

Para o Serviço de Biblioteca do CDTN

Wellington Antonio Soares

BH 06/05/1993.

ANÁLISE DINÂMICA NÃO-LINEAR DE LAJES
EM CONCRETO ARMADO SOB AÇÃO DE CARGAS
IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSÃO.

Wellington Antonio Soares

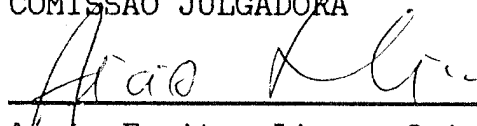
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS


ANÁLISE DINÂMICA NÃO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADO
SOB AÇÃO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSÃO

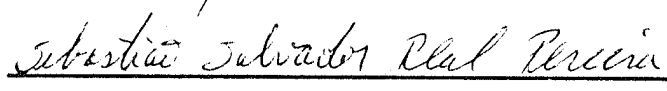
Autor : Wellington Antonio Soares

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia ,
da Universidade Federal de Minas Gerais , como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

COMISSÃO JULGADORA


Aécio Freitas Lira - Orientador


Antonio Maria Claret de Gouveia


Sebastião Salvador Real Pereira

Belo Horizonte , julho de 1991.




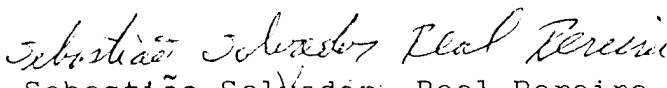
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA PARA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO WELLINGTON ANTÔNIO SOARES.

Aos onze dias do mês de julho de hum mil novecentos e noventa e um, às 9:00 horas, sob a presidência do Prof. Aécio Freitas Lira e com a participação dos professores Antônio Maria Claret de Gouveia e Sebastião Salvador Real Pereira, realizou-se a reunião da Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas para a defesa da dissertação "Análise Dinâmica Não-Linear de Lajes em Concreto Armado sob Ação de Cargas Impulsivas Provenientes de Explosões" do aluno Wellington Antônio Soares. Verificada a presença dos membros da Comissão Examinadora e do aluno, o senhor Presidente declarou aberta a sessão. Após a apresentação da dissertação, procedeu-se a discussão da mesma. A dissertação foi aprovada por unanimidade pela Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 11 de julho de 1991.--.--.--.


Prof. Aécio Freitas Lira


Prof. Antônio Maria Claret de Gouveia


Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Este trabalho foi realizado com o apoio do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (C.D.T.N.) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (C.N.E.N.).

À minha esposa Sandra Eliana e aos meus filhos Wellington Júnior e Guilherme, pelo tempo de dedicação que lhes roubei para preparar esta dissertação. Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Aécio Freitas Lira, meu orientador , pelo estímulo e contribuição na elaboração desta dissertação.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), nas pessoas de seu Superintendente e meus chefes imediatos , por haverem permitido a realização deste trabalho.

Aos colegas Vanderley de Vasconcelos e Arivaldo Moraes do Sacramento pelas sugestões na elaboração do Capítulo 4.

Ao colega Lúcio Carlos Martins Pinto pela contribuição prestada na parte de computação.

Ao professor Sílvio Túlio Corrêa pela revisão do texto.

RESUMO

Este trabalho apresenta critérios e procedimentos para análise dinâmica não-linear de lajes em concreto armado, de forma retangular, submetidas a cargas impulsivas provenientes de explosão. As condições de contorno das lajes são do tipo engaste ou apoio simples.

Inicialmente cada laje é transformada num sistema equivalente, não-amortecido, com um só grau de liberdade. A resposta desse sistema é então calculada com base no método da aceleração linear.

A ferramenta básica resultante deste trabalho é um programa para microcomputador do tipo PC, que permitirá ao usuário uma análise rápida e de baixo custo para os tipos de lajes citados.

ABSTRACT

Criteria and procedures for the dynamic non-linear analysis of rectangular reinforced plates subjected to impulsive loads from explosions are presented in this work. Simple supports and clamped edges are the boundary conditions of the plates.

First each plate is transformed into a non-damped equivalent system with a single degree of freedom. The response of the equivalent system to the impulsive load is then computed based on the linear acceleration method.

A PC microcomputer program is a powerful tool resulting from this work. With this software the user can perform a quick and low cost analysis of the plates covered in this thesis.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBTENÇÃO DO SISTEMA EQUIVALENTE COM UM SÓ GRAU DE LIBERDADE.....	5
2.1 Utilização de modelo simplificado para a análise dinâmica.....	5
2.1.1 Conceituação de rótulas plásticas.....	7
2.1.2 Linhas de ruptura em lajes.....	10
2.2 Definição do sistema equivalente com um só grau de liberdade.....	16
2.2.1 Conceituação dos fatores de transformação.....	17
2.3 Fatores de transformação para modelos estruturais do tipo laje retangular com apoio simples ou engaste.....	20
2.3.1 Hipóteses básicas.....	20
2.3.2 Fatores de transformação para lajes retangulares engastadas e simplesmente apoiadas.....	22
2.4 Momento fletor de plastificação e momento de inércia efetivo para seções retangulares.....	27
2.5 Momentos fletores de plastificação ao longo das linhas de ruptura.....	31
3. ANÁLISE DINÂMICA NÃO-LINEAR DE SISTEMA COM UM SÓ GRAU DE LIBERDADE.....	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 Formulação da equação de movimento do sistema.....	37
3.3 Metodologia de cálculo : aceleração linear.....	39
3.3.1 Princípios básicos do método numérico utilizado ...	39
3.3.2 Obtenção de fórmulas de recorrência.....	44

3.3.3 Resistência do sistema no fim de cada intervalo de tempo.....	47
3.3.4 Considerações sobre o método de cálculo utilizado.	48
4. AVALIAÇÃO DA CARGA IMPULSIVA PROVENIENTE DE EXPLO- SÃO.....	51
4.1 Explosões controladas e acidentais.....	52
4.2 Conceituação de carga impulsiva.....	53
4.3 Efeitos de ondas de choque em ambiente não-confina- do.....	53
4.4 Referências para avaliação de carga impulsiva.....	64
5. PROGRAMA PARA MICROCOMPUTADOR E EXEMPLOS DE APLICA- ÇÃO.....	68
5.1 Apresentação do programa.....	68
5.2 Orientação para utilização do programa RESPOD.BAS.	70
5.3 Exemplos de aplicação.....	74
5.3.1 Exemplo de laje com apoio simples	74
5.3.2 Exemplo de laje com engaste	74
5.4 Comentários sobre os resultados gráficos.....	77
5.5 Outras utilizações do programa.....	83
5.6 Aferição do algoritmo para a análise não-linear...	83
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO I - LISTAGEM DO PROGRAMA RESPOD.BAS	93
ANEXO II - LISTAGENS DOS RESULTADOS DOS EXEMPLOS..	135
ANEXO III - UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR CONVENCIONAL.....	151

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 - Fatores de transformação para laje retangular engastada em todo o contorno (tipo de carregamento uniformemente distribuído).....	23
Tabela 2 - Fatores de transformação para laje retangular simplesmente apoiada em todo o contorno (tipo de carregamento uniformemente distribuído)..	25
Tabela 3 - Resultados de testes de explosões com explosivo TNT (picos de pressões refletidas e de sobrepessões e suas durações).....	66
Tabela 4 - Arquivo de dados típico para laje com resistência tendo faixas elástica / plástica (apoio simples em todo o contorno).....	72
Tabela 5 - Arquivo de dados típico para laje com resistência tendo faixas elástica/elastoplástica/plástica (engaste em todo o contorno).....	73
Tabela 6 - Arquivos de exemplos para lajes com apoio simples em todo o contorno.....	75
Tabela 7 - Arquivos de exemplos para lajes com engaste em todo o contorno.....	76
Tabela 8 - Comparações de resultados de cálculo analítico com cálculo via programa RESPOD (Valores de deslocamentos em milímetros).....	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Modelo estrutural de laje e sistema equivalente para análise dinâmica.....	6
Figura 2 - Formação de rótulas plásticas em viga engastada.....	8
Figura 3 - Dados para análise de viga engastada com formação de rótulas plásticas.....	11
Figura 4 - Dados para análise de viga com apoios simples com formação de rótulas plásticas.....	12
Figura 5 - Formação de linhas de ruptura em laje engastada.....	14
Figura 6 - Formação de linhas de ruptura em laje com apoio simples.....	15
Figura 7 - Esquema da forma e disposição da armadura a ser utilizada.....	28
Figura 8 - Momento de plastificação para vigas e lajes em concreto armado (estruturas subarmadas).	29
Figura 9 - Momentos de plastificação ao longo das linhas de ruptura em função das armaduras longitudinal e transversal.....	32
Figura 10 - Setores em que a laje engastada é dividida , ao final da formação das linhas de ruptura, e esforços envolvidos.....	33

Figura 11-Setores em que a laje em apoio simples é dividida ,ao final da formação das linhas de ruptura, e esforços envolvidos.....	34
Figura 12-Sistema não-amortecido com um só grau de liberdade (modelo e equação de equilíbrio dinâmico).....	36
Figura 13-Ilustração de carregamento típico e de curvas de resistência versus deslocamento.....	38
Figura 14-Curva de resistência para análise elástica....	40
Figura 15-Curva de resistência para análise elástica / plástica.....	40
Figura 16-Curva de resistência para análise elastoplástica.....	41
Figura 17-Ilustração dos parâmetros envolvidos na solução da equação de equilíbrio dinâmico.....	43
Figura 18-Ilustração de curvas de aceleração real e aproximada (fórmulas de recorrência).....	45
Figura 19-Ilustração do processo de integração numérica.	49
Figura 20-Variação da sobrepressão com o tempo, num determinado ponto,durante passagem das ondas de choque provenientes de explosão.....	54
Figura 21-Distribuição espacial da sobrepressão.....	56
Figura 22-Variação da sobrepressão provocada pela onda de choque e da pressão dinâmica do vento em em função do tempo.....	56

Figura 23 - Sobrepressão e pressão dinâmica em função da distância (para uma bomba de um megaton)....	58
-Figura 24 - Duração da fase positiva da sobrepressão e da pressão dinâmica em função da distância (para uma bomba de um megaton).....	59
Figura 25 - Curvas de decaimento da sobrepressão e da pressão dinâmica	61
Figura 26 - Pulso de pressão sobre a face frontal de um edifício de forma paralelepípedica.....	63
Figura 27 - Curva de pressão em função do tempo para vasos de pressão com e sem aberturas ("venting")....	67
Figura 28 - Curva de sobrepressão em função do tempo para edifícios de centrais nucleares.....	67
Figura 29 - Diagrama de blocos para o programa RESPOD.. ..	71
Figura 30 - Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RAPOE.DAT (laje em apoio simples com deslocamento máximo na faixa elástica).....	78
Figura 31 - Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RAPOP.DAT (laje em apoio simples com deslocamento máximo na faixa plástica).....	79
Figura 32 - Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RENG.E.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa elástica)...	80

Figura 33-Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RENGEP.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa elastoplástica).....	81
Figura 34-Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivos de dados RENGP.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa plástica)...	82
Figura 35-Exemplo de sistema com um só grau de liberdade analisado via abordagem analítica e pelo programa RESPOD.....	85

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas com que se defrontam os projetistas da área de engenharia civil é dimensionar estruturas para resistir a cargas impulsivas decorrentes das ondas de pressão geradas por explosões. O surgimento desse tipo de problema deu-se, inicialmente, com a necessidade de se proteger pessoas e equipamentos contra ondas de pressão resultantes de explosões nucleares. Mais recentemente, a legislação nuclear passou a incluir a consideração de efeitos de explosão como critério de projeto para instalações nucleares. Na indústria convencional, esses tipos de estruturas têm-se tornado mais freqüentes nas áreas de manuseio e armazenamento de produtos explosivos ou mesmo em áreas onde existem equipamentos trabalhando sob alta pressão.

Inicialmente, o cálculo das estruturas para resistir a efeitos de explosão era feito com base em tensões máximas limitadas na fase elástica, resultando em estruturas anti-econômicas. Posteriormente, abandonou-se essa metodologia e passou-se a permitir que a estrutura pudesse se plastificar em algumas regiões, mantendo-se, entretanto, os deslocamentos de pontos críticos dentro de limites aceitáveis. Essa abordagem conduziu, assim, a análise elastoplástica de estruturas (análise não-linear).

Teoricamente, pode-se obter a resposta dinâmica de estruturas, inicialmente em regime elástico, por meio das equações diferenciais de movimento para o contínuo elastoplástico, numa abordagem tridimensional. Entretanto, às vezes, a complexidade das equações resultantes inviabiliza a solução do problema. Às vezes, até mesmo para problemas elásticos simples, o tratamento como um meio contínuo é de difícil solu-

ção . A impossibilidade prática de solução de tais tipos de problemas pela abordagem exata, leva a utilização de modelos simplificados, obtidos a partir de hipóteses pré-estabelecidas; nesses casos, entretanto, procura-se controlar parâmetros que garantam que tal simplificação não venha a inviabilizar a utilização final da estrutura.

Um outro fator que justifica a utilização de cálculos simplificados é a natureza do próprio tipo de carregamento em questão, o qual é de difícil avaliação e carrega na sua estimativa grande parcela de incerteza.

