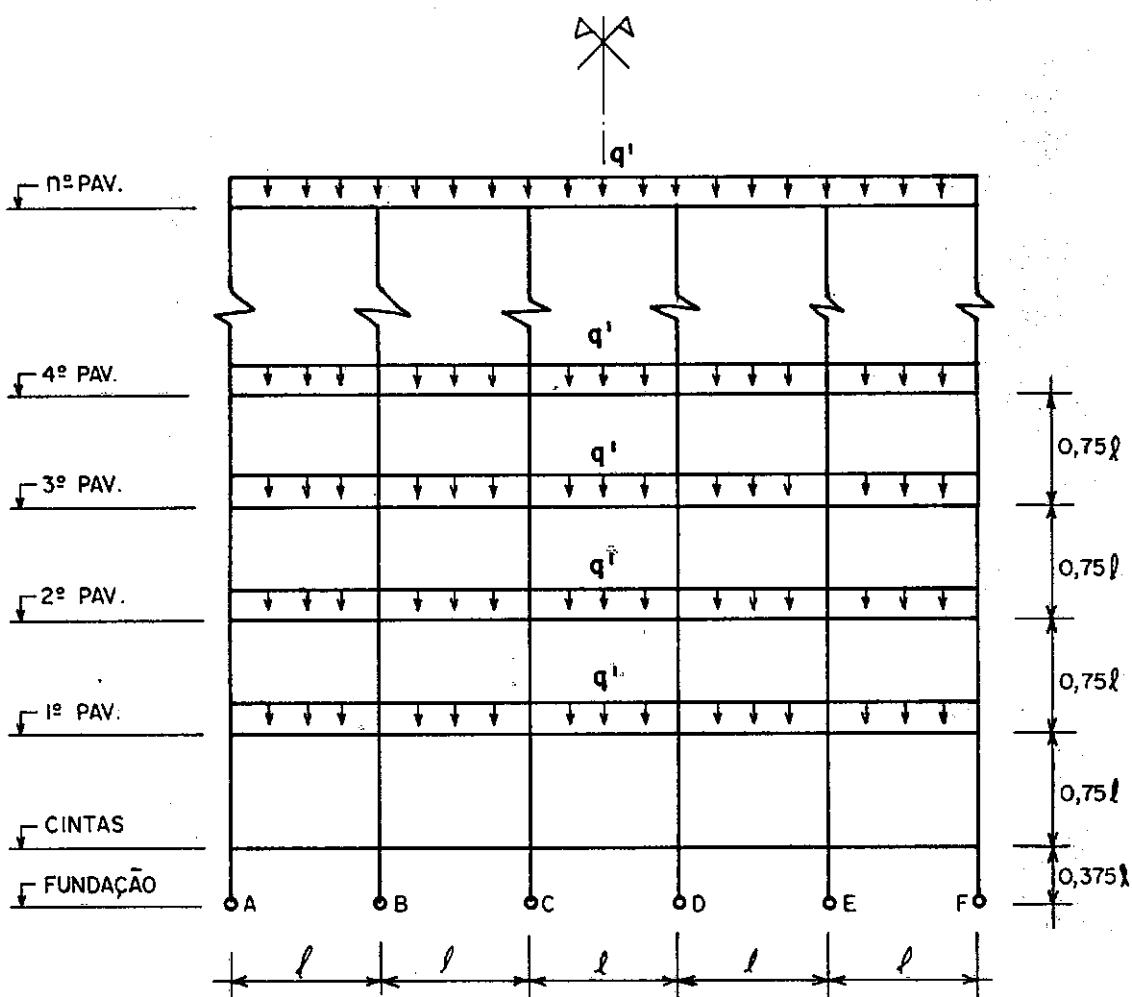
Para a avaliação dos diversos fatores que influenciam a uniformização dos recalques de edificações,

foi considerado um pórtico plano simétrico com cinco vãos e número de pavimentos variável (01, 02, 03, 04, 05, 08, 11 e 15 pavimentos), como é mostrado na figura (IV.3). É importante observar que apesar do número de pavimentos variar, o carregamento total permanece constante, no sentido de se permitir uma comparação dos valores obtidos nas análises com diferentes números de pavimentos.

Nestas análises é admitida a hipótese de Winkler, onde são consideradas molas abaixo de cada apoio da superestrutura e é ignorada a interação entre os elementos de fundação para fins de recalques.

#### IV.4.2. Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo na Grandeza dos Recalques

No sentido de se avaliar o efeito da interação solo-estrutura na grandeza dos recalques absolutos e diferenciais, foi feita a análise de um pórtico plano para diferentes valores de  $K_{ss}$ . As figuras (IV.4) e (IV.5) mostram a influência de  $K_{ss}$  nos recalques absoluto e diferencial máximos para o pórtico com 01 (um) pavimento. Observa-se que em ambos os casos os valores dos recalques máximos (absoluto e diferencial) considerando-se a interação solo-estrutura diminuem com o aumento de  $K_{ss}$ , enquanto no processo convencional de estimativa de recalques a grandeza dos mesmos independe do valor de  $K_{ss}$ . Observa-se, também, que o recalque diferencial é bem mais influenciado pela interação solo-estrutura que o recalque absoluto, confirmando as observações feitas por MEYERHOF



$$I_v / I_p = 2,34$$

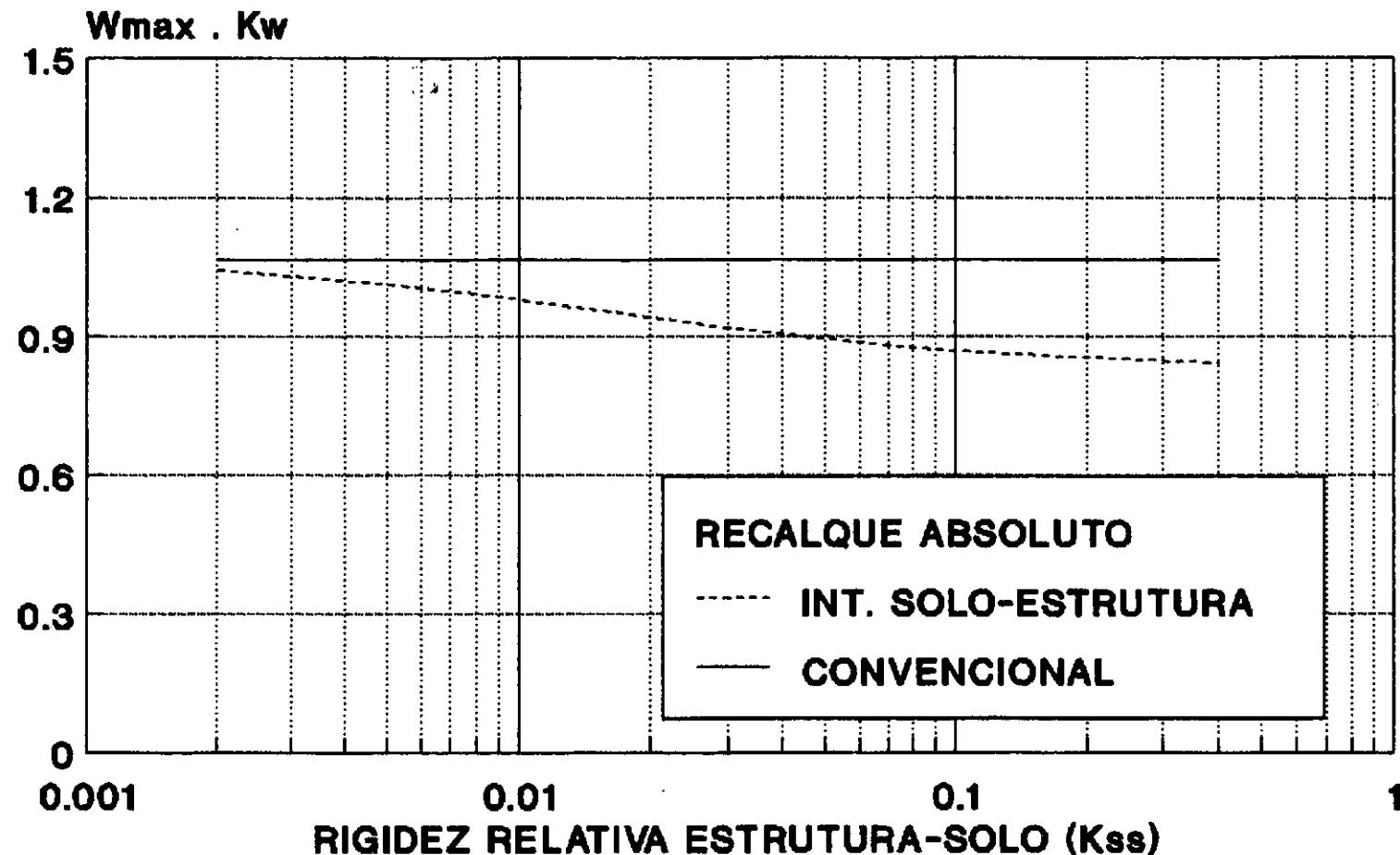
$$I_c / I_v = 1,67$$

$$\bullet \frac{q'}{n} = q / n$$

ONDE:  $I_v$ ,  $I_p$ ,  $I_c$  = INÉRCIA À FLEXÃO DAS VIGAS, PILARES E CINTAS RESPECTIVAMENTE;

$q$  = CARREGAMENTO UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO NAS VIGAS.

FIG. IV.3 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO PÓRTICO PLANO UTILIZADO NAS ANÁLISES DO ESTUDO PARAMÉTRICO.



**Fig. IV.4 - Influência da rigidez relativa estrutura-solo no recalque absoluto - pórtico plano com 01 pavimento.**

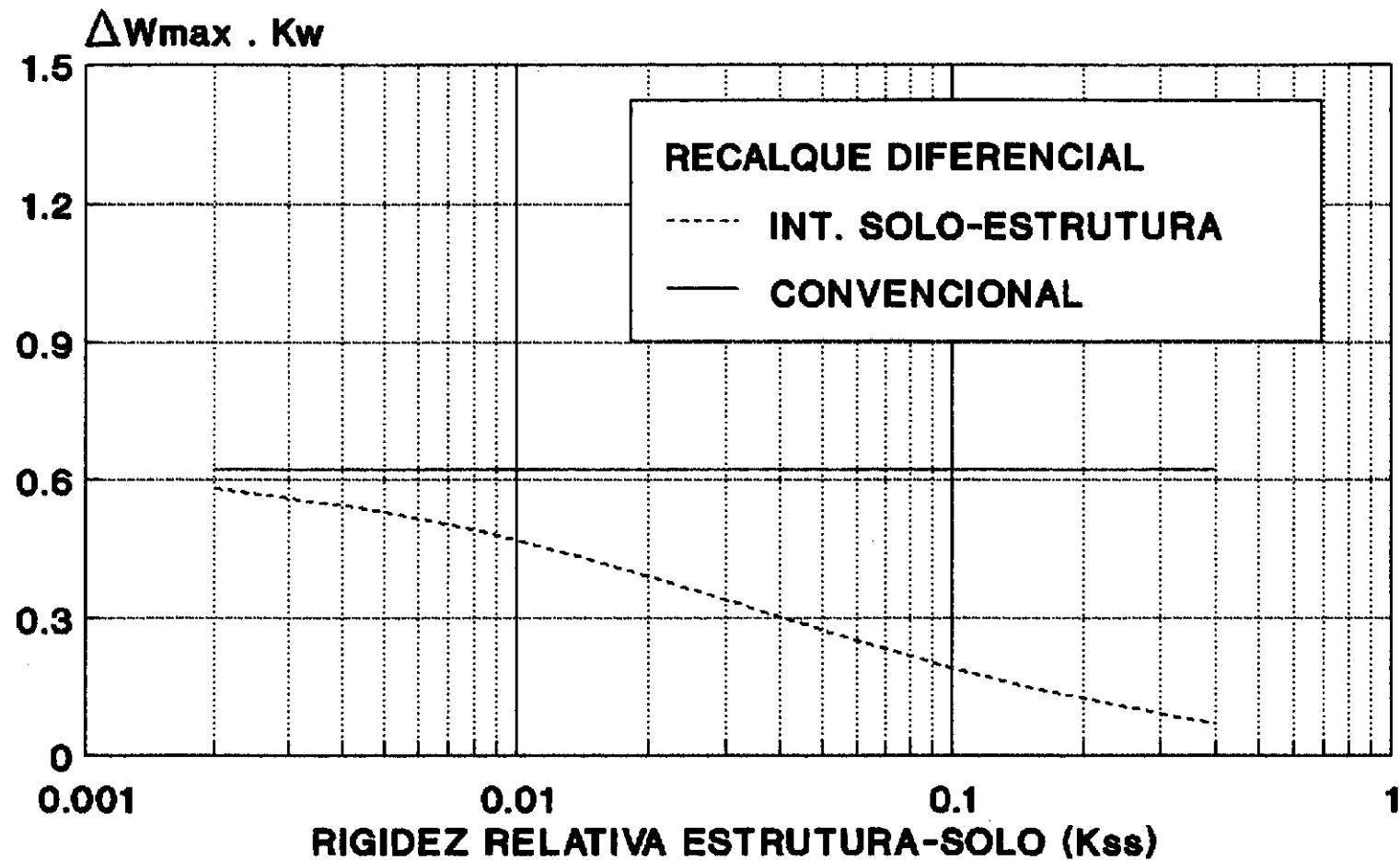


Fig. IV.5 - Influência da rigidez relativa estrutura-solo no recalque diferencial - pórtico plano com 01 pavimento.

(1979).

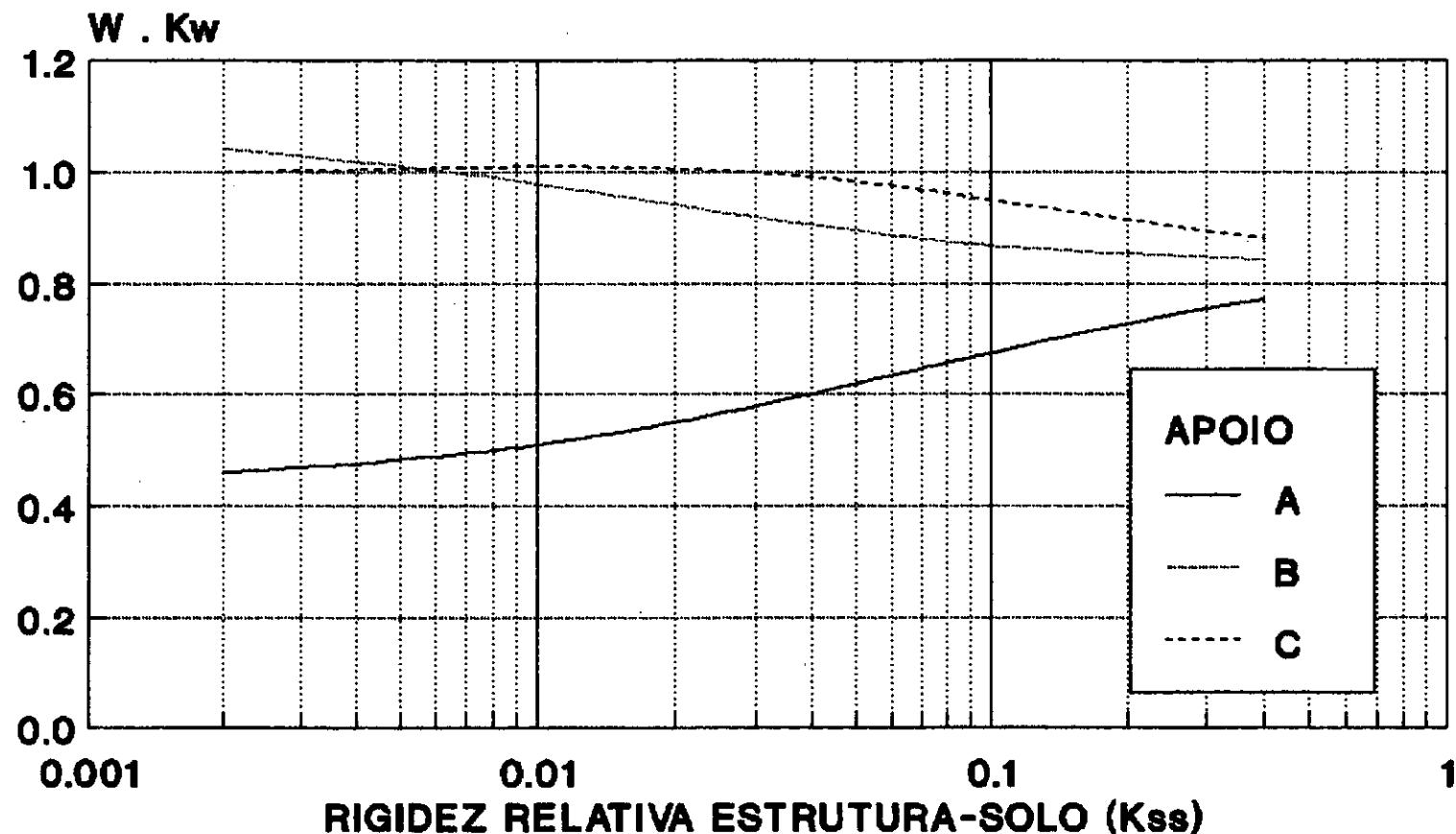
A figura (IV.6) apresenta a variação dos recalques absolutos dos apoios A, B e C considerando-se a interação solo-estrutura em função de  $K_{ss}$ . Observa-se que à medida que cresce o valor de  $K_{ss}$ , a distância entre as três curvas diminui e, consequentemente, os recalques diferenciais também diminuem, mas o recalque médio da edificação é o mesmo. Na realidade o que acontece é que a interação solo-estrutura faz com que a deformada de recalques torne-se mais suave, com os apoios mais carregados tendendo a recalcar menos que o previsto e os apoios menos carregados tendendo a recalcar mais que o previsto (fig. IV.7).

Seguindo-se esta tendência à uniformização dos recalques, há uma redistribuição de carga nos apoios, havendo uma transferência de carga dos apoios que tendem a recalcar mais para os que tendem a recalcar menos. Este acréscimo de carga em alguns pilares pode ser importante, como observa AOKI (1987).

#### IV.4.3. Influência do Número de Pavimentos da Edificação

Para se avaliar a influência do número de pavimentos da edificação na uniformização dos recalques, foram feitas análises com diferentes valores de  $K_{ss}$  para o caso do pórtico plano com 01, 02, 03, 04, 05, 08, 11 e 15 pavimentos.

A figura (IV.8) mostra a variação da razão de uniformização de recalques (RU) com a rigidez relativa



**Fig. IV.6 - Variação dos recalques absolutos em função de  $K_{ss}$  - pórtico plano com 01 pavimento.**

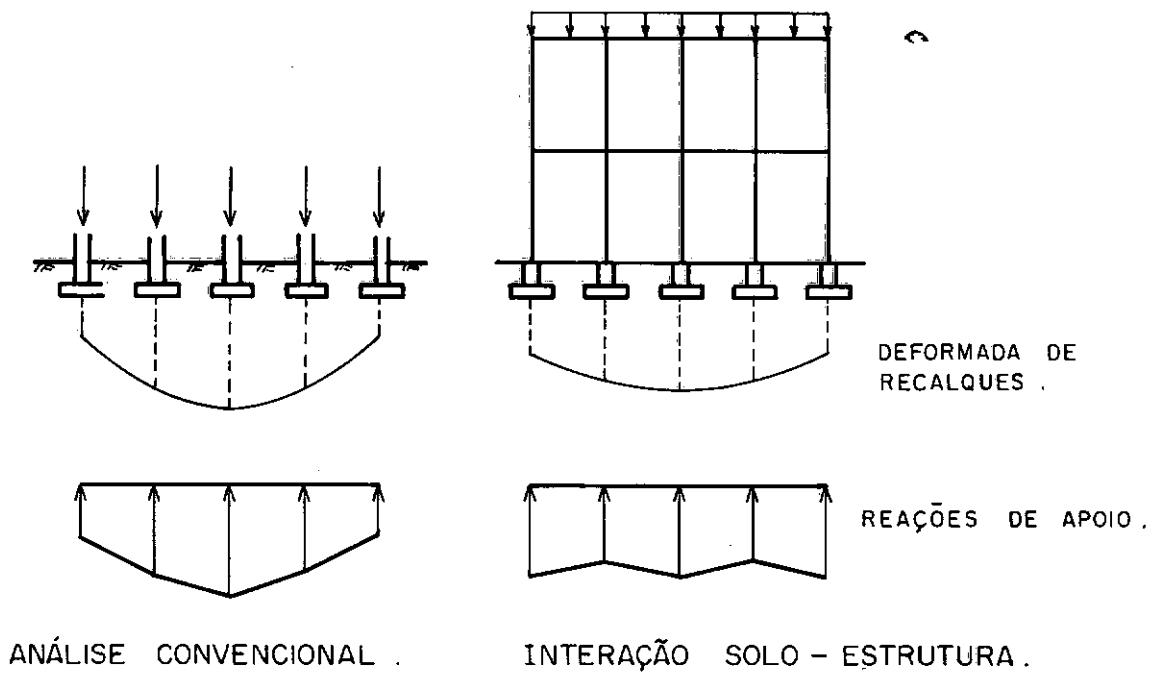


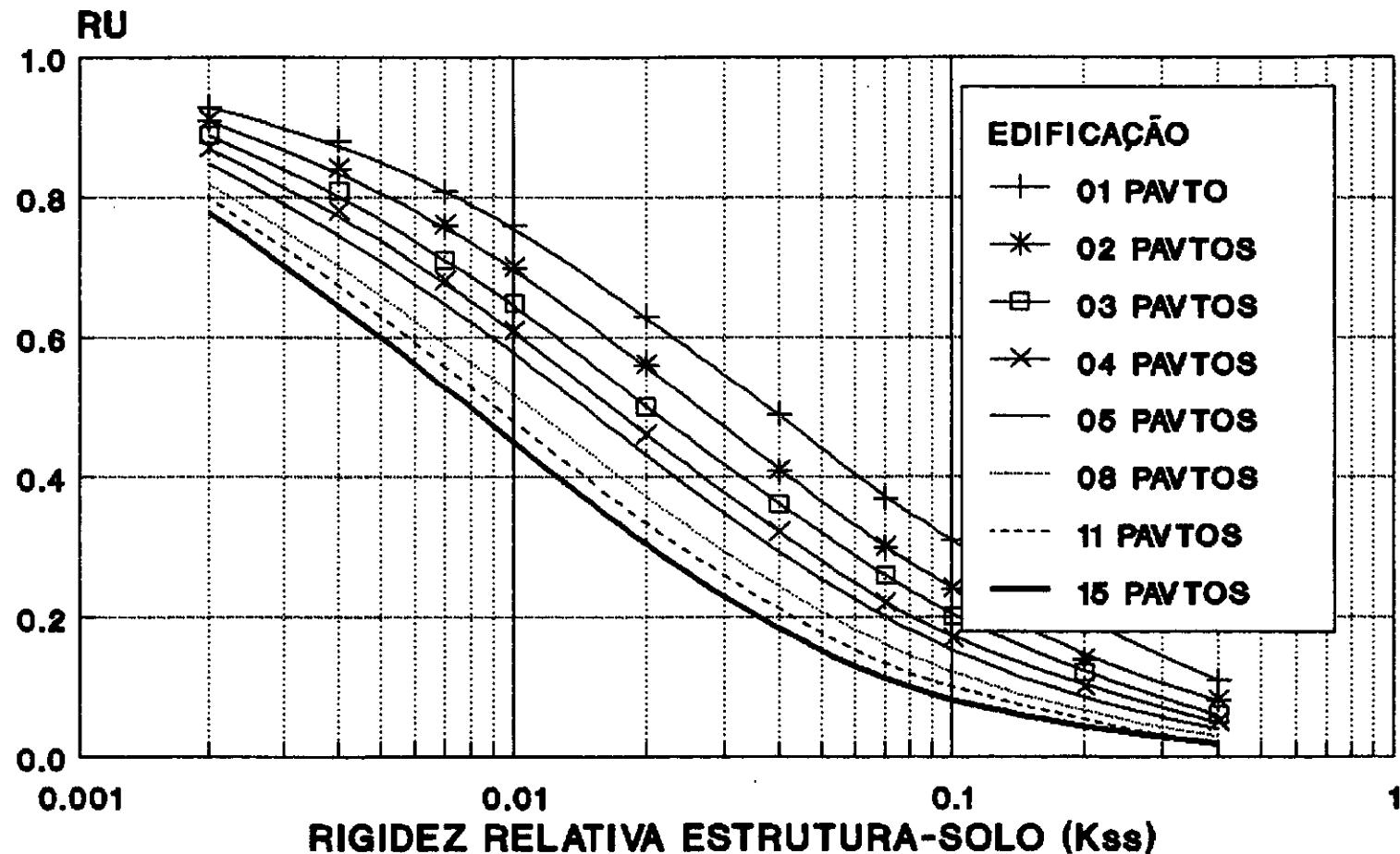
FIG. IV.7-EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO - ESTRUTURA NOS  
RECALQUES E REAÇÕES DE APOIO DE EDIFICAÇÕES .

estrutura-solo ( $K_{ss}$ ), para diferentes números de pavimentos da edificação. Observa-se para um determinado valor de  $K_{ss}$ , que o valor de RU diminui à medida que cresce o número de pavimentos da edificação. Isto é explicado pelo fato do aumento do número de pavimentos promover um aumento da rigidez global da estrutura, diminuindo, portanto, o nível dos recalques diferenciais.

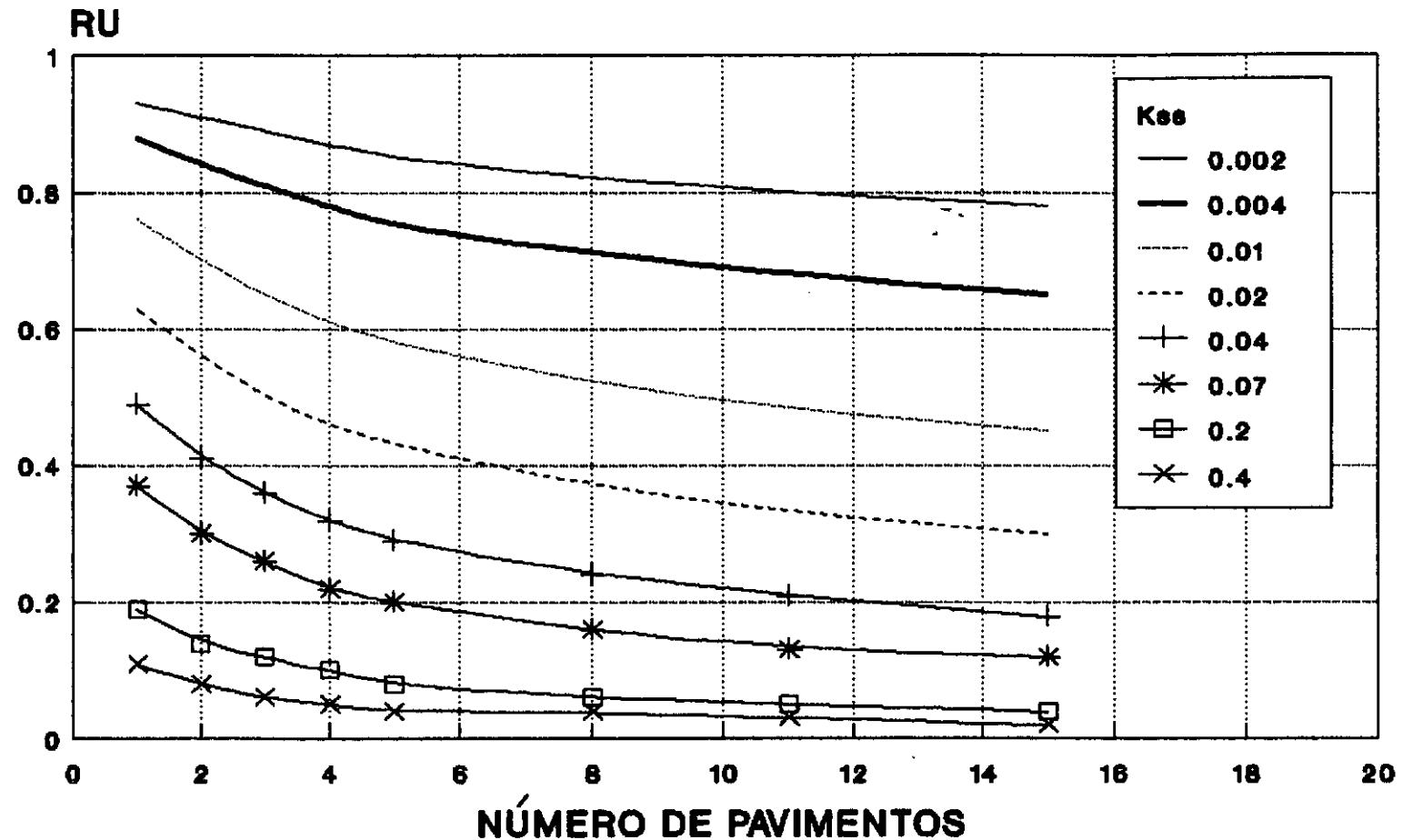
Baseando-se neste princípio é que MEYERHOF (1953) propõe que em uma análise de interação solo-estrutura, uma estrutura qualquer possa ser substituída por uma outra mais simples com rigidez equivalente. No caso analisado, o aumento do número de pavimentos pode ser substituído por um aumento do valor de  $K_{ss}$  (ver capítulo V).

Observa-se, também, que esta influência do número de pavimentos no valor de RU depende da faixa de rigidez relativa estrutura-solo. Para um melhor entendimento da contribuição do número de pavimentos da edificação na uniformização dos recalques, a figura (IV.9) apresenta a variação de RU com o número de pavimentos, para diferentes valores de  $K_{ss}$ . Observa-se que para o caso de altos ou baixos valores de  $K_{ss}$  ( $K_{ss} > 0,2$  ou  $K_{ss} < 0,004$ ), o número de pavimentos exerce uma influência menor no valor de RU que para o caso de valores intermediários de  $K_{ss}$ , ou seja, a influência do número de pavimentos é maior para o caso de estruturas semiflexíveis ou semi-rígidas.

Em 1986, BARATA propôs, em caráter experimental, um método para previsão de recalques



**Fig. IV.8 - Variação de RU em função da rigidez relativa estrutura-solo - pórtico com diferentes números de pavimentos.**



**Fig. IV.9 - Variação de RU em função do número de pavimentos da edificação para diferentes valores de  $K_{ss}$ .**

levando-se em consideração a rigidez da estrutura. Neste trabalho o autor tenta exprimir graficamente a relação entre a deflexão relativa e o recalque absoluto máximo em função da rigidez da estrutura. Apesar dos inúmeros fatores influentes nesta rigidez, o parâmetro  $H/L$ , que é a relação entre a altura da edificação e o seu comprimento em planta, é considerado como fator controlador desta rigidez. Através da plotagem neste gráfico de diversos casos citados na literatura nacional e internacional, verificou-se que estes pontos se situaram em uma larga faixa, dentro de duas curvas limites. Isto evidencia uma grande dispersão, o que se deve, segundo o autor, ao fato de que ali estão representadas edificações com estruturas e fundações variadas, em terrenos também diversificados, ou seja, o universo representado no gráfico é muito amplo e, por isto mesmo, disperso.

As figuras (IV.10) e (IV.11) mostram as pontos teóricos obtidos neste estudo paramétrico e a faixa sugerida por BARATA (1986). Verifica-se que praticamente todas os pontos teóricos situaram-se dentro da faixa proposta pelo referido autor, evidenciando para os casos analisados uma boa representatividade deste gráfico. Ressalta-se, ainda, que o estudo teórico revelou que a curvatura do limite inferior da faixa deveria ser menor que a proposta por BARATA (1986). A coleta de um maior número de casos reais de edificações monitoradas (especialmente estruturas flexíveis) pode levar a uma maior representatividade do gráfico.

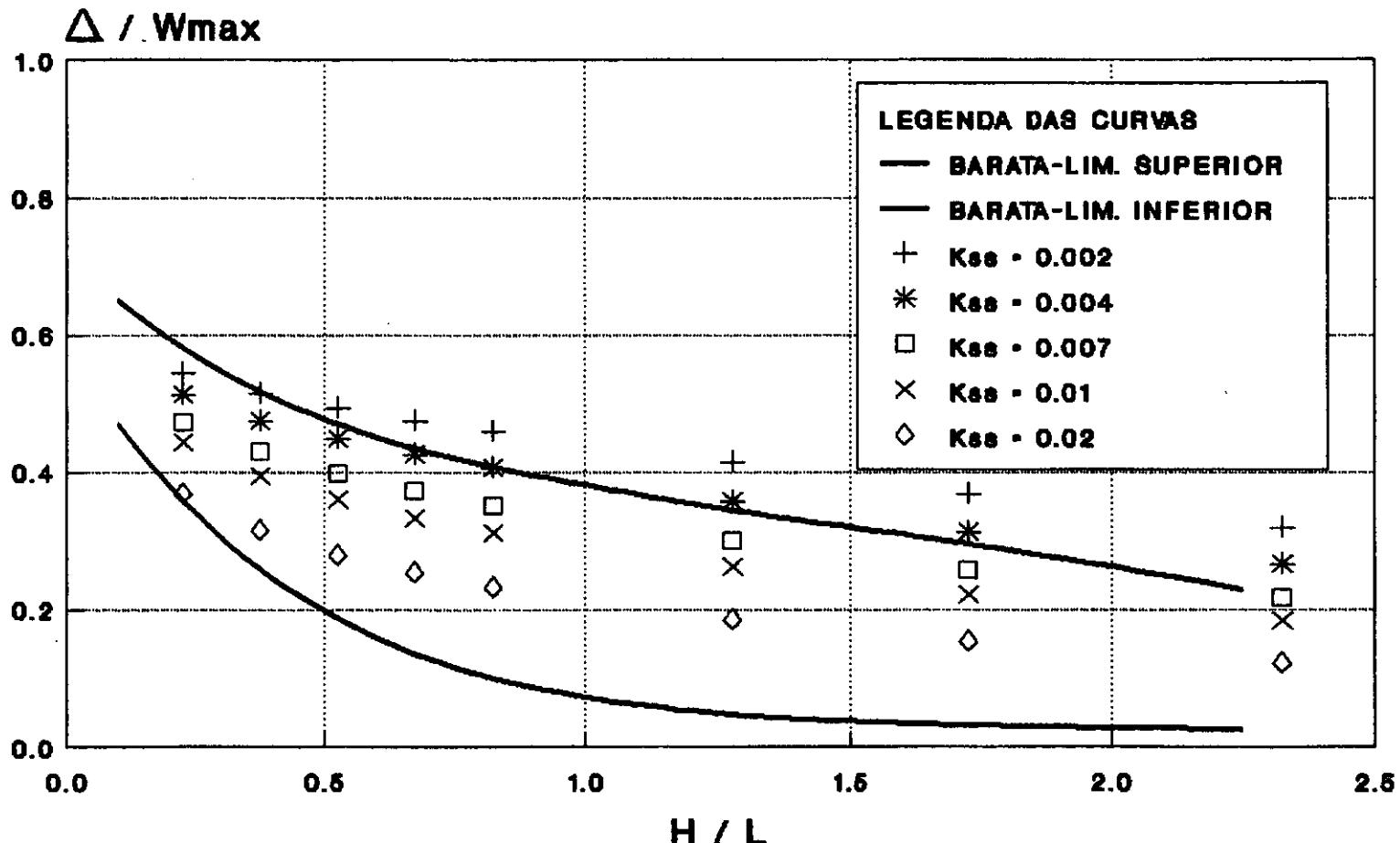
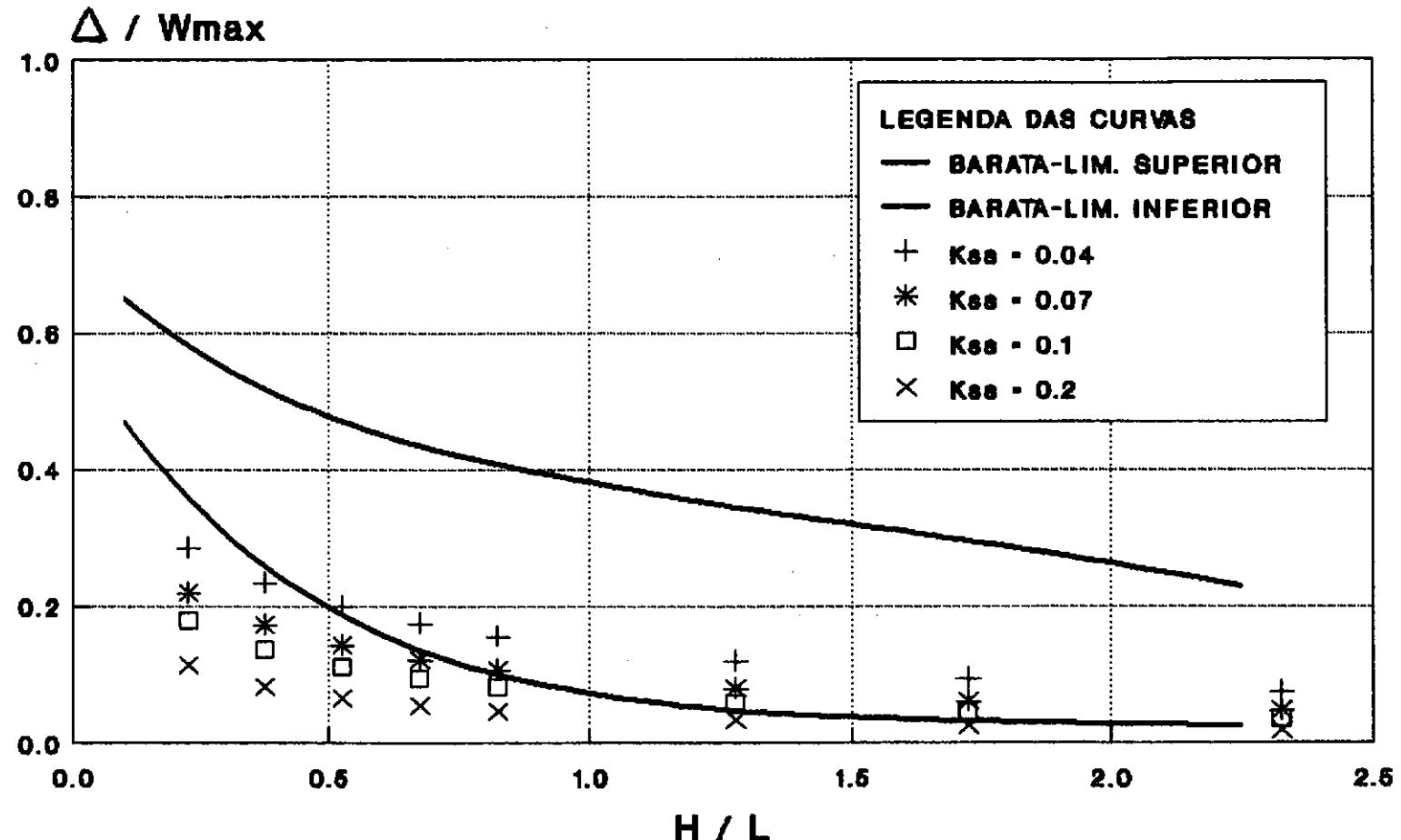


Fig. IV.10 - Comparação entre as curvas teóricas obtidas e a faixa proposta por BARATA (1986) -  $K_{ss} < 0.04$ .