As estruturas para resistir a efeitos de explosão normalmente são lajes em concreto armado, constituindo-se nos elementos principais para receber o efeito direto das ondas de choque de explosão e mesmo das cargas de impacto que também podem ser geradas durante uma explosão. Tais tipos de lajes podem ser considerados, para efeito de cálculo, como painéis isolados sob ação das cargas que cheguem até elas, em função da distância à fonte de explosão. Neste trabalho, serão analisados somente lajes retangulares isoladas, tendo condições de apoio do tipo engaste ou apoio simples, ao longo de todas as bordas.

Em virtude das incertezas na avaliação do carregamento, nas referências /1,2/ são apresentadas justificativas para mais uma simplificação adicional na avaliação da resposta dinâmica de lajes, sob ação das cargas impulsivas. Essa simplificação consiste em se substituir cada laje isolada, que é um sistema com vários graus de liberdade, por um sistema equivalente, tendo um único grau de liberdade. Nas citadas referências, é apresentada uma metodologia que faz tal tipo de substituição, e que é implementada neste trabalho.

O sistema com um grau de liberdade a ser analisado não incluirá amortecimento, uma vez que as cargas são de curta duração, não dando, assim, tempo para manifestação das forças de amortecimento na estrutura.

Esta dissertação foi elaborada com base em manuais do Exército dos Estados Unidos, e que são utilizados para projeto de estruturas para resistir a efeitos de bombas atômicas /1,3/. Essa documentação foi a referência básica utilizada para transformar cada laje num sistema equivalente com um só grau de liberdade. Apesar da versão disponível desse documento ser datada do ano de 1973, ela, normalmente, é citada nas literaturas mais recentes como fonte de referência bibliográfica.

Com o objetivo de fornecer algumas diretrizes para conceituação da carga impulsiva, é apresentado um capítulo específico com base em /2,4/. Na referência /2/, é abordado, também, a transformação de laje em sistema com um só grau de liberdade.

A avaliação da carga impulsiva resultante de explosões é complexa e praticamente é um estudo do tipo caso a caso, e que deve, em princípio, ser feita em conjunto com especialistas da área correspondente ao fenômeno de explosão que estiver sendo analisado. Neste trabalho, são apresentadas várias referências que abordam a avaliação de cargas impulsivas decorrentes de explosão.

No Capítulo 2, elaborado com base na referência / 1 /, trata-se da obtenção do sistema equivalente, não-amortecido, com um só grau de liberdade, a partir de lajes totalmente engastadas ou simplesmente apoiadas ao longo de todo o contorno. Fornece-se, nesse capítulo, um formulário, com o qual é possível, partir-se de uma laje, com dimensões e ferragem conhecidas, e chegar-se ao sistema equivalente, definido em termos de massa, curva de resistência-deslocamento e carregamento equivalentes.

No Capítulo 3, escrito com base na referência / 3 /, fornece-se uma metodologia para avaliação da resposta dinâmica não-linear de um sistema, não-amortecido, com um só grau de liberdade. O método de cálculo é o da aceleração linear e consiste de uma análise numérica de forma recursiva.

No Capítulo 4 ,são fornecidas informações básicas com o objetivo de se conceituar as citadas cargas impulsivas. Essas cargas impulsivas podem se dar em recintos fechados ou ao ar livre, dando origem às conhecidas cargas em ambientes confinados ou não-confinados,sendo essas últimas de avaliação mais simples do que as primeiras. Para casos simples,pode-se utilizar o Capítulo 4 como uma ferramenta para avaliação de cargas impulsivas em ambiente não-confinado.

No Capítulo 5 ,é feita a implementação ,em microcomputador, das teorias dos Capítulos 2 e 3, dando como produto final um programa para microcomputador do tipo PC. Com esse programa, e possível partir-se de uma laje com dimensões , materiais e carregamento conhecidos e chegar-se ao deslocamento final do ponto central da laje. A decisão final se a laje resiste ao carregamento imposto é feita com base no fator de utilidade estabelecido para a laje. O programa dispõe ainda de recursos gráficos próprios para apresentação dos vários resultados obtidos. Essa visualização gráfica permite, inclusive , a detecção de erros provenientes de intervalo de tempo inadequadamente escolhido. Essa detecção pode ser feita comparando-se a função de resistência característica de um determinado tipo de laje com a resistência resultante do processamento numérico.

No Capítulo 6, é feita uma recapitulação global do trabalho e são apresentadas algumas recomendações que podem servir de base para outras dissertações nessa área.

No Anexo I, apresenta-se um fluxograma simplificado bem como a listagem do programa fonte RESPOND.BAS .Esse programa foi escrito na linguagem QUICKBASIC . No Anexo II, são fornecidas as listagens de resultados de casos exemplos processados com o programa RESPOND.

No Anexo III, são apresentados os arquivos de dados típicos para utilização do citado programa na análise não-linear convencional.

2. OBTENÇÃO DO SISTEMA EQUIVALENTE COM UM SÓ GRAU DE LIBERDADE

2.1 Utilização de modelo simplificado para a análise dinâmica

Em princípio, uma análise dinâmica rigorosa é possível para estruturas relativamente simples. Na prática, uma estrutura possui distribuição contínua de massa, o que torna o seu cálculo rigoroso mais complexo, mesmo para condições de contorno simples. Além disso, uma solução rigorosa só é possível quando o carregamento dinâmico e a função de resistência puderem ser representados por expressões matemáticas adequadas.

Pelos motivos citados e normalmente por razões práticas de projeto, costuma-se adotar métodos simplificados que possibilitem uma análise dinâmica mais rápida para estruturas complexas, dentro da precisão de cálculo adequada. Esses métodos normalmente exigem uma simplificação tanto da estrutura, quanto do carregamento.

Em vários casos que ocorrem na prática é possível reduzir-se um sistema real, possuindo vários graus de liberdade, a um sistema equivalente com um só grau de liberdade, sem que haja perda significativa nos resultados finais procurados. Assim, na Figura 1, para efeitos práticos, a laje apoiada ao longo de suas bordas pode ser substituída por meio de um sistema equivalente, tendo os parâmetros característicos " $M_e, K_e, P_e(t)$ " indicados. Embora tais parâmetros sejam parte integrante de uma só estrutura, geralmente é possível tratá-los independentemente.

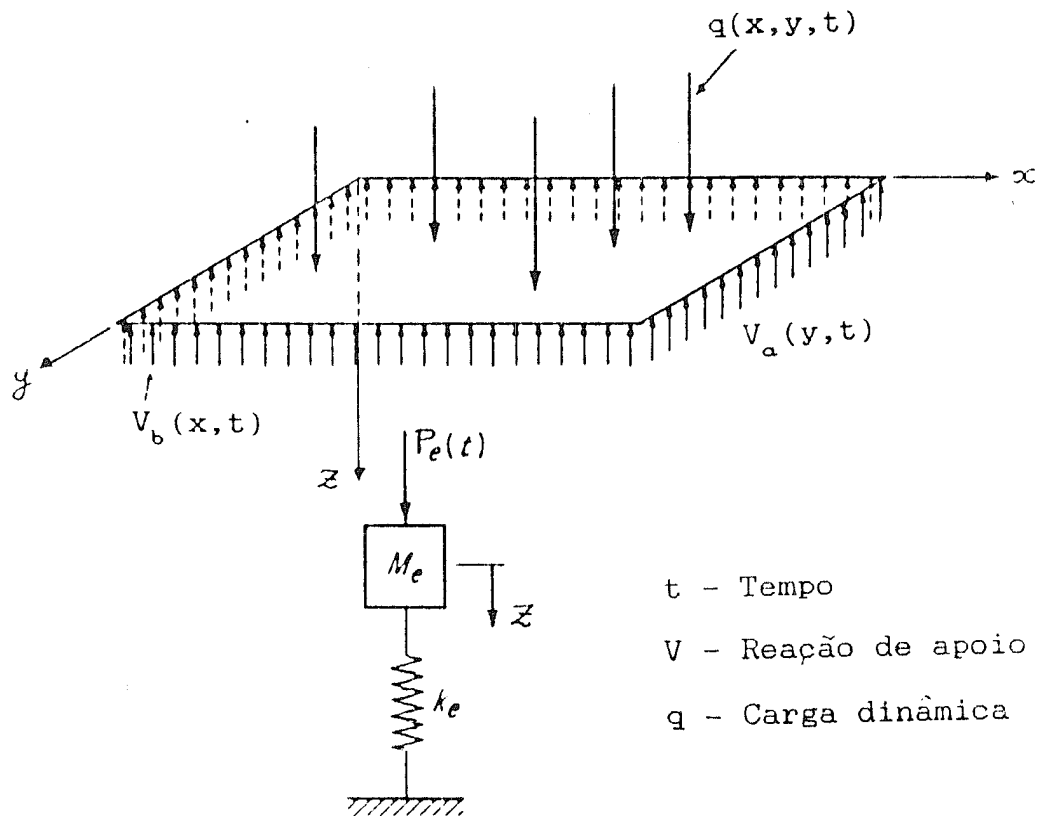


Figura 1 - Modelo estrutural de laje e sistema equivalente para análise dinâmica.

Um dos métodos de simplificação em regime elástico consiste em se incluir , na análise dinâmica, somente um ou alguns poucos modos normais de vibração. Esse procedimento é, na realidade, uma simplificação do sistema dinâmico real. Entretanto, para muitos modelos estruturais, essa abordagem não pode ser utilizada, em virtude da dificuldade em se determinar os modos de vibração. Além disso, às vezes até mesmo o modo fundamental de vibração tem que ser aproximado.

2.1.1 Conceituação de rótulas plásticas

Para efeito de projeto , nem sempre é prático buscar-se soluções rigorosas para modelos estruturais que permitam o comportamento plástico . A Figura 2 é apresentada com o objetivo de ilustrar a mudança de comportamento estrutural de uma viga metálica ,biengastada , sob ação de carregamento distribuído crescente, envolvendo comportamento plástico.

Na medida em que se aumenta a magnitude do carregamento distribuído, a viga passa a apresentar comportamentos estruturais distintos, os quais serão identificados, neste trabalho, a partir das faixas definidas a seguir :

a) faixa elástica

Quando o carregamento é pequeno, todos os pontos da viga se mantêm em regime elástico; assim, todo o modelo estrutural (viga) apresenta comportamento elástico; a faixa elástica se rá definida como aquela em que todos os pontos do material estiverem em regime elástico. Nessa faixa , o deslocamento "Z_c" no vão central da viga é relacionado à carga resultante total "P" sobre a viga por meio da seguinte expressão :

$$P = K \cdot Z_c \quad (2.1)$$

$$q_1(y,t) < q_2(y,t) < q_3(y,t)$$

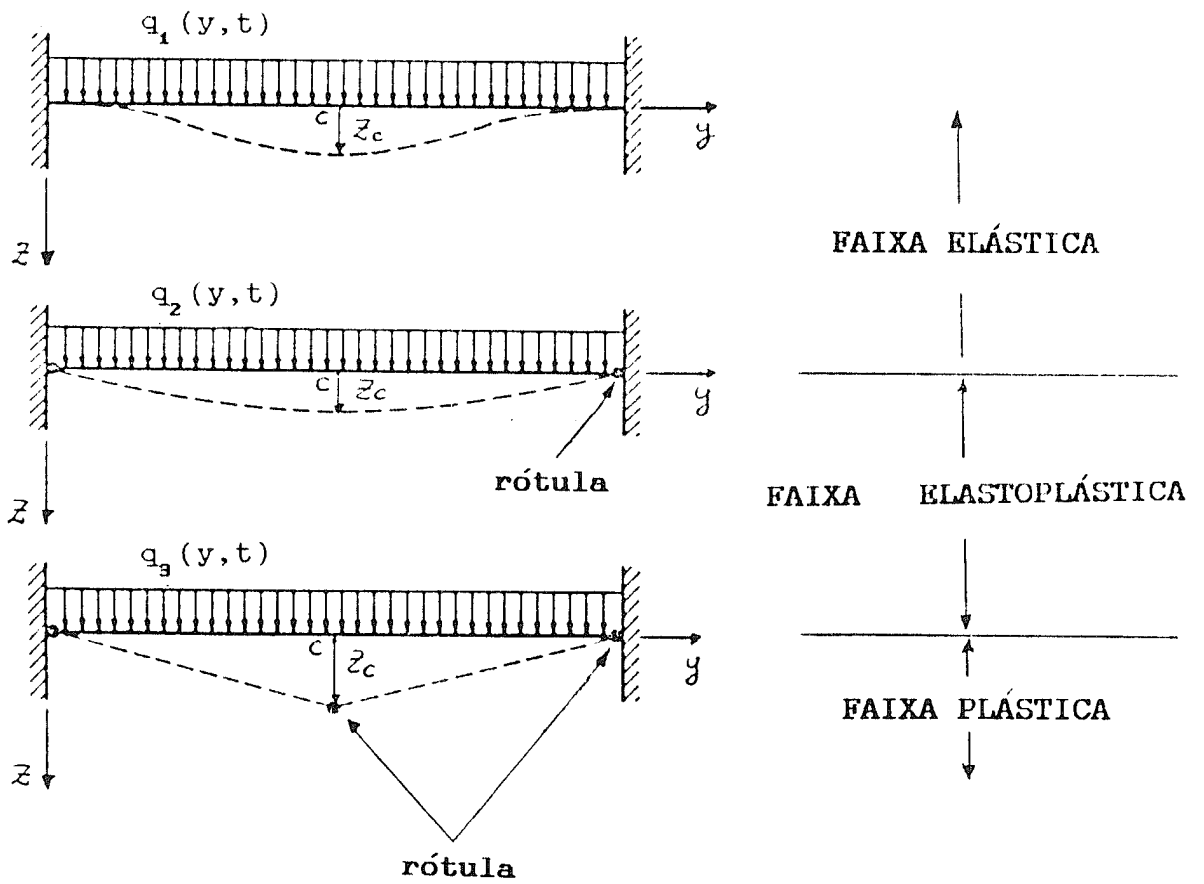


Figura 2 - Formação de rótulas plásticas em viga biengastada.