**Fig. IV.11 - Comparação entre as curvas teóricas obtidas e a faixa proposta por BARATA (1986) -  $K_{ss} > 0.02$ .**

#### IV.4.4. Influência dos Primeiros Pavimentos da Edificação

No item (IV.4.3) foi mostrado que o aumento do número de pavimentos da edificação diminui o nível dos recalques diferenciais. É importante notar, no entanto, que esta tendência à uniformização dos recalques não cresce de maneira linear com o número de pavimentos. Observa-se que há uma maior influência dos primeiros pavimentos, que segundo GOSHY (1978), se deve ao fato de estruturas abertas com painéis se comportarem, segundo planos verticais, de maneira semelhante a uma viga parede. Com isto as partes mais baixas da estrutura sofrerão deformações apenas à flexão (fig. IV.12).

Com o objetivo de se aprofundar esta questão quanto à contribuição dos primeiros pavimentos na tendência à uniformização dos recalques, foram plotadas as curvas de variação do fator de contribuição à uniformização de recalques (FC) em função do número de pavimentos, para diferentes valores de  $K_{ss}$ , como mostra a figura (IV.13). Este fator é definido por:

$$FC = \frac{\Delta w_1 - \Delta w_n}{\Delta w_1 - \Delta w_{15}} \quad (IV.6)$$

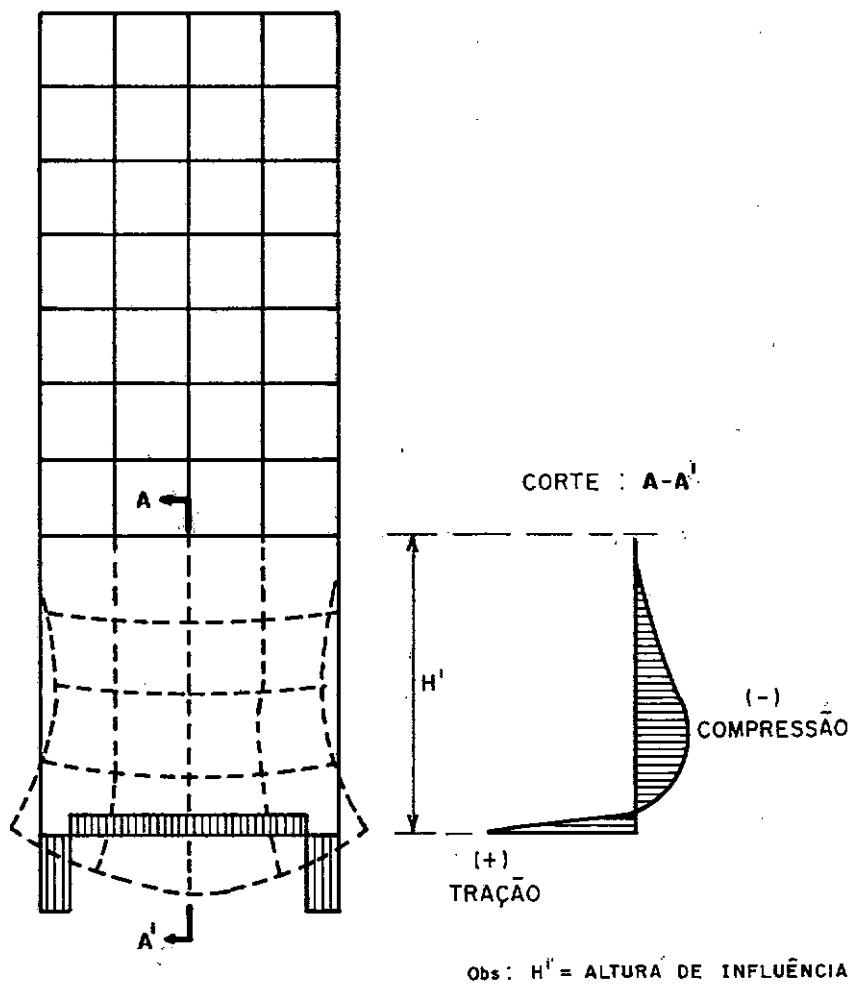
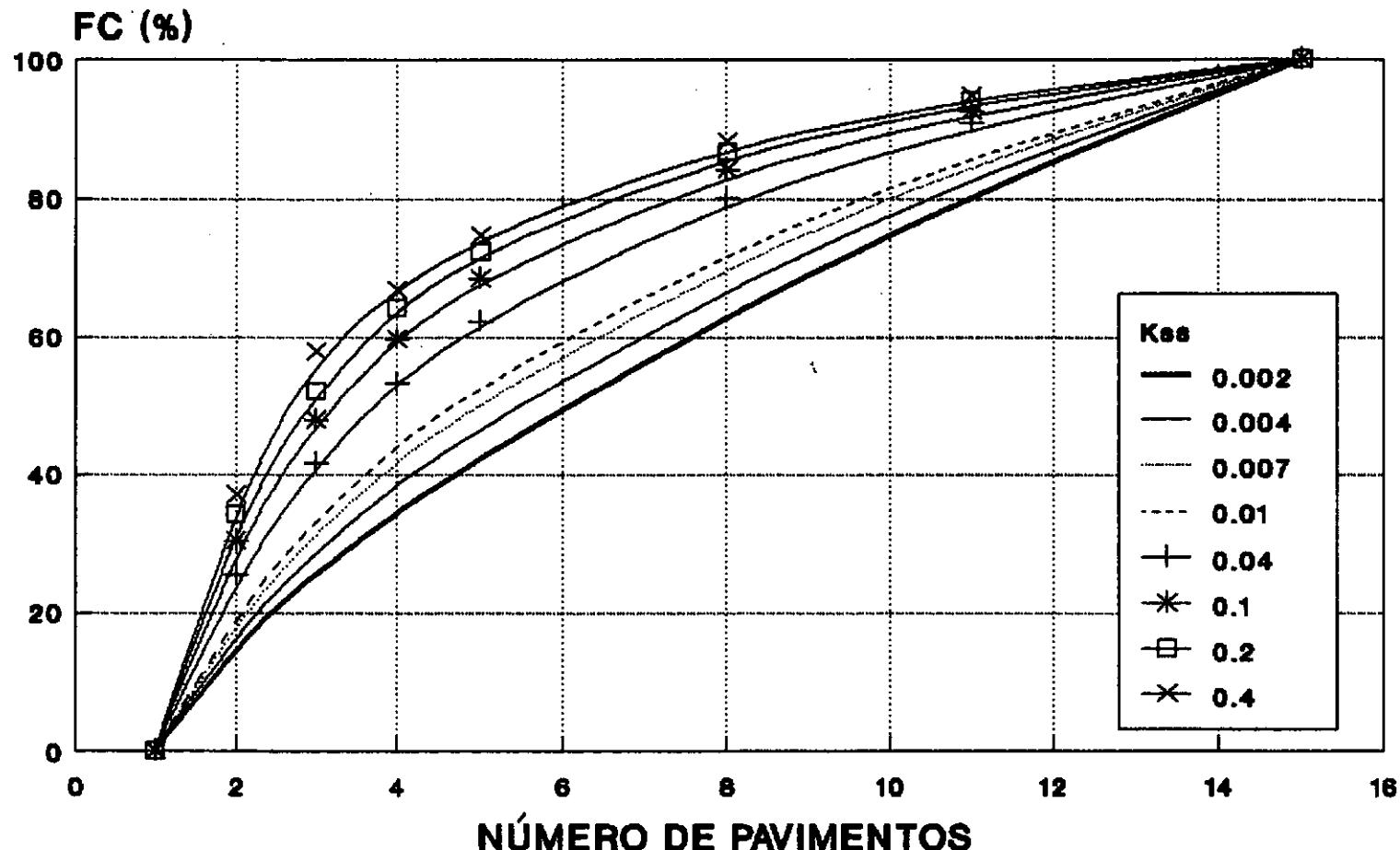


FIG. IV.12 - MODELO DA ANALOGIA DA VIGA - PAREDE  
(GOSHY, 1978)



**Fig. IV.13 - Variação de FC em função do número de pavimentos da edificação para diferentes valores de  $K_{ss}$ .**

Onde:  $\Delta W_4$ ,  $\Delta W_{15}$  e  $\Delta W_n$  = Recalque diferencial máximo considerando-se a interação solo-estrutura para o caso do pórtico com 01, 15 e n pavimentos, respectivamente.

O valor de FC expõe a contribuição dos n primeiros pavimentos na redução total do recalque diferencial estimado, para um aumento da rigidez correspondente a quinze pavimentos. Os resultados demonstram que há realmente uma maior contribuição dos primeiros pavimentos na tendência à uniformização dos recalques, mas esta contribuição depende também da rigidez relativa estrutura-solo. Observa-se que esta contribuição torna-se mais significativa à medida que cresce o valor de  $K_{ss}$ , ou seja, que corresponde ao caso de estruturas mais rígidas.

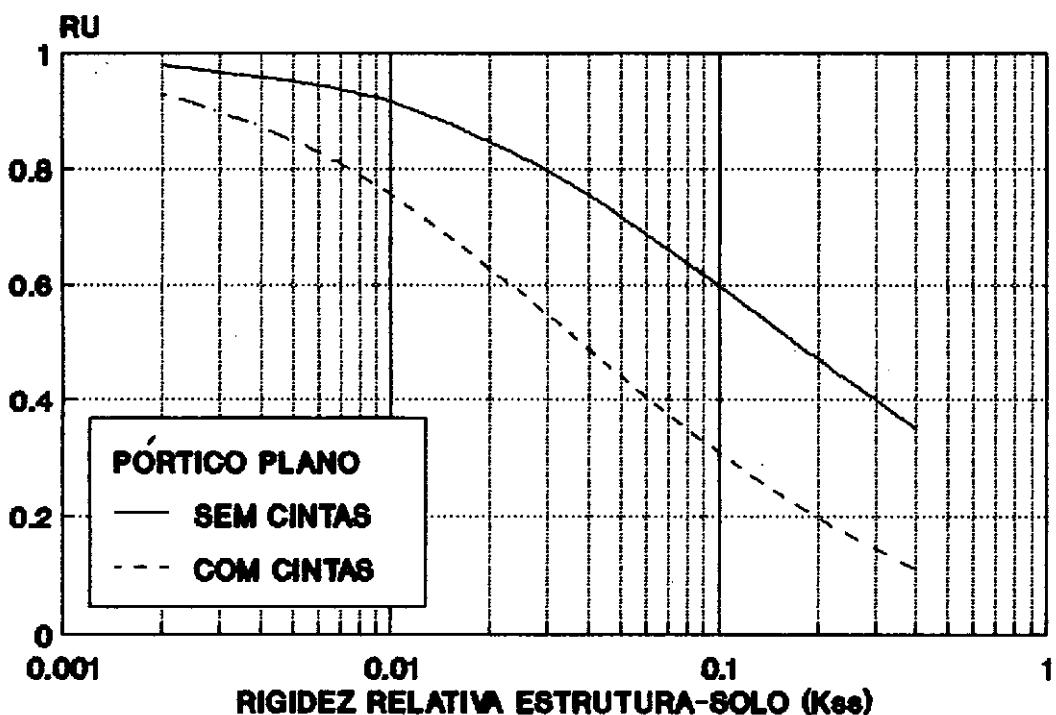
Estes resultados confirmam as observações feitas por GOSHY (1978), segundo o qual a contribuição dos quatro ou cinco primeiros pavimentos de uma edificação na uniformização de recalques é bem maior que a contribuição dos demais. Este fato deve ser levado em consideração no caso de enrigecimento de estruturas com o objetivo de se diminuir o nível dos recalques diferenciais (GUSMÃO e GUSMÃO FILHO, 1990).

#### IV.4.5. Influência das Cintas

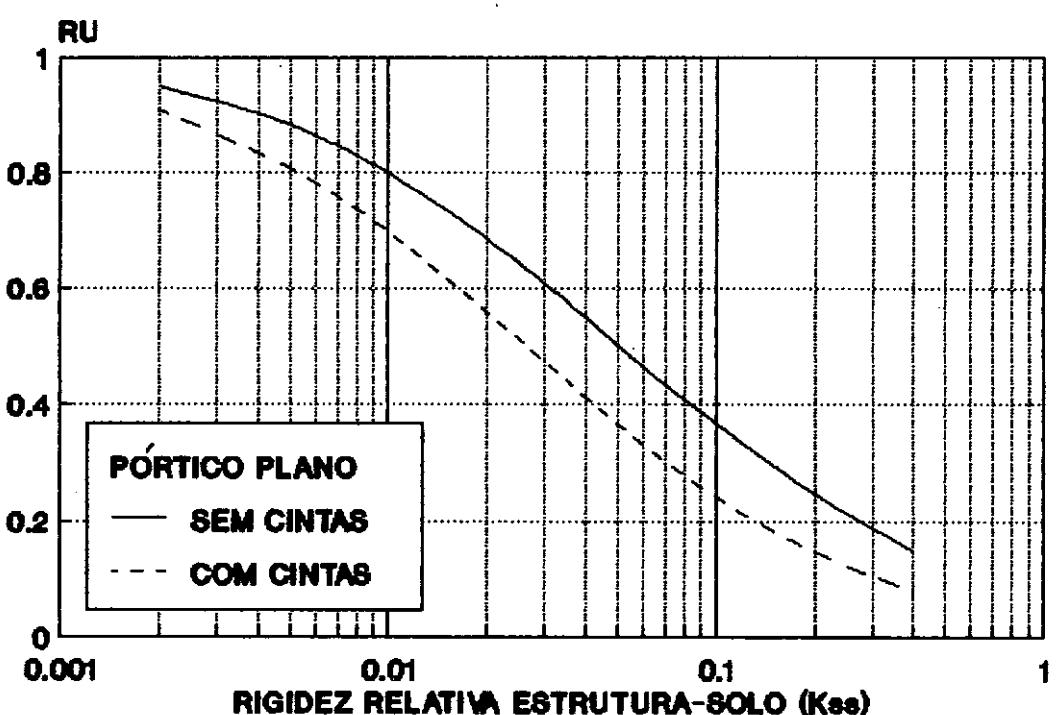
Cintas são peças estruturais em forma de vigas, em geral enterradas, que têm entre outras funções amarrar os pilares que chegam ao nível da fundação, restringindo o movimento relativo dos mesmos. Normalmente são dimensionadas apenas à flexão, mas quando a edificação está sujeita a uma deformada de recalques com forma côncava, absorvem também esforços de tração (fig. IV.12).

Como foi visto no item (IV.4.4), a contribuição dos primeiros pavimentos de uma edificação na tendência à uniformização dos recalques é bem maior que a contribuição dos demais. Baseando-se neste princípio é que foi feita uma análise idêntica a do item (IV.4.3) desprezando-se apenas a presença das cintas, no sentido de se avaliar o efeito das cintas na tendência à uniformização dos recalques.

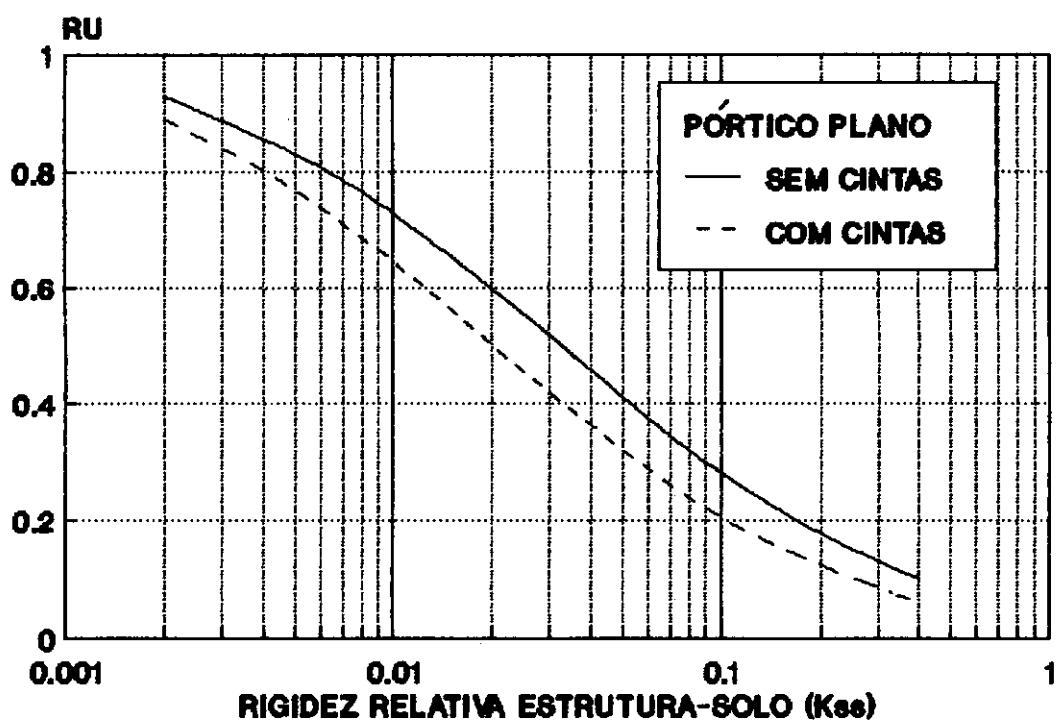
As figuras (IV.14) a (IV.21) mostram a variação de RU com  $K_{ss}$  para edificações com diferentes números de pavimentos, considerando-se ou não a presença das cintas. Observa-se que realmente a presença das cintas contribui na tendência à uniformização dos recalques, sendo que esta influência diminui à medida que cresce o número de pavimentos da edificação, a ponto desta influência, para a estrutura analisada, ser praticamente desprezível para um número de pavimentos superior a oito. Isto se deve ao fato da contribuição da rigidez das cintas na rigidez global da estrutura diminuir à medida que cresce o número de pavimentos da edificação.



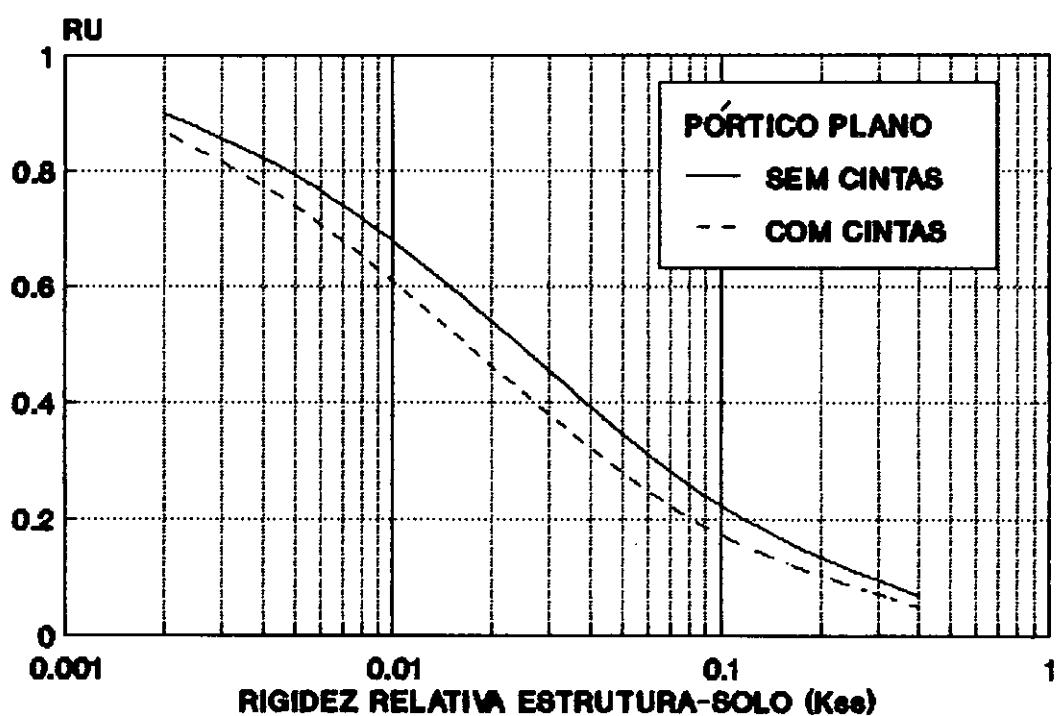
**Fig. IV.14 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 01 pavimento.**



**Fig. IV.15 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 02 pavimentos.**



**Fig. IV.16 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 03 pavimentos.**



**Fig. IV.17 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 04 pavimentos.**

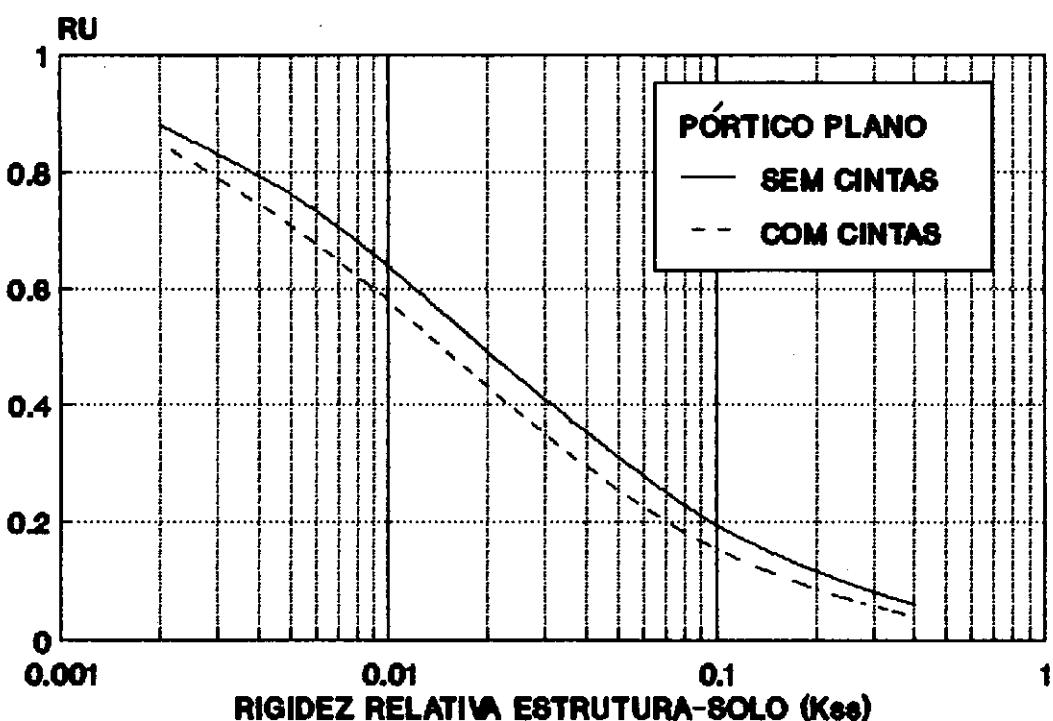


Fig. IV.18 – Efeito das cintas no valor de RU – Pórtico plano com 05 pavimentos.

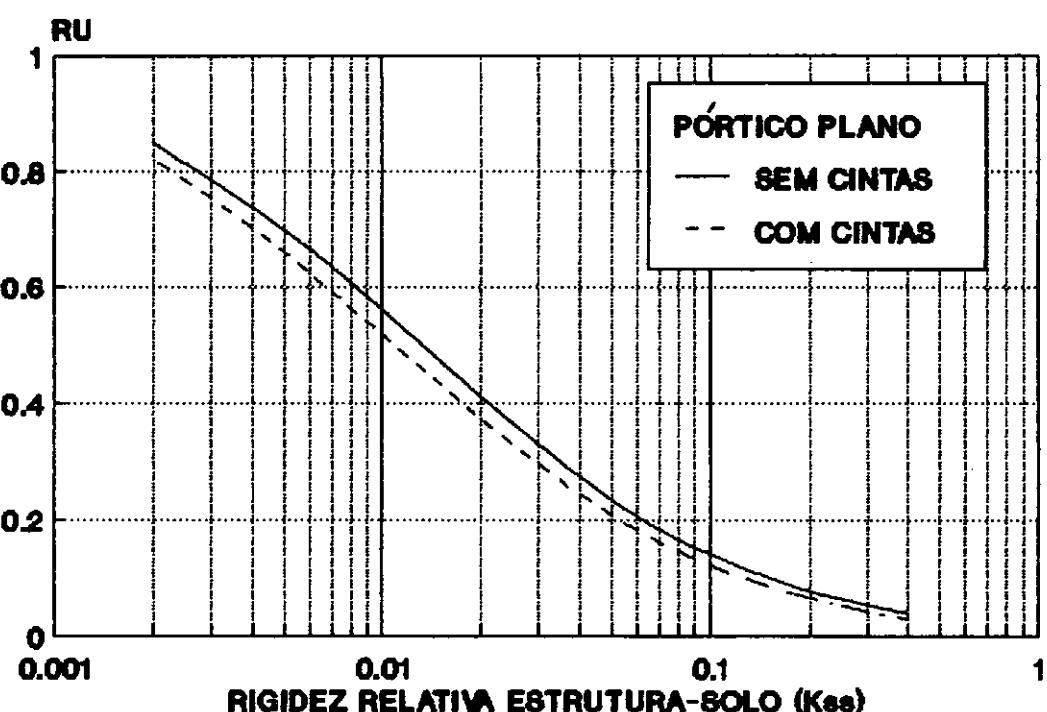


Fig. IV.19 – Efeito das cintas no valor de RU – Pórtico plano com 08 pavimentos.

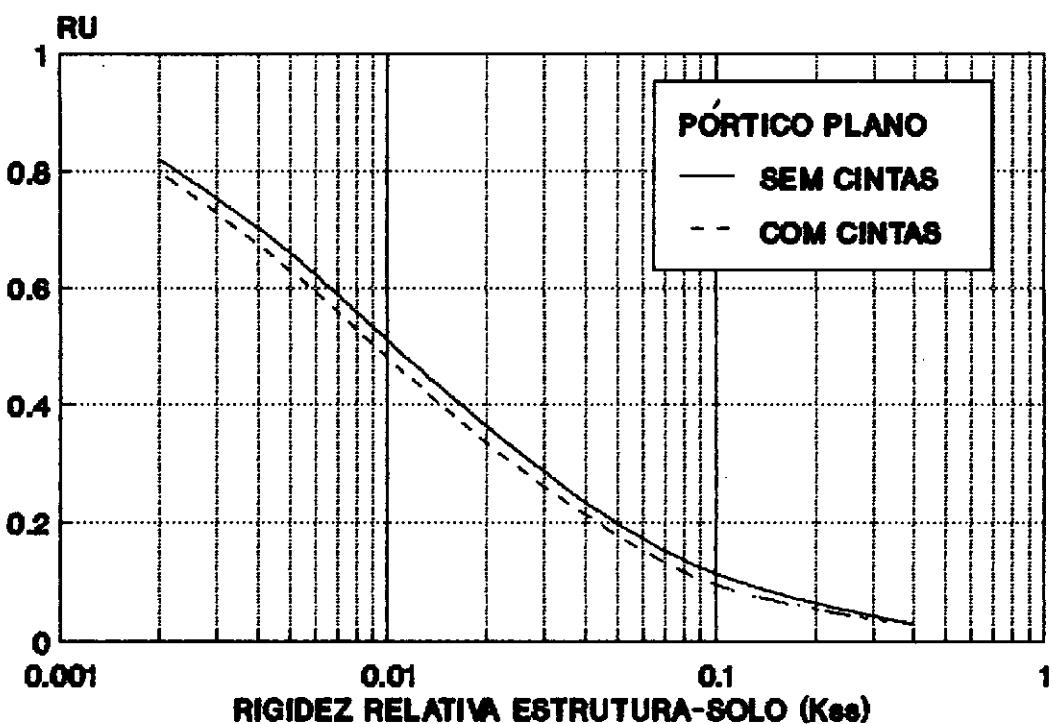


Fig. IV.20 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 11 pavimentos.

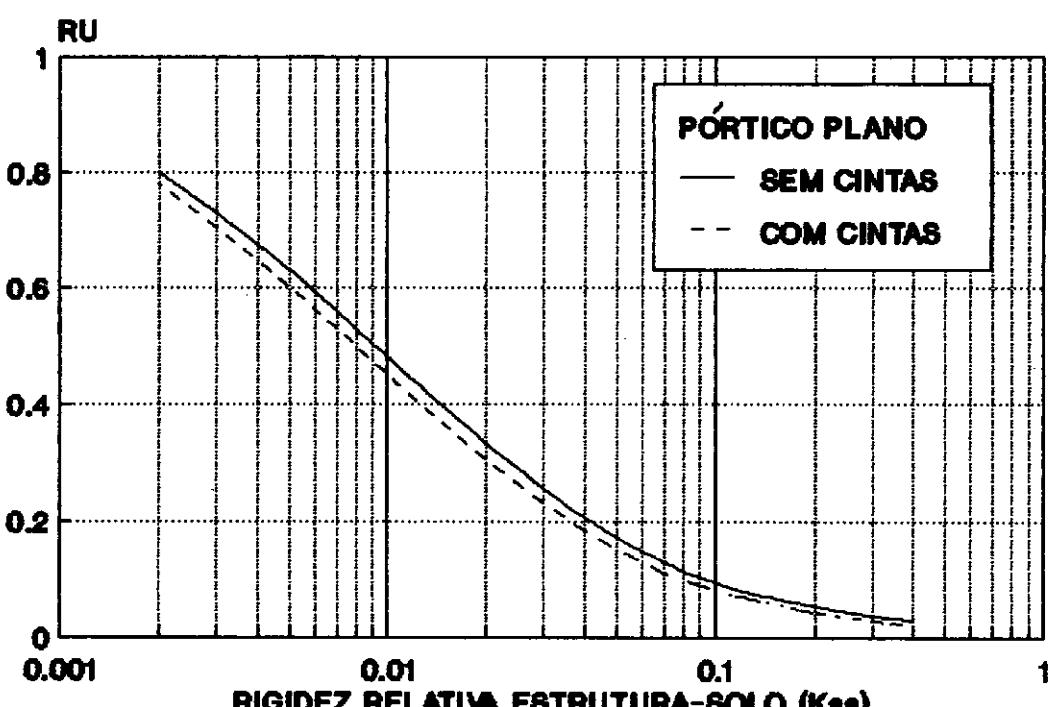


Fig. IV.21 - Efeito das cintas no valor de RU - Pórtico plano com 15 pavimentos.

#### IV.4.6. Influência do Efeito Tridimensional de Pórtico

Para se avaliar o efeito tridimensional de pórtico nas análises de interação solo-estrutura em edificações, foi considerado um pórtico espacial cujos elementos possuem as mesmas características geométricas e propriedades de deformação dos elementos do pórtico plano analisado nos itens anteriores. Esta análise foi feita para o caso da edificação com 01 (um) pavimento e com a forma em planta mostrada na figura (IV.22). Para se manter constante a relação entre a carga atuante e o número de apoios da edificação, foi considerada uma carga total duas vezes maior que a correspondente ao pórtico plano, distribuída uniformemente ao longo das vigas longitudinais.

A figura (IV.23) mostra a variação de RU com  $K_{ss}$  para o caso do pórtico plano e espacial. Os resultados mostram que a consideração do efeito tridimensional de pórtico faz com que haja uma maior tendência à uniformização dos recalques. Esta maior tendência é explicada pelo fato das cintas e vigas transversais aumentarem a rigidez global da estrutura.

#### IV.4.7. Influência da Forma em Planta da Edificação

Resultados de medições de recalques em diversos tipos de edificações mostram que há uma influência da forma em planta da edificação na tendência à uniformização dos recalques. Segundo BARATA (1986), quanto

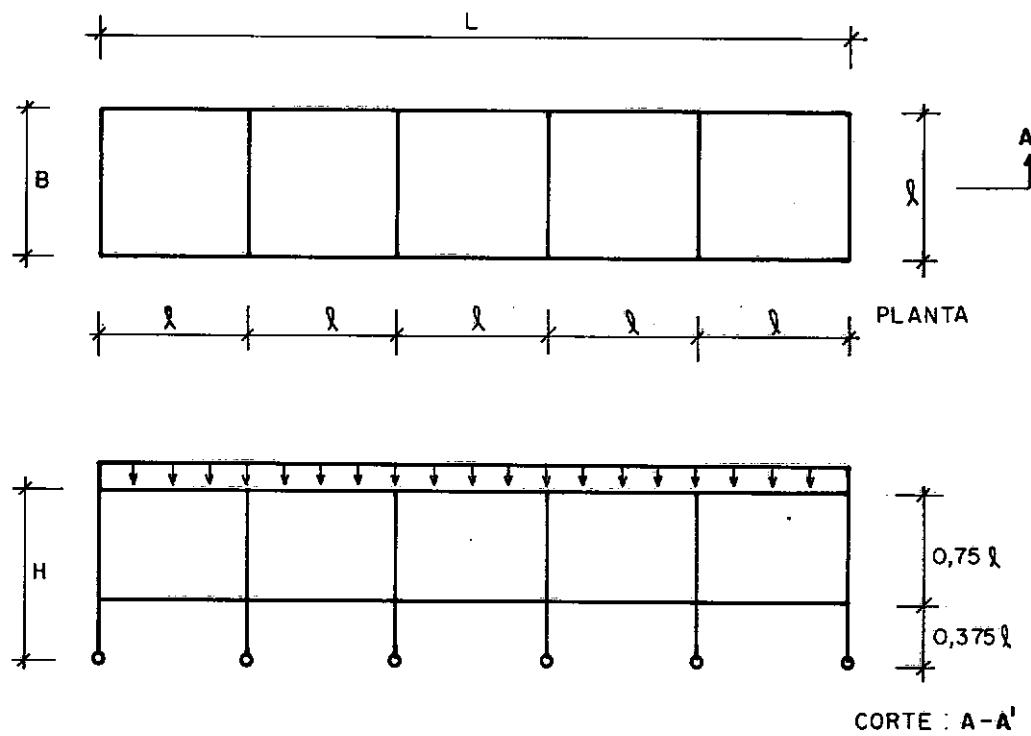
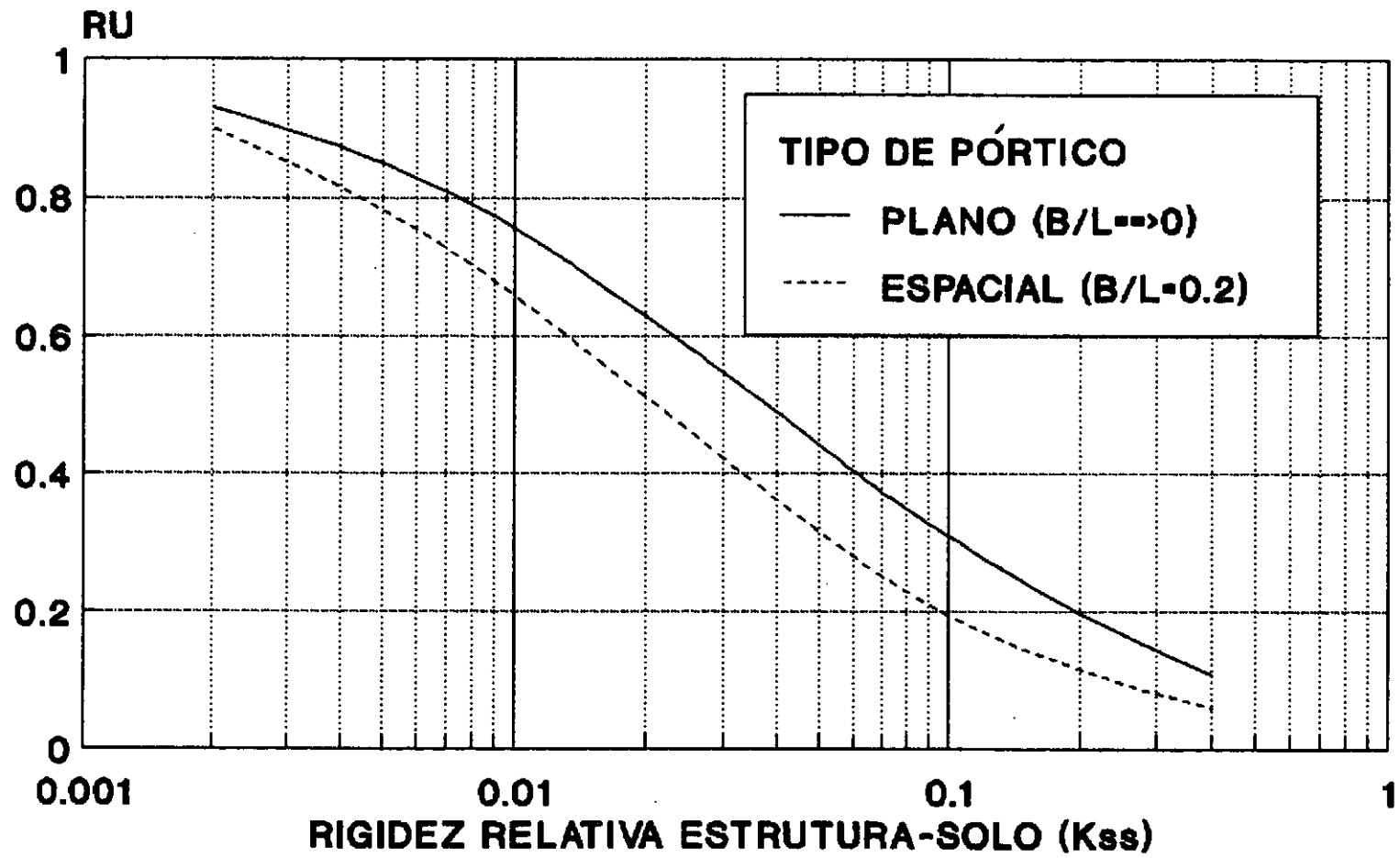


FIG. IV.22 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO PÓRTICO ESPACIAL UTILIZADO NAS ANÁLISES DO ESTUDO PARA-MÉTRICO .