Em (2. 1) , "K" é denominada de constante de mola.

b) faixa elastoplástica

Aumentando-se progressivamente o carregamento, haverá um instante em que as seções nos apoios irão atingir o limite de escoamento do material. Quando toda a seção atinge o limite de escoamento, diz-se que nesses locais houve a formação de rótulas plásticas, as quais não oferecem mais resistência à rotação. As rótulas irão aparecer primeiro nos apoios, onde os momentos fletores são máximos (regime elástico).

A partir da formação dessas duas rótulas plásticas, o sistema estrutural resultante é ainda estável e é capaz de absorver esforços de flexão. Esse sistema passa a se comportar como uma viga biapoiada, tendo momentos aplicados nas extremidades da viga , com valores iguais aos dos momentos de plastificação das seções de apoio.

A faixa elastoplástica será definida como a faixa intermediária entre o instante da formação das primeiras rótulas plásticas e o instante da formação da última rótula plástica permitida pelo sistema estrutural considerado (no caso a viga). Nessa faixa ,o deslocamento no meio do vão da viga é relacionado com a carga total "P" atuando sobre a viga por meio da equação (2.2), onde " \bar{P} " é uma constante não nula e " K_2 " é uma constante de mola.

$$P = \bar{P} + K_2 \cdot Z_c \quad (2.2)$$

c) faixa plástica

Aumentando-se, ainda mais o carregamento, haverá um instante em que toda a seção central entrará em escoamento, for-

mando-se aí mais uma rótula plástica. Essa rótula forma-se nesse local, pois é onde o momento fletor é máximo. A partir desse instante, a viga passará a se comportar como um mecanismo e não será mais capaz de absorver esforços de flexão. Um acréscimo na magnitude do carregamento, após tal estágio, provocará a ruptura do sistema. A faixa plástica será definida a partir da formação dessa última rótula plástica.

Nas Figuras 3 e 4, são ilustradas, respectivamente, as etapas de formação de rótulas plásticas em vigas metálicas engastada e simplesmente apoiada. Nessas Figuras, são apresentados os valores das cargas totais verticais correspondentes aos instantes de plastificação, nas seções extremas ou no vão central. Conforme pode ser observado, essas cargas são dadas em função dos momentos fletores de plastificação das seções críticas. Para cada carga crítica, pode-se calcular o correspondente deslocamento no meio do vão. As cargas críticas e os deslocamentos assim calculados definem as curvas de resistência para essas vigas. Pode-se ainda, a partir desses dados, calcular as rigidezes (constantes de mola) aplicáveis às várias faixas de comportamento estrutural.

De acordo com /5/, o comportamento de vigas em concreto armado, do tipo subarmadas, é semelhante ao comportamento de vigas metálicas.

Cada uma das faixas apresentadas tem diferentes formas características. Assim sendo, não é possível identificar que formas modais serão válidas ao longo de toda a resposta da viga sob ação de carregamento crescente. Uma das simplificações usadas neste trabalho é tratar cada faixa como se fosse completamente independente das outras.

2.1.2 Linhas de ruptura em lajes

Usando vários resultados de testes obtidos na Universidade de Stuttgart, Ingerslev /6/ desenvolveu uma abordagem analí-

FAIXAS	CARREGAMENTO X COMPORTAMENTO ESTRUTURAL	MOMENTOS FLETORES	CARGAS DE PLASTIFICAÇÃO (#)	DIAGRAMA DE TENSÕES		DESLOCAMENTOS/RIGIDEZES
				SEÇÃO B	SEÇÃO C	
ELASTOPLÁSTICA	<p>$(Z_C) 1$</p>		$M_B = q_1 \cdot l^2 / 12$ $P_1 = q_1 \cdot l$		$(Z_C) 1 = \frac{P_1 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$	
	<p>$(Z_C) 2$</p>		$M_{PB} = q_2 \cdot l^2 / 12$ (*) $P_2 = q_2 \cdot l = 12 \cdot M_{PB} / l$		$(Z_C) 2 = \frac{P_2 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$ $(K_C) 2 = \frac{384 \cdot E \cdot I}{l^3}$	
	<p>$(Z_C) 3$</p>		$M_C = M_{PB} - q_3 \cdot l^2 / 8$ $P_3 = q_3 \cdot l$ $P_3 = (8/l) \cdot (M_C + M_{PB})$		$(Z_C) 3 = \frac{5 \cdot P_3 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$	
	<p>$(Z_C) 4$</p>		$M_C = M_{PC}$ $M_{PC} = M_{PB} - q_4 \cdot l^2 / 8$ (*) $P_4 = q_4 \cdot l = (8/l) \cdot (M_C + M_{PB})$		$(Z_C) 4 = \frac{5 \cdot P_4 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$ $(K_C) 4 = \frac{384 \cdot E \cdot I}{5 \cdot l^3}$	

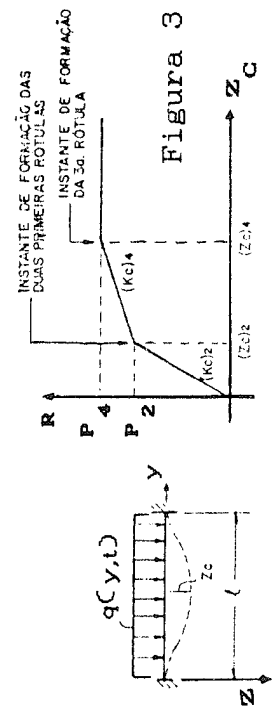
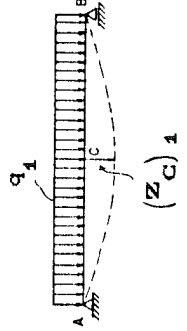
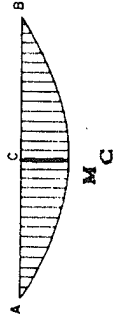
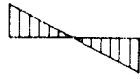
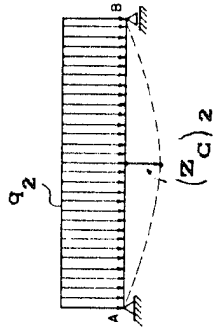
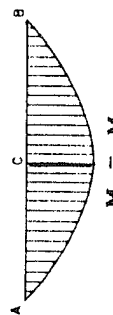



Figura 3 - Dados para análise de viga engastada com formação de rótulas plásticas

FAIXAS	CARREGAMENTO X COMPORTAMENTO ESTRUTURAL	MOMENTOS	FLETORES	CARGAS DE PLASTIFICAÇÃO (*)	DIAGRAMA DE TENSÕES		DESLOCAMENTOS / RIGIDEZES
					SEÇÃO B	SEÇÃO C	
ELÁSTICA	 <p>q_1 $(Z_C)_1$</p>	 <p>M_C</p>	$M_C = q_1 \cdot l^2 / 8$ $P_1 = q_1 \cdot l$ $M_C = P_1 \cdot l / 8$		$(Z_C)_1 = \frac{5 \cdot P_1 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$		
	 <p>q_2 $(Z_C)_2$</p>	 <p>$M_C = M_{PC}$</p>	$M_C = M_{PC} = P_2 \cdot l / 8$ (*) $P_2 = 8 \cdot M_{PC} / l$	 <p>M_{PC}</p>	$(Z_C)_2 = \frac{5 \cdot P_2 \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I}$ $(K_C)_2 = \frac{384 \cdot E \cdot I}{5 \cdot l^3}$		

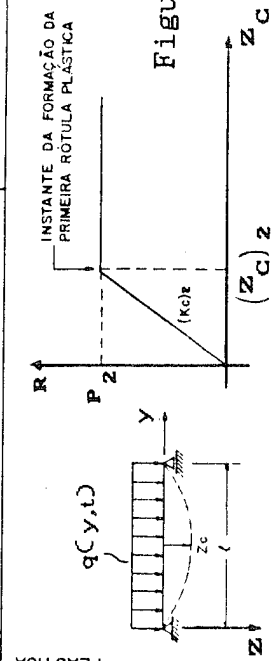


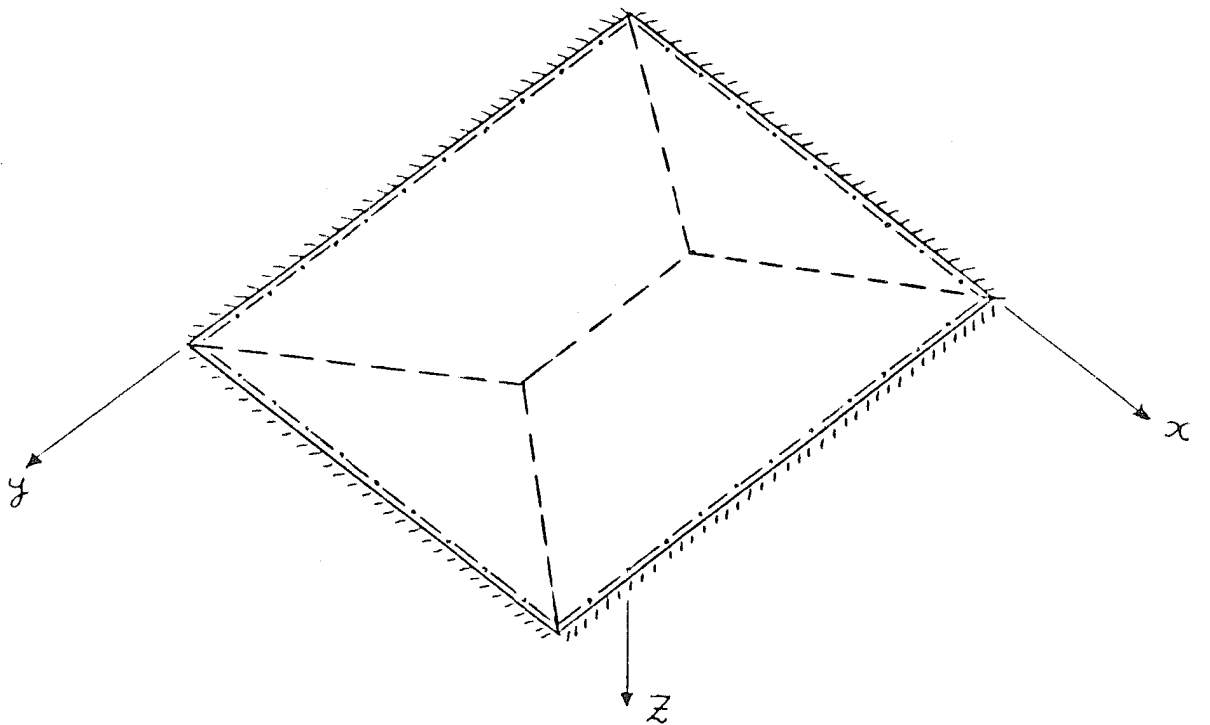
Figura 4 - Dados para análise de viga com apoios simples com formação de rótulas plásticas

tica para obtenção da carga crítica de projeto para placas. Posteriormente, Joahansen /7/ estendeu os estudos de carga última de vigas e de estruturas em pórtico para lajes em concreto armado, introduzindo o conceito de "linhas de ruptura", que são o equivalente bidimensional das rótulas plásticas. Em vez de calcular a forma deformada elástica da laje, a abordagem via linhas de ruptura procura determinar as possíveis formas de ruptura que correspondem a menor carga de ruptura, a qual é denominada carga crítica ou carga de ruptura /2,5/.

Quando a laje é submetida a cargas perpendiculares ao seu plano médio, são formadas linhas de escoamento nos locais de momentos fletores máximos, positivos ou negativos. Essas linhas subdividem a laje em setores planos (Figura 5). Como os deslocamentos ao longo das linhas de escoamento são grandes, os citados setores passam a sofrer rotação de corpo rígido. Uma vez conhecida a forma de ruptura da laje, a carga crítica de ruptura pode ser calculada, por exemplo, por meio de considerações de equilíbrio dos setores em que a laje é subdividida. Na referência /8/, é abordada a formação de linhas de ruptura em lajes retangulares.

Nas Figuras 5 e 6, mostra-se esquematicamente a formação de linhas de ruptura para o caso de lajes engastadas e de lajes simplesmente apoiadas, quando submetidas a carregamento uniformemente distribuído, aumentado gradativamente.

De acordo com a referência /2/, do ponto de vista prático, o método simplificado ora apresentado é extremamente importante e não deve ser considerado como uma aproximação grosseira que deva ser usada somente para análise preliminar. Os problemas em análise dinâmica envolvem incertezas significativas, particularmente em relação às características do carregamento. Nesses casos, às vezes, não se justifica a utilização de métodos complexos de análise dinâmica. Seria desperdício de tempo empregar-se método de cálculo tendo precisão maior do que a precisão dos dados de entrada.



Linha de ruptura no engaste — · — · —
 Linha de ruptura interna — — — —

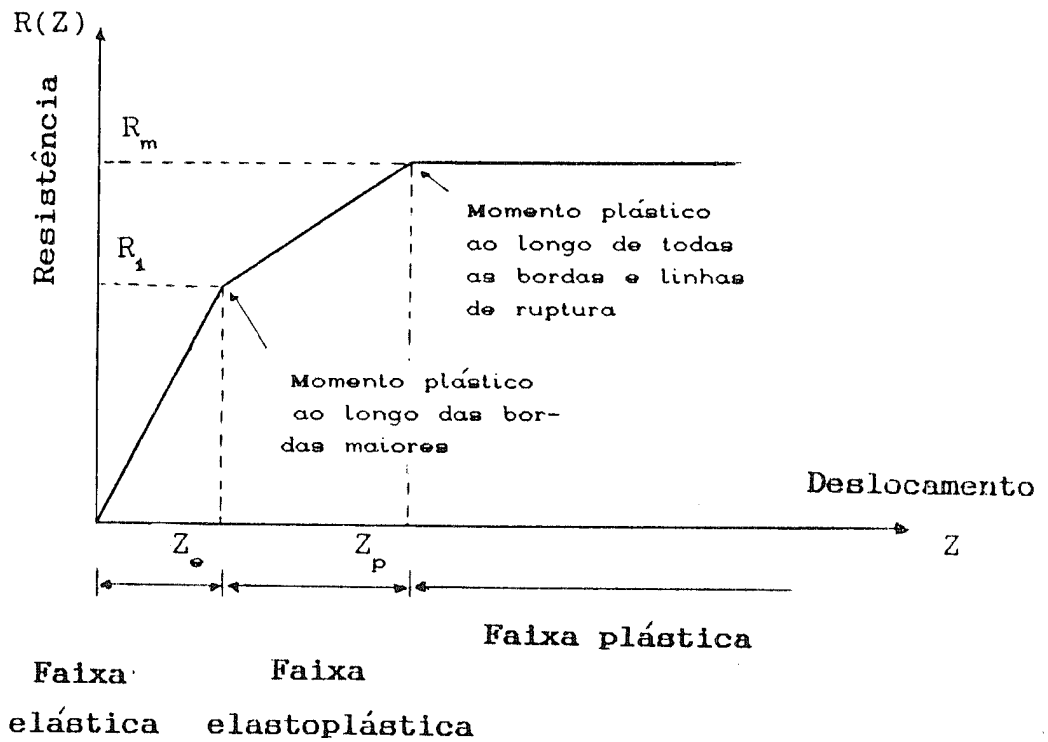
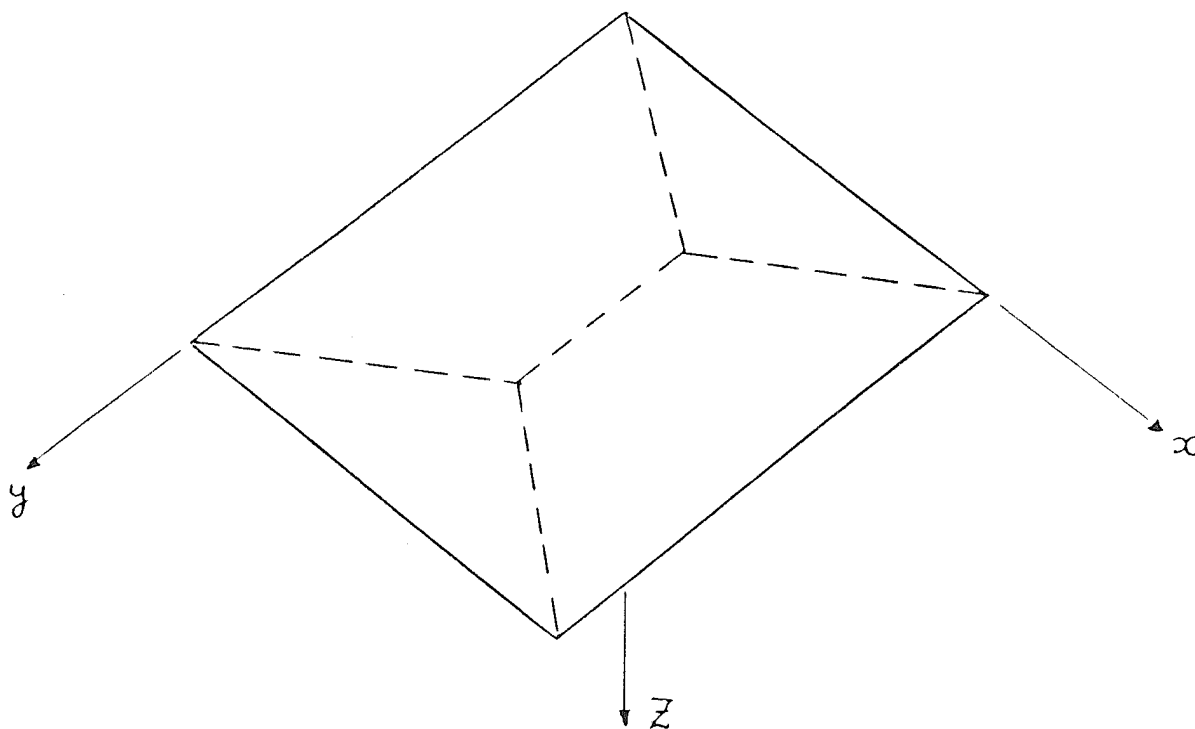


Figura 5 - Formação de linhas de ruptura em laje engastada.



Linha de ruptura interna: - - - -

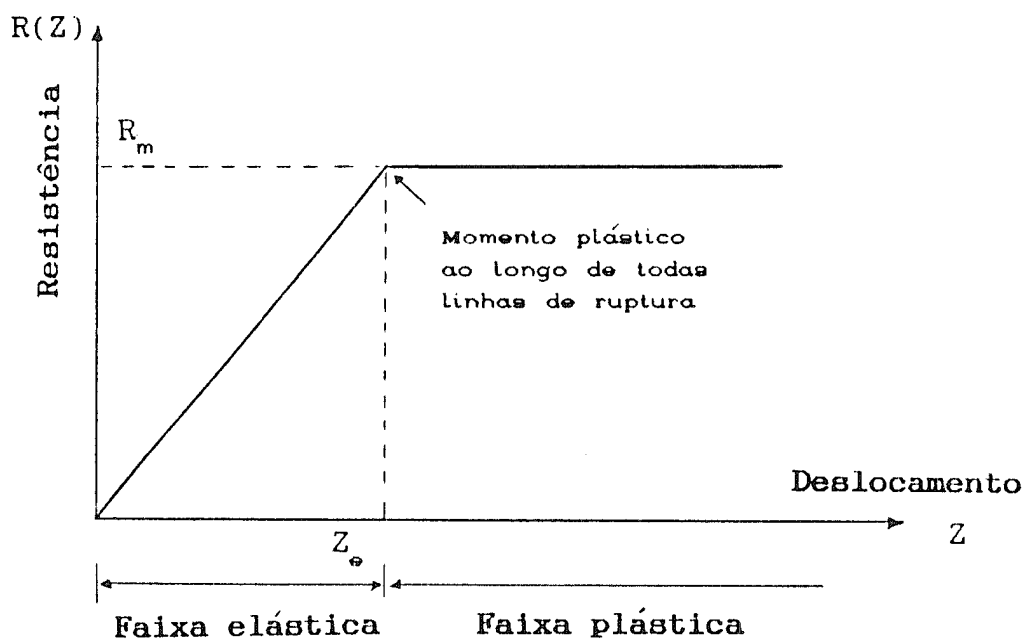


Figura 6 - Formação de linhas de ruptura em laje com apoio simples.

2.2 Definição de sistema equivalente com um só grau de liberdade

De modo a definir tal sistema, é necessário avaliar os parâmetros que o caracterizam (massa, resistência, carregamento) , os quais são indicados na Figura 1. Além disso, para efeito de se fazer a análise dinâmica ,é necessário determinar a forma e a magnitude do carregamento. Uma vez obtido o sistema equivalente, pode-se fazer uso da metodologia apresentada no Capítulo 3.

O sistema equivalente é normalmente selecionado de modo que o deslocamento da sua massa concentrada seja igual ao deslocamento de um ponto significativo do modelo estrutural. No caso das lajes aqui abordadas, esse ponto está localizado na parte central da laje. É conveniente ressaltar que as tensões e forças no sistema simplificado não são diretamente equivalentes às mesmas quantidades no modelo estrutural (laje). Entretanto, conhecendo-se o deslocamento do sistema equivalente, pode-se calcular as tensões ao longo do modelo estrutural ,com base na forma defletida assumida. Uma vez que a escala de tempo não é alterada, a resposta do sistema equivalente, definida em termos de deslocamento e tempo, é exatamente igual àquela do ponto significativo adotado (centro da laje).

Os parâmetros do sistema equivalente são avaliados com base numa forma de deslocamento assumida para o modelo estrutural. Neste trabalho, essa forma será escolhida como sendo a forma de deslocamento que o modelo estrutural teria se a carga dinâmica fosse aplicada estaticamente. Esse tipo de abordagem não é igual àquele onde se usa o primeiro modo de vibração ; segundo a referência /3/ , para os modelos estruturais aqui tratados ,a metodologia ora apresentada é mais precisa, principalmente em relação ao cálculo de tensões.

De modo a obter-se o sistema equivalente a partir do modelo

estrutural, serão introduzidos no item seguinte os chamados "fatores de transformação". Esses fatores serão denotados pela letra maiúscula "K" e serão usados para converter o sistema real (laje) num sistema equivalente com um só grau de liberdade. Esses fatores terão subscritos que irão caracterizar o tipo de transformação que estiver sendo realizado. Multiplicando-se os valores totais de carga, massa, resistência e rigidez da estrutura real pelos correspondentes fatores de transformação, obtêm-se os parâmetros que definem o sistema equivalente com um só grau de liberdade.

2.2.1 Conceituação dos fatores de transformação

Na definição dos fatores de transformação apresentada a seguir, "P(t)" é igual ao produto "q(t).a.b" onde "a" e "b" são, respectivamente, a largura e o comprimento da laje e "q(t)" é a carga dinâmica por unidade de área.

Fator de carga

O fator de carga é o fator pelo qual a carga total aplicada sobre o modelo estrutural é multiplicada de modo a obter-se uma "carga concentrada" para o sistema equivalente. Se a carga equivalente é "P_e(t)", então o fator de carga é definido pela equação:

$$K_1 = P_e(t) / P(t) \quad (2.3)$$

O fator "K₁" é obtido igualando-se o trabalho externo realizado pela carga equivalente "P_e(t)", sobre o sistema equivalente, com o trabalho externo feito pela carga real "P(t)" sobre o modelo estrutural defletido. O requisito básico é que o deslocamento do sistema equivalente, em qualquer tempo, seja igual ao deslocamento de referência do sistema real.

Fator de massa

É o fator pelo qual a massa distribuída total do modelo estrutural é multiplicada, de modo a obter-se a massa concentrada do sistema equivalente. Se a massa do sistema real é "M" e a massa equivalente ao sistema é "M_e", então o fator de massa "K_m" é dado pela relação :

$$K_m = M_e / M \quad (2.4)$$

O fator "K_m" é obtido igualando-se a energia cinética do modelo estrutural, com base na forma defletida assumida, com a energia cinética do sistema equivalente em qualquer tempo.

Fator de resistência

É o fator pelo qual a resistência do modelo estrutural tem que ser multiplicada de modo a obter-se a resistência do sistema equivalente. Para obter-se o fator de resistência, é necessário igualar-se a energia de deformação do modelo estrutural, calculada com base na forma defletida assumida, com a energia de deformação do sistema equivalente. Se a resistência calculada para o modelo estrutural é "R" e a resistência do sistema equivalente é "R_e", então o fator de resistência é definido pela relação :

$$K_r = R_e / R \quad (2.5)$$

Fator massa-carga

É o fator formado a partir da combinação dos fatores de carga e de massa. Este fator é útil em análises em que se utiliza a integração numérica. O fator massa-carga "K_{lm}" é definido pela equação (2.6).

$$K_{lm} = K_m / K_l \quad (2.6)$$

Função de resistência e constante de mola

A resistência de um modelo estrutural é proporcionada pelas forças internas que tendem a recolocá-lo em sua condição inicial de equilíbrio. Para um dado deslocamento, a força restauradora é definida numericamente como sendo igual a carga estática necessária para produzir esse mesmo deslocamento.

Na faixa elástica, a resistência "R" de um modelo estrutural é função de seu deslocamento

$$R = K \cdot Z \quad (2.7)$$

onde "K" é a constante de mola, igual a força necessária para produzir um deslocamento unitário, e "Z" é o deslocamento. Tendo assumido a forma defletida como citado antes, a constante de mola é determinada a partir das equações de deslocamento estático para cada caso de condições de carregamento e de apoio.

Quando um modelo estrutural se deforma sob ação de uma força, a relação resistência-deslocamento é alterada. Para alguns tipos de modelos estruturais, tais como lajes simplesmente apoiadas, a resistência é descrita por duas faixas, elástica e plástica (Figura 7). Já para outros casos de carga e de condições de apoio, como no caso de lajes engastadas ao longo de todo o contorno, são necessárias três faixas de deformação para definir a variação de "R" (Figura 6). Nesse último caso, são obtidas duas constantes de mola.