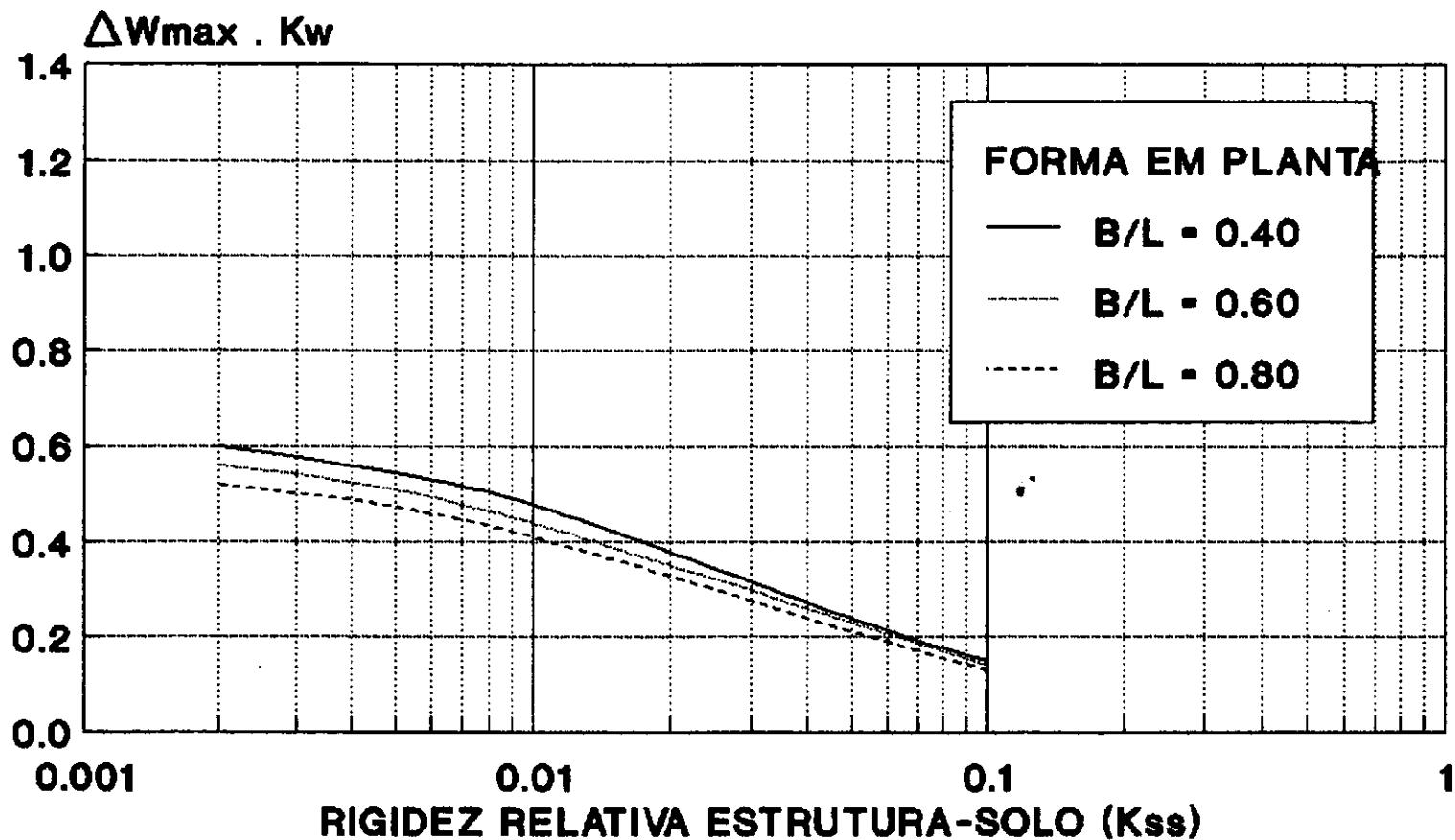


**Fig. IV.23 - Efeito tridimensional de  
pórtico no valor de RU - Pórtico com  
01 pavimento.**

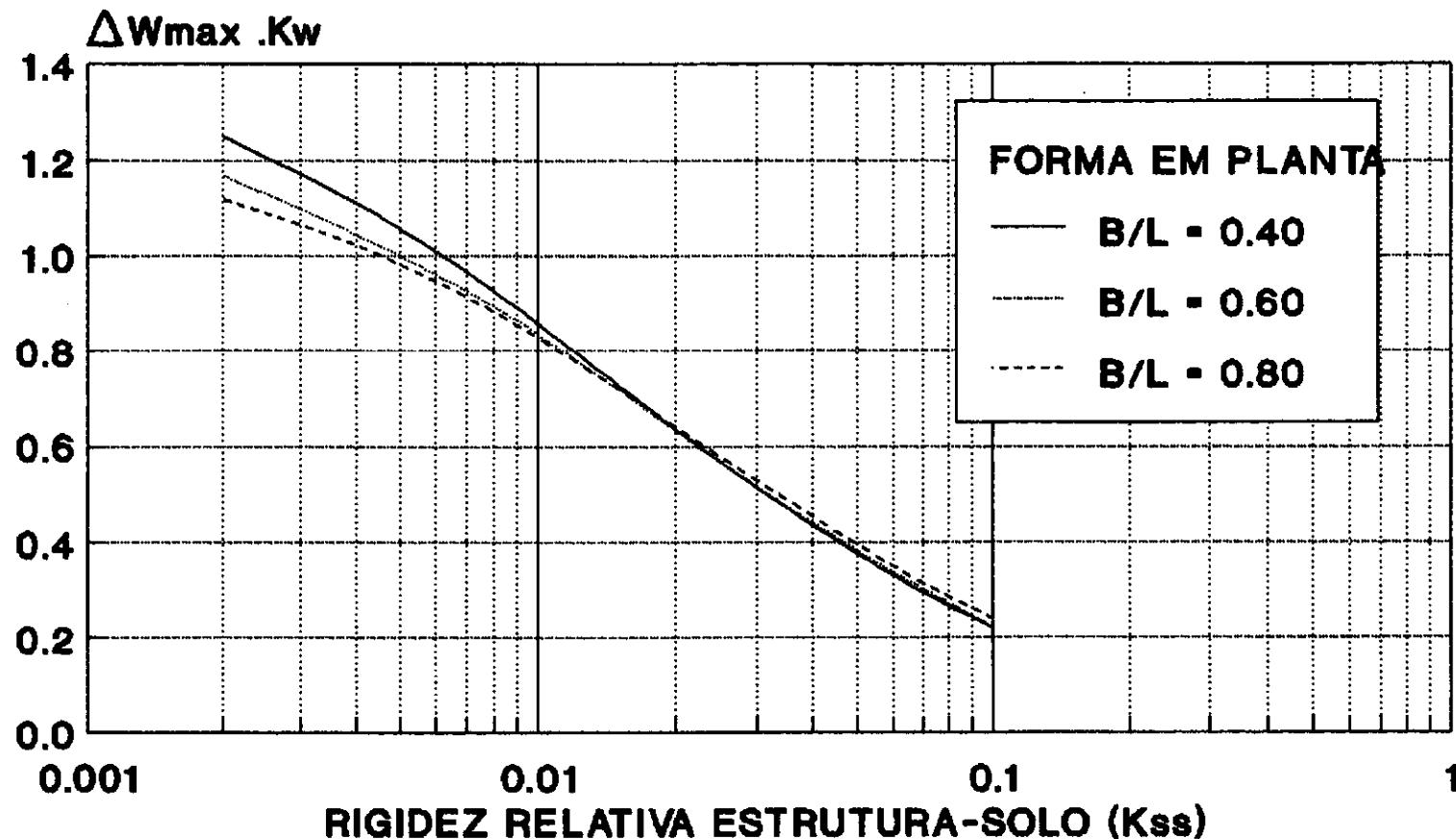
mais próxima de um quadrado for a planta da edificação, maior será esta tendência. FRASER e WARDLE (1976) mostram que para o caso de um radier retangular assente em um semi-espacô elástico, o valor da rigidez relativa estrutura-solo correspondente a um comportamento rígido (recalques diferenciais nulos) cresce ao se aumentar a sua relação comprimento/largura (ver figura III.2). BROWN e YU (1986) observam, também, que para o caso de edificações com forma em planta alongada, o seu desempenho é muito próximo de um pórtico plano longitudinal. Edificações com forma em planta próxima de um quadrado, no entanto, só podem ser realisticamente analisadas como pórticos tridimensionais.

No sentido de se avaliar este efeito da forma em planta da edificação na tendência à uniformização dos recalques, foram feitas análises de pórticos espaciais com  $\Theta_1$  (um) pavimento semelhantes ao analisado no item (IV.4.6), variando-se apenas a relação entre a largura e o comprimento em planta da edificação. Para a determinação de ( $V_o$ ) foi considerado um carregamento uniformemente distribuído nas vigas, sendo que nas vigas de bordo o valor deste carregamento é igual à metade do valor das demais, simulando-se uma laje uniformemente carregada.

As figuras (IV.24) e (IV.25) mostram a variação do recalque diferencial máximo em função de  $K_{ss}$ , para diferentes valores de  $B/L$ . Os resultados mostram que tanto para o pórtico longitudinal periférico, quanto para o longitudinal central, o recalque diferencial máximo tende a diminuir à medida que a relação  $B/L$  tende ao valor



**Fig. IV.24 - Variação de  $\Delta W_{max}$  em função de  $K_{ss}$  para diferentes valores de  $B/L$  - Pórtico longitudinal periférico.**



**Fig. IV.25 - Variação de  $\Delta W_{max}$  em função de  $K_{ss}$  para diferentes valores de  $B/L$  - Pórtico longitudinal central.**

unitário. Observa-se, ainda, que este efeito diminui à medida que cresce o valor de  $K_{ss}$ , ou seja, para um dado terreno de fundação, o efeito da forma em planta da edificação na tendência à uniformização de recalques é mais importante em estruturas mais flexíveis, como mostram as figuras (IV.26) e (IV.27).

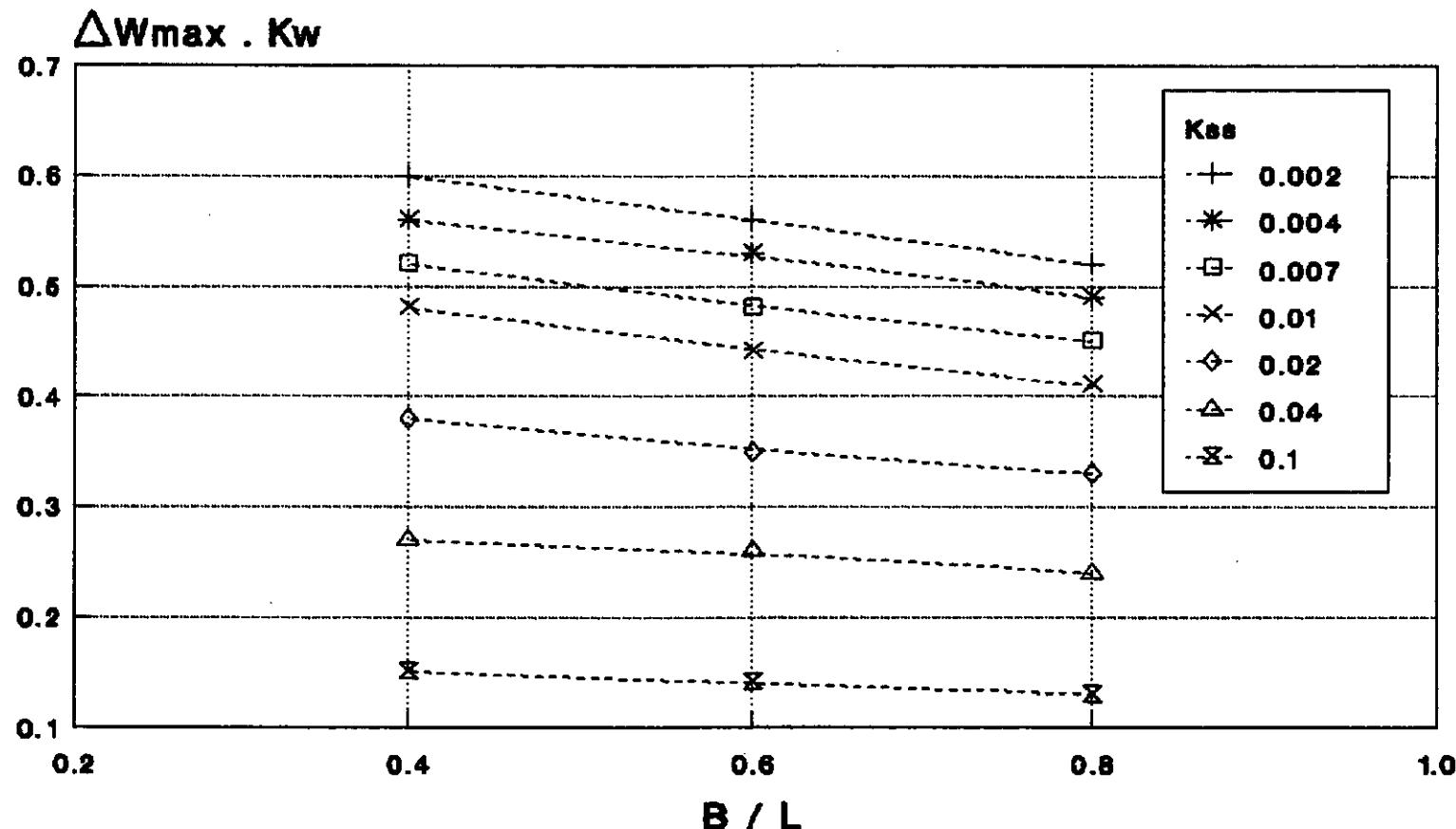
#### IV.5. ANÁLISES CONSIDERANDO-SE A INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

##### IV.5.1. Considerações Iniciais

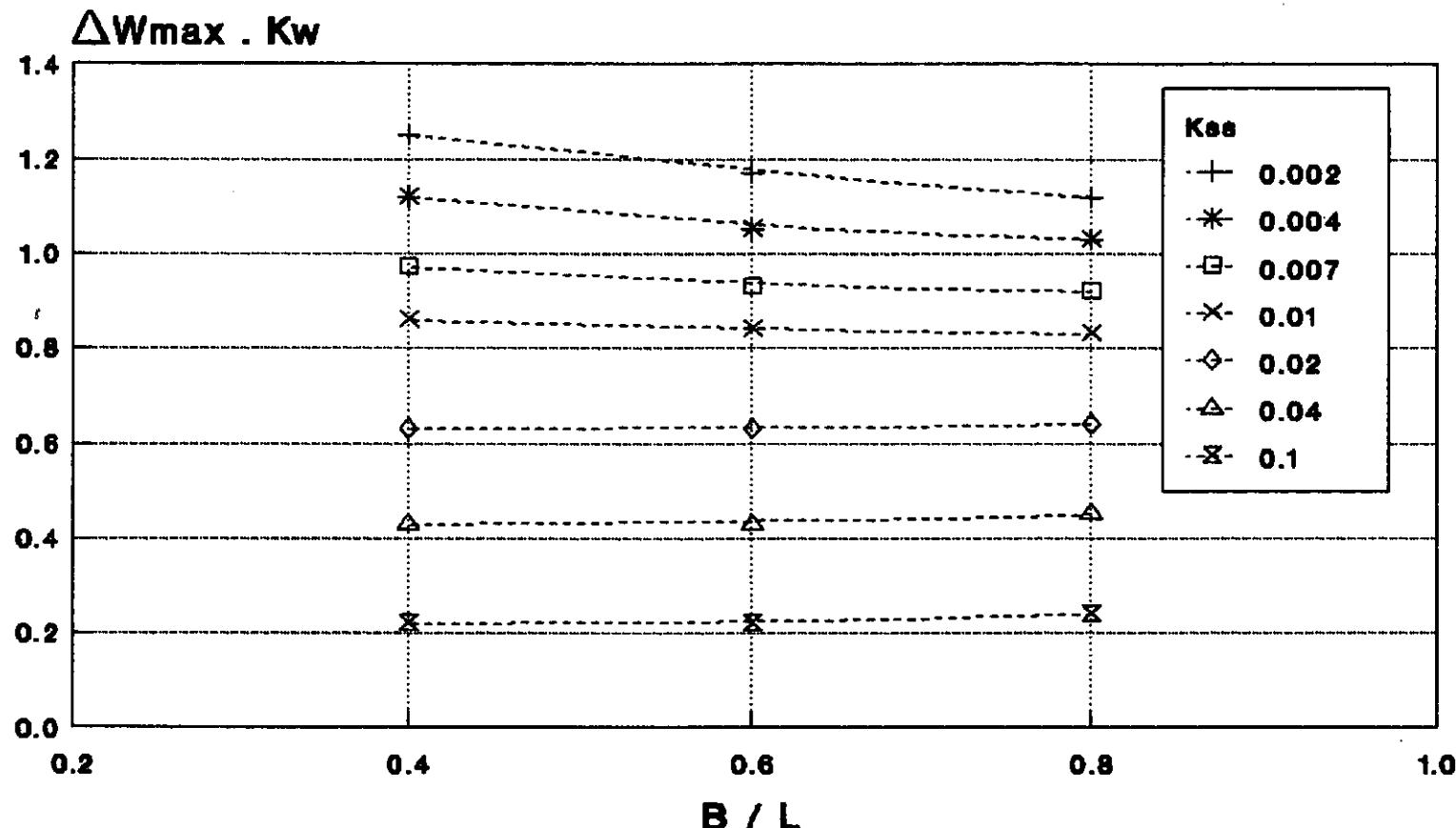
Para estas análises foi considerado o pórtico plano descrito no item (IV.4.1). Nestas análises o comportamento carga-recalque de um apoio não é determinado apenas pelo seu carregamento, mas também pelo carregamento dos demais apoios. Assim, a simulação do apoio como uma mola não é mais válida, e a matriz  $[FM]$  possui elementos não-nulos fora da diagonal principal. Para o cálculo da interação entre elementos de fundação foi utilizado o método proposto por AOKI e LOPES (1975), conforme descrito no Apêndice II.

##### IV.5.2. Influência da Rígidez Relativa Estrutura-Solo na Grandeza dos Recalques

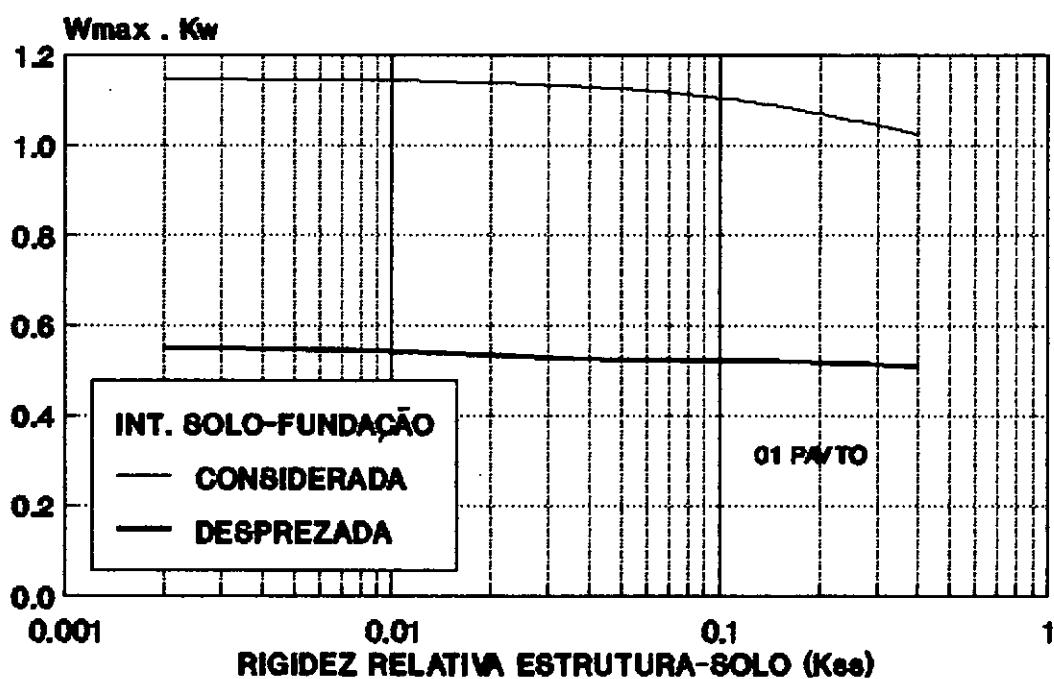
As figuras (IV.28) a (IV.31) mostram a variação dos recalques absoluto e diferencial máximos em função da rigidez relativa estrutura-solo, para os



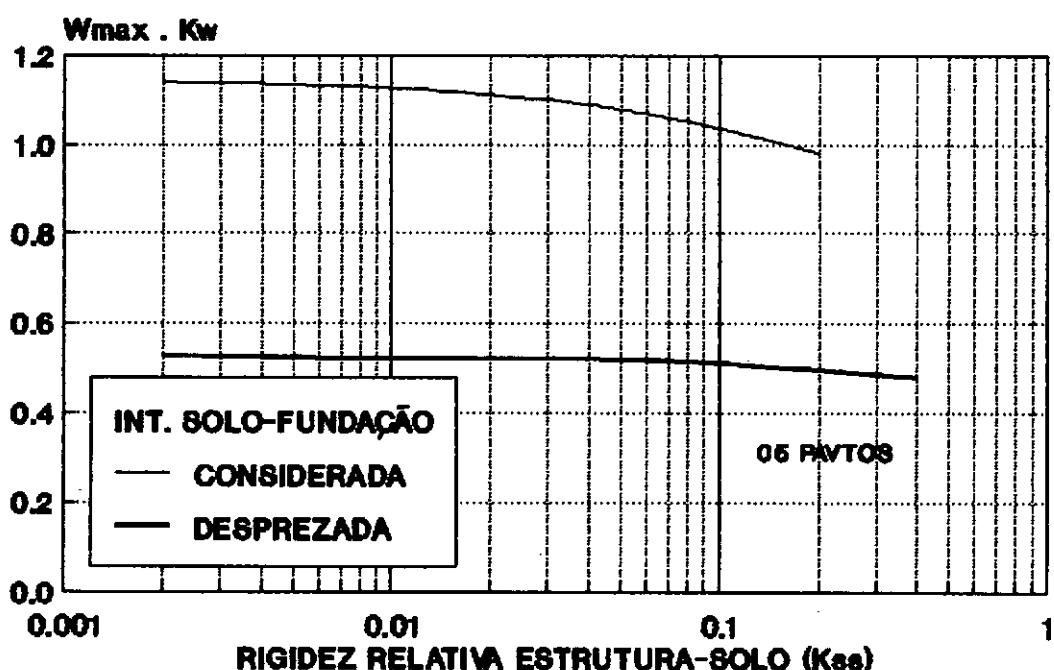
**Fig. IV.26 - Variação de  $\Delta W_{max}$  em função de  $B/L$  para diferentes valores de  $K_{ss}$  - Pórtico longitudinal periférico.**



**Fig. IV.27 - Variação de  $\Delta W_{max}$  em função de  $B/L$  para diferentes valores de  $K_{ss}$  - Pórtico longitudinal Central.**



**Fig. IV.28 – Variação de Wmax em função de Kss considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.**



**Fig. IV.29 – Variação de Wmax em função de Kss considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.**

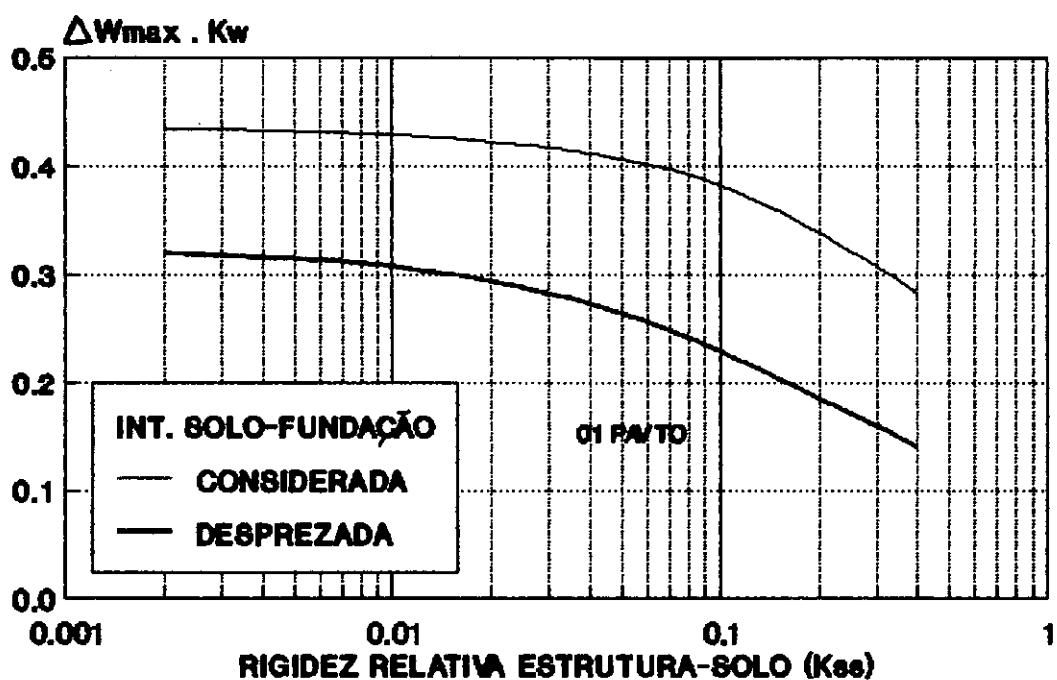


Fig. IV.30 - Variação de  $\Delta W_{\max}$  em função de  $K_{ss}$  considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.

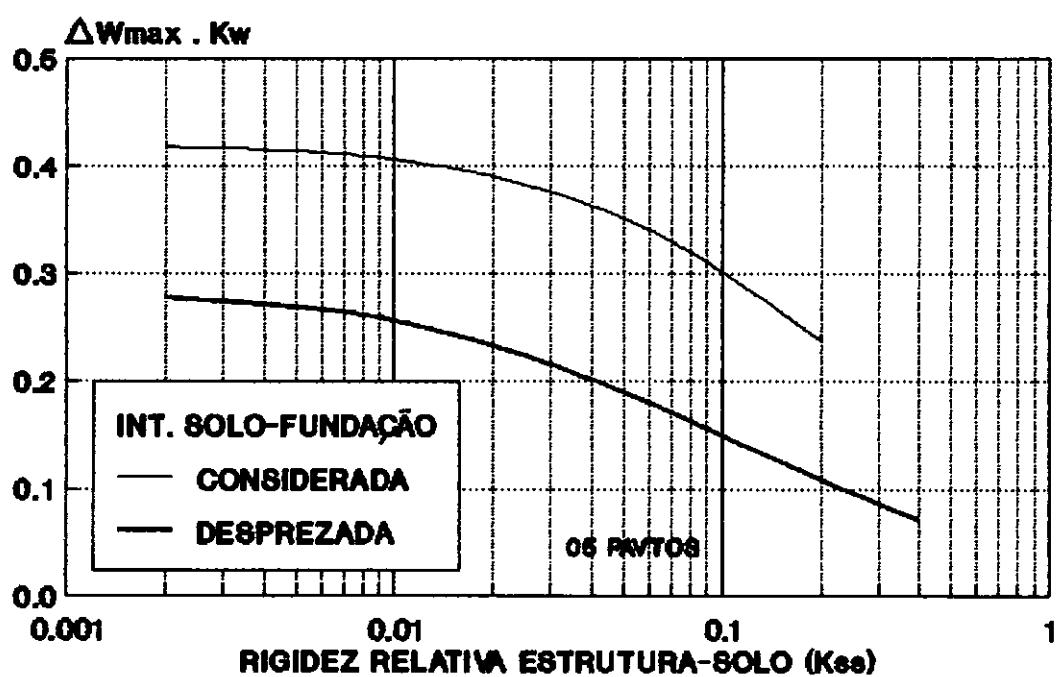
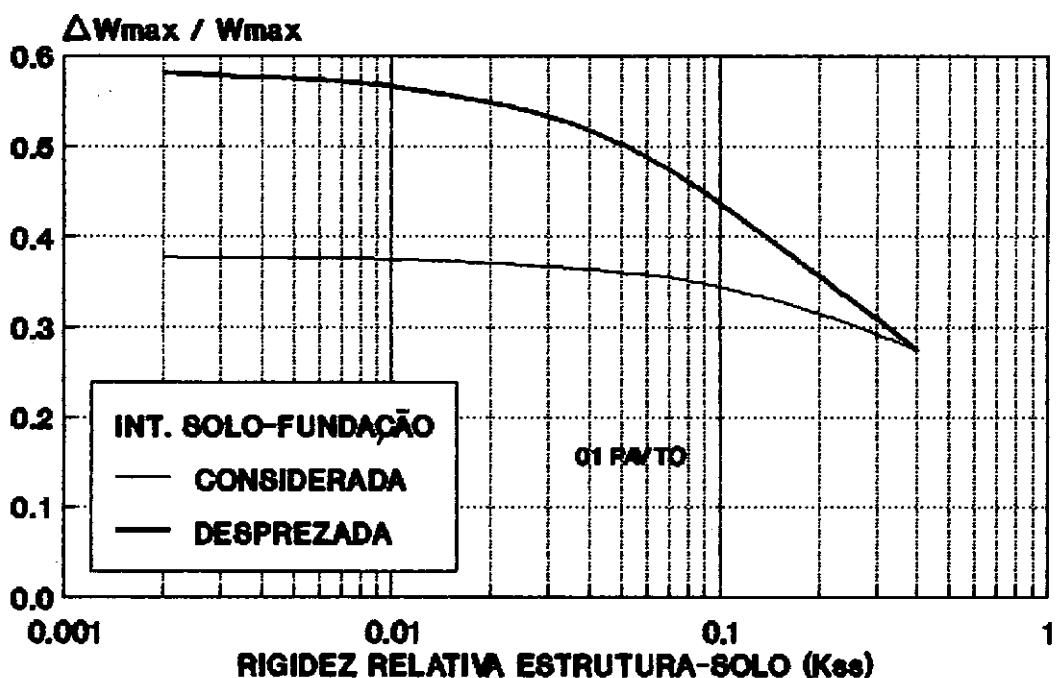


Fig. IV.31 - Variação de  $\Delta W_{\max}$  em função de  $K_{ss}$  considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.

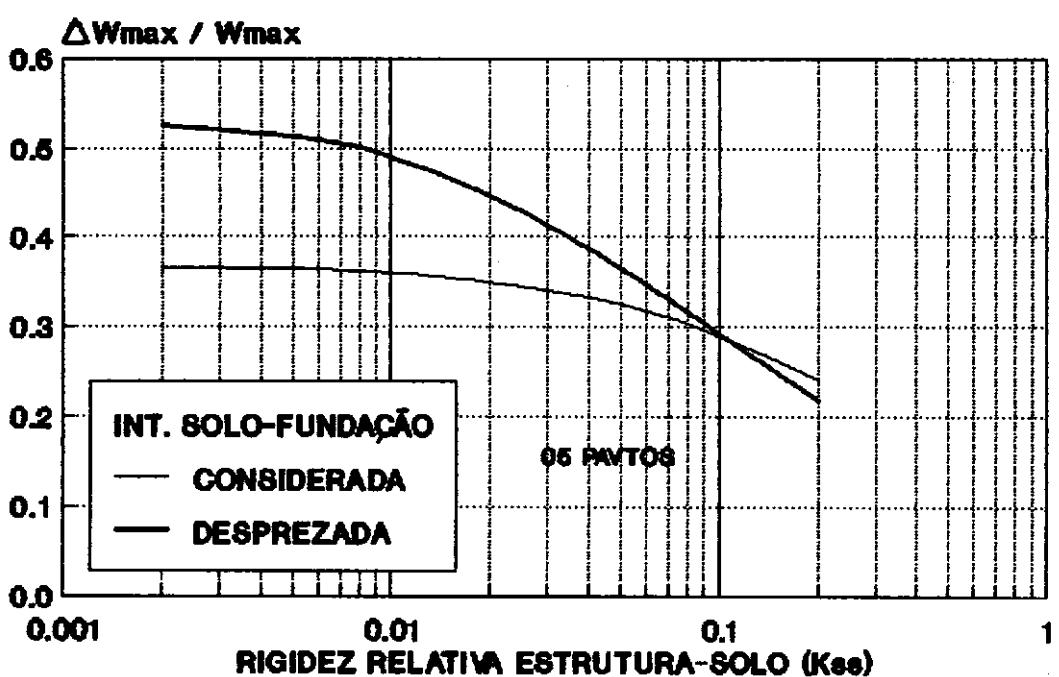
pórticos com 01 (um) e 05 (cinco) pavimentos. Observa-se que em todos os casos há um aumento da grandeza dos recalques ao se considerar a interação entre os elementos de fundação. Poulos (1975a) analisando um pórtico plano simétrico com dois vãos e um pavimento, diz que a desconsideração da interação entre recalques de sapatas adjacentes leva a uma subestimativa do recalque absoluto máximo e a uma superestimativa do recalque diferencial máximo. Na realidade o que acontece é que, para baixos e médios valores de  $K_{ss}$ , a consideração da interação entre os elementos de fundação faz com que a relação entre o recalque diferencial e o absoluto máximo diminua, como mostram as figuras (IV.32) e (IV.33). Isto se deve ao fato da superposição dos carregamentos dos apoios produzirem uma deformada de recalques mais suave. Nota-se, no entanto, que este efeito diminui à medida que cresce o valor de  $K_{ss}$  e o número de pavimentos da edificação. Este fato pode inclusive ser comprovado nos gráficos apresentados por Poulos (1975a).

#### IV.5.3. Influência do Número de Pavimentos da Edificação

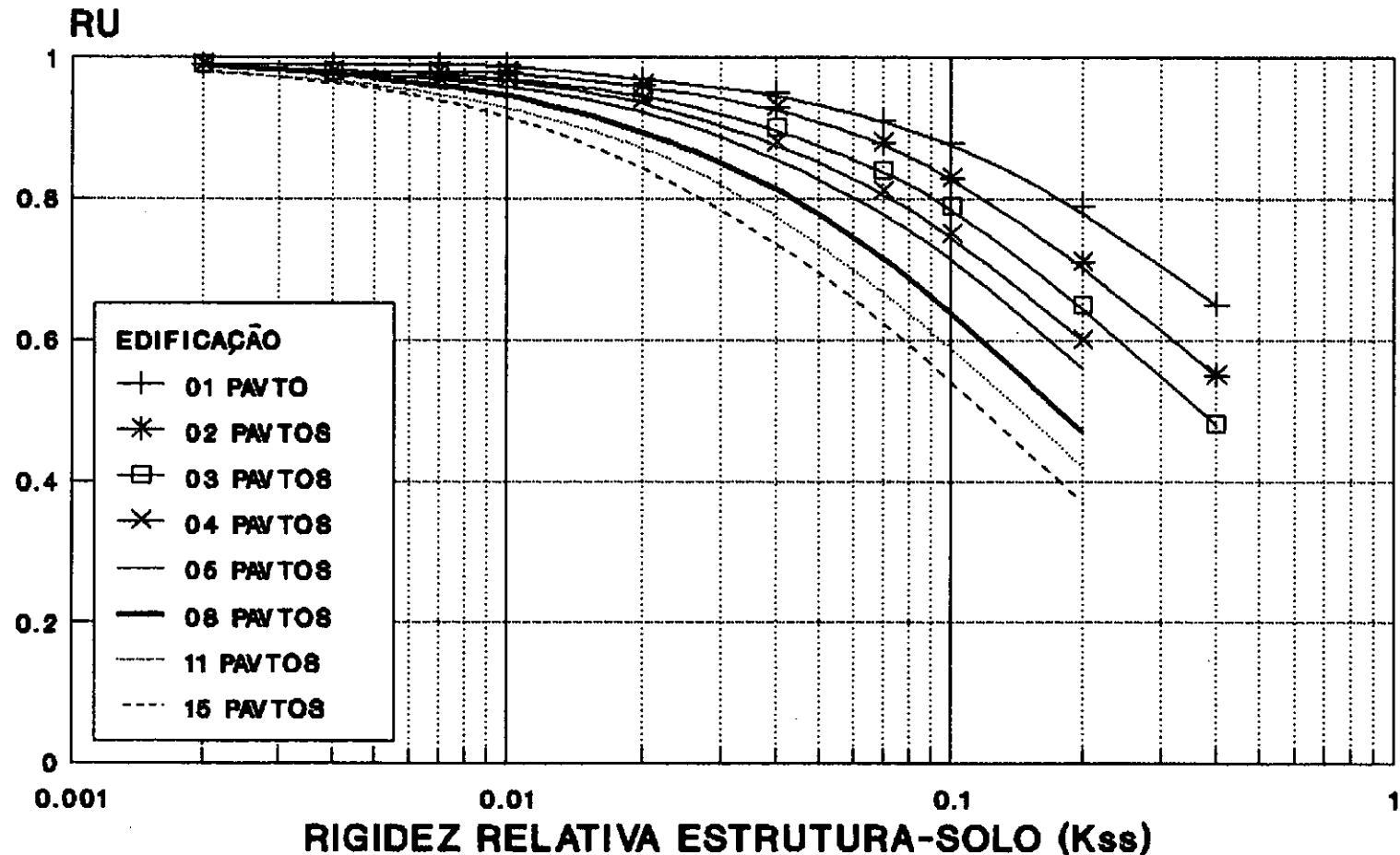
A figura (IV.34) mostra a variação de RU em função da rigidez relativa estrutura-solo, para edificações com diferentes números de pavimentos. Observa-se que as curvas revelam algumas conclusões semelhantes às obtidas no item (IV.4.3), ou seja, há uma maior tendência à uniformização dos recalques à medida que aumenta o número de pavimentos da edificação, e que os



**Fig. IV.32 – Variação de  $\Delta W_{\max}/W_{\max}$  em função de  $K_{ss}$  considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.**



**Fig. IV.33 – Variação de  $\Delta W_{\max}/W_{\max}$  em função de  $K_{ss}$  considerando-se ou não a interação entre elementos de fundação.**



**Fig. IV.34 - Variacao de RU em função de  $K_{ss}$  considerando-se a interação entre os elementos de fundação.**

primeiros pavimentos exercem uma maior influência neste efeito.