De acordo com (2.5) , a resistência "R_e" do sistema equivalente com só um grau de liberdade é igual ao produto do fator de resistência "K_r" pela resistência "R".

$$R_e = K_r \cdot R \quad (2.8)$$

Com base na equação (2.7) e assumindo-se que o deslocamento do sistema equivalente é igual deslocamento do ponto representativo do modelo estrutural, observa-se que a constante de mola equivalente " K_e " é obtida a partir da seguinte equação :

$$K_e = K_r \cdot K = K_l \cdot K \quad (2.9)$$

Reações dinâmicas

As reações dinâmicas são necessárias para a determinação das forças cisalhantes sobre o modelo estrutural, bem como para a determinação das cargas dinâmicas que atuam sobre os apoios. Para obter essas reações dinâmicas, é necessário trabalhar com o sistema real e não com o sistema equivalente. No sistema massa-mola da Figura 1, a reação de apoio é sempre igual a força na mola. Já para o modelo estrutural (laje), nessa mesma Figura, as equações de reações dinâmicas são afetadas pela distribuição da carga aplicada e pelas forças de inércia ao longo do modelo estrutural. Nesse caso, não há uma correspondência entre reação na mola e reação nos apoios.

O procedimento utilizado nas referências /1,2/, para obtenção das equações de reações dinâmicas, produzem, na verdade, reações aproximadas para os modelos. Essas aproximações resultam em parte pelo fato de se ter assumido uma forma defletida que não leva em consideração todos os modos de vibração. Além disso, não se levou em consideração o fato de que os próprios apoios também entram em escoamento.

2.3 Fatores de transformação para modelos estruturais do tipo laje retangular com apoio simples ou engaste

2.3.1 Hipóteses básicas

Os fatores de transformação, bem como as reações dinâmicas, são obtidos com base em hipóteses simplificadoras. Assim sendo, haverá necessariamente uma variação na precisão dos resultados dos valores obtidos para cisalhamento, deslocamento e momentos fletores ao longo do modelo estrutural. De acordo com a referência /1/, essas aproximações usadas estão dentro dos limites de precisão desejados para os casos de projetos de que tratam tal referência (estruturas para resistir a efeitos de ondas de pressão devidas a explosões - propósitos defensivos). No Apêndice A, dessa mesma referência, é apresentada uma comparação entre resultados de cálculos exatos e de cálculos aproximados, no que diz respeito a cisalhamento, momento fletor e deslocamento.

Com base na forma defletida assumida e impondo-se a condição que o deslocamento máximo do modelo estrutural seja igual, em qualquer tempo, ao deslocamento do sistema equivalente, é possível calcular os fatores de transformação necessários.

O fator de carga é obtido igualando-se o trabalho realizado pela carga sobre o modelo estrutural, tendo como equação de deslocamentos a forma defletida assumida, com o trabalho realizado pela carga equivalente sobre o sistema equivalente.

O fator de massa é obtido igualando-se, em qualquer tempo, a energia cinética do modelo estrutural com a do sistema equivalente.

O fator de resistência é obtido igualando-se, em qualquer tempo, a energia de deformação do modelo estrutural com a do sistema equivalente.

Conforme já abordado anteriormente, as lajes a que este trabalho está orientado, possuem faixas de comportamento diferenciadas, na medida em que o carregamento distribuído é aumentado progressivamente. Tais faixas foram denominadas de elástica, elastoplástica e plástica. Assim, ao longo do pro-

cesso numérico de obtenção da resposta do sistema equivalente, é necessário localizar-se em que faixa o sistema estará num determinado instante, para que se possa utilizar os fatores de transformação correspondentes.

Nas Tabelas 1 e 2, pode-se ver que os fatores de transformação são dados em função do tipo de faixa de comportamento apresentado pelo modelo estrutural. Assim, a laje simplesmente apoiada possui duas faixas: elástica e plástica. Já a laje biengastada possui três faixas: elástica, elastoplástica e plástica.

2.3.2 Fatores de transformação para lajes retangulares engastadas ou simplesmente apoiadas

Neste trabalho não é apresentada uma dedução dos fatores de transformação. Serão aqui utilizados os resultados das Tabelas 1 e 2, que contêm os fatores de transformação, as fórmulas para o cálculo de resistências, rigidezes e reações dinâmicas aplicáveis a lajes totalmente engastadas ao longo de todo o contorno e a lajes simplesmente apoiadas. Esses dados foram obtidos na referência /1/. Nessa mesma referência é apresentada uma dedução dos fatores de transformação para lajes retangulares quadradas.

Com base nos fatores de transformação fornecidos nas Tabelas 1 e 2, é possível partir-se de uma laje retangular de espessura constante (modelo estrutural) e chegar-se a um sistema equivalente, no qual é possível simular-se o comportamento dinâmico não-linear (físico) de lajes retangulares sob ação de cargas impulsivas.

Nas Figura 5 e 6, são ilustradas as funções de resistência previstas para os casos de lajes retangulares abordadas nesta dissertação. Todos os parâmetros que caracterizam as fun-

Tabela 1 - Fatores de transformação para laje retangular engastada em todo o contorno
(Tipo de carregamento : uniformemente distribuído ,/1/)

Faixa de deformação	a/b	Fator de carga (KL)	Fator de massa (KM)	Fator massa-carga (KLM)	Fatores multiplicativos					
					Resistência máxima	Constante de mola	Reações dinâmicas			
							(lado a)		(lado b)	
KLE	KME	KLME	FARE	FKE	FVAE1	FVAE2	FVBE1	FVBE2		
Elástica	1,0	0,33	0,21	0,63	30,2	870	0,10	0,15	0,10	0,15
	0,9	0,34	0,23	0,68	27,8	798	0,09	0,14	0,10	0,17
	0,8	0,36	0,25	0,69	26,0	757	0,08	0,12	0,11	0,19
	0,7	0,38	0,27	0,71	26,0	744	0,07	0,11	0,11	0,21
	0,6	0,41	0,29	0,71	26,4	778	0,06	0,09	0,12	0,23
	0,5	0,43	0,31	0,72	25,0	866	0,05	0,08	0,12	0,25
		KLEP	KMEP	KLMEP	FAREP	FKEP	FVAEP1	FVAEP2	FVBEP1	FVBEP2
Elastoplástica	1,0	0,46	0,31	0,67	12,0	271	0,07	0,18	0,07	0,18
	0,9	0,47	0,33	0,70	11,0	248	0,06	0,16	0,08	0,20
	0,8	0,49	0,35	0,71	10,3	228	0,06	0,14	0,08	0,22
	0,7	0,51	0,37	0,73	9,8	216	0,05	0,13	0,08	0,24
	0,6	0,53	0,39	0,74	9,3	212	0,04	0,11	0,09	0,26
	0,5	0,55	0,41	0,75	9,0	216	0,04	0,09	0,09	0,28
		KLP	KMP	KLMP	FARP	-	FVAP1	FVAP2	FVBP1	FVBP2
Plástica	1,0	0,33	0,17	0,51	12,0	0	0,09	0,16	0,09	0,16
	0,9	0,35	0,18	0,51	11,0	0	0,08	0,15	0,09	0,18
	0,8	0,37	0,20	0,54	10,3	0	0,07	0,13	0,10	0,20
	0,7	0,38	0,22	0,58	9,8	0	0,06	0,12	0,10	0,22
	0,6	0,40	0,23	0,58	9,3	0	0,05	0,10	0,10	0,25
	0,5	0,42	0,25	0,59	9,0	0	0,04	0,08	0,11	0,27

Observações : "a" e "b" - menor e maior lado da laje, respectivamente.

Esta Tabela continua na página seguinte.

Continuação da Tabela 1

Fórmulas auxiliares para determinação da Curva de Resistência, das Constantes de Mola e das Reações de Apoio em laje engastada.

RESISTÊNCIAS (R_1 , R_m) :

$$R_1 = \text{FARE} \cdot (m_p)_x \quad (\text{ Resistência Elástica Máxima })$$

$$R_m = (1/a) \cdot (12 \cdot A_1 + \text{FAREP} \cdot A_2) \quad (\text{ Res. Plástica })$$

$$A_1 = m_{r1} \cdot a + (m_p)_y \cdot a$$

$$A_2 = m_{r1} \cdot a + m_{r2} \cdot (b - a) + (m_p)_x \cdot b$$

CONSTANTES DE MOLA (K_1 , K_2) :

$$K_1 = \text{FKE} \cdot E \cdot I_a / a^2 \quad (\text{ Faixa elástica })$$

$$K_2 = \text{FKPE} \cdot E \cdot I_a / a^2 \quad (\text{ Faixa elastoplástica })$$

REAÇÕES DE APOIO POR UNIDADE DE COMPRIMENTO (V_a , V_b) :

$$V_a(t) = \text{FVAE1} \cdot P(t) + \text{FVAE2} \cdot R(t) \quad (\text{ Faixa elástica })$$

$$V_b(t) = \text{FVBE1} \cdot P(t) + \text{FVBE2} \cdot R(t)$$

$$V_a(t) = \text{FVAEP1} \cdot P(t) + \text{FVAEP2} \cdot R(t) \quad (\text{ Faixa })$$

$$V_b(t) = \text{FVBEP1} \cdot P(t) + \text{FVBEP2} \cdot R(t) \quad (\text{ Elastoplástica })$$

$$V_a(t) = \text{FVAP1} \cdot P(t) + \text{FVAP2} \cdot R_m \quad (\text{ Faixa Plástica })$$

$$V_b(t) = \text{FVBP1} \cdot P(t) + \text{FVBP2} \cdot R_m$$

NOTAÇÃO :

E - Módulo de elasticidade do material

I_a - Momento de inércia efetivo da seção transversal

m_{r1} m_{r2} $(m_p)_x$ $(m_p)_y$ - Momentos fletores por unidade de comprimento - Ver Figura 10.

Tabela 2 - Fatores de transformação para laje retangular simplesmente apoiada em todo o contorno
(Tipo de carregamento : uniformemente distribuido)

Fonte : Referência /1/

Faixa de deformação	a/b	Fator de carga (KL)	Fator de massa (KM)	Fator massa-carga (KLM)	Fatores multiplicativos					
					Resistência máxima	Constante de mola	Reações dinâmicas			
							(lado a)		(lado b)	
		KLE	KME	KLME	FARE	FKE	FVAE1	FVAE2	FVBE1	FVBE2
Elastica	1,0	0,45	0,31	0,68	12,0	271	0,07	0,18	0,07	0,18
	0,9	0,47	0,33	0,70	11,0	248	0,06	0,16	0,08	0,20
	0,8	0,49	0,35	0,71	10,3	228	0,06	0,14	0,08	0,22
	0,7	0,51	0,37	0,73	9,8	216	0,05	0,13	0,08	0,24
	0,6	0,53	0,39	0,74	9,3	212	0,04	0,11	0,09	0,26
	0,5	0,55	0,41	0,75	9,0	216	0,04	0,09	0,09	0,28
		KLP	KMP	KLMP	FARP	-	FVAP1	FVAP2	FVBP1	FVBP2
Plástica	1,0	0,33	0,17	0,51	12,0	0	0,09	0,16	0,09	0,16
	0,9	0,35	0,18	0,51	11,0	0	0,08	0,15	0,09	0,18
	0,8	0,37	0,20	0,54	10,3	0	0,07	0,13	0,10	0,20
	0,7	0,38	0,22	0,58	9,8	0	0,06	0,12	0,10	0,22
	0,6	0,40	0,23	0,58	9,3	0	0,05	0,10	0,10	0,25
	0,5	0,42	0,25	0,59	9,0	0	0,04	0,08	0,11	0,27

Observações : "a" - menor lado da laje
"b" - maior lado da laje

Esta Tabela continua na página seguinte.

Continuação da Tabela 2

Fórmulas auxiliares para determinação da Curva de Resistência, das Constantes de Mola e das Reações de Apoio em laje com apoio simples.

RESISTÊNCIAS (R_m) :

$$R_m = (1/a) \cdot (12 \cdot A_1 + \text{FAREP} \cdot A_2) \quad (\text{Res. Plástica})$$

$$A_1 = m_{r1} \cdot a$$

$$A_2 = m_{r1} \cdot a + m_{r2} \cdot (b - a)$$

CONSTANTES DE MOLA (K_1) :

$$K_1 = \text{FKE} \cdot E \cdot I_a / a^2 \quad (\text{Faixa elástica})$$

REAÇÕES DE APOIO POR UNIDADE DE COMPRIMENTO (V_a , V_b) :

$$V_a(t) = \text{FVAE1} \cdot P(t) + \text{FVAE2} \cdot R(t) \quad (\text{Faixa elástica})$$

$$V_b(t) = \text{FVBE1} \cdot P(t) + \text{FVBE2} \cdot R(t)$$

$$V_a(t) = \text{FVAP1} \cdot P(t) + \text{FVAP2} \cdot R_m \quad (\text{Faixa Plástica})$$

$$V_b(t) = \text{FVBP1} \cdot P(t) + \text{FVBP2} \cdot R_m$$

NOTAÇÃO :

E - Módulo de elasticidade do material

I_a - Momento de inércia efetivo da seção transversal

m_{r1} m_{r2} - Momentos fletores por unidade de comprimento -

Ver Figura 11.