#### IV.5.4. Influência da Profundidade da Fronteira Rígida

É sabido que um dos fatores que influenciam a grandeza dos recalques é a espessura da camada compressível. À medida que esta espessura aumenta, os recalques aumentam de grandeza.

Com o objetivo de simular este efeito e sua influência na interação solo-estrutura, foi feita uma análise do pórtico plano com 01 (um) pavimento variando-se apenas a espessura da camada compressível (fig. IV.35).

As figuras (IV.36) e (IV.37) mostram a variação dos recalques absoluto e diferencial máximos com a rigidez relativa estrutura-solo, para diferentes valores de  $h/L$ . Os resultados mostram que em ambos os casos, os recalques crescem à medida que aumenta a espessura da camada compressível.

AOKI (1987) observa que quando a fronteira rígida se encontra próxima das fundações e, consequentemente, a camada compressível é pouco espessa, o efeito da interação solo-estrutura seria desprezível e o cálculo convencional seria satisfatório. A figura (IV.38) mostra a variação de RU em função de  $K_{ss}$ , para diferentes valores de  $h/L$ . Observa-se que realmente à medida que o valor de  $h/L$  cresce, o valor de RU decresce, indicando um maior efeito da interação solo-estrutura.

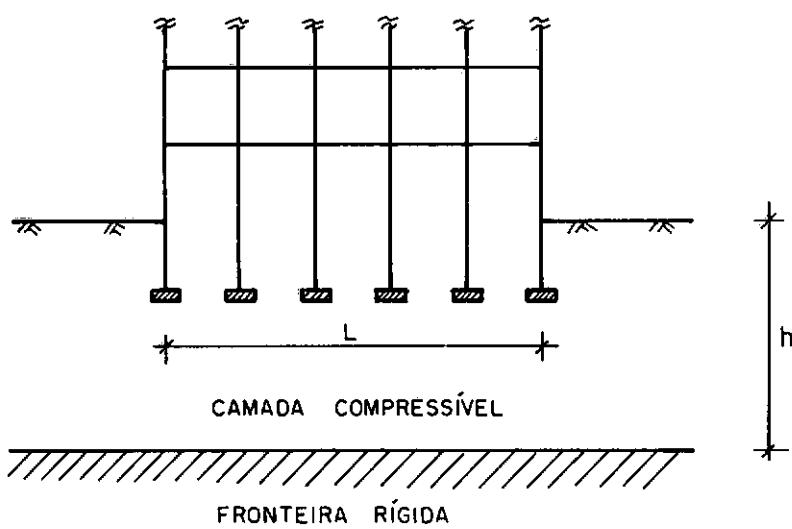
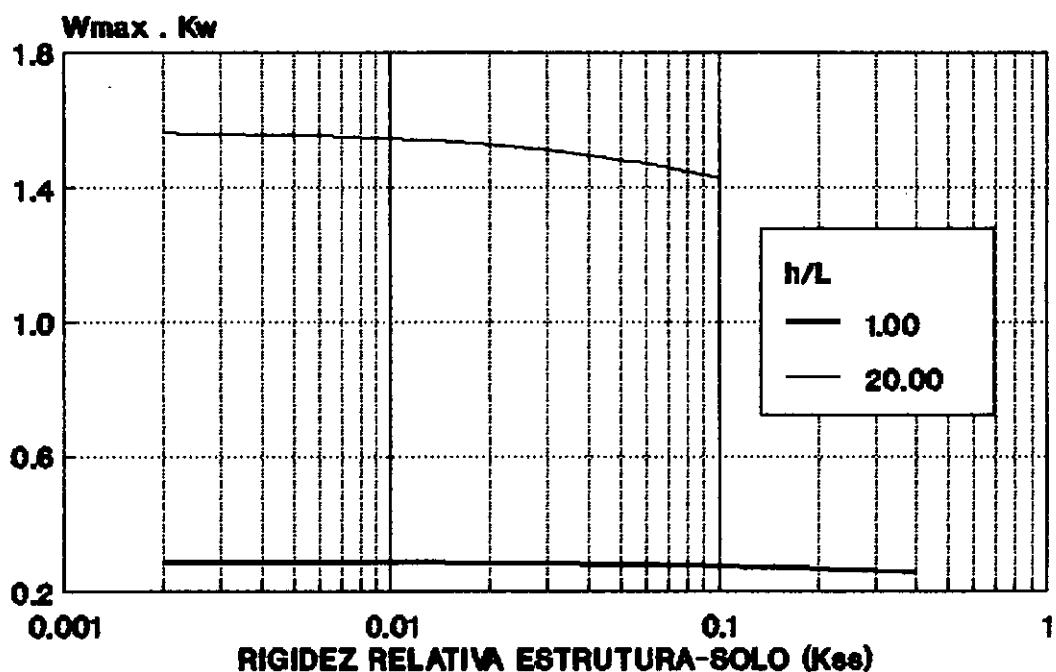
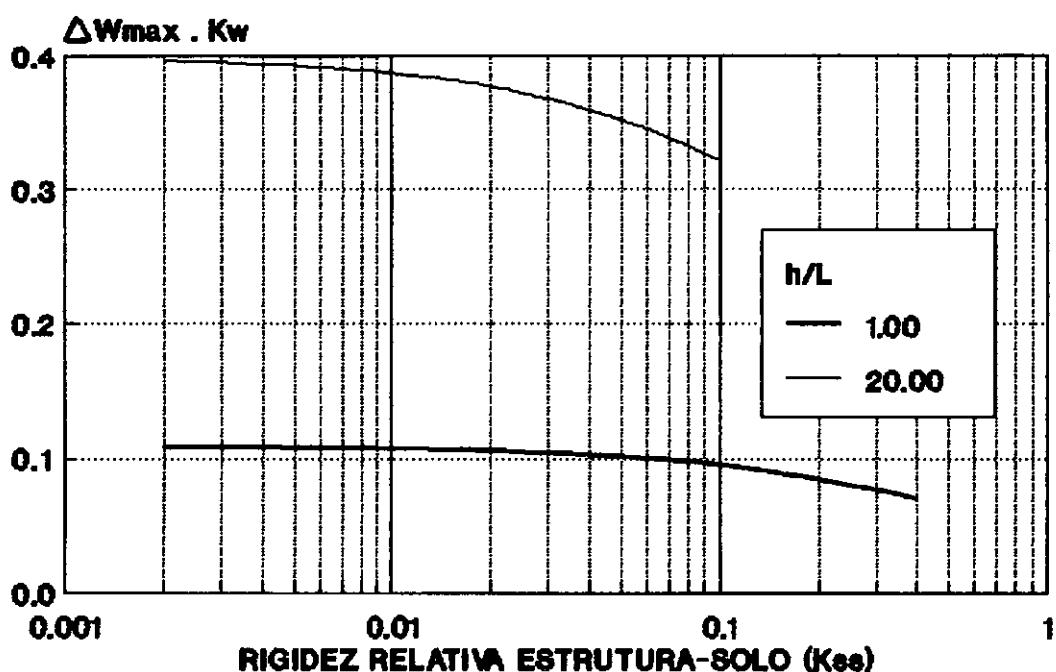


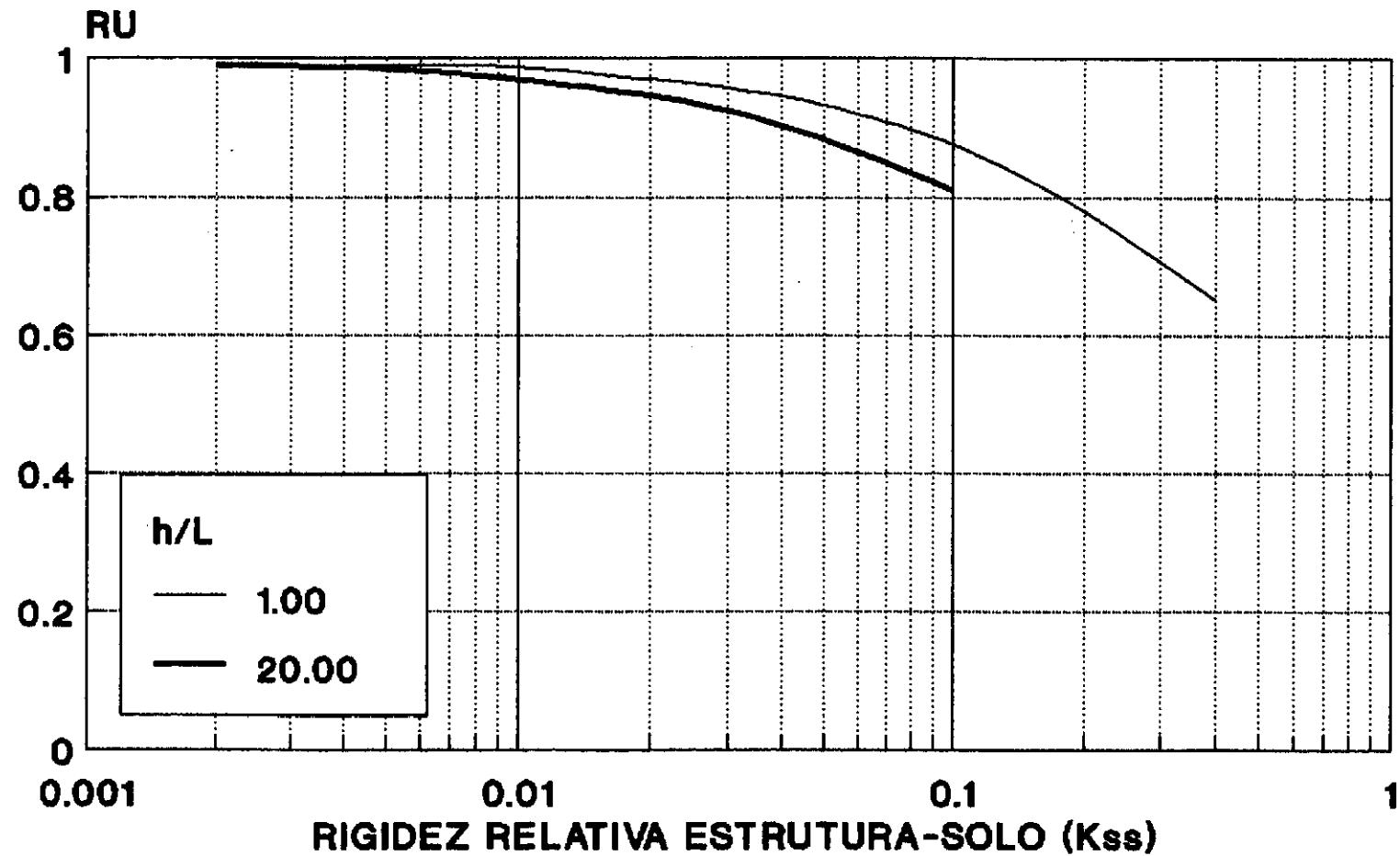
FIG. IV.35 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO PÉRFIL UTILIZADO P/ A ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA FRONTEIRA RÍGIDA .



**Fig. IV.36 - Variação de Wmax em função de Kss para diferentes valores de h/L - Pórtico plano com 01 pavimento.**



**Fig. IV.37 - Variação de ΔWmax em função de Kss para diferentes valores de h/L - Pórtico plano com 01 pavimento.**



**Fig. IV.38 - Variação de RU em função de  
Kss para diferentes valores de h/L -  
Pórtico plano com 01 pavimento.**

## CAPÍTULO V – METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CONSIDERAÇÃO EFEITO DA RIGIDEZ DA ESTRUTURA NOS RECALQUES

### V.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar do consenso em relação à influência da interação solo-estrutura no desempenho de edificações, poucos são os casos de obras em que é dada uma atenção a este aspecto. Uma das razões para isto é que ainda não se dispõe de métodos expeditos para introduzir a interação solo-estrutura em projetos de edificações. O método proposto por POULOS (1975a) e apresentado no item (III.3), por exemplo, no caso de edifícios altos ou estruturas complexas pode levar a uma análise bastante demorada. A seguir é apresentado uma metodologia que permite algumas vezes uma grande simplificação nestas análises.

### V.2. O MÉTODO PROPOSTO POR MEYERHOF (1953)

Em 1953, MEYERHOF publicou um trabalho que é considerado uma das primeiras tentativas de se avaliar os efeitos da interação solo-estrutura em edificações. Segundo o autor, na prática, a rigidez da fundação é em geral muito pequena em relação à rigidez da superestrutura, principalmente em estruturas aporticadas. São desenvolvidas, então, fórmulas para a estimativa da rigidez de estruturas aporticadas abertas ou fechadas com painéis de vedação.

O autor sugere, entre outras coisas, que em uma análise interativa uma estrutura com um número qualquer de pavimentos possa ser substituída por outra mais simples com rigidez equivalente. Para o caso de prédios com múltiplos pavimentos, por exemplo, esta simplificação pode ser feita através da sua consideração como uma edificação com apenas 01 (um) pavimento.

Para o caso de um pórtico plano aberto de múltiplos pavimentos com vãos aproximadamente iguais, a rigidez à flexão de um pavimento é expressa por:

$$(E_c \cdot I'v)_i = E_c \cdot I_v \cdot \left( 1 + \frac{K_l + K_u}{K_v + K_l + K_u} - \frac{L^2}{l^2} \right) \quad (V.1)$$

Onde:  $K_v = I_v/l =$  Rigidez média das vigas;

$K_l = I_{pl}/(h^4/2) =$  Rigidez média das colunas inferiores;

$I_{pu} = I_{pl}/(h^4/2) =$  Rigidez média das colunas superiores;

$I_{pl} =$  Inércia à flexão das colunas inferiores;

$I_{pu} =$  Inércia à flexão das colunas superiores;

$L =$  Comprimento total do pórtico;

$h^4 =$  Altura do pavimento (pé-direito);

$l =$  Vôo médio do pórtico.

A rigidez à flexão da estrutura é obtida a partir do somatório das rigidezes dos diversos pavimentos:

$$(Ec \cdot I'v)_{est} = \sum_{i=1}^n (Ec_i \cdot I'_i v)_i \quad (V.2)$$

Onde: n = Número de pavimentos da estrutura.

### V.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para o caso do pórtico plano analisado no item (IV.4.3), foi feita uma comparação entre os recalques diferenciais máximos calculados pelo método de POULOS (1975a) desprezando-se a interação entre os elementos de fundação, e aqueles calculados utilizando-se a metodologia sugerida por MEYERHOF (1953). Neste exemplo foi considerado um pórtico com apenas 01 (um) pavimento e com rigidez equivalente.

A tabela (V.1) apresenta, para oito diferentes números de pavimentos, a rigidez à flexão da estrutura (calculada segundo as fórmulas V.1 e V.2) e o fator de rigidez equivalente, que é definido pela razão entre as rigidezes à flexão da estrutura a ser considerada e a da estrutura com apenas 01 (um) pavimento. É importante observar que para o caso do pórtico com 01 (um) pavimento, o seu fator de rigidez equivalente é igual ao valor unitário.

A figura (V.1) mostra as curvas de variação do recalque diferencial máximo em função da rigidez

Nº DE PAVIMENTOS	$(E_c \cdot I'v)_{est} (\times 10^5 \text{ KN.m}^2)$	FRE
01	8,9020	1,000
02	14,2655	1,603
03	19,6291	2,205
04	24,9927	2,808
05	30,3562	3,410
08	46,4470	5,218
11	62,5378	7,025
15	83,9921	9,435

Tabela V.1 - Valores da rigidez à flexão da estrutura e fatores de rigidez equivalente para o pórtico plano analisado com oito diferentes números de pavimentos.

relativa estrutura-solo e do número de pavimentos da estrutura. O método proposto por MEYERHOF (1953) sugere que para um determinado valor de  $K_{ss}$ , o recalque diferencial máximo de uma estrutura com um número de pavimentos qualquer é o correspondente ao da estrutura com apenas 01 (um) pavimento com  $K_{ss}$  igual ao produto entre o  $K_{ss}$  escolhido e o fator de rigidez equivalente (FRE).

As figuras (V.2) a (V.4) mostram a comparação entre os valores dos recalques diferenciais máximos obtidos através do método proposto por POULOS (1975a) e os obtidos a partir do procedimento proposto por MEYERHOF (1953), para diferentes valores de  $K_{ss}$  ( $\Delta w_{maxp}$  e  $\Delta w_{maxm}$ , respectivamente).

Observa-se que para o caso de altos e baixos

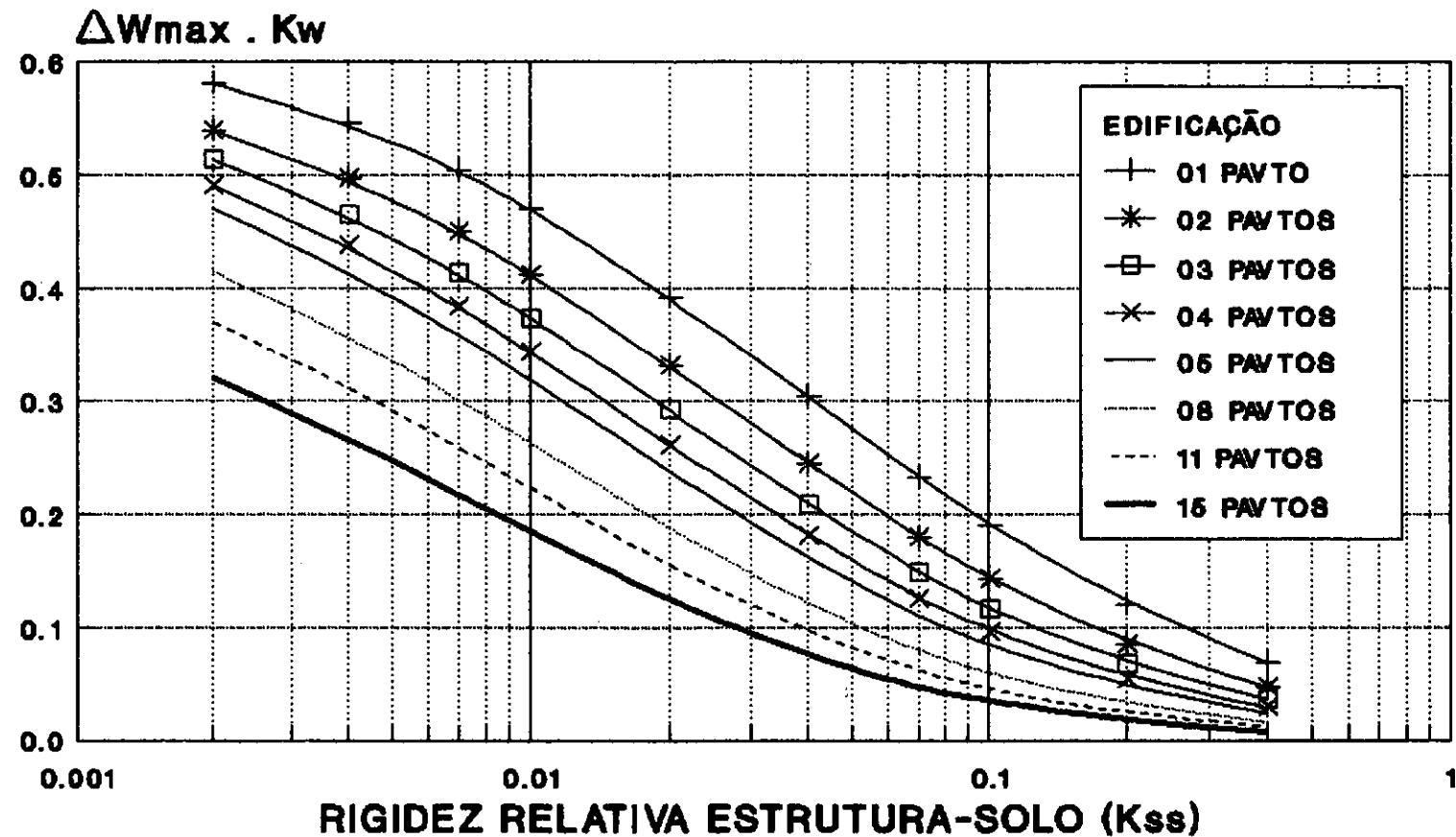


Fig. V.1 - Variação de  $\Delta W_{max}$  em função de Kss para edificações com diferentes números de pavimentos.

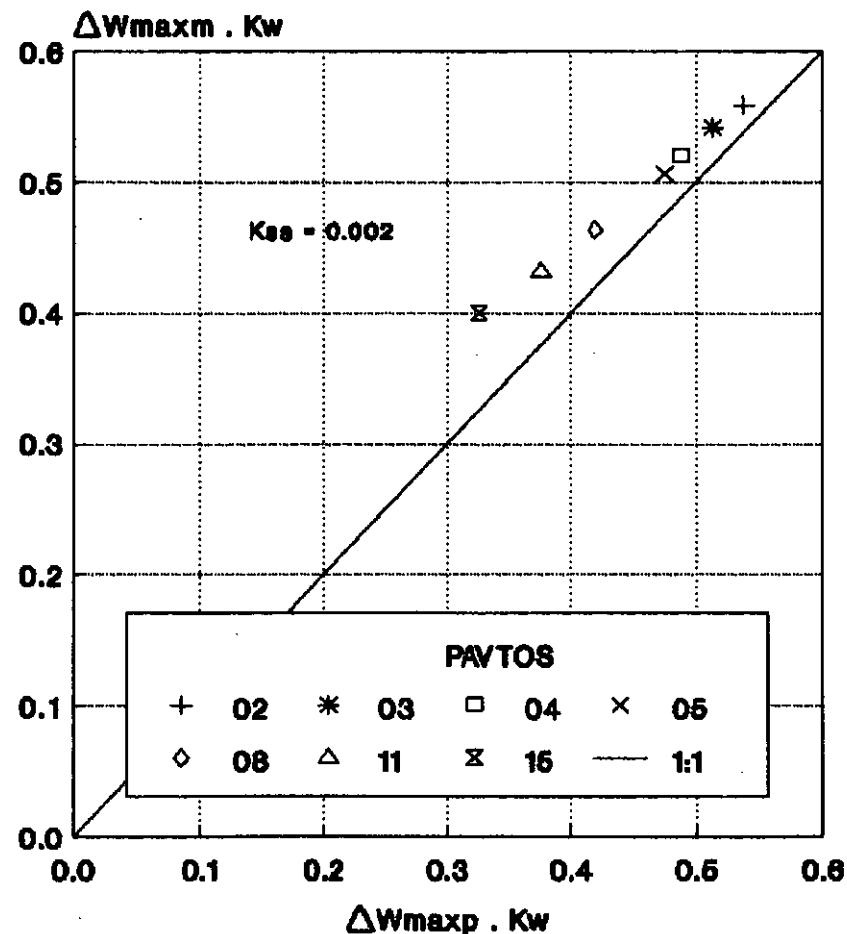


Fig. V.2 - Comparação entre os recalques diferenciais obtidos pelos métodos de POULOS(1975a) e de MEYERHOF(1953).

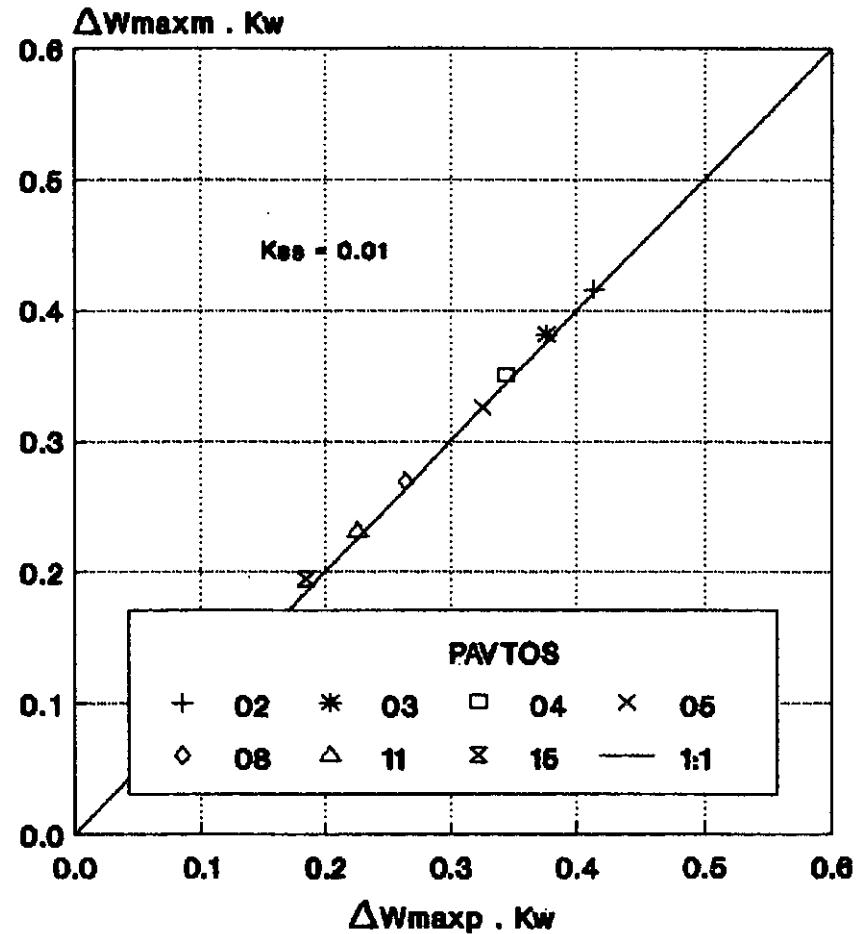
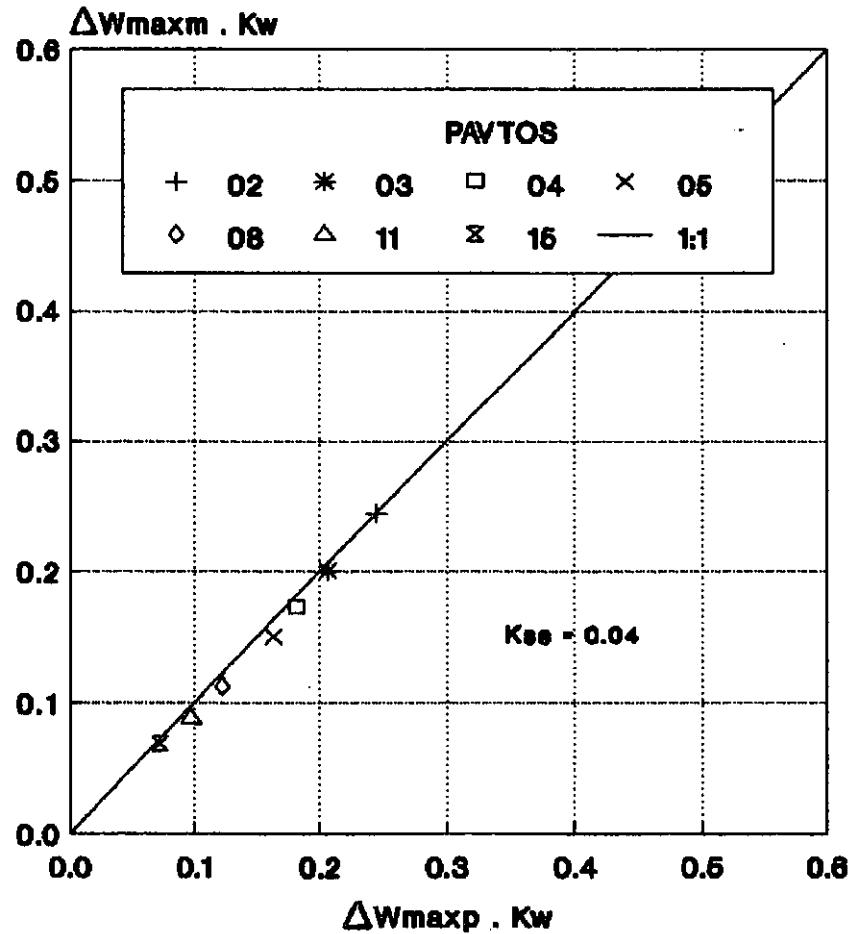


Fig. V.3 - Comparação entre os recalques diferenciais obtidos pelos métodos de POULOS(1975a) e de MEYERHOF(1953).



**Fig. V.4 - Comparação entre os recalques diferenciais obtidos pelos métodos de POULOS(1975a) e de MEYERHOF(1953).**

valores de  $K_{ss}$  a concordância dos valores foi satisfatória. Nota-se, também, que esta concordância é ainda melhor para o caso de valores intermediários de  $K_{ss}$  (GUSMÃO e LOPES, 1990).

## CAPÍTULO VI - CASOS PRÁTICOS DOS EFEITOS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES

### VI.1. INTRODUÇÃO

Apesar de terem sido publicados nos últimos vinte anos alguns trabalhos contendo modelos para a análise de interação solo-estrutura em edificações, a maioria dos autores reconhecem que estes modelos não apresentam resultados confiáveis, a menos que o comportamento do solo e as relações constitutivas correspondentes sejam adequadamente compreendidas e levadas em consideração (PRAKASH e VILADKAR, 1977). BURLAND e WROTH (1974) observam que comparada com a literatura existente sobre a previsão de recalques, a questão dos recalques admissíveis e a influência dos recalques no desempenho e funcionalidade das edificações têm recebido pouca atenção. Tal fato é surpreendente ao se considerar que grandes somas de dinheiro são gastas em investigações de solo dirigidas à estimativa de recalques e que as fundações da maioria das edificações são projetadas especificadamente para limitar os recalques totais e diferenciais.

O monitoramento de edificações representa uma grande contribuição para a avaliação dos inúmeros fatores envolvidos na interação solo-estrutura. Seus resultados, além de possibilitarem a identificação de anormalidades na obra, servem de "feed-back" para projetos

futuros, proporcionando projetos mais seguros e econômicos.

## VI.2. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RECALQUES DE OBRAS INSTRUMENTADAS

### VI.2.1. Conceituação Inicial

A análise de recalques medidos de uma edificação deve compreender dois aspectos fundamentais: o primeiro é que o monitoramento deve assegurar que os resultados obtidos sejam representativos do comportamento da edificação; o segundo é que estes resultados devem ser corretamente interpretados. É comum serem disponíveis resultados confiáveis, mas submetê-los a uma interpretação errônea.

Para o caso de uma edificação qualquer com um número qualquer de apoios e sujeita a um determinado carregamento, tem-se uma deformada correspondente aos recalques estimados e outra correspondente aos valores medidos. Apesar dos recalques não serem variáveis aleatórias, pode-se, por analogia, associar a estas deformadas uma curva de frequência para os valores dos recalques estimados e outra para os recalques medidos, como é mostrado na figura (VI.1). Nesta figura o caso (a) é aquele em que houve um acerto total na previsão dos recalques. O caso (b) é aquele em que o recalque médio estimado coincide com o recalque médio medido, mas houve deficiência na previsão da distribuição dos recalques. No

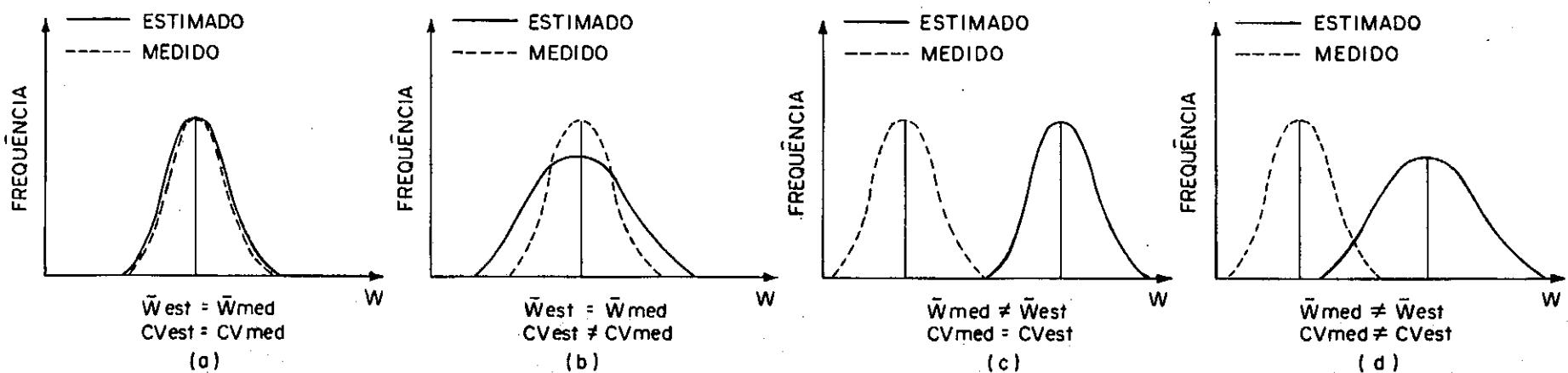
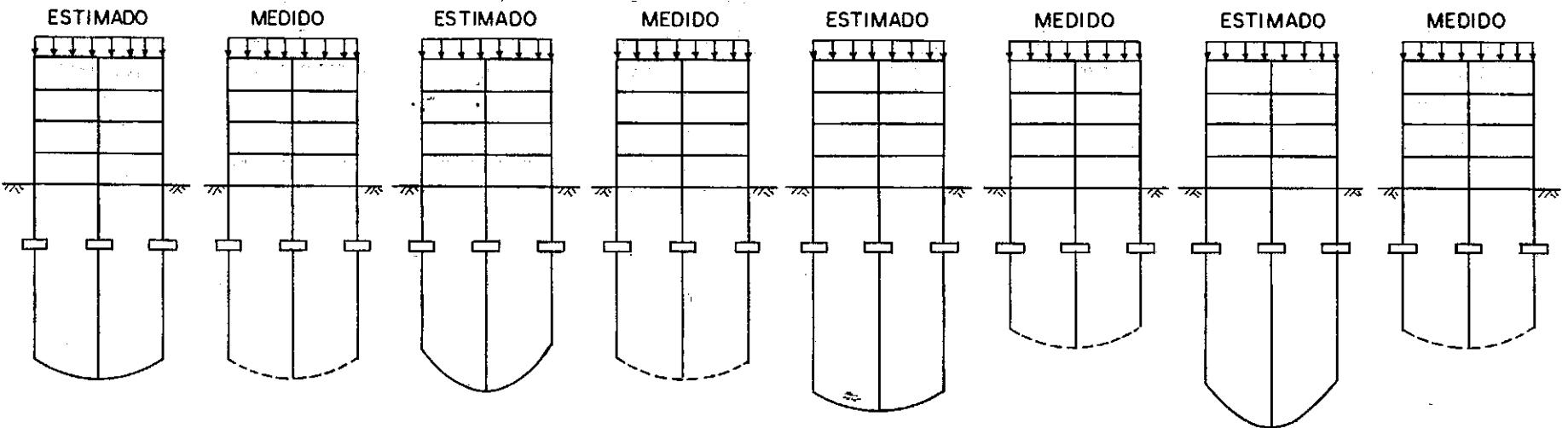


FIG. VI.1 - EXEMPLOS DE DEFORMADAS CORRESPONDENTES AOS RECALQUES ESTIMADOS E MEDIDOS E SUAS RESPECTIVAS CURVAS DE FREQUÊNCIAS.

caso (c) não houve acerto na previsão do recalque médio, embora houvesse na forma como os recalques se distribuem. Já no caso (d) houve deficiência tanto na estimativa do recalque médio como da distribuição dos mesmos.

Pode-se analisar o desempenho de uma edificação qualquer associando-o a dois diferentes modelos: um modelo que represente o comportamento tensão-deformação do terreno de fundação e um modelo que represente a interação solo-estrutura. Observa-se que a interação solo-estrutura influencia a forma da deformada de recalques da edificação, fazendo com que os pilares mais carregados tendam a recalcar menos que o previsto e os pilares menos carregados a recalcar mais que o previsto, embora o recalque absoluto médio seja praticamente independente da interação solo-estrutura. Com isto, pode-se admitir que o recalque absoluto médio seja função apenas do carregamento da edificação e das propriedades de deformação do terreno de fundação e, consequentemente, a diferença entre os valores médios correspondentes aos recalques estimados e medidos possa ser associada à validade do modelo de tensão-deformação adotado para o terreno de fundação. Quanto menor for esta diferença, mais representativo será o modelo de tensão-deformação adotado.

Como já foi visto anteriormente, a interação solo-estrutura promove uma tendência à uniformização dos recalques, influenciando a forma da sua deformada. Pode-se admitir que a forma desta deformada e, consequentemente a interação solo-estrutura, possa ser associada à dispersão

das curvas de frequência dos recalques. Há uma tendência da dispersão da curva de frequência diminuir ao se considerar o efeito da interação solo-estrutura. A figura (VI.2) ilustra três condições de uniformização de recalques criadas pela estrutura.

A simples comparação das dispersões das curvas correspondentes aos recalques absolutos estimados e medidos, representadas pelos seus desvios-padrão, pode levar a erros de interpretação se os recalques absolutos médios não tiverem a mesma ordem de grandeza. Em virtude disto, é que ao invés de considerar o desvio-padrão, deve-se considerar o coeficiente de variação das curvas, que é a relação entre o desvio-padrão e o valor médio. Com isto pode-se admitir que a diferença entre os valores do coeficientes de variação correspondentes aos recalques estimados e medidos está associada à representatividade do modelo de interação solo-estrutura considerado. Em uma estimativa convencional de recalques, o coeficiente de variação correspondente aos recalques previstos deve ser maior que o correspondente aos recalques medidos, independentemente da representatividade ou não do modelo de tensão-deformação adotado para o terreno de fundação.

#### **VI.2.2. Definição de Parâmetros para Análise dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura**

No sentido de se analisar alguns efeitos da interação solo-estrutura em edificações, foram definidos dois parâmetros que servirão para avaliar os efeitos de

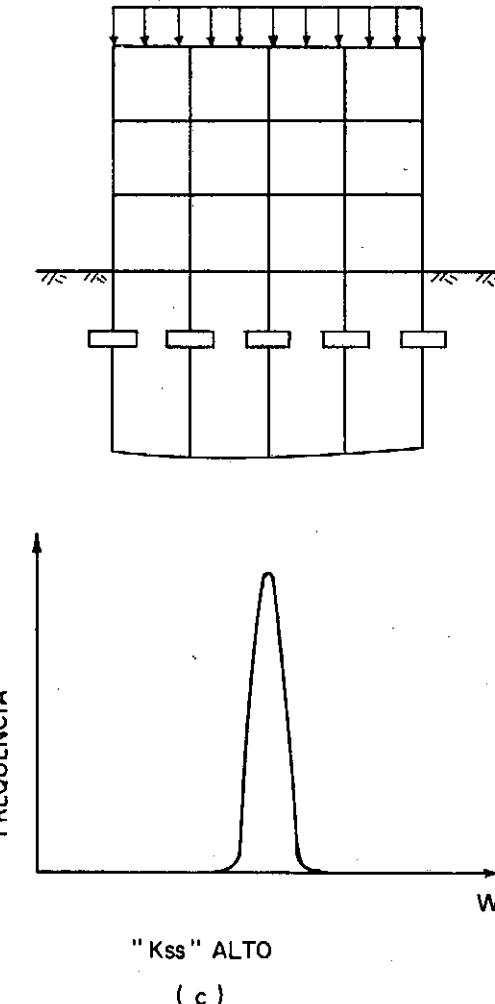
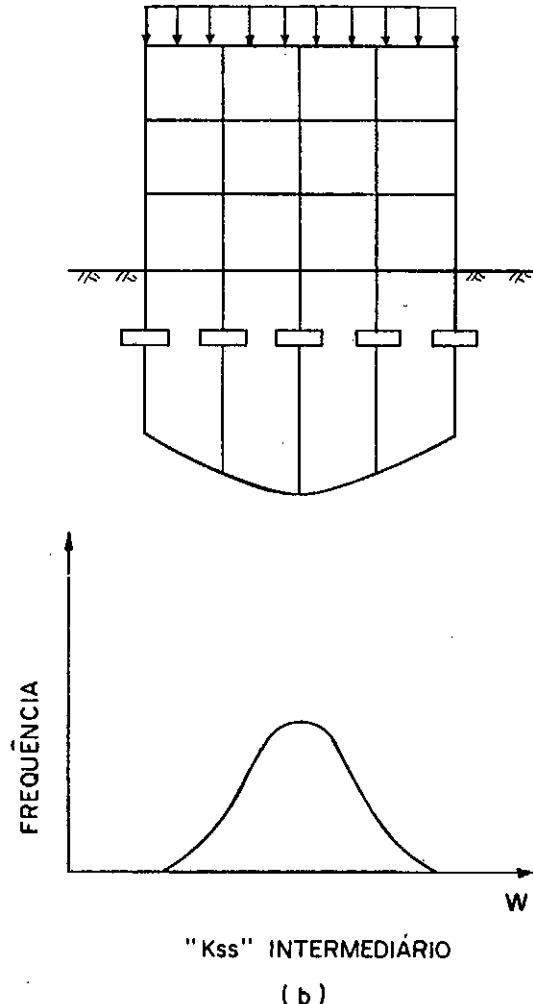
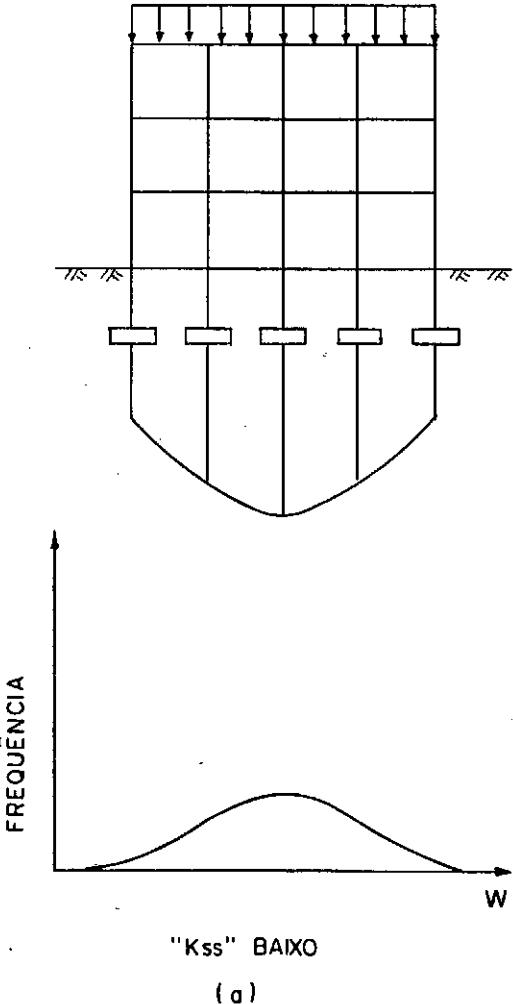


FIG. VI. 2 - VARIAÇÃO DE VALORES DA RIGIDEZ RELATIVA ESTRUTURA-SOLO E SUAS CURVAS DE FREQUÊNCIA DE RECALQUES CORRESPONDENTES.

redistribuição de carga nos pilares e tendência à uniformização dos recalques:

(a) Fator de Recalque Absoluto (AR)

$$AR = \frac{w_i}{\bar{w}} \quad (VI.1)$$

Onde:  $w_i$  = Recalque absoluto do apoio  $i$ ;

$\bar{w}$  = Recalque absoluto médio.

(b) Fator de Recalque Diferencial (DR)

$$DR = \frac{|w_i - \bar{w}|}{\bar{w}} \quad (VI.2)$$

### VI.2.3. Sobre o Efeito da Redistribuição de Carga nos Pilares

Como foi visto no item (I.1) os recalques diferenciais provocam uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, resultando numa redistribuição de carga nos pilares da edificação. A interação solo-estrutura faz com que haja um alívio de carga nos pilares mais carregados e uma sobrecarga dos pilares menos carregados. Observa-se que para o caso dos pilares que têm recalque absoluto estimado convencionalmente maior que o valor médio, há uma tendência deste valor ser maior que o recalque absoluto medido, devido à tendência de alívio de carga nestes pilares. No caso dos pilares que têm recalque

absoluto estimado convencionalmente menor que o valor médio, observa-se o contrário, ou seja, há uma tendência deste valor ser menor que o valor medido, devido à tendência de sobrecarga destes pilares. A simples comparação entre os valores dos recalques absolutos estimados convencionalmente e os medidos, como foi visto no item (VI.2), pode levar a erros de interpretação se os valores médios correspondentes não tiverem a mesma ordem de grandeza. Em virtude disto, deve-se fazer a comparação não entre os recalques absolutos, mas entre os valores de AR estimados convencionalmente e medidos. Logo, no caso dos pilares com ARest maior que a unidade, há uma tendência deste valor ser maior que o valor de ARmed (alívio de carga), enquanto que no caso dos pilares com ARest menor que a unidade, há uma tendência deste valor ser menor que o valor de ARmed (sobrecarga).

#### VI.2.4. Sobre o Efeito da Tendência à Uniformização dos Recalques

Como já foi visto anteriormente, a interação solo-estrutura promove uma tendência à uniformização dos recalques. Observa-se que, no caso dos recalques absolutos médios estimados convencionalmente e medidos terem a mesma ordem de grandeza, há uma diminuição dos recalques diferenciais medidos em relação aos estimados convencionalmente. Assim, de uma maneira geral, os valores de DR estimados convencionalmente devem ser maiores que os medidos, evidenciando o efeito da interação solo-estrutura.

na suavização da forma da deformada de recalques.

### VI.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RECALQUES A CASOS DE OBRAS ANALISADOS

#### VI.3.1. Generalidades

Foram considerados 07 (sete) prédios em que foram feitas medições de recalque. A maioria destas edificações é de grande porte, com fundações, estruturas e subsolos diferentes. A seguir são apresentados estes casos, onde é feita a aplicação da metodologia proposta no item (VI.2), no sentido de se enfatizar alguns efeitos importantes da interação solo-estrutura, tais como a suavização da deformada de recalques e a redistribuição de carga nos pilares.

#### VI.3.2. Caso 01 - Recife/PE

A edificação analisada e instrumentada é um prédio residencial com estrutura aporticada em concreto armado e painéis de alvenaria, constituída pelo pavimento térreo, 01 (um) pavimento vazado e 13 (treze) pavimentos-típo, num total de 15 (quinze) lajes e 30 (trinta) pilares. Há uma junta que separa o pavimento vazado e o estacionamento do restante da estrutura. As análises realizadas referem-se apenas à área de projeção da lámina do prédio.

O perfil geotécnico do terreno de fundação,

caracterizado através de sondagens a percussão e ensaios de penetração estática (cone holandês), é mostrado na figura (VI.3).

Em virtude do elevado custo de uma solução em fundações profundas (estacas com mais de 35m de comprimento), foram projetadas fundações superficiais do tipo sapatas, associadas a uma melhoria da camada mais superficial do terreno. Esta melhoria, em torno de 5m de espessura, foi feita utilizando-se a técnica de compactação através de estacas de areia e brita. Tal técnica tem sido utilizada com frequência em Recife-PE e tem apresentado resultados bastante satisfatórios (GUSMÃO FILHO e GUSMÃO, 1990). Estas sapatas, após o melhoramento da camada superficial, foram projetadas transmitindo ao terreno uma tensão média de 350 KPa a uma profundidade de 1,50m.

Para a estimativa dos recalques da edificação, foram coletadas amostras indeformadas da camada de argila em profundidade e realizados ensaios de adensamento oedométrico. O recalque da camada superficial de areia foi desprezado em virtude de ser muito menor que o recalque da camada argilosa. A estimativa dos recalques sem a consideração da interação solo-estrutura levou à previsão de uma deformada de recalques com forma côncava, com um recalque absoluto máximo da ordem de 110 mm. Esta análise mostrou rotações relativas (ou distorções angulares) entre pilares interligados maiores que os valores recomendados para o limite de aparecimento de danos sugerido por SKEMPTON e MACDONALD (1956).

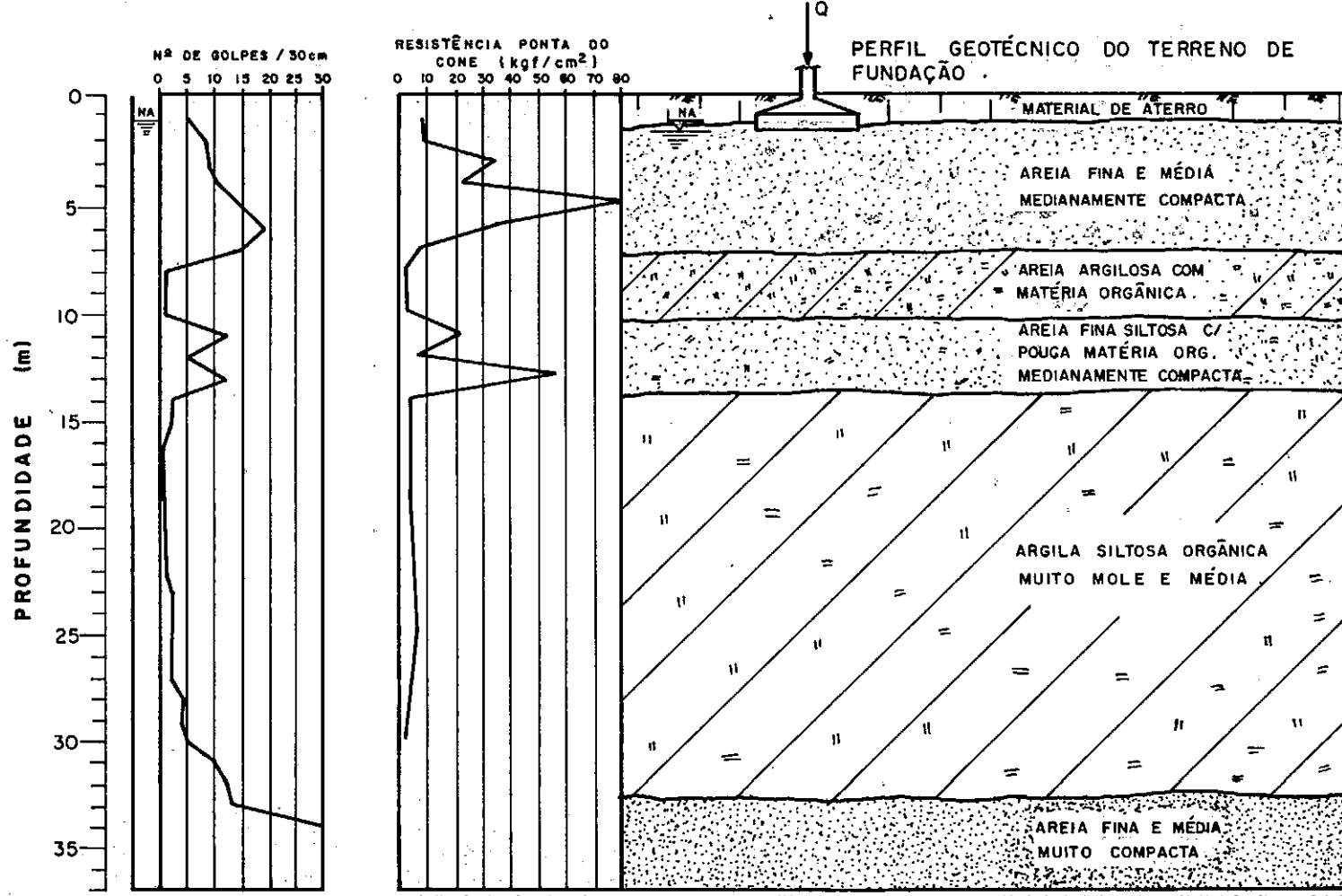


FIG. VI.3 - PERFIL GEOTÉCNICO DO TERRENO DE FUNDAÇÃO - CASO 01 (ANTES DO MELHORAMENTO)

Para a avaliação dos efeitos da interação solo-estrutura nos recalques do prédio, foi admitido que a superestrutura fosse substituída por um radier com rigidez equivalente utilizando-se a formulação proposta por MEYERHOF (1953). Foram então utilizados os gráficos propostos por FRASER e WARDLE (1976) para a estimativa da percentagem média de redução dos recalques diferenciais convencionais, como é sugerido por BURLAND et alii (1977). Obteve-se uma redução média da ordem de 30%, e com isso as rotações relativas atingiram valores compatíveis com um bom desempenho da edificação (GUSMÃO e GUSMÃO FILHO, 1990). No sentido de absorver a provável redistribuição de carga, os pilares periféricos foram dimensionados até o terceiro pavimento para cargas 30% maiores que as previstas no projeto estrutural original. Foi projetado também um cintamento que tem como principal função promover uma forte amarração dos pilares da edificação, restringindo-se assim os movimentos horizontais relativos dos mesmos, e contribuindo para a restrição aos movimentos verticais diferenciais juntamente com a superestrutura. É importante ressaltar que este reforço foi feito nas cintas devido ao fato da contribuição relativa dos primeiros pavimentos na rigidez da estrutura ser bem maior que a dos demais pavimentos (ver item IV.4.4). Estas cintas foram armadas para absorver não apenas esforços de flexão, mas também esforços de tração decorrentes do tipo de deformada de recalques previsto (fig. VI.4).

A fim de se avaliar o desempenho da edificação, foi implantada uma instrumentação para

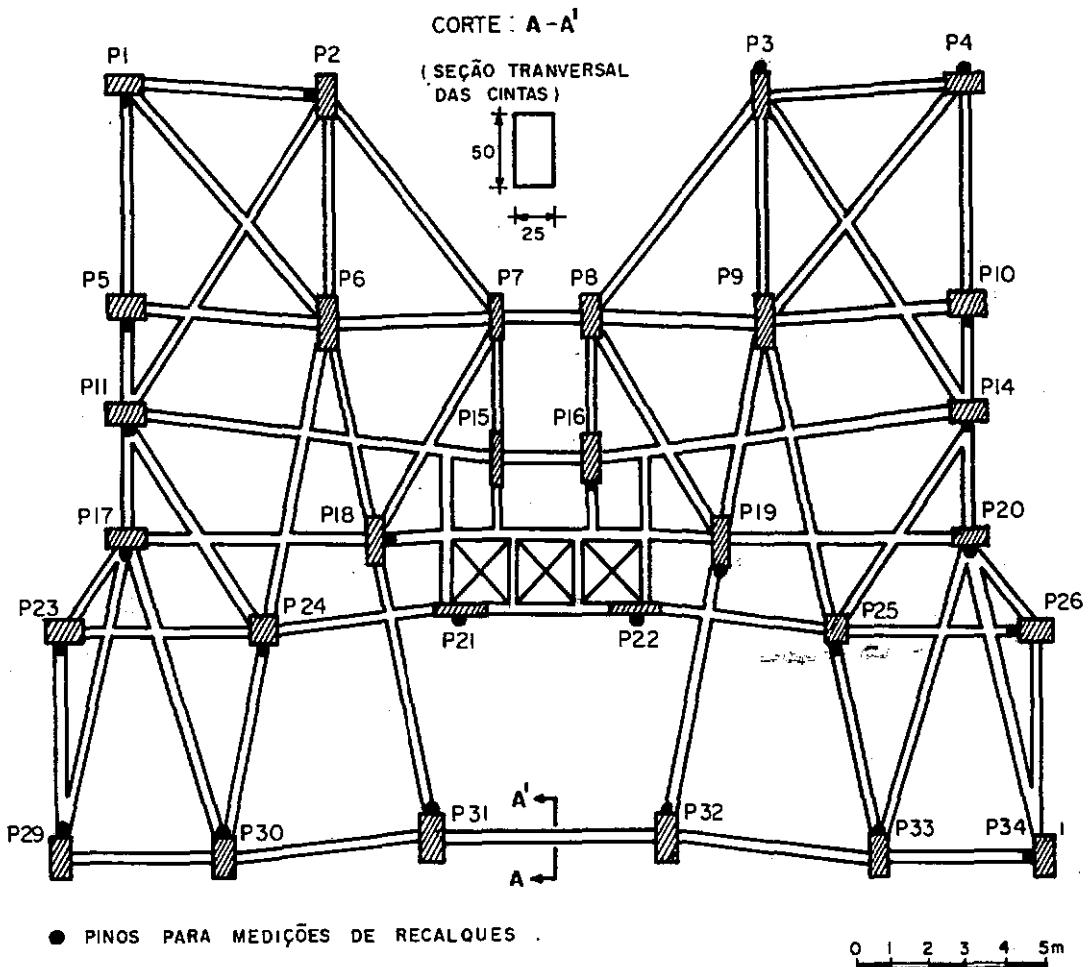


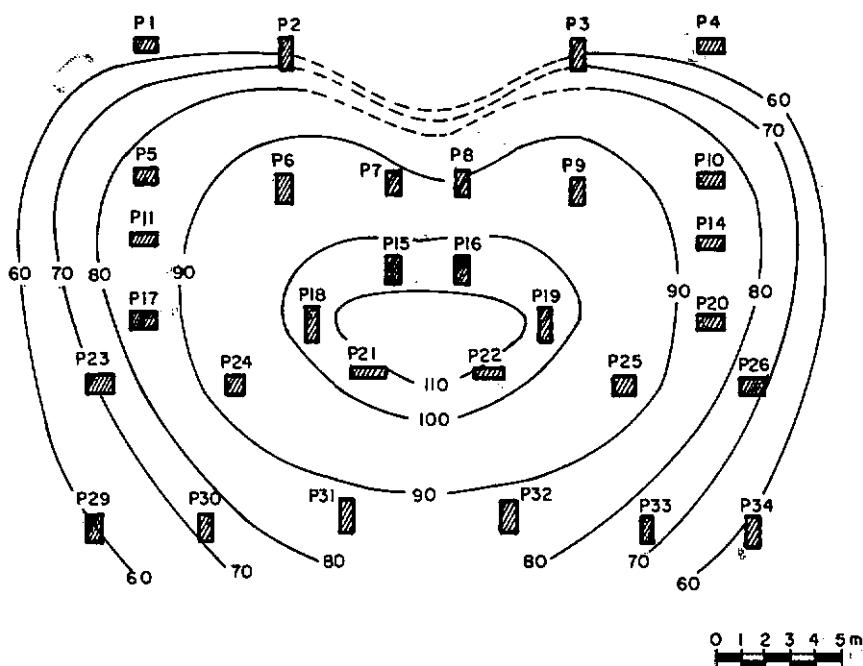
FIG. VI.4 - FORMA E LOCAÇÃO DAS CINTAS DA ESTRUTURA -  
CASO 01 .

acompanhamento dos recalques. Foram instalados pinos para medição de recalque em todos os pilares da projeção da lâmina da edificação, num total de 30 (trinta) pinos.

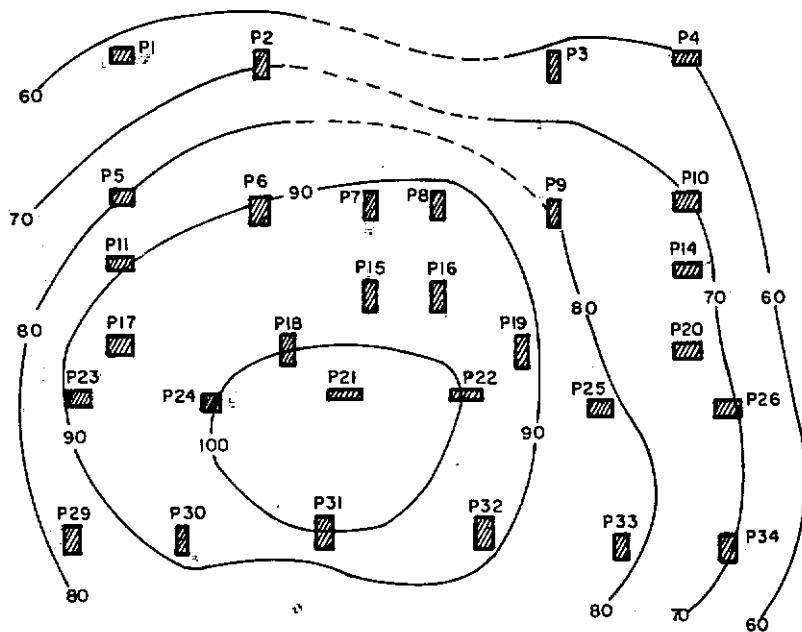
O primeiro nivelamento, devido a problemas construtivos, foi realizado quando já estava concluída a 5<sup>a</sup> laje da estrutura, o que equivale aproximadamente a 13% do carregamento total previsto. Foram realizadas 06 (seis) leituras durante a construção e mais 01(uma) com o prédio totalmente construído (antes da sua ocupação). Um estudo de regressão mostrou um recalque absoluto médio em torno de 6 mm para o período entre o início da construção e a primeira leitura de recalques, que pode ser desprezado em função da grandeza dos recalques medidos na última leitura.

A figura (VI.5) mostra as curvas de isorecalques correspondentes aos recalques estimados convencionalmente (sem ser levada em consideração a interação solo-estrutura) e aos medidos pela última leitura.

O quadro (VI.1) mostra algumas características referentes à distribuição dos recalques estimados convencionalmente e aos medidos. Observa-se que os recalques absolutos médios têm a mesma ordem de grandeza, revelando uma boa representatividade do modelo de tensão-deformação do solo adotado nas análises. Como era de se esperar, o coeficiente de variação dos recalques medidos é menor que o dos recalques estimados convencionalmente, devido à influência da interação solo-estrutura na tendência à uniformização dos recalques.



RECALQUES ESTIMADOS SEM CONSIDERAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (mm).



RECALQUES MEDIDOS (mm).

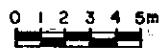


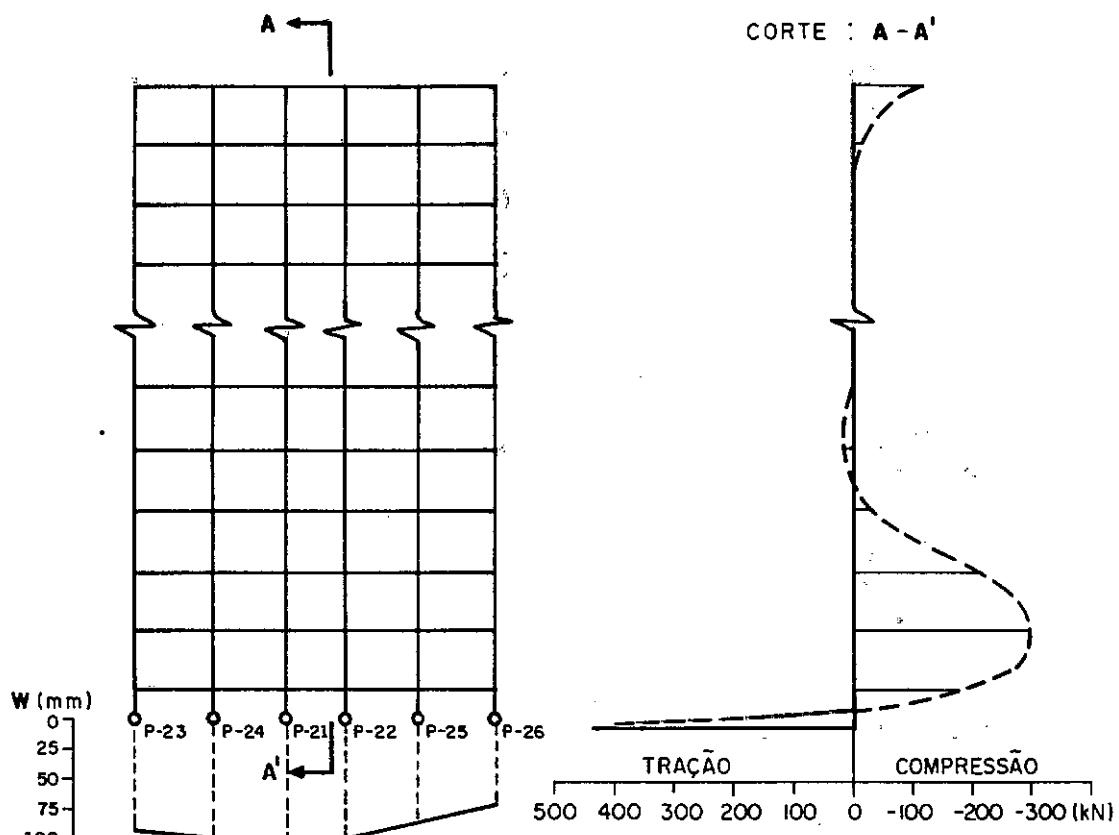
FIG. VI.5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE ISORECALQUES ESTIMADAS CONVENCIONALMENTE E AS MEDIDAS — CASO 01 .

Foi feita uma análise estrutural do pôrtico central do prédio sujeito à deformada de recalques medidos na última leitura. A figura (VI.6) mostra os resultados desta análise, que confirmam os esforços previstos no modelo da viga-parede proposto por GOSHY (1978). Observa-se, também, que os esforços diminuem de baixo para cima, sendo praticamente desprezíveis a partir do 4º-pavimento.

Os resultados da instrumentação indicam que houve uma redistribuição de carga nos pilares. Esta redistribuição, decorrente da interação solo-estrutura, faz com que os pilares que tendem a recalcar mais tenham um alívio de carga, enquanto que os pilares que tendem a recalcar menos tenham um acréscimo de carga. No caso desta edificação, em que havia uma previsão de uma deformada de recalques com forma côncava, existe uma tendência de sobrecarga dos pilares periféricos e uma tendência de alívio de carga para os pilares centrais.

CARACTERÍSTICAS	RECALQUE ABSOLUTO	
	CONVENCIONAL	MEDIDO
MÉDIA (mm)	79,2	82,3
DESVIO-PADRÃO (mm)	15,0	13,4
COEFIC. DE VARIAÇÃO	0,189	0,162

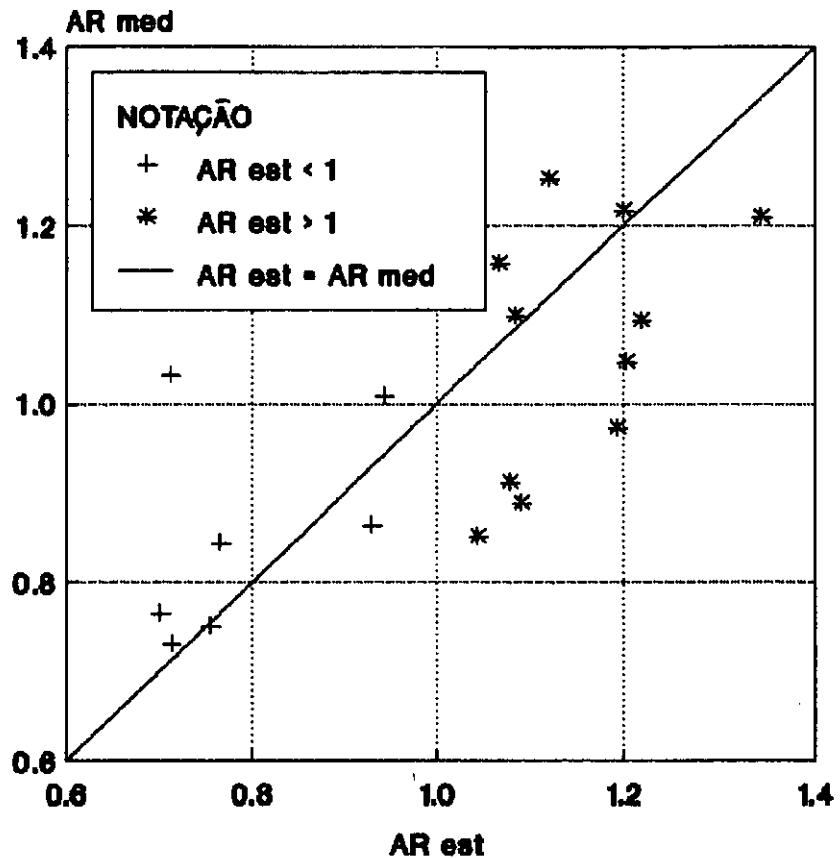
Quadro VI.1 - Características da distribuição dos recalques estimados convencionalmente e medidos - Caso 01.



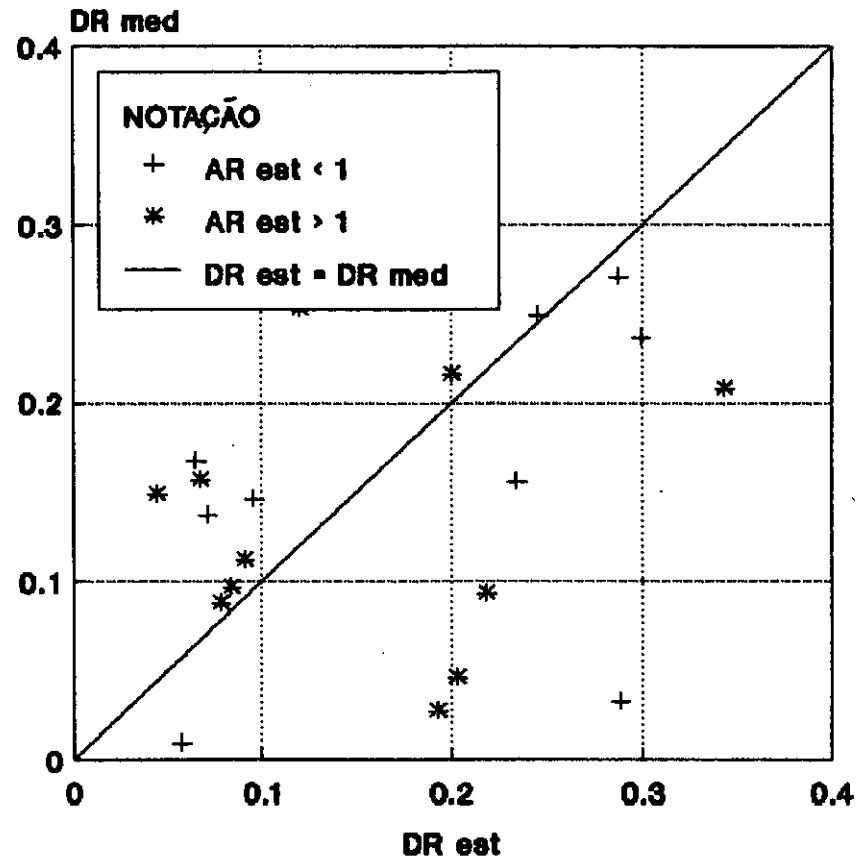
DEFORMADA, DE RECALQUES  
MEDIDOS PARA O PÓRTICO  
CENTRAL .

FIG. VI.6—ESFORÇOS NORMAIS NAS BARRAS HORIZONTAIS  
DO PÓRTICO CENTRAL DA ESTRUTURA DEVIDO  
AOS RECALQUES MEDIDOS — CASO 01 .

A figura (VI.7) mostra a comparação dos valores de AR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se, para a maioria dos pontos, que quando o valor de AR estimado convencionalmente é maior que a unidade, o valor de AR medido é menor que o de AR estimado convencionalmente. No caso de AR estimado convencionalmente ser menor que a unidade, o valor de AR medido é maior que o de AR estimado convencionalmente. Isto é explicado pelo fato dos pilares mais carregados terem um recalque absoluto estimado convencionalmente maior que o recalque absoluto médio estimado convencionalmente ( $W_i > \bar{W}$ ), ocorrendo o contrário para os pilares menos carregados ( $W_i < \bar{W}$ ). A interação solo-estrutura, como já foi visto, faz com que os pilares mais carregados tendam a ter um alívio de carga, resultando em menores recalques absolutos quando comparados com o recalque absoluto medido. Isto faz com que o valor de AR estimado convencionalmente seja maior que o valor de AR medido. Já no caso dos pilares menos carregados ocorre o inverso, ou seja, eles tendem a ter um sobrecarga, resultando em maiores recalques absolutos quando comparados com o recalque absoluto medido, fazendo com que o valor de AR estimado convencionalmente seja menor que o valor de AR medido. O comportamento discordante de alguns pilares pode ser explicado por uma heterogeneidade das características de deformação do terreno, o que foi comprovado pelo fato do prédio recalcar mais de um lado que do outro, apesar do mesmo ser simétrico.