ções de resistência são obtidos a partir das Tabelas 1 e 2 com base na relação a/b, onde "a" é o menor lado da laje e "b" é o maior lado. Uma vez determinada a relação a/b, é possível também obter-se a rigidez correspondente, o que possibilita automaticamente a determinação dos deslocamentos limites que definem as várias faixas de comportamento.

Conforme pode ser visto nas Tabelas 3 e 4, os valores de resistência são dados em função de momentos fletores responsáveis pela formação das linhas de ruptura; esses momentos fletores são definidos como momentos por unidade de comprimento ao longo das linhas de ruptura ou como a magnitude do vetor resultante de momentos fletores distribuídos que atuam ao longo de linhas de rupturas internas.

2.4 Momentos fletores de plastificação e momento de inércia efetivo para seções retangulares

Esse item aplica-se especificamente a lajes retangulares em concreto armado, tendo espessura constante e com mesma taxa de armadura ao longo das duas maiores dimensões (largura e comprimento). A disposição das armaduras deverá ser estabelecida de acordo com a Figura 7.

Próximo da carga de ruptura, a distribuição de tensões no concreto é do tipo parabólica, sendo que a mesma pode ser aproximada por uma distribuição retangular equivalente /4/. Na Figura 8, é ilustrada essa relação de equivalência. Com base nessa distribuição, para efeito de projeto, a capacidade última de resistência a momento fletor de uma seção retangular em concreto armado é dada por

$$M_p = \rho_s \cdot B \cdot d^2 \cdot f_{ydi} \cdot \left(1 - \frac{\rho_s \cdot f_{ydi}}{1,7 \cdot f_{ckdi}} \right) \quad (2.10)$$

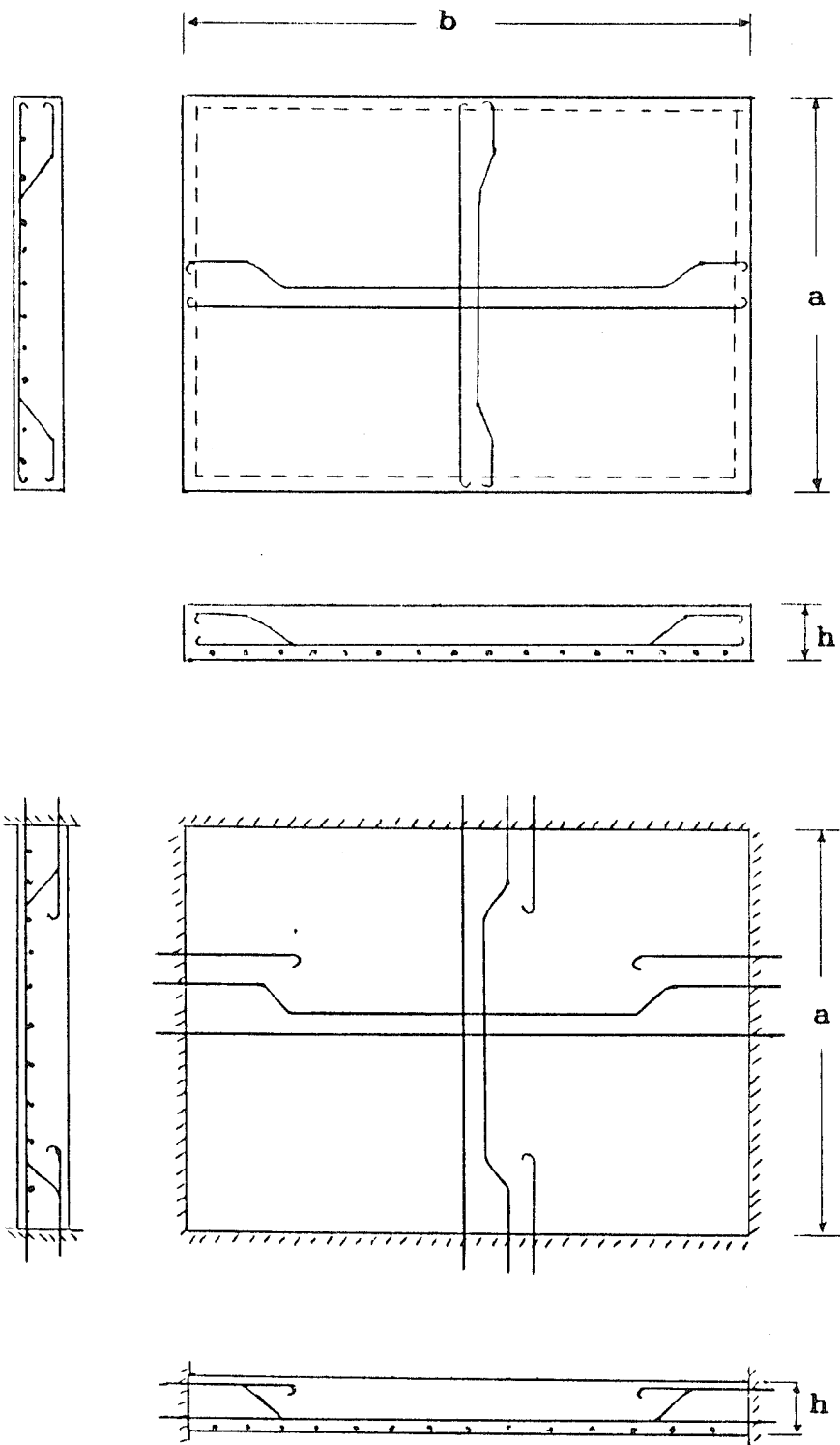
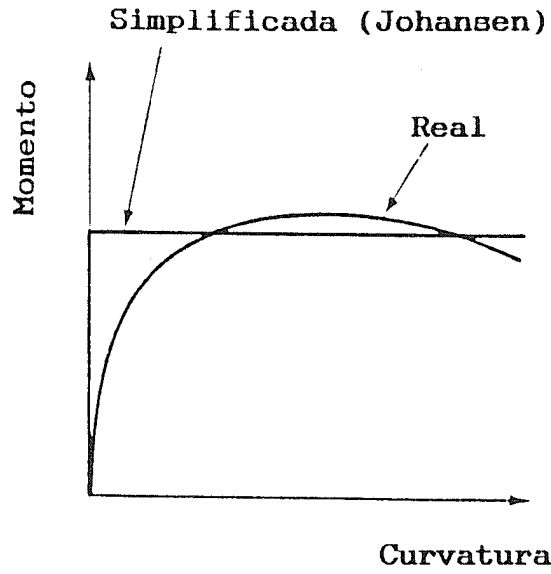
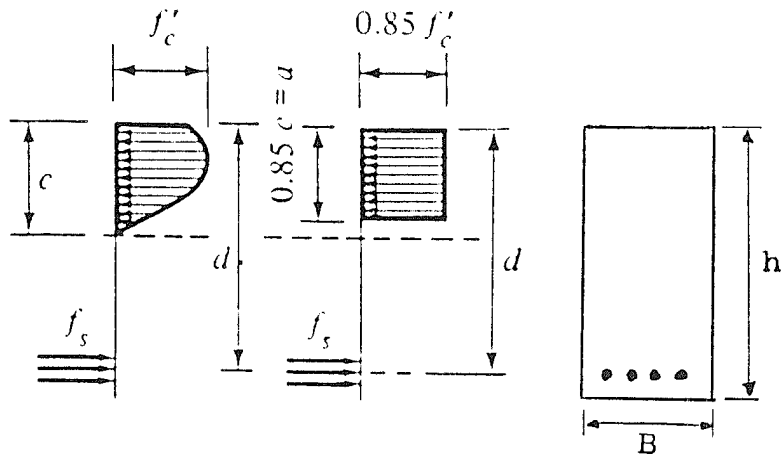


Figura 7 - Esquema da forma e disposição da armadura a ser utilizada.



(a) Momento versus curvatura



(b) Distribuição de tensões normais, real e simplificada, na seção transversal, /4/ .

Figura 8 - Momento de plastificação para vigas e lajes em concreto armado (estruturas subarmadas).

onde "B" é a largura, "d" é a altura efetiva, " ρ_s " é a taxa de armadura de tração " f_{ydi} " é o limite de escoamento dinâmico do aço e " f_{ckdi} " é a resistência dinâmica característica à compressão do concreto. De modo a garantir que a seção seja do tipo subarmada, a taxa de armadura é limitada a um valor igual a 0.75 % (referência /2/).

Para o caso de lajes, é de interesse o momento de plastificação por unidade de comprimento, o qual é dado por

$$m_p = M_p / B = \rho_s \cdot d^2 \cdot f_{ydi} \cdot \left[1 - \frac{\rho_s \cdot f_{ydi}}{1,7 \cdot f_{ckdi}} \right] \quad (2.11)$$

Nessas duas últimas fórmulas, a armadura é suposta como sendo distribuída perpendicularmente à seção a qual elas se aplicam.

De acordo com a referência /2/, as resistências do concreto e do aço são dependentes do tempo, ou seja, a resistência aumenta com a taxa de deformação. Isto equivale a dizer que um mesmo material apresenta resistência dinâmica maior do que a sua resistência estática. Nos exemplos de aplicação a peças de concreto armado, na citada referência é assumido um fator de majoração de 25% nas resistências estáticas para efeito de obtenção das resistências dinâmicas.

Como pode ser visto nas fórmulas das constantes de mola das Tabelas 1 e 2, há um parâmetro " I_a ", momento de inércia efetivo, que ainda não foi determinado. Esse momento de inércia é um dos parâmetros necessários ao cálculo da rigidez da seção analisada.

Segundo a referência /2/, é difícil calcular corretamente o momento de inércia efetivo, em virtude do fissuramento do concreto. Esse fissuramento não é facilmente quantificável e tem um efeito apreciável sobre o momento de inércia. Além disso, o momento de inércia varia ao longo dos vãos da laje e

depende dos deslocamentos provocados pelo carregamento. Alguns projetistas tem usado a seção transformada toda fissurada para efeito de obtenção do momento de inércia efetivo. Já outros projetistas utilizam seções transformadas com base na média entre as seções fissurada e não fissurada. De acordo ainda com /2/, esta última abordagem é razoável e pode ser quantificada pela expressão dada a seguir, onde o resultado é expresso em polegadas quadradas.

$$I_a = B \cdot d^3 \cdot \left[5,5 \cdot \rho_s + 0,083 \right] / 2 \quad (2.12)$$

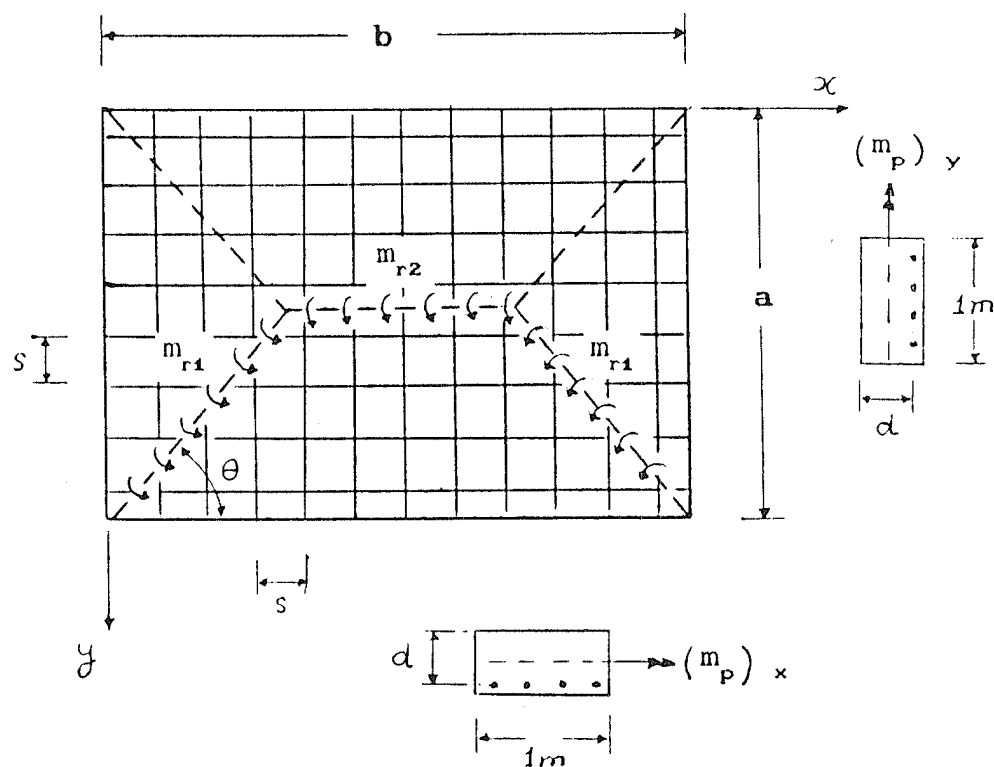
2.5 Momentos fletores de plastificação ao longo das linhas de ruptura

Conforme mostrado na Figura 9 , os planos verticais, que passam pelas linhas de rupturas inclinadas em relação aos lados da laje, contêm seções de concreto cujas armaduras não se dispõem perpendicularmente às mesmas. Assim, é necessário obter-se uma fórmula que forneça o momento fletor de plastificação resultante ao longo da linha de ruptura inclinada, em função das armaduras dispostas segundo às direções dos lados da laje. Com base em relações geométricas apresentadas em /9/ , obtêm-se as seguinte expressões para momento fletor por unidade de comprimento ao longo das linhas de ruptura :

$$m_{r2} = (m_p)_x \quad (2.13)$$

$$m_{r1} = (m_p)_x \cdot \cos^2 \theta + (m_p)_y \cdot \cos^2 (\theta + \pi/2) \quad (2.14)$$

onde " θ " é o ângulo de inclinação da linha de ruptura (Figura 9), " m_{r1} " e " m_{r2} " são, respectivamente, o momento ao longo da linha de ruptura inclinada e o momento ao longo da linha de ruptura paralela ao maior lado da laje. Na Figura 9 são ilustrados, também, os momentos de plastificação por unidade de comprimento, $(m_p)_x$ e $(m_p)_y$. Nas figuras 10 e 11, são ilustrados os momentos " m_{r1} " e " m_{r2} ", para os casos de lajes engastadas e simplesmente apoiadas.



$$m_{r2} = (m_p)_x \quad \text{para } a \neq b$$

$$m_{r1} = (m_p)_x \cdot \cos^2 \theta + (m_p)_y \cdot \cos^2 (\theta + \pi/2)$$

$$(m_p)_x = (m_p)_y = \rho_s \cdot d^2 \cdot f_{ydt} \cdot \left(1 - \frac{\rho_s \cdot f_{ydt}}{1,7 \cdot f_{ckdi}} \right)$$

Figura 9 - Momentos de plastificação ao longo das linhas de ruptura em função das armaduras longitudinal e transversal.

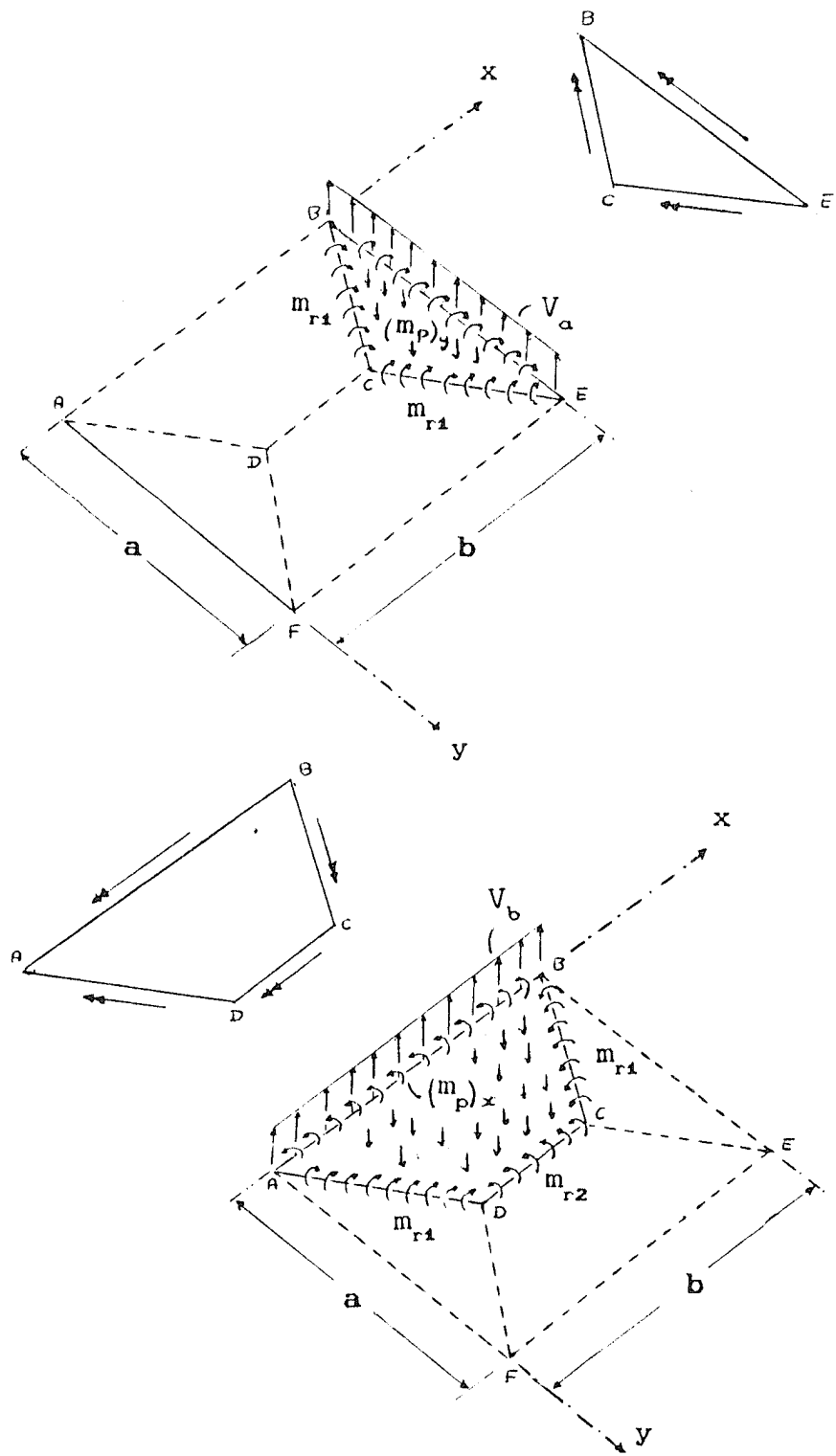


Figura-10 Setores em que a laje engastada é dividida ,ao final da formação das linhas de ruptura, e esforços envolvidos.

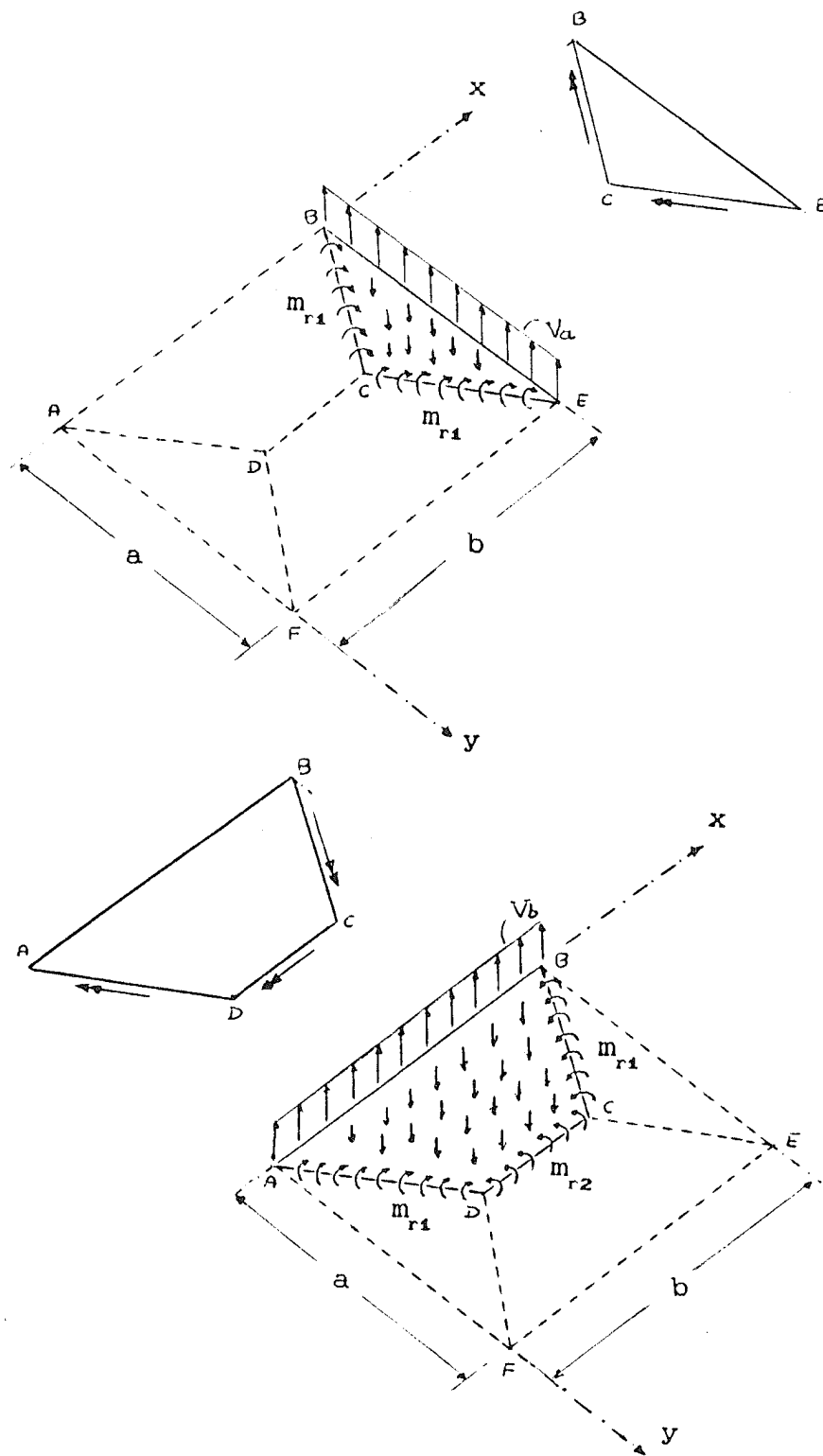


Figura 11-Setores em que a laje em apoio simples é dividida ,ao final da formação das linhas de ruptura, e esforços envolvidos.

3. ANÁLISE DINÂMICA NÃO-LINEAR DE SISTEMAS COM UM SÓ GRAU DE LIBERDADE

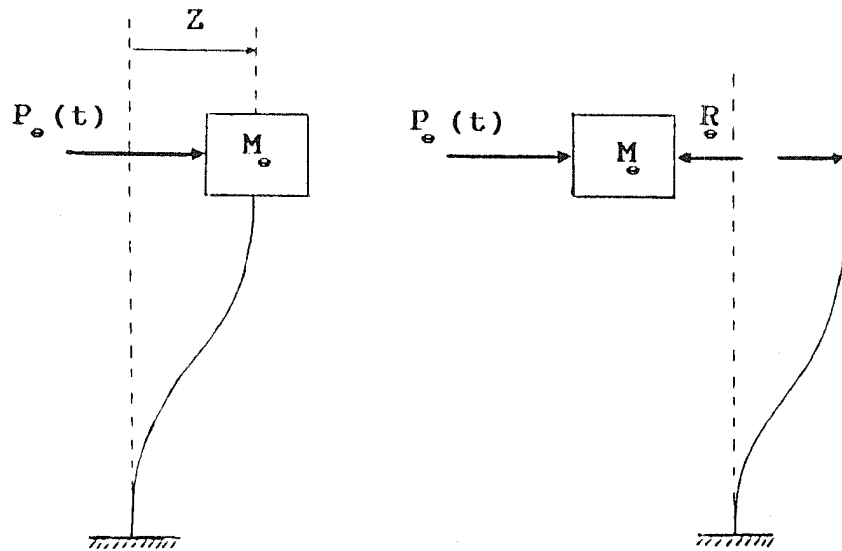
3.1 Introdução

Este Capítulo apresenta uma metodologia para obtenção da resposta dinâmica de um sistema não-amortecido, com um só grau de liberdade, por meio de análise numérica, a qual é implementada em microcomputador.

A análise numérica, que consiste em se resolver a equação diferencial de movimento do sistema por meio de operações aritméticas, é uma forma mais geral de abordagem do que a solução rigorosa; esta só é possível quando o carregamento e as funções de resistência podem ser definidos em termos de expressões matemáticas simples.

Um sistema com um só grau de liberdade é definido como aquele no qual pode-se conhecer a posição de qualquer ponto do sistema, em qualquer tempo "t", a partir de uma única coordenada. Na Figura 12, é mostrado um exemplo típico de tal sistema, onde a massa " M_e " pode mover-se somente na direção horizontal e qualquer ponto da massa se desloca de uma mesma quantidade; no modelo indicado é assumido que a mola não possui massa.

Como as cargas de que tratam esta dissertação são do tipo impulsiva, o sistema com um só grau de liberdade não incluirá amortecimento, uma vez que este não é importante na avaliação da resposta máxima do sistema / 2/. A resposta máxima a uma carga impulsiva é atingida num intervalo de tempo muito cur-



$$M_0 \cdot \frac{d^2 Z(t)}{dt^2} + R_0(Z(t)) = P_0(t)$$

Figura 12 - Sistema não-amortecido com um só grau de liberdade (modelo e equação de equilíbrio dinâmico).

to, mesmo antes que as forças de amortecimento sejam capazes de absorver energia significativa da estrutura /2,10 /.

3.2 Formulação da equação de movimento do sistema

Para o sistema não-amortecido, mostrado na Figura 12, o equilíbrio dinâmico pode ser expresso por meio da seguinte equação diferencial de movimento :

$$M_e \cdot \ddot{Z}(t) = P_e(t) - R_e(Z(t)) \quad (3.1)$$

onde "M_e" é a massa do sistema, "t" é a variável tempo, "P_e(t)" é o carregamento dinâmico, "Z(t)" é o deslocamento da massa a partir da sua posição de equilíbrio estático, "R_e(Z(t))" é a função de resistência e "Z̈(t)" é a aceleração da massa (derivada segunda do deslocamento em relação ao tempo). Na Figura 13, são ilustradas formas típicas de carregamento e de funções de resistência.