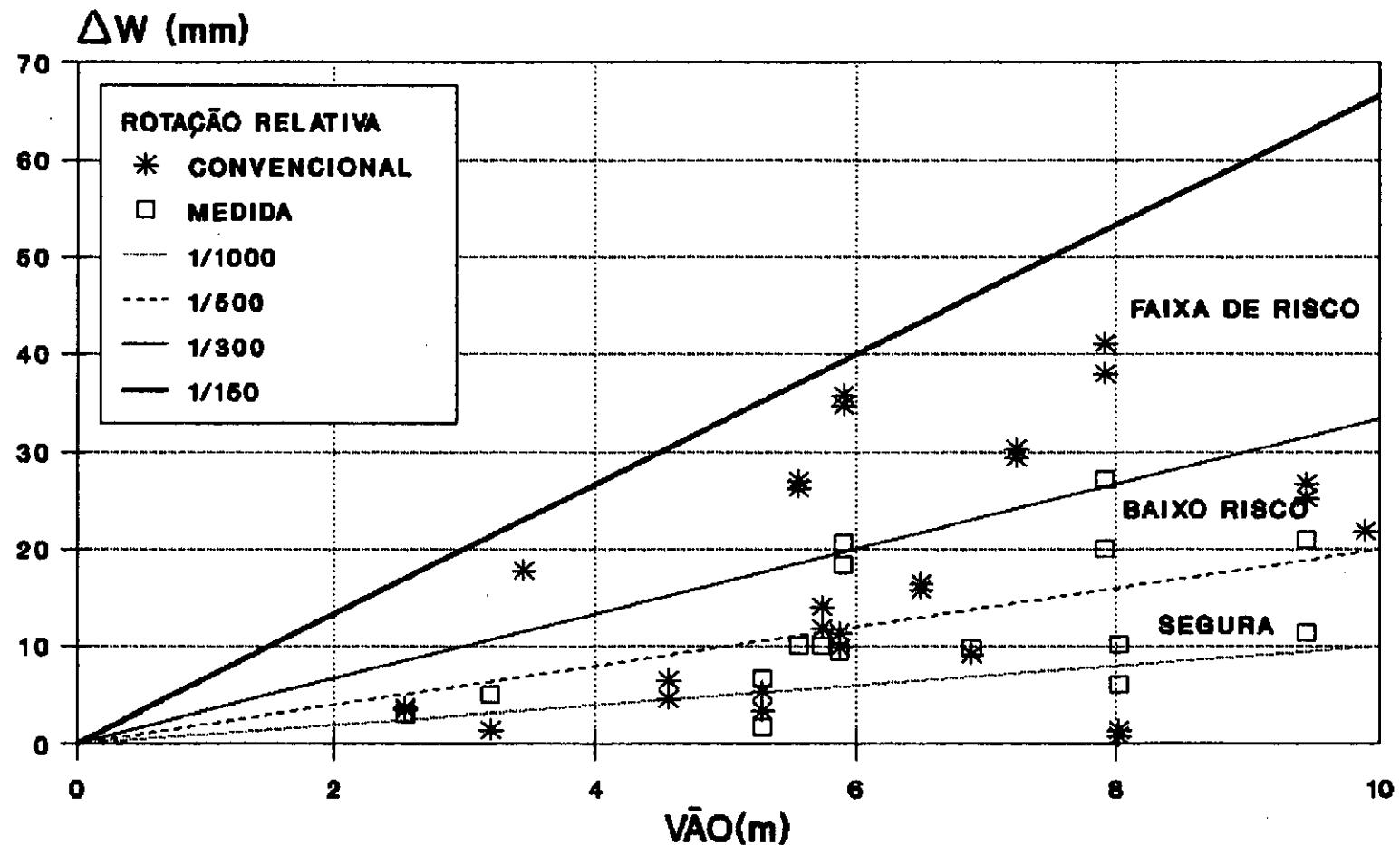
**Fig. VI.7 - Comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 01.**



**Fig. VI.8 - Comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 01.**

A medição dos recalques também permitiu indicar o efeito da interação solo-estrutura na uniformização dos recalques, conduzindo a uma deformada de recalques mais suave. A figura (VI.8) mostra a comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos. O fato de que, para a maioria dos pontos, os valores de DR estimados convencionalmente são menores que os medidos, pode ser atribuído à heterogeneidade das características de deformação do terreno de fundação, já comentada anteriormente.

Como já foi visto anteriormente, o recalque absoluto médio medido e o estimado convencionalmente têm a mesma ordem de grandeza (cerca de 80 mm). Com isto pode-se admitir a hipótese de que a diferença entre os recalques diferenciais medidos e estimados convencionalmente seja provocada preponderantemente pelo efeito da interação solo-estrutura. No sentido de se avaliar o desempenho do prédio com relação ao aparecimento de danos, a figura (VI.9) mostra a comparação entre as rotações relativas (ou distorções angulares) medidas e as estimadas convencionalmente para os pilares interligados. Observa-se que as rotações relativas medidas situaram-se praticamente todas abaixo de 1/300, que é o valor limite proposto por SKEMPTON e MACDONALD (1956) a partir do qual é provável a ocorrência de fissuras em paredes de alvenaria de estruturas aporticadas. Este gráfico ilustra bem a observação de BARATA (1986), segundo a qual não é coerente comparar as distorções angulares estimadas convencionalmente com os limites para aparecimento de



**Fig. VI.9 – Comparação entre as rotações relativas estimadas convencionalmente e as medidas - Caso 01.**

danos sugeridos por diversos autores, sob pena de se chegar a projetos conservadores.

#### VI.3.3. Caso 02 - Santos/SP

Esta edificação corresponde ao prédio "B", que foi analisado por MACHADO (1958). Trata-se de uma estrutura aporticada em concreto armado, cujos detalhes estruturais não são apresentados no referido trabalho.

O perfil geotécnico do terreno de fundação é mostrado na figura (VI.10). A fundação do prédio consiste num radier nervurado assente a uma profundidade de 2m em relação ao terreno natural.

Para a estimativa dos recalques foram coletadas amostras indeformadas da camada de argila mole intermediária e realizados ensaios de caracterização, compressão simples e adensamento oedométrico. Os recalques da camada inicial de areia foram desprezados em virtude de serem bem menores que os estimados para a camada argilosa.

Foi implantada uma instrumentação para medição de recalques em 20 (vinte) dos 28 (vinte e oito) pilares existentes. A figura (VI.11) mostra as isorecalques estimadas convencionalmente e as medidas através da instrumentação.

O quadro (VI.2) mostra algumas características da distribuição dos recalques estimados convencionalmente e medidos. Observa-se que os recalques absolutos médios estimado convencionalmente e medido têm a mesma ordem de grandeza, revelando uma boa

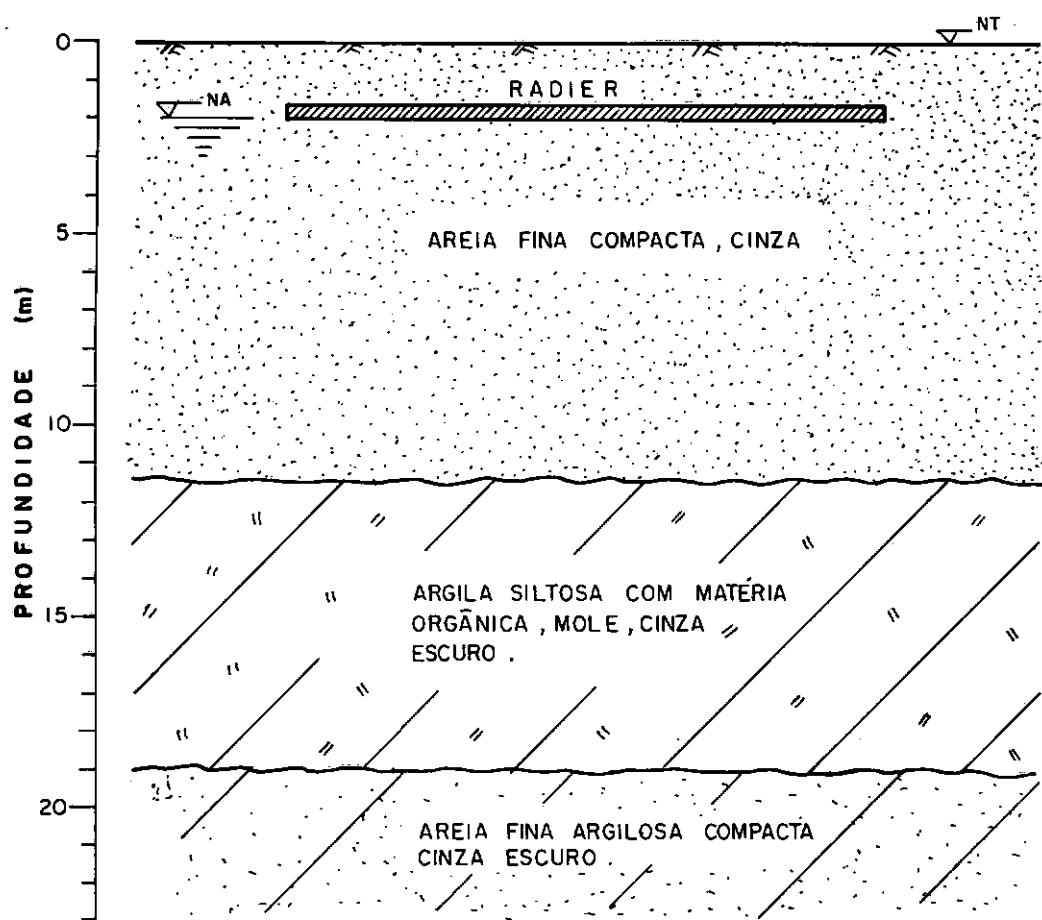
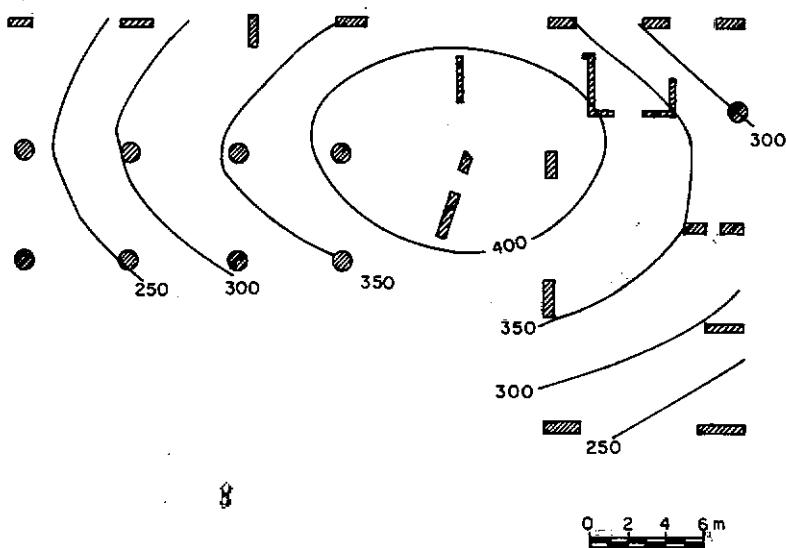
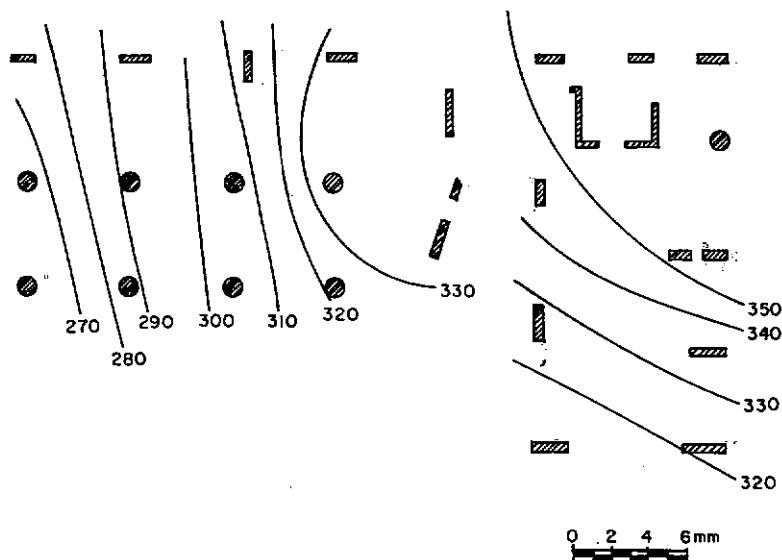


FIG. VI. 10 - PERFIL GEOTÉCNICO DO TERRENO DE FUNDAÇÃO -  
CASO 02 .



**RECALQUES ESTIMADOS SEM CONSIDERAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (mm).**



**RECALQUES MEDIDOS (mm) .**

FIG. VI.11 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE ISORECALQUES ESTIMADAS CONVENCIONALMENTE E MEDIDAS – CASO 02

CARACTERÍSTICAS	RECALQUE ABSOLUTO	
	CONVENCIONAL	MEDIDO*
MÉDIA (mm)	310,7	319,9
DESVIO-PADRÃO (mm)	71,2	31,1
COEFIC. DE VARIAÇÃO	0,229	0,097

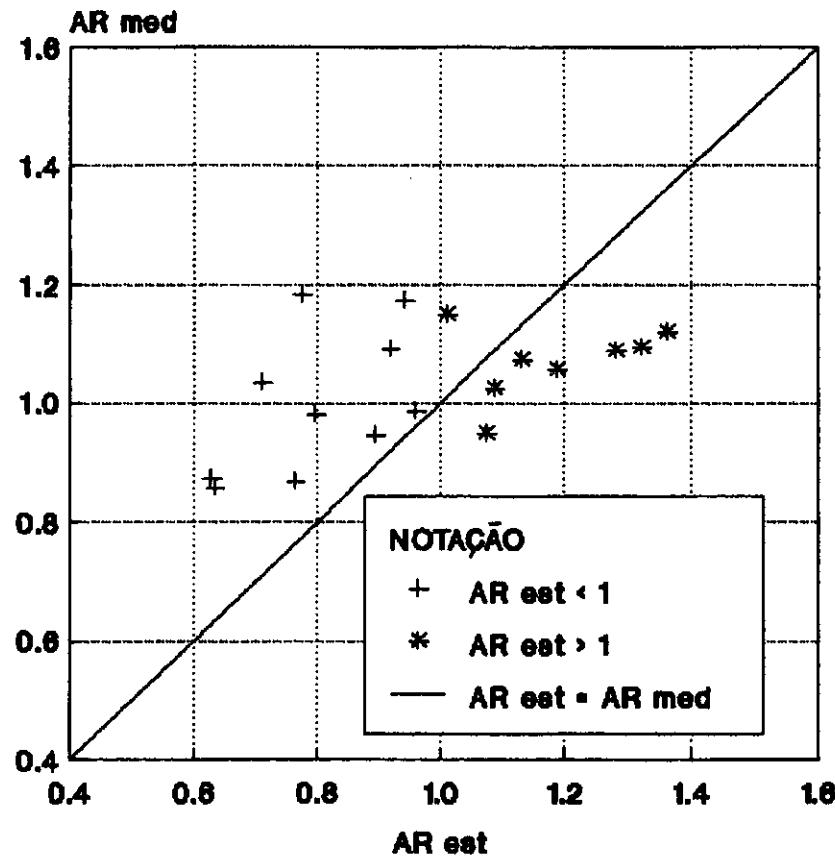
\* Leitura realizada cerca de 4,5 anos após o término da construção da edificação.

Quadro VI.2 - Características da distribuição dos recalques estimados convencionalmente e medidos - Caso 02.

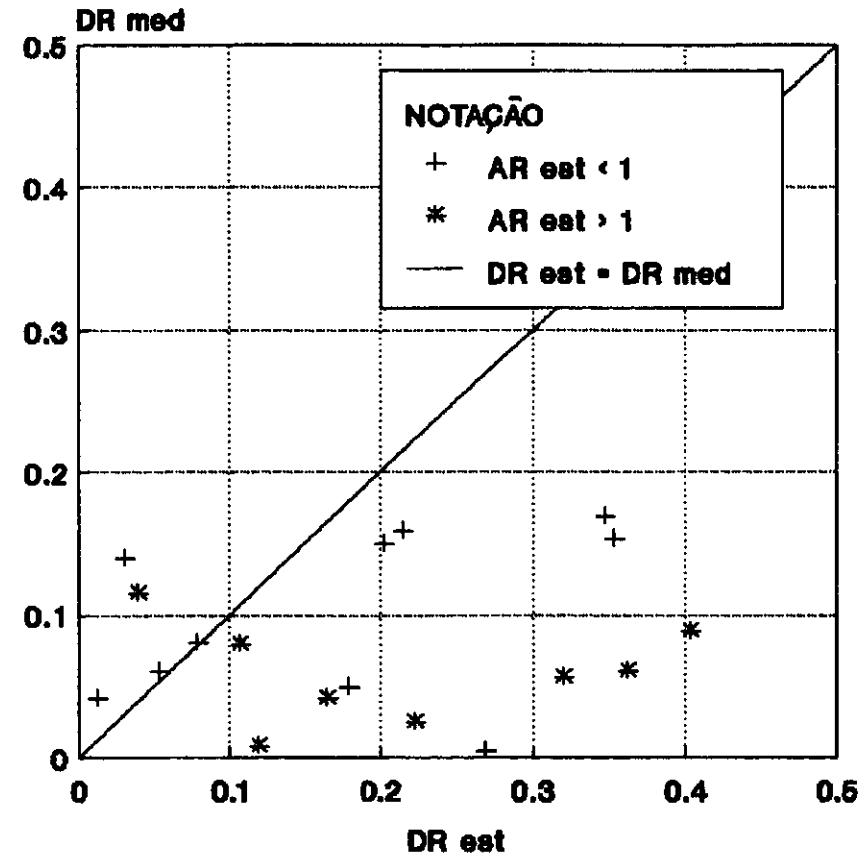
representatividade do modelo de tensão-deformação adotado para o terreno de fundação. O coeficiente de variação correspondente aos recalques medidos mostrou-se menor que o correspondente aos recalques estimados convencionalmente, confirmando o efeito da interação solo-estrutura na tendência à uniformização dos recalques.

A figura (VI.12) mostra a comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se muito claramente que houve uma redistribuição de carga nos pilares. Os resultados confirmam a tendência dos pilares com o valor de ARest maior que a unidade sofrerem um alívio de carga ( $A_{Rest} > A_{Rmed}$ ). Nos pilares com o valor de ARest menor que a unidade, a tendência é exatamente a oposta, ou seja, sofrerem uma sobrecarga ( $A_{Rest} < A_{Rmed}$ ).

Os resultados da instrumentação também mostraram que a interação solo-estrutura leva a uma



**Fig. VI.12 – comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 02.**



**Fig. VI.13 – Comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 02.**

tendência de uniformização dos recalques. A figura (VI.13) mostra a comparação dos valores de DR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se que em praticamente todos os pontos o valor de DRest é maior que o de DRmed, evidenciando a suavização da deformada de recalques da edificação.

#### VI.3.4. Caso 03 - Santos/SP

Esta edificação corresponde ao prédio "C", que foi analisado por MACHADO (1958). Trata-se de uma estrutura aporticada em concreto armado com 12 (doze) pavimentos e 50 (cinquenta) pilares.

O perfil geotécnico do terreno de fundação é mostrado na figura (VI.14). A fundação do prédio consiste de sapatas isoladas, interligadas por um sistema de vigas (cintas), assentes a uma profundidade de 2m em relação ao terreno natural.

Durante a etapa de prospecção geotécnica do terreno de fundação, foram coletadas em diferentes profundidades amostras indeformadas da camada de argila mole e realizados ensaios de caracterização, oedométrico e compressão simples. Em função dos resultados dos ensaios oedométricos, foram estimados convencionalmente os recalques da edificação. Os recalques da camada superficial de areia foram desprezados.

A implantação de uma instrumentação para medição de recalques permitiu a comparação dos recalques medidos e estimados convencionalmente em 26 (vinte e seis)

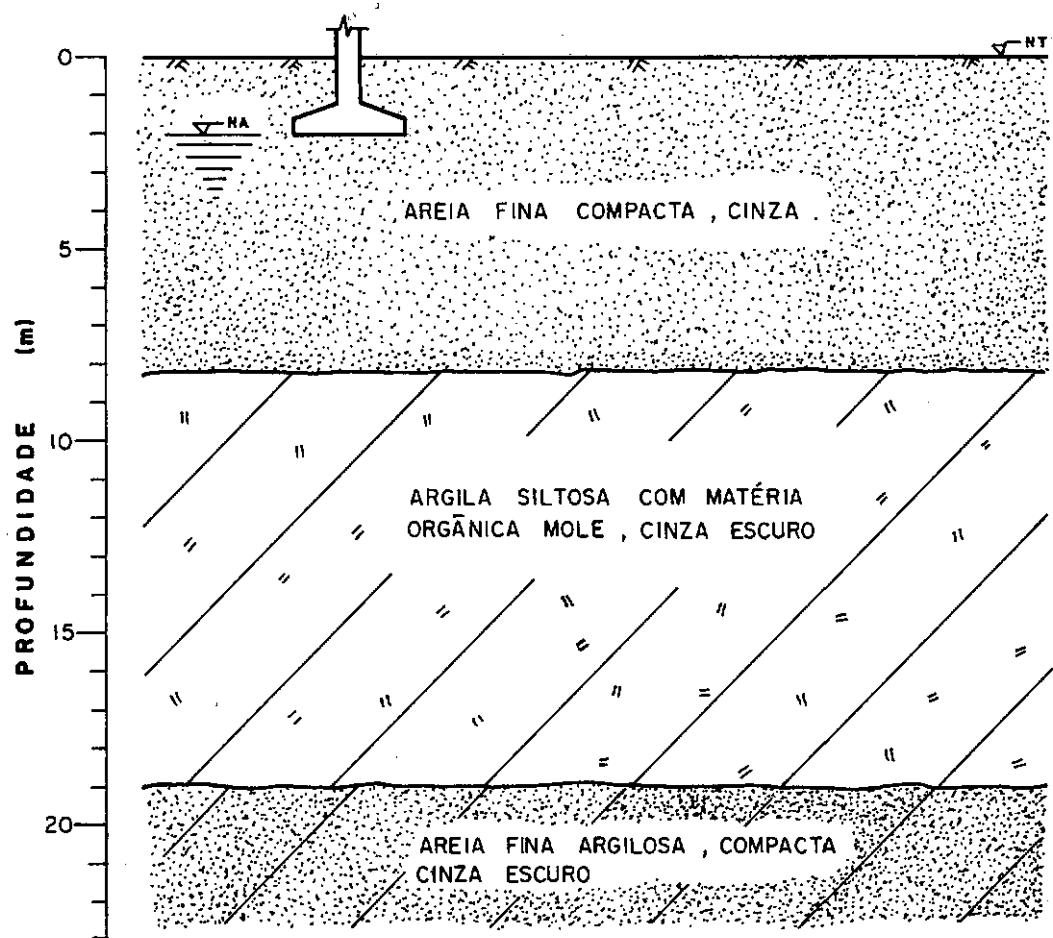
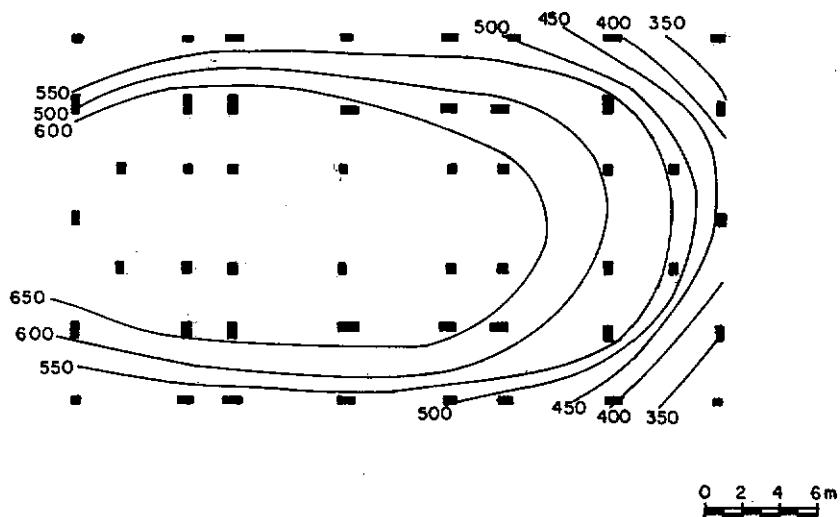
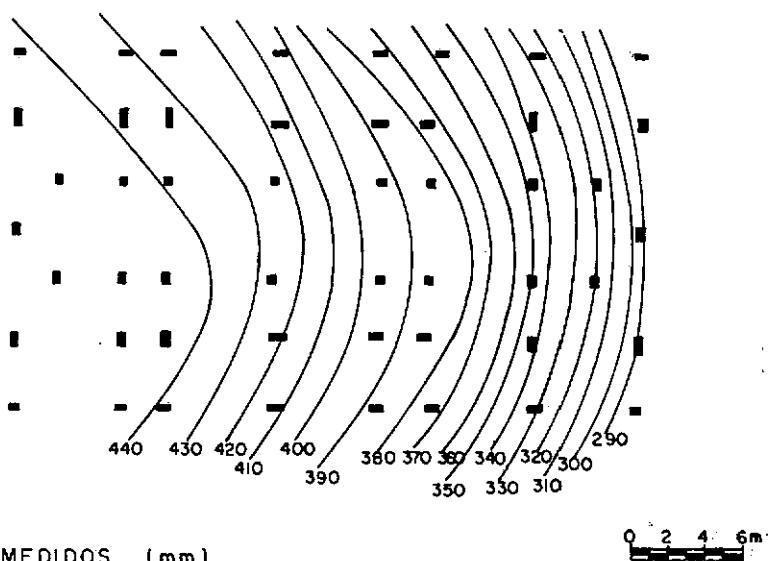


FIG. VI. 14 - PERFIL GEOTÉCNICO DO TERRENO DE FUNDAÇÃO  
CASO 03 .



RECALQUES ESTIMADOS SEM CONSIDERAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO - ESTRUTURA (mm)



RECALQUES MEDIDOS (mm)

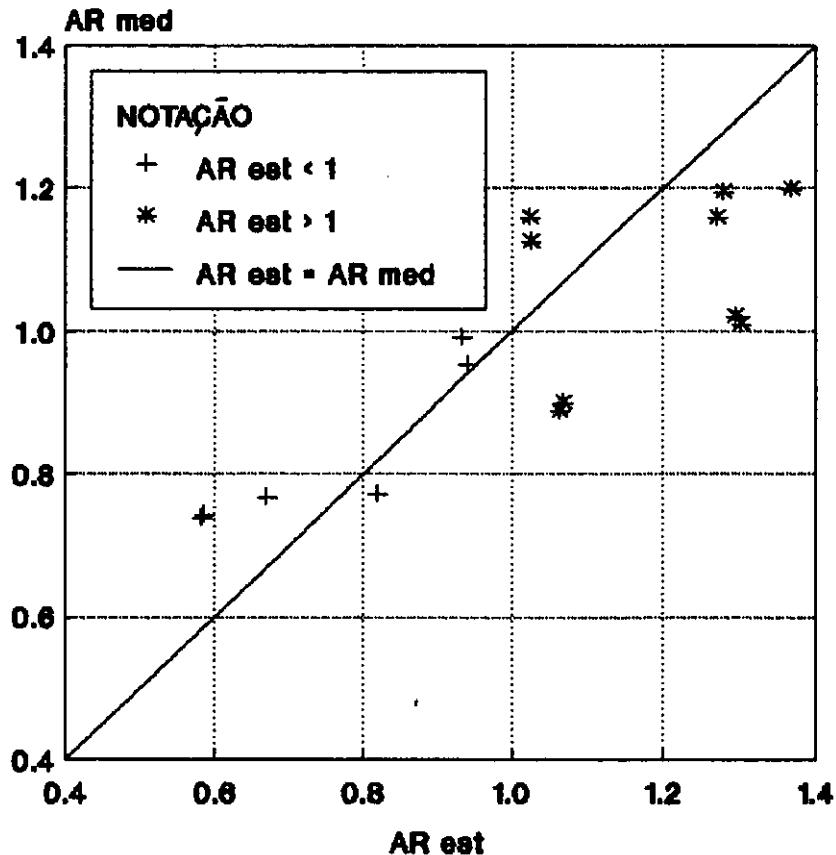
FIG. VI.15 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE ISORECALQUES  
ESTIMADAS CONVENCIONALMENTE E MEDIDAS - CASO 03

pilares. O trabalho, no entanto, apresenta apenas as medições correspondentes a 17 (dezessete) pilares. A figura (VI.15) mostra as isorecalques estimadas convencionalmente e as medidas. Observa-se que o ponto de recalque máximo observado não está no centro da estrutura, mas do lado esquerdo da figura. Este fato é explicado pela existência de uma edificação similar construída simultaneamente neste lado (MACHADO, 1958).

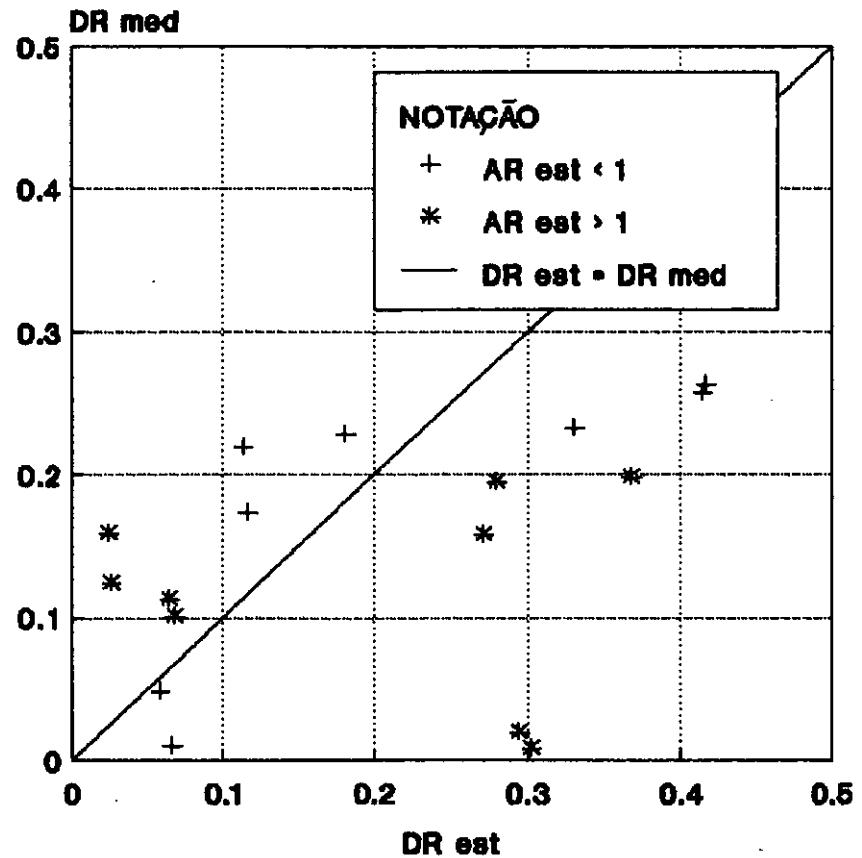
O quadro (VI.3) mostra algumas características da distribuição dos recalques absolutos estimados convencionalmente e medidos. Observa-se que o recalque absoluto médio medido é cerca de 30% menor que o estimado convencionalmente. Esta diferença revela uma baixa representatividade do modelo de tensão-deformação adotado para o terreno ou, como admite MACHADO (1958), uma superavaliação das cargas atuantes na edificação. O efeito da interação na uniformização dos recalques é confirmado pelo fato do coeficiente de variação dos recalques estimados convencionalmente ser maior que o correspondente aos recalques absolutos medidos.

A figura (VI.16) mostra a comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se, para a maioria dos pontos, que há uma tendência de ARest ser maior que ARmed quando ARest é maior que a unidade, e de ARest ser menor que ARmed quando ARest é menor que a unidade. Este fato indica claramente que a interação solo-estrutura realmente provoca uma redistribuição de cargas nos pilares.

A figura (VI.17) mostra a comparação entre



**Fig. VI.16 – Comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos – Caso 03.**



**Fig. VI.17 – Comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos – Caso 03.**

CARACTERÍSTICAS	RECALQUE ABSOLUTO	
	CONVENCIONAL	MEDIDO*
MÉDIA (mm)	522,4	378,1
DESVIO-PADRÃO (mm)	126,3	64,1
COEFIC. DE VARIAÇÃO	0,242	0,169

\* Leitura realizada cerca de 4 anos após o término da construção da edificação.

Quadro VI.3 - Características da distribuição dos recalques estimados convencionalmente e medidos - Caso 03.

os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se, a exemplo dos outros casos, que a grande maioria dos pontos apresenta DRest maior que DRmed, indicando o efeito da interação solo-estrutura na suavização da deformada de recalques da edificação.

#### VI.3.5. Caso 04 - Santos/SP

Esta edificação corresponde ao prédio "D", que foi analisado por MACHADO (1958). Trata-se de uma estrutura aporticada em concreto armado com 12 (doze) pavimentos e 66 (sessenta e seis) pilares.

Esta edificação foi construída próxima do edifício "C" e o perfil geotécnico do seu terreno de fundação foi considerado como o mesmo do edifício "C" (fig. VI.14). A fundação do prédio é semelhante a do Caso 03, ou seja, sapatas isoladas interligadas por um sistema

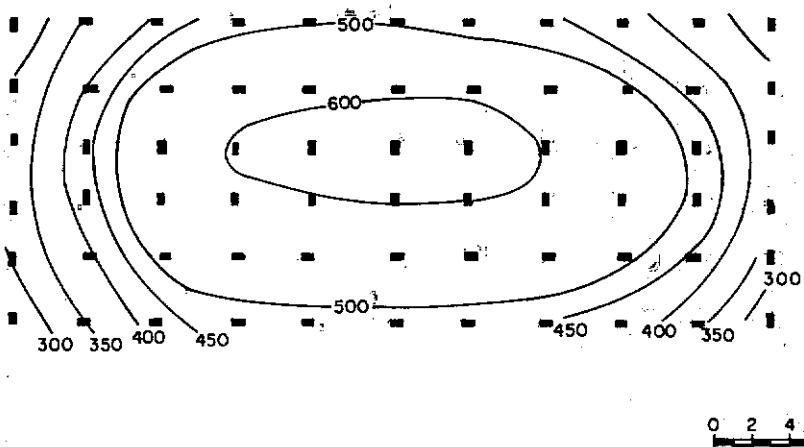
de vigas, assentes a uma profundidade de 2m em relação ao terreno natural.

A partir dos parâmetros da camada de argila mole (ver item VI.3.4), foram estimados os recalques da edificação, sem no entanto ser considerada a interação solo-estrutura. Os recalques da camada superficial de areia foram desprezados.

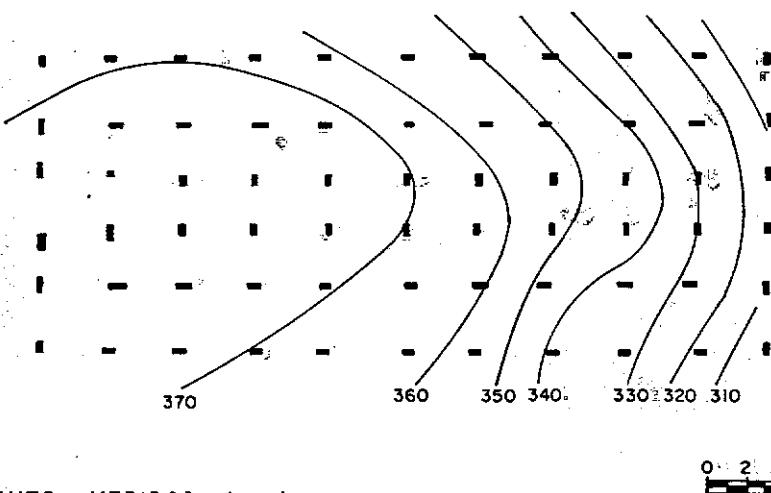
Foi implantada uma instrumentação para medição dos recalques, sendo acompanhados 19 (dezenove) pilares. A figura (VI.18) mostra a comparação entre as isorecalques estimadas convencionalmente e as medidas.

O quadro (VI.4) mostra algumas características da distribuição dos recalques absolutos estimados convencionalmente e medidos. Observa-se que o recalque absoluto médio é cerca de 25% menor que o estimado convencionalmente. Esta diferença revela uma baixa representatividade do modelo de tensão-deformação adotado para o solo. O efeito da interação solo-estrutura na uniformização dos recalques é observado pelo fato do coeficiente de variação dos recalques absolutos estimados convencionalmente ser bem maior que o correspondente aos recalques absolutos medidos.

A figura (VI.19) mostra a comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se, a exemplo dos demais casos, que para a grande maioria dos pontos há uma tendência de ARmed ser menor que ARest quando ARest é maior que a unidade, e de ARmed ser maior que ARest quando ARest é menor que a unidade. Este fato indica a redistribuição de carga nos pilares

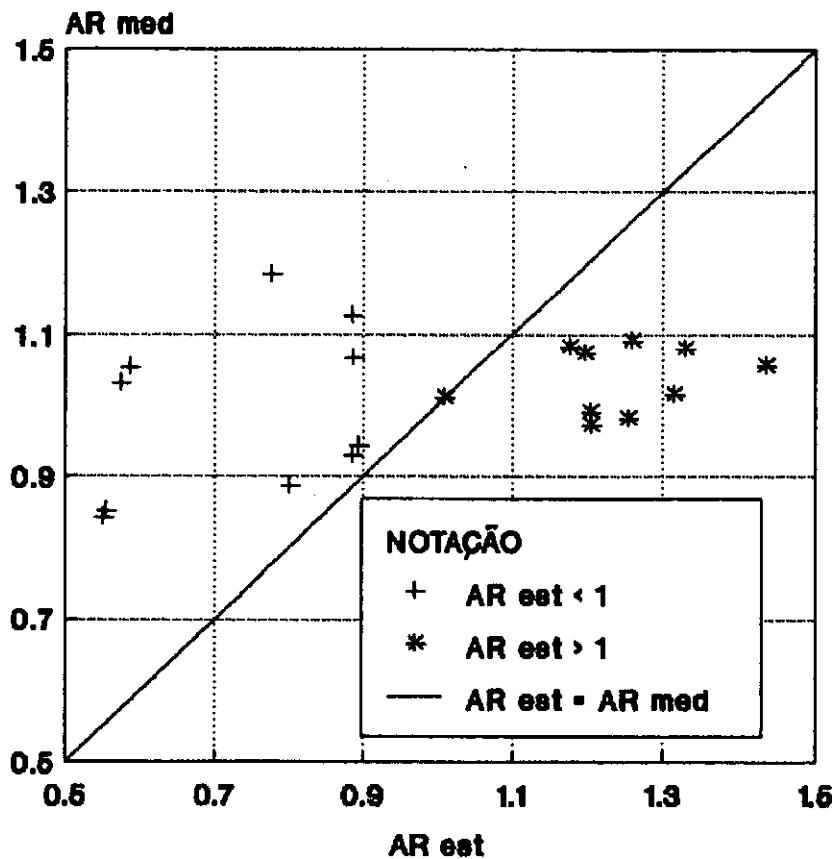


RECALQUES ESTIMADOS SEM CONSIDERAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (mm).

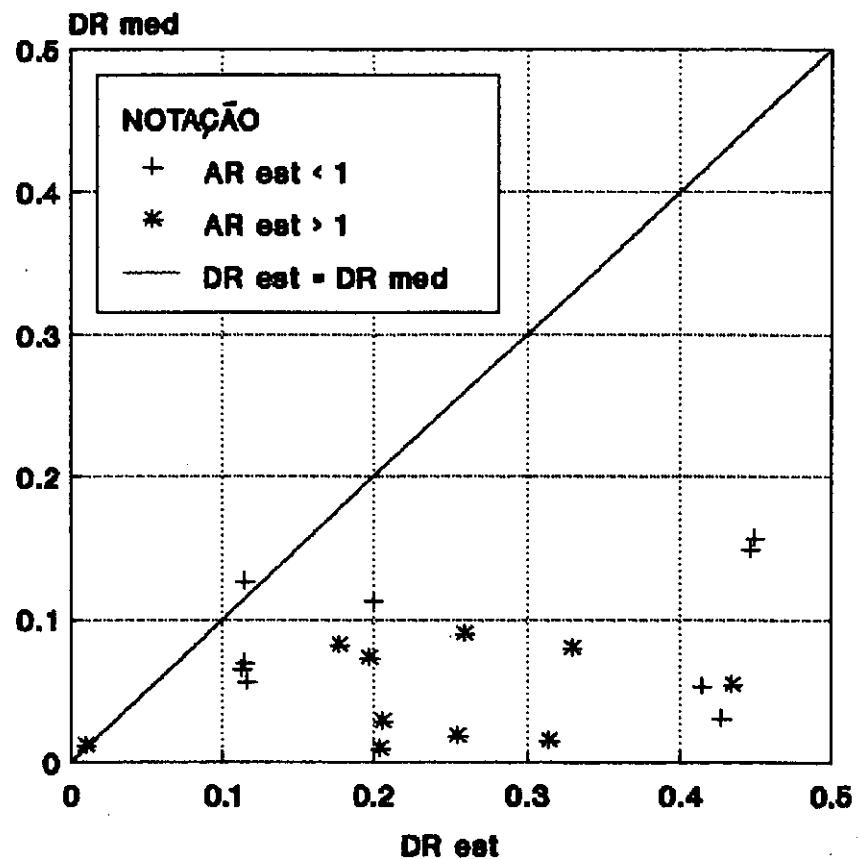


RECALQUES MEDIDOS (mm)

FIG. VI. 18-COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE ISORECALQUES ESTIMADAS CONVENCIONALMENTE E MEDIDAS -CASO 04



**Fig. VI.19 – Comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos – Caso 04.**



**Fig. VI.20 – Comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos – Caso 04.**

CARACTERÍSTICAS	RECALQUE ABSOLUTO	
	CONVENCIONAL	MEDIDO*
MÉDIA (mm)	455,3	351,8
DESVIO-PADRÃO (mm)	129,0	26,7
COEFIC. DE VARIAÇÃO	0,283	0,076

\* Leitura realizada cerca de 4 anos após o término da construção da edificação.

Quadro VI.4 - Características da distribuição dos recalques estimados convencionalmente e medidos - Caso 04.

provocada pela interação solo-estrutura.

A figura (VI.20) mostra a comparação dos valores de DR estimados convencionalmente e os medidos. Observa-se, para a maioria dos pontos, que o valor de DR<sub>med</sub> é menor que o de DR<sub>est</sub>, indicando o efeito da interação solo-estrutura na uniformização dos recalques da edificação.

#### VI.3.6. Caso 05 - Durban

A edificação analisada é uma estrutura aporticada com 02 (dois) pavimentos e 06 (seis) pilares, em Durban, África do Sul, apresentada por WEBB (1974).

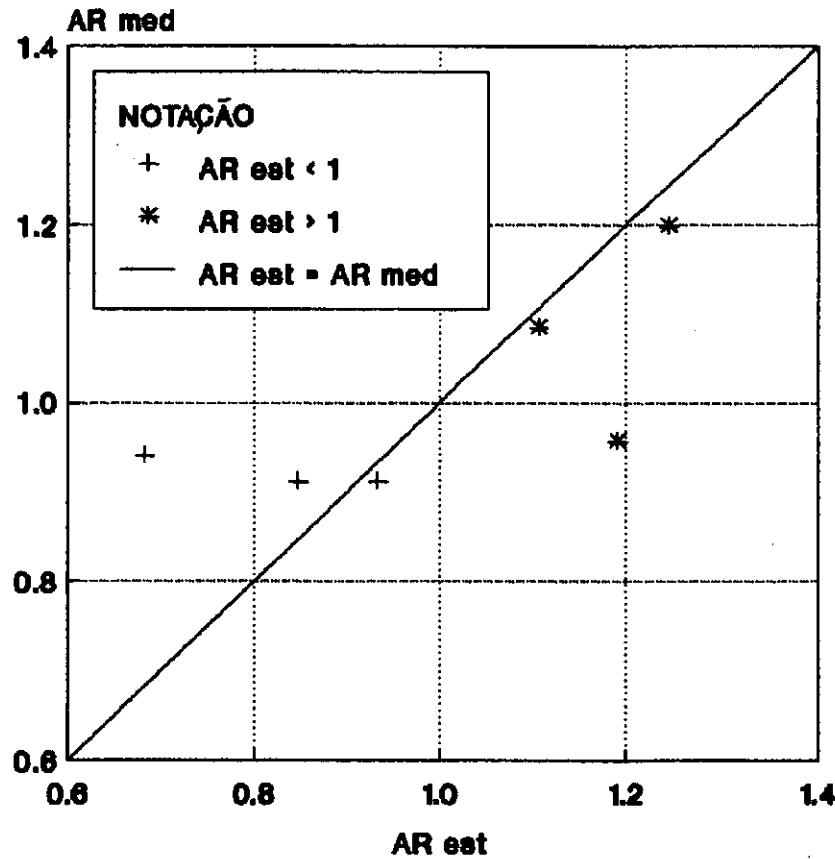
A fundação do prédio consiste de sapatas isoladas, assentes em uma camada de aterro sobrejacente a uma espessa camada de material coesivo com baixa consistência. Os parâmetros de resistência e

compressibilidade dos solos do terreno de fundação foram obtidos a partir de ensaios de laboratório em amostras indeformadas coletadas "in situ". WEBB (1974) apresenta os resultados destes parâmetros e do acompanhamento dos recalques do prédio num período de cerca de 02 (dois) anos.

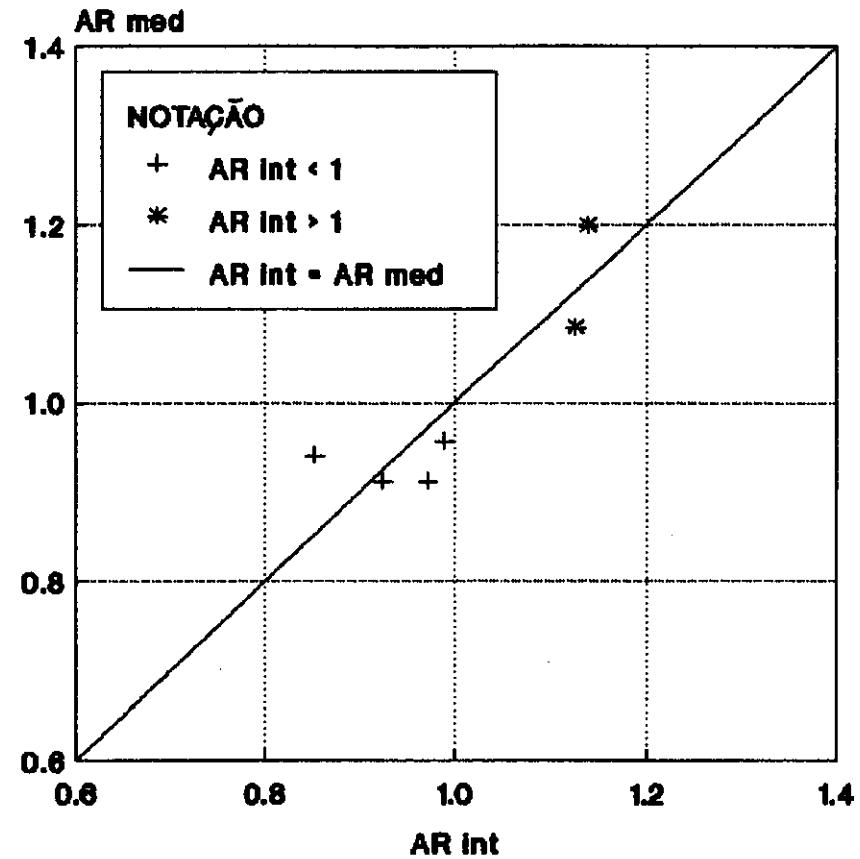
A partir destes dados, WOOD et alii (1977) desenvolveram uma análise de interação solo-estrutura para o referido prédio. Os autores apresentam os recalques medidos, estimados convencionalmente e os estimados levando-se em consideração a interação solo-estrutura. O método da análise de interação solo-estrutura é o proposto por WOOD e LARNACH (1974). O quadro (VI.5) mostra algumas características da distribuição dos recalques absolutos estimados (com e sem a interação solo-estrutura) e medidos.

Os resultados indicam que o recalque absoluto médio medido é cerca de 20% menor que o recalque médio estimado, o que segundo WOOD et alii (1977) se deve ao fato da curva tempo-recalque medida mostrar uma menor inclinação (na época da medição dos recalques) que no trecho correspondente à escolha dos parâmetros de tensão-deformação adotados. Observa-se, também, que há uma grande diminuição do coeficiente de variação do recalque absoluto estimado convencionalmente ao se considerar o efeito da interação solo-estrutura, e que o modelo de WOOD e LARNACH (1974) mostrou-se bem representativo para o caso analisado.

As figuras (VI.21) e (VI.22) mostram a



**Fig. VI.21 - Comparação entre os valores de AR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 05.**



**Fig. VI.22 - Comparação entre os valores de AR estimados com a interação solo-estrutura e os medidos - Caso 05.**

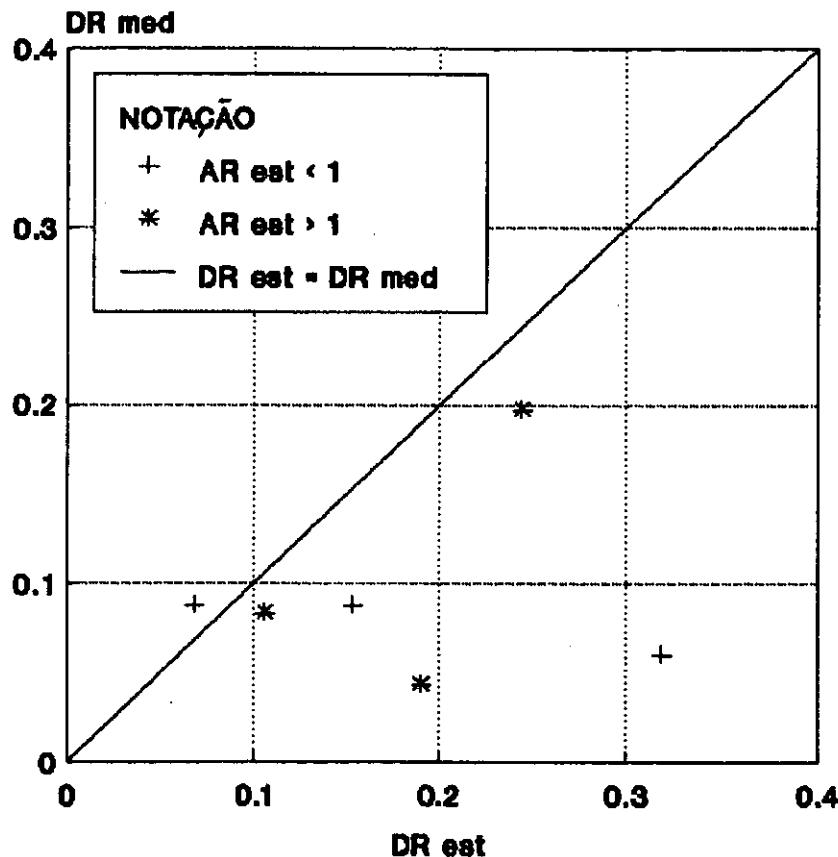
CARACTERÍSTICAS	RECALQUE ABSOLUTO		
	EST. CONV.	EST. INT.	MEDIDO
MÉDIA (mm)	224,3	220,5	175,5
DESVIO-PADRÃO (mm)	44,5	22,6	18,5
COEFIC. DE VARIAÇÃO	0,198	0,102	0,105

\* Leitura realizada cerca de 2 anos após o término da construção da edificação.

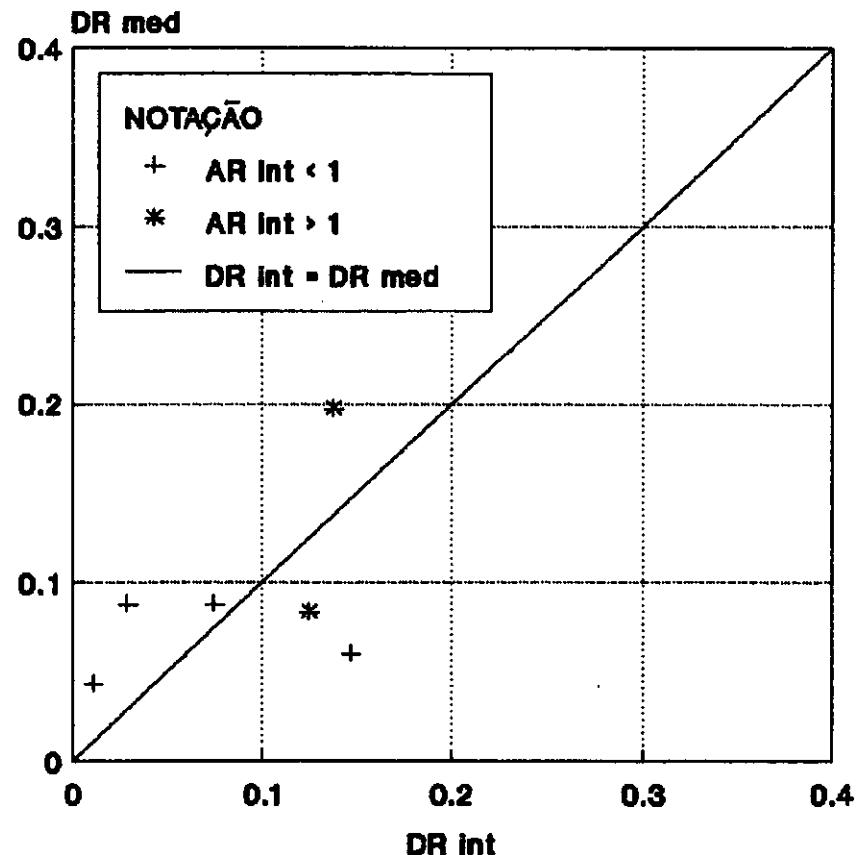
Quadro VI.5 - Características da distribuição dos recalques estimados (com e sem a interação solo-estrutura) e medidos - Caso 05.

comparação entre os valores de AR medidos e os estimados sem e com a consideração da interação solo-estrutura. A tendência observada é a mesma dos casos anteriores, ou seja, a interação solo-estrutura leva a uma redistribuição de carga nos pilares. Observa-se, para a maioria dos pontos, que ARest é maior que ARmed quando ARest é maior que a unidade, e que ARest é menor que ARmed quando ARest é menor que a unidade, ou seja, há uma transferência de carga dos pilares que tendem a recalcar mais para os que tendem a recalcar menos. É importante observar a boa concordância entre os valores de AR medidos e os estimados levando-se em consideração a interação solo-estrutura (ARint).

As figuras (VI.23) e (VI.24) mostram a comparação entre os valores de DR medidos e os estimados sem e com a consideração da interação solo-estrutura. Observa-se claramente o efeito da interação solo-estrutura



**Fig. VI.23 - Comparação entre os valores de DR estimados convencionalmente e os medidos - Caso 05.**



**Fig. VI.24 - Comparação entre os valores de DR estimados com a interação solo-estrutura e os medidos - Caso 05.**

na uniformização dos recalques, já que para a maioria dos pontos, o valor de DR estimado convencionalmente é maior que o DR medido. Ressalta-se, também, a boa concordância entre os valores de DR medidos e os estimados com a consideração da interação solo-estrutura (DR<sub>int</sub>).

#### VI.3.7. Caso 06 – Recife/PE

A edificação analisada é uma estrutura aporticada com 16 (dezesseis) pavimentos, num total de 17 (dezessete) lajes.

A fundação do prédio consiste de um radier assente a uma profundidade de 1,50m em relação ao terreno natural. O terreno de fundação é constituído por camadas de solo preponderantemente arenoso, observando-se, no entanto, uma camada de argila siltosa com consistência variando de mole a média entre 12 e 15m de profundidade.

Não são disponíveis os dados da estrutura, tais como planta de locação e cargas nos pilares, forma da fundação, etc. Com isto não são apresentados os recalques estimados, sendo, no entanto, disponíveis leituras de recalque durante a construção do prédio. Estes resultados serão utilizados na análise do item (VI.4).

#### VI.3.8. Caso 07 – Recife/PE

A edificação analisada é uma estrutura em concreto armado com 12 (doze) pavimentos, num total de 13 (treze) lajes.

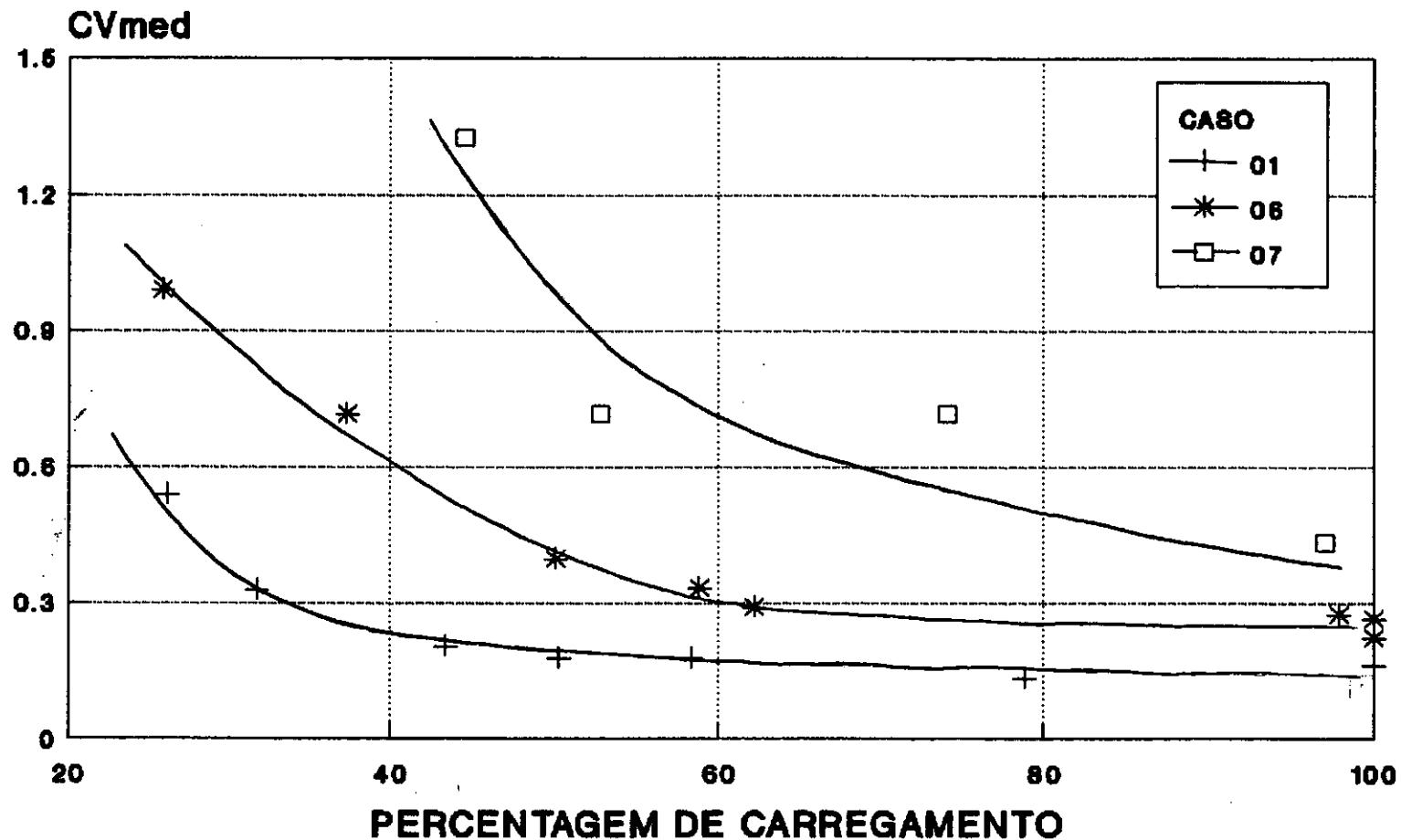
A fundação deste prédio consiste de sapatas isoladas e associadas assentes a uma profundidade de 1,20m em relação ao nível do terreno natural. O terreno de fundação é constituído por camadas de solo preponderantemente arenoso, sendo que a camada mais superficial foi sujeita a um melhoramento através de injeções de calda de cimento abaixo das sapatas.

A exemplo do Caso 06 não são disponíveis os dados da estrutura, sendo, no entanto, disponíveis leituras de recalques realizadas durante a construção do prédio.

#### VI.4. EFEITO DA SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA

A maioria dos trabalhos sobre interação solo-estrutura em edificações assume a hipótese de que não ocorre nenhum carregamento da estrutura antes que a mesma esteja completamente construída. Na realidade, à medida que a estrutura vai sendo construída a sua rigidez cresce e, como já foi visto no item (IV.4.4), este crescimento não se dá de maneira linear com o número de pavimentos. Nos Casos 01, 06 e 07 foram obtidas leituras de recalque durante a construção.

A figura (VI.25) mostra a curva do coeficiente de variação dos recalques absolutos medidos (CVmed) em função da percentagem da carga permanente atuante para as edificações. Observa-se que em todos os casos há uma diminuição do coeficiente de variação com o aumento da percentagem da carga permanente, ou seja, ao



**Fig. VI.25 - Influência da sequência construtiva no valor de CVmed para diferentes edificações.**

longo da construção da edificação. Estes resultados comprovam que à medida que a edificação vai sendo construída, há um aumento da sua rigidez e, consequentemente, há uma maior tendência à uniformização dos recalques. Os resultados também mostram que esta diminuição do coeficiente de variação não ocorre de maneira linear, havendo uma maior contribuição dos primeiros pavimentos (correspondentes a menores valores da percentagem média da carga permanente).

A figura (VI.26) mostra a variação dos valores de DR medidos (Caso 01) em função da percentagem média de carga permanente. Os resultados mostram que o valor médio de DRmed diminui à medida que a edificação vai sendo construída, evidenciando o efeito da rigidez da estrutura. Observa-se, também, que a dispersão dos valores de DRmed diminui à medida que a estrutura vai sendo construída, evidenciando a suavização da forma da deformada de recalques da edificação.

#### VI.5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA POR POULOS (1975a)

##### A UM CASO REAL DE OBRA

Com o objetivo de se observar a aplicabilidade da metodologia proposta por POULOS (1975a) a casos reais de obras, foi feita uma análise de interação solo-estrutura do Caso 01 utilizando-se este método. Nesta análise foi considerado o pórtico plano constituído pelos pilares P-23, P-24, P-21, P-22, P-25 e P-26 (ver figura VI.4).

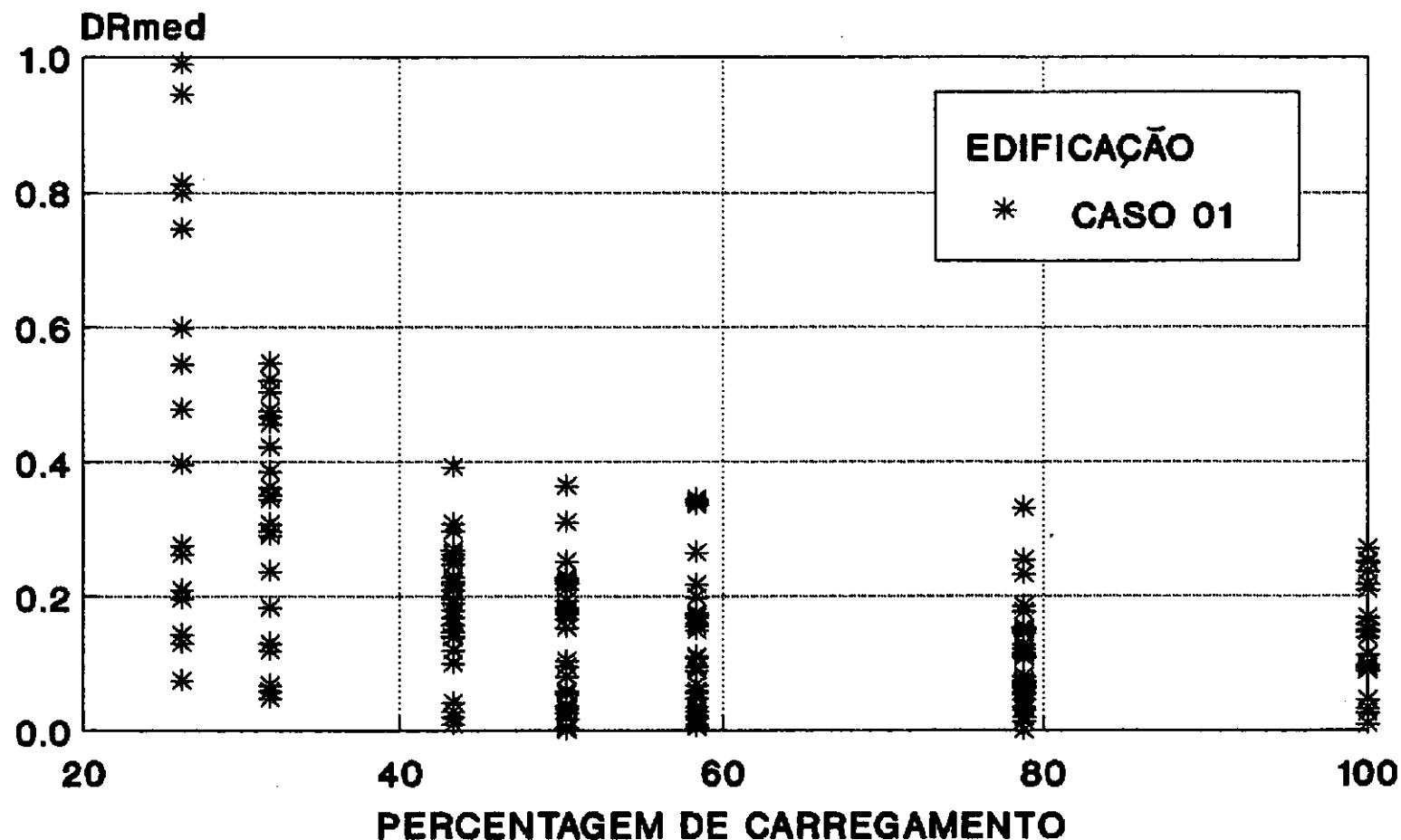
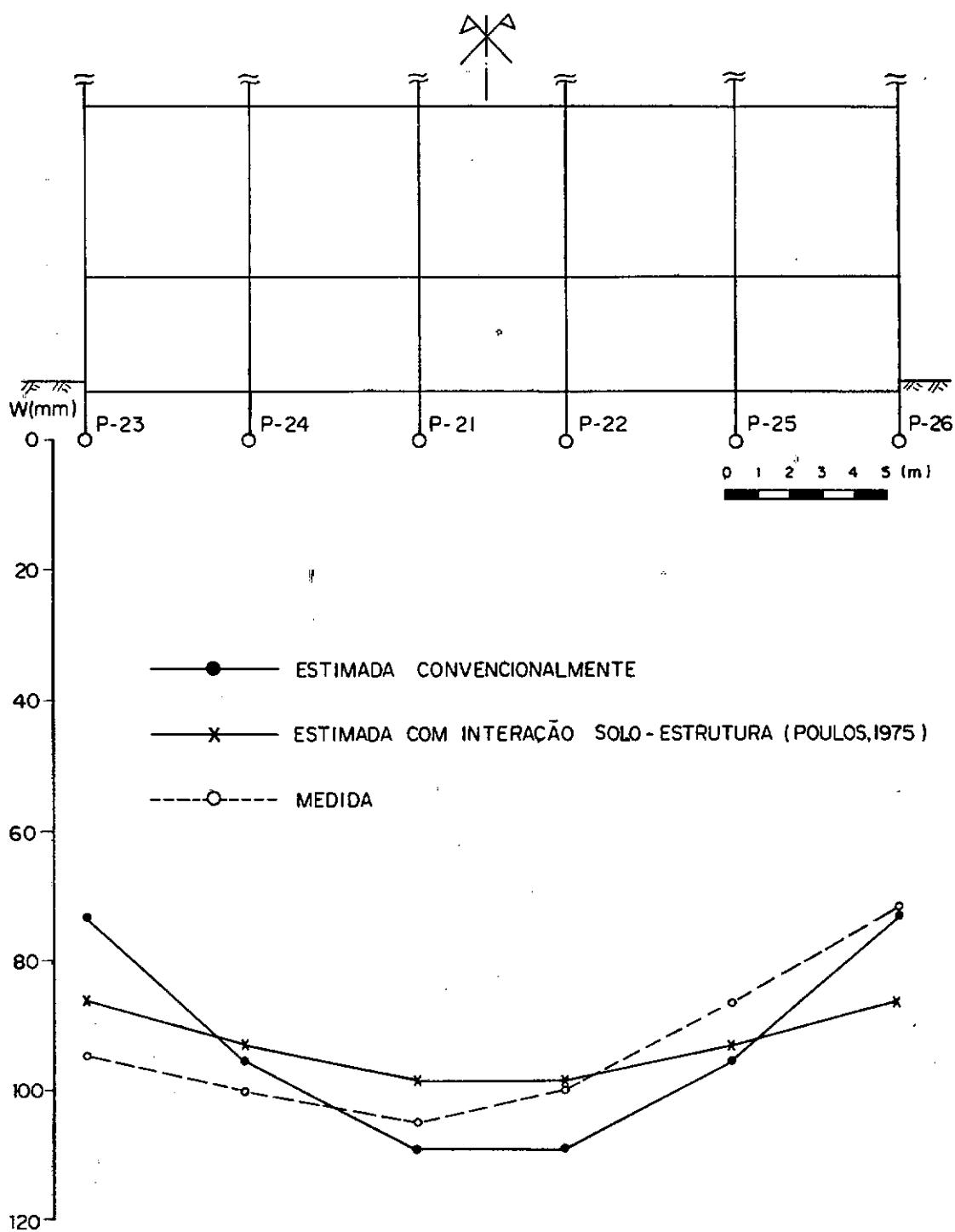


Fig. VI.26 - Influência da sequência construtiva no valor de DRmed - Caso 01.

O vetor ( $V_0$ ) considerado foi o obtido a partir do projeto estrutural original calculado convencionalmente, enquanto a matriz [SM] foi obtida utilizando-se o programa computacional SAFE. Na determinação da matriz [FM] o valor de  $K'$  (ver item IV.3) foi adotado como sendo a razão entre o recalque absoluto estimado convencionalmente de cada apoio e a sua carga vertical correspondente. Ressalta-se que nesta estimativa convencional de recalques foi considerada a interação entre os elementos de fundação.

O quadro (VI.6) mostra os recalques obtidos a partir desta análise, bem como os recalques estimados convencionalmente e os medidos. Os resultados indicam os efeitos da interação solo-estrutura anteriormente comentados: (i) redistribuição de carga nos pilares, como pode ser visto pela subestimativa convencional do recalque absoluto dos pilares periféricos (efeito da sobrecarga destes pilares) e superestimativa convencional do recalque absoluto dos pilares centrais (efeito do alívio de carga destes pilares); (ii) a tendência à uniformização dos recalques, como pode ser observado através da figura (VI.27), em que a deformada obtida a partir da metodologia proposta por POULOS (1975a) é mais suave que a correspondente aos recalques estimados convencionalmente.

Os resultados mostram, também, que este método mostrou-se bastante representativo para o caso analisado: se for eliminado da deformada correspondente aos recalques medidos o efeito da inclinação de corpo rígido (já comentado no item VI.3.2) , esta deformada



**FIG. VI. 27 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DEFORMADAS CORRESPONDENTES AOS RECALQUES ESTIMADOS CONVENCIONALMENTE, ESTIMADOS COM INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA E MEDIDOS - CASO 01.**

PILAR	RECALQUE ABSOLUTO (mm)		
	CONVENC.	COM INTER.	MEDIDO
P-23	72,6	85,96	94,4
P-24	95,2	92,70	100,1
P-21	108,8	98,33	105,0
P-22	108,8	98,33	100,0
P-25	95,2	92,70	86,1
P-26	72,6	85,96	71,1

Quadro VI.6 - Recalques absolutos estimados convencionalmente, estimados com a interação solo-estrutura (método de Poulos, 1975) e medidos - Caso 01.

PILARES	ROTAÇÃO RELATIVA ( $\times 10^{-3}$ )		
	CONVENCI.	COM INTER.	MEDIDA
P-23/P-24	4,37	1,30	2,01
P-24/P-21	2,59	1,07	1,84
P-21/P-22	0	0	0,14
P-22/P-25	2,59	1,07	1,74
P-25/P-26	4,37	1,30	1,99

Quadro VI.7 - Comparaçao entre as rotações relativas estimadas convencionalmente, estimadas com interação solo-estrutura (método de Poulos, 1975) e medidas - Caso 01.

praticamente coincide com a estimada com base no método proposto por POULOS (1975a). Este fato também pode ser comprovado através do quadro (VI.7), que mostra a comparação entre as rotações relativas estimadas com e sem interação solo-estrutura e as medidas.

Com uma análise de recalques levando-se em consideração a interação solo-estrutura seria possível antecipar que as rotações relativas (distorções angulares) reais estariam nas faixas de "baixo risco" quanto ao aparecimento de danos na edificação (ver figura VI.9).

#### VI.6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA POR BARATA (1986) AOS CASOS DE OBRAS ANALISADOS

Como foi visto no item (IV.4.3), BARATA (1986) propôs, em caráter experimental, um método para previsão de recalques diferenciais levando-se em consideração a rigidez da estrutura. A figura (IV.28) mostra a faixa proposta por BARATA (1986) e os pontos referentes a dois novos casos, já que os Casos 02 a 05 já haviam sido utilizados pelo referido autor. Os resultados mostram que estes novos casos se situaram dentro da faixa proposta por BARATA (1986). Ressalta-se, no entanto, que há a necessidade de um maior número de dados referentes a estruturas flexíveis, já que são poucos os casos coletados para baixos valores de H/L.

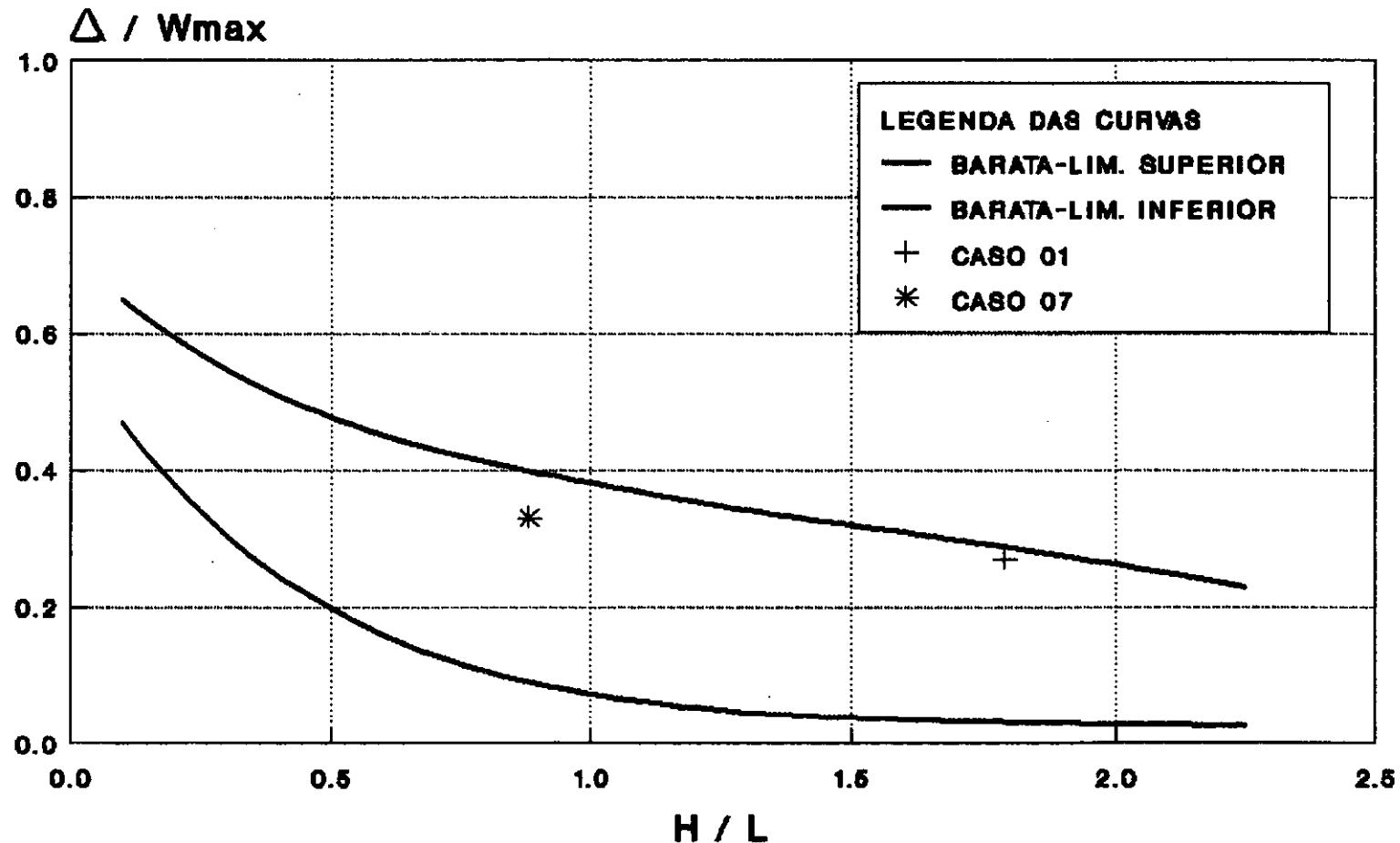


Fig. VI.28 - Comparação entre a Faixa Proposta por BARATA (1986) e os Pontos Obtidos para Diferentes Edificações.

## CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### VII.1. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho comprovam a importância da interação solo-estrutura e sua repercussão no desempenho de edificações. A revisão bibliográfica procedida revelou a existência de alguns métodos para a consideração da interação solo-estrutura em projetos de edificações, sendo que boa parte destes requerem análises tão complexas que, na prática, tornam-se inviáveis.

O método proposto por POULOS (1975a), apesar da sua simplicidade, revelou-se uma excelente ferramenta no sentido de se obter informações significativas para muitos problemas práticos envolvendo interação solo-estrutura, além de dar ao projetista um sentimento físico do problema.

O desenvolvimento de um estudo paramétrico de fatores influentes na interação solo-estrutura baseado neste modelo, revelou que de uma maneira geral há uma tendência à uniformização dos recalques ao se considerar a interação solo-estrutura. As principais conclusões deste estudo são:

- (a) O desempenho de uma edificação é governado pela rigidez relativa estrutura-solo.
- (b) Os recalques absoluto e diferencial máximos diminuem de grandeza com o aumento da rigidez relativa

estrutura-solo, sendo que os recalques absolutos são menos influenciados por esta rigidez que os diferenciais;

(c) O aumento do número de pavimentos da edificação aumenta a rigidez global da estrutura, exercendo uma significativa influência na tendência à uniformização dos recalques. Observa-se que esta influência depende da faixa de rigidez relativa estrutura-solo, sendo menor para os casos de valores altos e baixos.

(d) O gráfico experimental proposto por BARATA (1986), para consideração da interação solo-estrutura em edificações, mostrou ser representativo para os casos analisados no estudo paramétrico, bem como para os casos reais analisados. O limite inferior da faixa poderia ser menos curvo, como indica o estudo teórico.

(e) A tendência à uniformização dos recalques não cresce linearmente com o número de pavimentos da edificação. Observa-se que há uma maior contribuição dos primeiros pavimentos. Os resultados mostram ainda que quanto maior for a rigidez relativa estrutura-solo, maior será esta contribuição dos primeiros pavimentos.

(f) As cintas influenciam a rigidez global da estrutura e, consequentemente, a tendência à uniformização dos recalques. Esta influência diminui à medida que aumenta o número de pavimentos da edificação.

(g) A consideração do efeito tridimensional de pórtico faz com que haja uma maior tendência à uniformização dos recalques.

(h) Há uma maior tendência à uniformização dos recalques à medida que a forma em planta da edificação tende para um

quadrado. Observa-se, ainda, que este efeito diminui à medida que a rigidez relativa estrutura-solo aumenta.

(i) Os recalques absoluto e diferencial máximos aumentam de grandeza ao se considerar a interação entre os elementos de fundação para fins de recalque. Observa-se, no entanto, que a relação entre o recalque diferencial máximo e o recalque absoluto máximo diminui.

A metodologia proposta por MEYERHOF (1953) para substituição, em análises de interação solo-estrutura, da estrutura real por uma outra mais simples com rigidez equivalente, mostrou ser bastante satisfatória para os diversos casos analisados.

A comparação entre os resultados de recalques estimados e medidos para diversos casos de obras revelou as seguintes conclusões:

(i) O desempenho de uma edificação pode ser associado a 02 (dois) modelos: comportamento tensão-deformação do terreno de fundação e interação solo-estrutura.

(ii) O recalque absoluto médio da edificação está associado ao modelo de tensão-deformação do terreno de fundação, e é função do carregamento aplicado à estrutura e das propriedades de deformação do terreno. A diferença entre o recalque absoluto médio estimado e o medido está ligada à representatividade do modelo de comportamento tensão-deformação adotado para o terreno de fundação.

(iii) A forma da deformada de recalques e, consequentemente, a dispersão da curva de frequência dos recalques absolutos está associada ao modelo de interação solo-estrutura. No caso mais geral, a diferença entre os

coeficientes de variação (relação entre o desvio-padrão e o valor médio) correspondentes aos recalques estimados e aos medidos está ligada à representatividade do modelo de interação solo-estrutura considerado.

(iv) Em todos os casos de obras analisados, o coeficiente de variação correspondente aos recalques estimados convencionalmente é maior que o correspondente aos recalques medidos, comprovando o efeito da interação solo-estrutura na tendência à uniformização dos recalques.

(v) As análises comprovam alguns efeitos da interação solo-estrutura em edificações, tais como a redistribuição de carga nos pilares e diminuição dos recalques diferenciais.

(vi) Os resultados mostram também que à medida que a estrutura vai sendo construída e carregada, há um aumento da sua rigidez e, consequentemente, uma maior tendência à uniformização dos recalques (efeito da sequência construtiva).

A análise de interação solo-estrutura de um caso real de obra de edificação revelou uma boa aplicabilidade do método proposto por POULOS (1975a).

## VII.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Um dos objetivos deste trabalho é propiciar o desenvolvimento de uma linha de pesquisa que envolva aspectos da interação solo-estrutura e desempenho de edificações, na Área de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Diante das limitações

deste trabalho, bem como dos resultados obtidos, são feitas a seguir algumas sugestões para novos estudos:

- (1) Desenvolvimento de um programa computacional único que englobe as análises estruturais, análises de recalques e resolução das equações previstas no método proposto por POULOS (1975a).
- (2) Desenvolvimento de um programa computacional de interação solo-estrutura utilizando-se comportamento não-linear para o solo e/ou para a estrutura.
- (3) Criação de um banco de dados de edificações em que tenha sido realizado acompanhamento de recalques.
- (4) Reavaliação dos critérios para aparecimento de danos em edificações.
- (5) Análises de interação solo-estrutura em edificações levando-se em consideração a fluência do concreto.
- (6) Análises de interação solo-estrutura em edificações com fundações em estacas.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALLAM, M.M., RAO, K.S.S., e SUBRAMANYA, B.V.V. (1986), "Partial Loss of Support and Frame-Soil Interaction", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.113, No.12, pp. 2488-2499.
- AOKI, N., e LOPES, F.R. (1975), "Estimating Stresses and Settlements due to Deep Foundations by the Theory of Elasticity", Proc. of V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Vol.I, pp. 377-386.
- AOKI, N. (1987), "Modelo Simples de Transferência de Carga de Estaca Vertical Sujeita a Carga Axial de Compressão", Anais do Ciclo de Palestras sobre Fundações, ABMS-NRNE, Recife, pp. 79-95.
- BARATA, F.E. (1971), "The Allowable Settlement and the Design of Foundations", Proc. of IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Porto Rico, Vol.II, pp. 197-202.
- BARATA, F.E. (1984), "Propriedades Mecânicas dos Solos: uma Introdução ao Projeto de Fundações", Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1a. Edição.
- BARATA, F.E. (1986), "Recalques de Edifícios sobre Fundações Diretas em Terrenos de Compressibilidade Rápida e com a Consideração da Rigidizez da Estrutura", Tese de Concurso para Professor Titular do Depto de Construção Civil, Escola de Engenharia da UFRJ, Rio de Janeiro.
- BASU, A.K. (1977), "Soil Structure Interaction Problems of Framed Structures", International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.II, pp. 148-152.
- BHANDARI, R.K., e RAO, A.R.K. (1977), "Concept of Rigidity in Foundation Analysis", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 287-294.

- BISHARA, A.G., e JANG, S. (1980), "Settlement-Induced Forces in Concrete Bridges", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST7, pp. 1423-1436.
- BJERRUM, L. (1963), "Dicussion", European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesdaden, Vol.II, pp. 135.
- BOWLES, J.E. (1987), "Elastic Foundation Settlements on Sand Deposits", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.113, No.8, pp. 846-860.
- BROWN, P.T. (1977), "Structure-Foundation Interaction and Soil Creep", Proc. of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tóquio, Vol.I, pp. 439-442.
- BROWN, P.T., e YU, S.K.R. (1986), "Load Sequence and Structure-Foundation Interaction", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.3, pp. 481-488.
- BURAGOHAIN, D.N., e RAGHAVAN, N. (1977), "Interaction of Frames with Pile Foundations", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 109-115.
- BURLAND, J.B., e WROTH, C.P. (1974), "Settlements of Buildings and Associated Damage", Proc. of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 611-654.
- BURLAND, J.B., BROMS, B.B., e de MELLO, V.F.B. (1977), "Behavior of Foundations and Structures", Proc. of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tóquio, Vol.II, pp. 495-546.
- CHAE, Y.S. (1977), "Analytical Studies for Soil-Structure Interaction Problems", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 497-512.

- CHAMECKI, S. (1955), "Consideração da Rígidez da Estrutura no Cálculo dos Recalques da Fundação", Boletim Técnico do Depto Nacional de Obras de Saneamento, Ministério da Viação e Obras Públicas, Agosto, pp. 05-29.
- CHAMECKI, S. (1956), "Structural Rigidity in Calculating Settlements", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.82, No.SM-1, pp. 01-19.
- CHAMECKI, S. (1958), "Novo Conceito de Recalte Diferencial Admissível", Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Recife e Campina Grande, Vol. I, pp. 03-06.
- CHANDRASEKARAN, V.S., e KHEDKAR, S.P. (1977), "Shear Wall Foundation Interaction", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 123-127.
- CHEN, W., e SNITBHAN, N. (1977), "Analytical Studies for Solutions of Soil Structure Interaction Problems", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 557-575.
- DEMENEIGHI, A. (1981), "Analysis of Soil-Structure Interaction", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.II, pp. 95-98.
- DIETRICH, T. (1981), "On the Validity of Winkler's Principle", Proc. of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.II, pp. 103-108.
- EGOROV, K.E., KUZMIN, P.G., e POPOV, B.P. (1957), "The Observed Settlements of Buildings as Compared with Preliminary Calculation", Proc. of IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Vol.I, pp. 291-296.
- FELD, J. (1965), "Tolerance of Structures to Settlement", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.91, No.SM3, pp. 555-569.

- FRASER, R.A., e WARDLE, L.J. (1976), "Numerical Analysis of Rectangular Rafts on Layered Foundations", *Géotechnique*, Vol.26, No.4, pp. 613-630.
- GOLDER, H.Q. (1971), "El Asentamiento Permisible en Estructuras", Proc. of IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Porto Rico, Vol.I, pp. 187-206.
- GOSHY, B. (1978), "Soil-Foundation-Structure Interaction", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.104, No.ST5, pp. 749-761.
- GUSMÃO, A.D. (1987), "Avaliação do Desempenho de uma Fundação com Base nas Propriedades de um Perfil do Subsolo do Recife", Relatório de Iniciação Científica, CNPq, Recife.
- GUSMÃO, A.D., e GUSMÃO FILHO, J.A. (1990), "Um Caso Prático dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Edificações", Anais do IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador, Vol. II, pp. 437-446.
- GUSMÃO, A.D., e LOPES, F.R. (1990), "Um Método Simplificado para Consideração da Interação Solo-Estrutura em Edificações", Anais do IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador, Vol. II, pp. 447-454.
- GUSMÃO FILHO, J.A., e GUSMÃO, A.D. (1990), "Contribuição ao Estudo de Melhoramento de Terrenos Arenosos", Anais do IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador, Vol. II, pp. 395-402.
- HABIB, P. (1981), "Discussion", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.IV, pp. 695-722.
- HADJIAN, A.H. (1977), "Foundation-Soil Interaction - The State of Confusion", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 181-187.

- JAIN, O.P., TRIKHA, D.N., e JAIN, S.C. (1977), "Differential Foundation Settlement of High Rise Buildings", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 237-243.
- KING, G.J.W. (1977), "An Introduction to Superstructure-Raft-Soil Interaction", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 453-466.
- KING, G.J.W., e CHANDRASEKARAN, V.S. (1977), "An Assessment of the Effects of Interaction Between a Structure and its Foundation", Proc. of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 368-383.
- KING, G.J.W., e CHANDRASEKARAN, V.S. (1977), "Interactive Analysis Using a Simplified Soil Model", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 93-99.
- KLEPIKOV, S.N. (1989), "Allowable Deformations of Buildings and Damages", Proc. of XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro (a ser publicado).
- LEE, I.K., e HARRISON, H.B. (1970), "Structure and Foundation Interaction Theory", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST2, pp. 177-197.
- LEE, I.K., e BROWN, P.T. (1972), "Structure-Foundation Interaction Analysis", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.98, No.ST11, pp. 2413-2431.
- LEE, I.K. (1975), "Structure-Foundation-Supporting Soil Interaction Analysis", Proc. of Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behavior and their Application to Geotechnical Structures, New South Wales, Vol.II, pp. 255-294.
- LEE, I.K. (1977), "Interaction Analysis of Rafts and Raft-Pile Systems", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 513-520.

- LOJELO, L., e PAOLIANI, P. (1987), "Soil-Structure Interaction Analysis of a Nuclear Power Plant", Proc. of International Conference on Soil-Structure Interactions, Paris.
- LOPES, F.R. (1988), "Notas de Apoio às Aulas de Fundações I", COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- LOPES, F.R., e GUSMÃO, A.D. (1991), "On the Soil-Structure Interaction and its influence in the Distribution of Foundation Loads and Settlements", Proc. of X European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Firenze (a ser publicado).
- MACHADO, J. (1958), "Estudo Comparativo de Recalques Calculados e Observados em Fundações Diretas em Santos", Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Campina Grande, Vol.I, pp. 21-36.
- MACHADO, J. (1961), "Settlement of Structures in the City of Santos, Brazil", Proc. of V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol.I, pp. 719-725.
- MAGNAN, J.P. (1987), "Soil-Structure Interactions: Embankments and Shallow Foundations", Proc. of International Conference on Soil-Structure Interactions, Paris.
- MAJID, K.I., e CUNNELL, M.D. (1976), "A Theoretical and Experimental Investigation into Soil-Structure Interaction", Géotechnique, Vol.26, No.2, pp. 331-350.
- MEYERHOF, G.G. (1953), "Some Recent Foundation Research and its Application to Design", Structural Engineering, Londres, Vol.31, pp. 151-167.
- MEYERHOF, G.G. (1979), "Soil-Structure Interaction and Foundations", Proc. of VI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lima, Vol.I, pp. 109-140.

- MIYAHARA, F., e ERGATOUDIS, J.G. (1976), "Matrix Analysis of Structures-Foundation Interaction", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No.ST1, pp. 251-265.
- MORGENSTERN, N.R. (1975), "Stress-Strain Relations for Soils on Practice", Proc. of V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Vol.IV, pp. 01-41.
- MORRIS, D. (1966), "Interaction of Continuous Frames and Soil Media", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.92, No.ST5, pp. 13-44.
- MUSTAFAYEV, A.A. (1981), "The Interaction of Subsidence Soils with Foundations", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.II, pp. 199-200.
- OSTAFICZUK, S., e PININSKA, J. (1987), "Problems of Soil-Structure Interaction and Accidental Cases in the Tropical Soils Conditions", Proc. of International Conference on Soil-Structure Interactions, Paris.
- POLSHIN, D.E., e TOKAR, R.A. (1957), "Maximum Allowable Non-uniform Settlement of Structures", Proc. of IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Vol.I, pp. 402-405.
- POULOS, H.G. (1975a), "Settlement Analysis of Structural Foundation Systems", Proc. of IV South-East Asian Conference on Soil Engineering, Kuala Lumpur, Malásia, Vol.IV, pp. 52-62.
- POULOS, H.G. (1975b), "Settlement of Isolated Foundation", Proc. of Symposium on Recent Developments on the Analysis of Soil Behavior and their application to Geotechnical Structures, Vol.I, pp. 181-214.
- POULOS, H.G. (1981), "Soil-Structure Interaction", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.IV, pp. 307-334.

- PRAKASH, S., e VILADKAR, M.N. (1977), "Research on Soil-Structure Interaction in India", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.II, pp. 71-77.
- RAMANATHAN, B., e PUJAR, K.L. (1977), "Effect of Superstructure Rigidity in Raft Design", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 117-121.
- SARSBY, R. (1987), "Settlement of Houses Constructed over Peat", Proc. of International Conference on Soil-Structure Interactions, Paris.
- SIMONS, N. (1957), "Settlement Studies on Two Structures in Norway", Proc. of IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Vol.I, pp. 431-436.
- SKEMPTON, A.W., e MACDONALD, D.H. (1956), "Allowable Settlements of Buildings", Institution of Civil Engineers, Part 3, Vol.5, pp. 727-768.
- SOROTCHAN, E.A., TROITZKY, G.M., KLEPIKOV, S.N., LAZE8NIK, G.E., VINOKOUROV, E.F., e BYKHOUTSEV, V.E. (1981), "Soil-Foundation Interaction, Study and Realisation", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.II, pp. 259-262.
- SPARKS, A.D.W., RETIEF, F.J., ERRERA, L.A., e VINAGRE, T.J.U.S. (1981), "Soil-Structure Interaction and Volume Change Soils", Proc. of X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol.II, pp. 263-269.
- UNGUREANU, N., CIONGRADI, I., e STRAT, L. (1977), "Framed Structure-Foundation Beams-Soil Interaction", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 101-108.
- VILADKAR, M.N., e PRAKASH, S. (1987), "Theoretical and Experimental Investigation into Frame Structure-Foundation Interaction", Proc. of International Conference on Soil-Structure Interactions, Paris.

- WEBB, D.L. (1974), "Observed Settlement and Cracking of a Reinforced Concrete Structure Founded on Clay", Proc. of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 443-450.
- WOOD, L.A., e LARNACH, W.J. (1974), "The Effects of Soil-Structure Interaction on Raft Foundations", Proc. of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 460-470.
- WOOD, L.A., e LARNACH, W.J. (1975), "The Interactive Behavior of a Soil-Structure System and its Effect on Settlements", Proc. of Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behavior and their application to Geotechnical Structures, New South Wales, Vol.II, pp. 75-87.
- WOOD, L.A., LARNACH, W.J., e WOODMAN, N.J. (1977), "Observed and Computed Settlements of Two Buildings", Proc. of International Symposium on Soil-Structure Interaction, Roorkee, Vol.I, pp. 129-136.

APÊNDICE I - LISTAGEM DO PROGRAMA COMPUTACIONAL INTERA

```

5' **** * **** * **** * **** * **** * **** * **** * **** *
10' *
15' *      PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANALISE DE INTERACAO      *
20' *          SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICACOES                      *
25' *
30' *      AUTOR: ALEXANDRE DUARTE GUSMAO ~ COPPE/UFRJ           *
35' *
40' **** * **** * **** * **** * **** * **** * **** * **** *
50'
60'
70'
100 CLEAR:DEFDBL A-Z:CLS
110 DEFINT I,J,K
120 GOSUB 2000
130 IF OP$="3" THEN GOSUB 2200:GOTO 450
135 CLS:PRINT TAB(33);"DADOS GERAIS":PRINT TAB(33);STRING$(12,"-"):PRINT:PRINT
140 PRINT TAB(10);:INPUT"TIPO DE ESTRUTURA.....:",EST$
143 PRINT TAB(10);:INPUT"NUMERO DE APOIOS DA ESTRUTURA....:",NAP
146 PRINT TAB(10);:INPUT"MODULO DE YOUNG DO SOLO(tf/m2)...:",ES
150 GOSUB 2500
160 IF RS="N" THEN GOTO 135
170 DIM VO(NAP),SM(NAP,NAP),FM(NAP,NAP)
180 CLS:PRINT TAB(12);"REACOES DE APOIO VERTICais - ESTRUTURA INDESLOCavel(tf)"*
190 PRINT TAB(12);STRING$(55,"-"):PRINT
200 FOR I=1 TO NAP
210 PRINT TAB(10);"VO(";I;")":":INPUT'',VO(I)
220 NEXT I
230 GOSUB 2500
240 IF RS="N" THEN GOTO 180
250 CLS:PRINT TAB(26);"MATRIZ DA ESTRUTURA(tf/mm)"*
260 PRINT TAB(26);STRING$(26,"-"):PRINT
270 FOR I=1 TO NAP
280 FOR J=I TO NAP
290 PRINT TAB(10);"SM(";I;",";J;")":":INPUT'',SM(I,J)
295 IF I<>J THEN SM(J,I)=SM(I,J)
300 NEXT J
310 NEXT I
320 GOSUB 2500
330 IF RS="N" THEN GOTO 250
340 CLS:PRINT TAB(27);"MATRIZ DA FUNDACAO(mm/tf)"*
350 PRINT TAB(27);STRING$(25,"-"):PRINT
360 FOR I=1 TO NAP
370 FOR J=1 TO NAP
380 PRINT TAB(10);"FM(";I;",";J;")":":INPUT'',FM(I,J)
390 NEXT J
400 NEXT I
410 GOSUB 2500
420 IF RS="N" THEN GOTO 340
430 CLS
440 IF OP$="2" THEN GOSUB 2600
450 CLS:LOCATE 8,32:PRINT"((PROCESSANDO))"
460 GOSUB 3000
470 GOSUB 3200
480 GOSUB 3500
490 GOSUB 3600
500 GOSUB 4000

```

```

510 CLS:PRINT TAB(36);"OPCOES"
520 PRINT TAB(36);STRING$(6,'-')
530 LOCATE 8,10:PRINT"(1) - RESULTADOS NA TELA"
540 LOCATE 10,10:PRINT"(2) - RESULTADOS NA IMPRESSORA"
550 LOCATE 12,10:PRINT"(3) - FINAL DO PROGRAMA"
560 LOCATE 24,32:INPUT"ESCOLHA UMA OPCAO:",CS
570 IF CS(>"1" AND CS(>"2" AND CS(>"3" THEN GOTO 510
580 IF CS="3" THEN CLS:LPRINT CHR$(12);:END
590 IF CS="2" THEN GOSUB 4500:GOTO 510
600 GOSUB 5500:GOTO 510
2000 REM ** SUBROTINA PARA ESCOLHA DA ENTRADA DE DADOS **
2010 CLS:LOCATE 8,10:PRINT"(1) - ENTRADA DE DADOS VIA TECLADO"
2020 LOCATE 10,10:PRINT"(2) - ENTRADA DE DADOS VIA TECLADO COM GERACAO DE ARQUIV
0"
2030 LOCATE 12,10:PRINT"(3) - ENTRADA DE DADOS VIA ARQUIVO"
2040 LOCATE 24,32:INPUT"ESCOLHA UMA OPCAO:",OPS
2050 IF OPS(>"1" AND OPS(>"2" AND OPS(>"3" THEN GOTO 2010
2060 RETURN
2200 REM ** SUBROTINA PARA LEITURA DE ARQUIVO DE DADOS **
2210 CLS:PRINT TAB(25);"ENTRADA DE DADOS VIA ARQUIVO"
2220 PRINT TAB(25);STRING$(28,'-'):PRINT:PRINT
2230 PRINT TAB(5)::INPUT"ARQUIVO DE DADOS DA ESTRUTURA:",ARQ1$:PRINT:PRINT
2235 PRINT TAB(5)::INPUT"ARQUIVO DE DADOS DO SOLO:",ARQ2$
2240 GOSUB 2500
2250 IF RS="N" THEN CLS:GOTO 2210
2260 CLS:LOCATE 8,30:PRINT"((LEENDO ARQUIVO))"
2270 OPEN ARQ1$ FOR INPUT AS #1:OPEN ARQ2$ FOR INPUT AS #2
2275 INPUT #1,ESTS
2280 INPUT #1,NAP:INPUT #2,ES
2285 DIM VO(NAP),SM(NAP,NAP),FM(NAP,NAP)
2290 FOR I=1 TO NAP
2300 INPUT #1,VO(I)
2310 NEXT I
2320 FOR I=1 TO NAP
2330 FOR J=1 TO NAP
2340 INPUT #1,SM(I,J)
2350 IF I()J THEN SM(J,I)=SM(I,J)
2360 NEXT J
2370 NEXT I
2380 FOR I=1 TO NAP
2390 FOR J=1 TO NAP
2400 INPUT #2,FM(I,J)
2410 NEXT J
2420 NEXT I
2430 CLOSE #1:CLOSE #2
2440 RETURN
2500 REM ** SUBROTINA PARA CONFERENCIA DE DADOS **
2510 LOCATE 24,28:INPUT"DADOS CONFEREM(S/N)":RS
2520 IF RS="s" THEN RS="S":IF RS="n" THEN RS="N"
2530 IF RS(>"N" AND RS(>"S" THEN GOTO 2510
2540 RETURN

```

```

2600 REM ** SUBROTINA PARA GERACAO DE ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA **
2610 PRINT TAB(20);"GERACAO DE ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA"
2620 PRINT TAB(20);STRINGS(38,'-'):PRINT :PRINT
2630 PRINT TAB(5);:INPUT"ARQUIVO DE DADOS DA ESTRUTURA:",ARQ1$:PRINT:PRINT
2635 PRINT TAB(5);:INPUT"ARQUIVO DE DADOS DO SOLO:",ARQ2$
2640 GOSUB 2500
2650 IF R$="N" THEN CLS:GOTO 2610
2660 CLS:LOCATE 8,28:PRINT"((GERANDO ARQUIVO))"
2670 OPEN ARQ1$ FOR OUTPUT AS #1:OPEN ARQ2$ FOR OUTPUT AS #2
2675 PRINT #1," ";:PRINT #1,EST$ 
2680 PRINT #1," ";:PRINT #1,NAP
2685 PRINT #2," ";:PRINT #2,USING"####.##";ES
2690 FOR I=1 TO NAP
2700 PRINT #1," ";:PRINT #1,USING"###.##";VO(I)
2720 NEXT I
2730 FOR I=1 TO NAP
2740 FOR J=I TO NAP
2750 PRINT #1," ";
2760 PRINT #1,USING"###.#####";SM(I,J)
2770 NEXT J
2780 NEXT I
2790 FOR I=1 TO NAP
2800 FOR J=1 TO NAP
2810 PRINT #2," ";
2820 PRINT #2,USING"###.#####";FM(I,J)
2830 NEXT J
2840 NEXT I
2850 CLOSE #1:CLOSE #2
2860 RETURN
3000 REM ** SUBROTINA PARA CONSTRUCAO DA MATRIZ IDENTIDADE **
3010 DIM IDE(NAP,NAP)
3020 FOR I=1 TO NAP
3030 FOR J=1 TO NAP
3040 IF I=J THEN IDE(I,J)=1 ELSE IDE(I,J)=0
3050 NEXT J
3060 NEXT I
3070 RETURN
3200 REM ** SUBROTINA PARA GERACAO DA MATRIZ PROD ==> [PROD]=[SM][FM] **
3210 DIM PROD(NAP,NAP)
3220 FOR I=1 TO NAP
3230 FOR J=1 TO NAP
3240 FOR K=1 TO NAP
3250 SUM1=SM(I,K)*FM(K,J)
3260 SUM2=SUM2+SUM1
3270 NEXT K
3280 PROD(I,J)=SUM2
3290 SUM2=0
3300 NEXT J
3310 NEXT I
3320 RETURN
3500 REM ** SUBROTINA PARA GERACAO DA MATRIZ SE ==> [SE]=[IDE]-[PROD] **
3510 DIM SE(NAP,NAP)
3520 FOR I=1 TO NAP
3530 FOR J=1 TO NAP
3540 SE(I,J)=IDE(I,J)-PROD(I,J)
3550 NEXT J
3560 NEXT I
3570 RETURN

```

---

```

3700 IF (I-L)()0 THEN GOTO 3710
3705 GOTO 3735
3710 FOR J=1 TO (NAP+1)
3715 TEMP=A(I,J)
3720 A(I,J)=A(L,J)
3725 A(L,J)=TEMP
3730 NEXT J
3735 PIVOT=A(I,I)
3740 PROXR=I+1
3745 FOR J=PROXR TO NAP
3750 CTE=A(J,I)/PIVOT
3755 FOR K=1 TO (NAP+1)
3760 A(J,K)=A(J,K)-CTE*A(I,K)
3765 NEXT K
3770 NEXT J
3775 NEXT I
3780 FOR I=1 TO NAP
3785 IREV=NAP+1-I
3790 Y=A(IREV,NAP+1)
3795 IF (IREV-NAP)()0 THEN GOTO 3805
3800 GOTO 3825
3805 FOR J=2 TO I
3810 K=NAP+2-J
3815 Y=Y-A(IREV,K)*V(K)
3820 NEXT J
3825 V(IREV)=Y/A(IREV,IREV)
3830 NEXT I
3835 RETURN
4000 REM ** SUBROTINA PARA GERACAO DOS VETORES [REC]=[FM][V] ; [RO]=[FM][VO] *
*
4010 DIM REC(NAP),RO(NAP)
4100 FOR I=1 TO NAP
4110 FOR K=1 TO NAP
4120 SUM1=FM(I,K)*V(K)
4130 SUM2=SUM2+SUM1
4140 SUM3=FM(I,K)*VD(K)
4150 SUM4=SUM4+SUM3
4160 NEXT K
4170 REC(I)=SUM2
4180 RO(I)=SUM4
4190 SUM2=0:SUM4=0
4200 NEXT I
4210 RETURN
4500 REM ** SUBROTINA PARA IMPRESSAO DOS RESULTADOS **
4510 CLS:LOCATE 12,25:PRINT"PREPARE A IMPRESSORA E "
4520 LOCATE 13,25:PRINT "APERTE QUALQUER TECLA !"
4530 AUX$=INKEY$:IF AUX$="" THEN GOTO 4530
4540 CLS:LOCATE 12,32:PRINT"((IMPRIMINDO))"

```

```

4550 LPRINT"UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO"
4560 LPRINT"COPPE - PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL"
4570 LPRINT"AREA DE GEOTECNIA":LPRINT
4580 LPRINT TAB(9);"ANALISE DE INTERACAO SOLO-ESTRUTURA - METODO DE POULOS(1975)

4590 LPRINT TAB(9);STRINGS(60,"-"):LPRINT:LPRINT
4600 LPRINT"((DADOS GERAIS))":LPRINT
4605 LPRINT TAB(5);"ARQUIVO DE DADOS DA ESTRUTURA":;ARQ1$
4607 LPRINT TAB(5);"ARQUIVO DE DADOS DO SOLO":;ARQ2$
4610 LPRINT TAB(5);"ESTRUTURA":;ESTS
4620 LPRINT TAB(5);"NUMERO DE APOIOS DA ESTRUTURA":;NAP
4630 LPRINT TAB(5);"MODULO DE YOUNG DO SOLO (tf/m2)":;:LPRINT USING"####.##";ES
4640 LPRINT:LPRINT:LPRINT"((REACOES E RECALQUES))":LPRINT
4650 LPRINT TAB(5);STRINGS(70,"-")
4660 LPRINT TAB(18);"REACOES DE APOIO(tf)":TAB(53);"RECALQUES(mm)"
4670 LPRINT TAB(6);"APOIO":TAB(12);STRINGS(63,"-")
4680 LPRINT TAB(13);"CONVENCIONAL":TAB(28);"COM INTERACAO";
4685 LPRINT TAB(45);"CONVENCIONAL":TAB(60);"COM INTERACAO"
4690 LPRINT TAB(5);STRINGS(70,"-")
4695 FOR I=1 TO NAP
4700 LPRINT TAB(8);I;TAB(16);
4710 LPRINT USING"##.##";VO(I);
4720 LPRINT TAB(32);:LPRINT USING"##.##";V(I);
4730 LPRINT TAB(48);:LPRINT USING"##.##";RO(I);
4740 LPRINT TAB(64);:LPRINT USING"##.##";REC(I)
4750 NEXT I
4760 LPRINT TAB(5);STRINGS(70,"-"):LPRINT
4770 RETURN
5500 REM ** SUBROTINA PARA APRESENTACAO DOS RESULTADOS NA TELA **
5510 CLS:PRINT TAB(9);"ANALISE DE INTERACAO SOLO-ESTRUTURA - METODO DE POULOS(19
75)"
5520 PRINT TAB(9);STRINGS(60,"-"):PRINT
5530 PRINT "((REACOES DE APOIO E RECALQUES))":PRINT
5540 PRINT TAB(5);STRINGS(70,"-")
5550 PRINT TAB(18);"REACOES DE APOIO(tf)":TAB(53);"RECALQUES(mm)"
5560 PRINT TAB(6);"APOIO":TAB(12);STRINGS(63,"-")
5570 PRINT TAB(13);"CONVENCIONAL":TAB(28);"COM INTERACAO";
5575 PRINT TAB(45);"CONVENCIONAL":TAB(60);"COM INTERACAO"
5580 PRINT TAB(5);STRINGS(70,"-")
5590 FOR I=1 TO NAP
5600 PRINT TAB(8);I;
5610 PRINT TAB(16);:PRINT USING"##.##";VO(I);
5620 PRINT TAB(32);:PRINT USING"##.##";V(I);
5630 PRINT TAB(48);:PRINT USING"##.##";RO(I);
5640 PRINT TAB(64);:PRINT USING"##.##";REC(I)
5650 NEXT I
5660 PRINT TAB(5);STRINGS(70,"-"):PRINT
5670 PRINT TAB(28);"APERTE UMA TECLA !!!":INPUT",TS
5680 RETURN

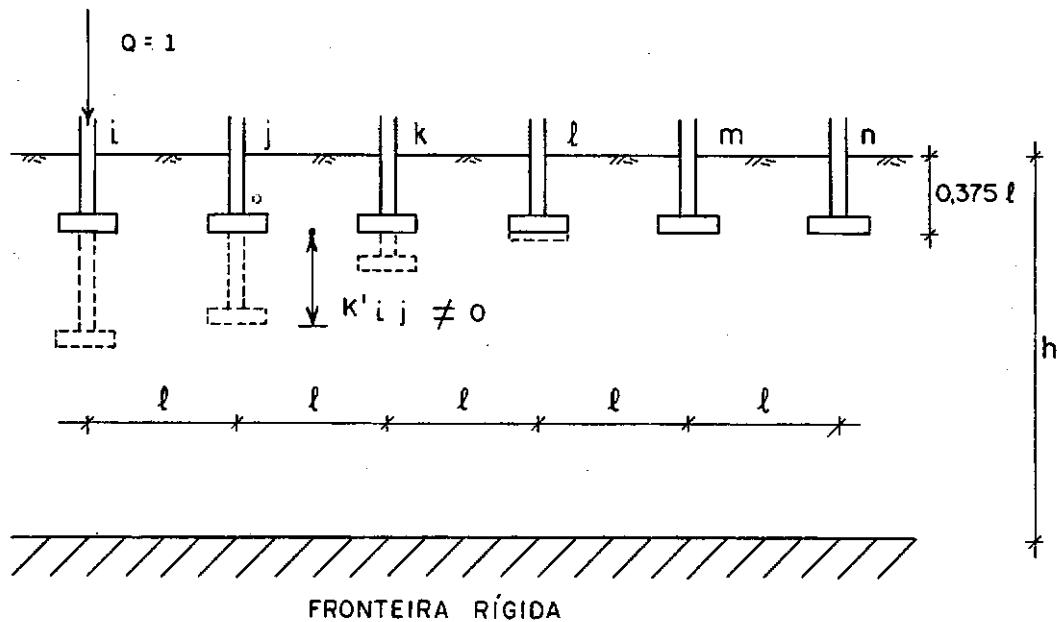
```

APÊNDICE II - DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ [FM]  
ATRAVÉS DO MÉTODO PROPOSTO POR AOKI E  
LOPES (1975)

Para a determinação dos elementos da matriz [FM] nas análises que consideram a interação entre elementos de fundação para fins de recalque, foi utilizado o programa computacional "AOKI-LOPES2", de autoria de N. e P.C. AOKI (1989), com adaptações feitas na COPPE/UFRJ.

Tal programa é baseado no método proposto por AOKI e LOPES (1975) para análise de recalques de fundações (superficiais e profundas) em um meio elástico e isotrópico. O carregamento da fundação é discretizado em um sistema de cargas pontuais equivalentes e é utilizada a formulação proposta por MINDLIN (1936) para o cálculo dos recalques devido às cargas pontuais. Com o princípio da superposição dos efeitos, somam-se as contribuições das cargas pontuais para a obtenção do recalque em qualquer ponto do maciço.

O perfil adotado para o estudo paramétrico do item (IV.5) está mostrado na figura (AII.1), onde se varia a espessura da camada de solo compressível ( $h$ ) e o módulo de Young do solo. A partir da aplicação de uma carga vertical unitária em um apoio qualquer, são calculados os recalques nos demais apoios e, então, é montada a matriz [FM].



$$[FM] = \begin{bmatrix} K'ii & K'ij & K'ik & K'il & K'im & K'in \\ K'jl & K'jj & K'jr & K'jl & K'jm & K'jn \\ K'rl & K'rj & K'rr & K'rl & K'rm & K'rn \\ K'li & K'lj & K'lr & K'll & K'lm & K'ln \\ K'mi & K'mj & K'mk & K'ml & K'mm & K'mn \\ K'ni & K'nj & K'nk & K'n\ell & K'nm & K'nn \end{bmatrix}$$

ONDE:  $K'ij$  = DESLOCAMENTO DO APOIO  $j$  DEVIDO A UM CARREGAMENTO UNITÁRIO NO APOIO  $i$ .

**FIG. A II. 1 - DETALHE ESQUEMÁTICO DO PERFIL ADOTADO PARA AS ANÁLISES CONSIDERANDO-SE O MÉTODO PROPOSTO POR AOKI E LOPES (1975).**