Com base nos fatores de transformação definidos no Capítulo 2, obtêm-se as seguintes relações :

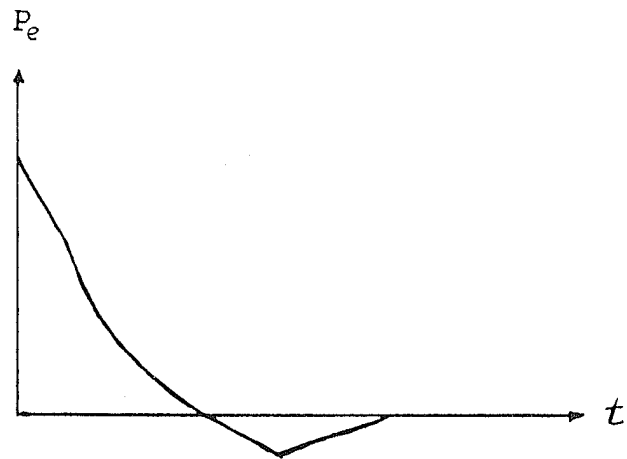
$$M_e = M \cdot K_m \quad (3.2)$$

$$P_e(t) = P(t) \cdot K_l \quad (3.3)$$

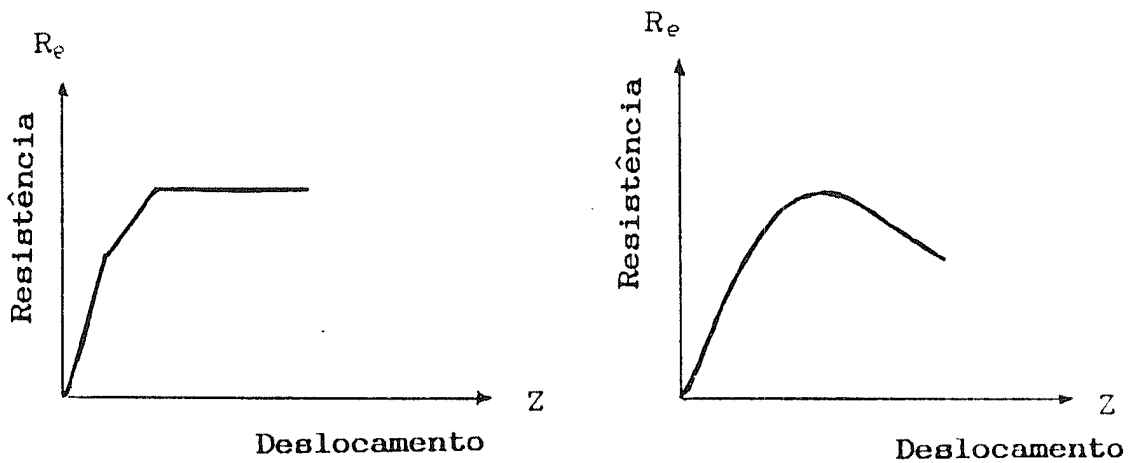
$$R_e(Z(t)) = R(Z(t)) \cdot K_r = R(Z(t)) \cdot K_l \quad (3.4)$$

onde "M" é a massa total da laje, "P(t)" é o carregamento dinâmico total sobre a laje e "R(Z(t))" é a função de resistência total da laje. Substituindo-se essas expressões na equação (3.1) obtém-se a equação (3.5).

$$K_m \cdot M \cdot \ddot{Z}(t) = K_l \cdot P(t) - K_r \cdot R(Z(t)) \quad (3.5)$$



Carregamento dinâmico típico



Exemplos de funções de resistência

Figura 13 - Ilustração de carregamento típico e curvas de resistência versus deslocamento.

Reagrupando-se os termos e utilizando-se o fato de que $K_r = K_l$ e que $K_{lm} = K_m / K_l$ chega-se a seguinte expressão:

$$K_{lm} \cdot M \cdot \ddot{Z}(t) + R(Z(t)) = P(t) \quad (3.6)$$

onde " K_{lm} " é o fator massa-carga para a laje analisada. Em (3.6), " $P(t)$ " é igual ao produto " $q(t).a.b$ ", sendo " $q(t)$ " a função que descreve o carregamento por unidade de área, que atua ao longo do tempo; " a " e " b " são, respectivamente, a largura e o comprimento da laje.

Nas Figuras 14, 15 e 16, são ilustrados, respectivamente, os tipos de curvas de resistência aplicáveis às análises elástica, elástica-plástica e elastoplástica. A Figura 15 é aplicável ao caso de lajes simplesmente apoiadas. Já a Figura 16 aplica-se ao caso de laje engastada ao longo de todo o contorno.

Nas Figuras 15 e 16, são apresentadas também as expressões algébricas para as curvas de resistência, tanto para a fase de carregamento como para a fase de descarregamento (após o deslocamento máximo ter sido atingido nas regiões elastoplástica ou plástica).

3.3 Metodologia de cálculo : aceleração linear

3.3.1 Princípios básicos do método numérico utilizado

A equação diferencial do movimento (3.6) pode ser reescrita na seguinte forma :

$$\ddot{Z}(t) = \frac{P(t) - R(Z(t))}{M \cdot K_{lm}} \quad (3.7)$$

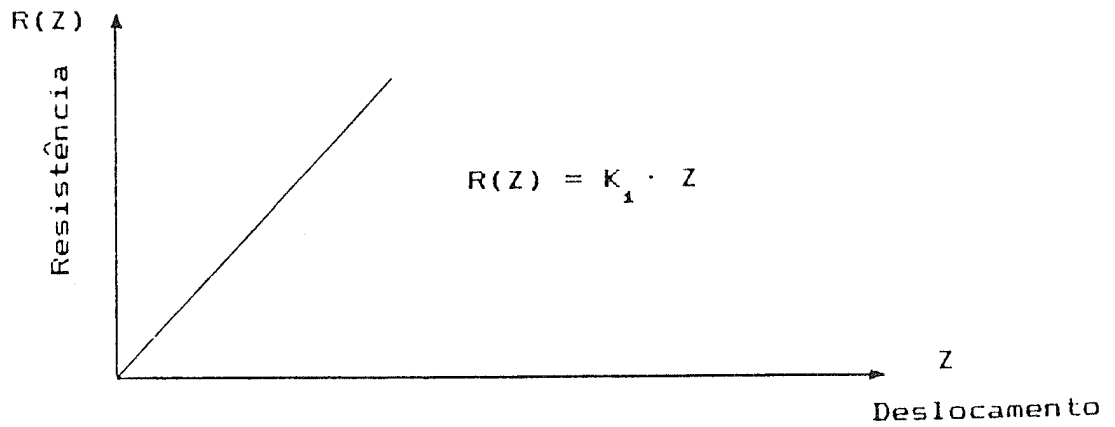
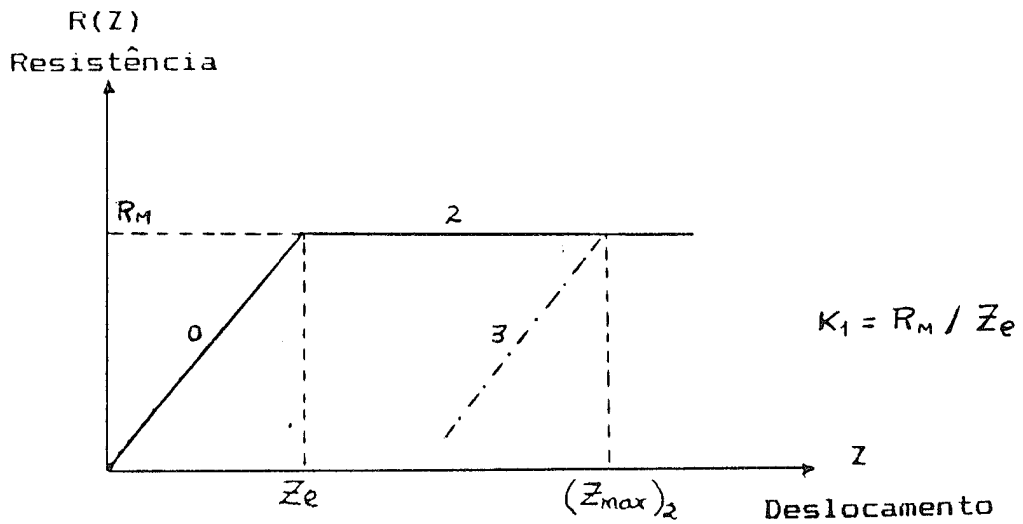
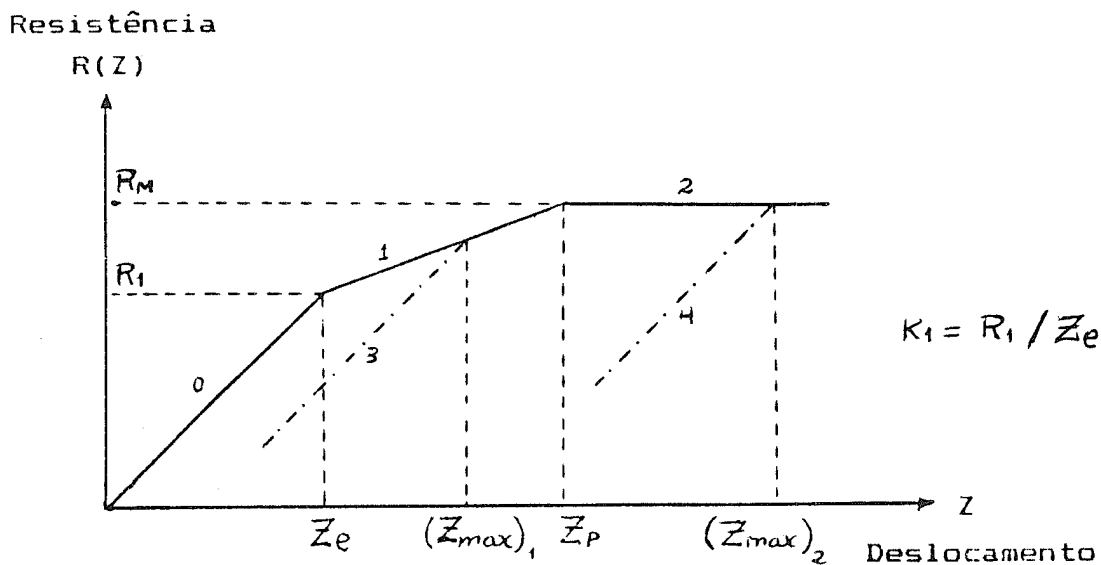


Figura 14 - Curva de resistência para análise elástica.



Curva	Condição de deslocamento máximo	Curva de Resistência $R(Z)$
0	Atingido ou não	$K_1 \cdot Z$
2	Não atingido	R_M
3	Atingido (descarregamento)	$R_M - K_1 \cdot \left[(Z_{\max})_2 - Z \right]$

Figura 15 - Curva de resistência para análise elástica / plástica.



Curva	Condição de deslocamento máximo	Curva de Resistência $R(Z)$
0	Atingido ou não	$K_1 \cdot Z$
1	Não atingido	$R_1 + (R_M + R_1) \cdot \frac{(Z - Z_e)}{(Z_p - Z_e)}$
3	Atingido (1)	$R_1 + (R_M - R_1) \cdot \frac{(Z - Z_e)}{(Z_p - Z_e)} - K_1 \cdot [(Z_{max})_1 - Z]$
2	Não atingido	R_M
4	Atingido (2)	$R_M - K_1 \cdot [(Z_{max})_2 - Z]$

(1) Descarregamento na fase elastoplástica

(2) Descarregamento na fase plástica

Figura 16 - Curva de resistência para análise elastoplástica.

Na realidade, a equação (3.7) não pode ser usada diretamente para obter o valor da aceleração num tempo genérico "t", uma vez que a função de resistência também pode depender do deslocamento "Z". Se isto fosse possível, o deslocamento e velocidade poderiam ser calculados, diretamente, a partir da integração da aceleração assim obtida.

O procedimento utilizado para obtenção do deslocamento será feito a partir da equação (3.7), entretanto não para um tempo genérico "t", e sim para uma seqüência de pontos discretos no domínio do tempo (" $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$..."). Além disso, será admitido que, no intervalo de tempo " Δt_n ", que separa dois tempos consecutivos " t_n " e " t_{n+1} ", a aceleração " $Z(t)$ " terá variação linear e que o carregamento dinâmico " $P(t)$ " iniciará a partir do tempo " t_0 ".

Os valores de aceleração, velocidade e deslocamento no tempo " t_n " serão designados, respectivamente, através das notações " \ddot{Z}_n ", " \dot{Z}_n " e " Z_n ".

Com base no fato de que a velocidade e o deslocamento podem ser calculados a partir da integração da aceleração, pode-se calcular a velocidade e o deslocamento ao final de cada intervalo de tempo pelas equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

$$\dot{Z}_{n+1} = \dot{Z}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{Z}(t) \cdot dt \quad (3.8)$$

$$Z_{n+1} = Z_n + \dot{Z}_n \cdot \Delta t_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left[\int \ddot{Z}(t) \cdot dt \right] \cdot dt \quad (3.9)$$

Essas duas equações indicam que a velocidade e o deslocamento no tempo " t_{n+1} " podem ser obtidos por extrapolação a partir dos correspondentes valores no tempo " t_n ", desde que seja

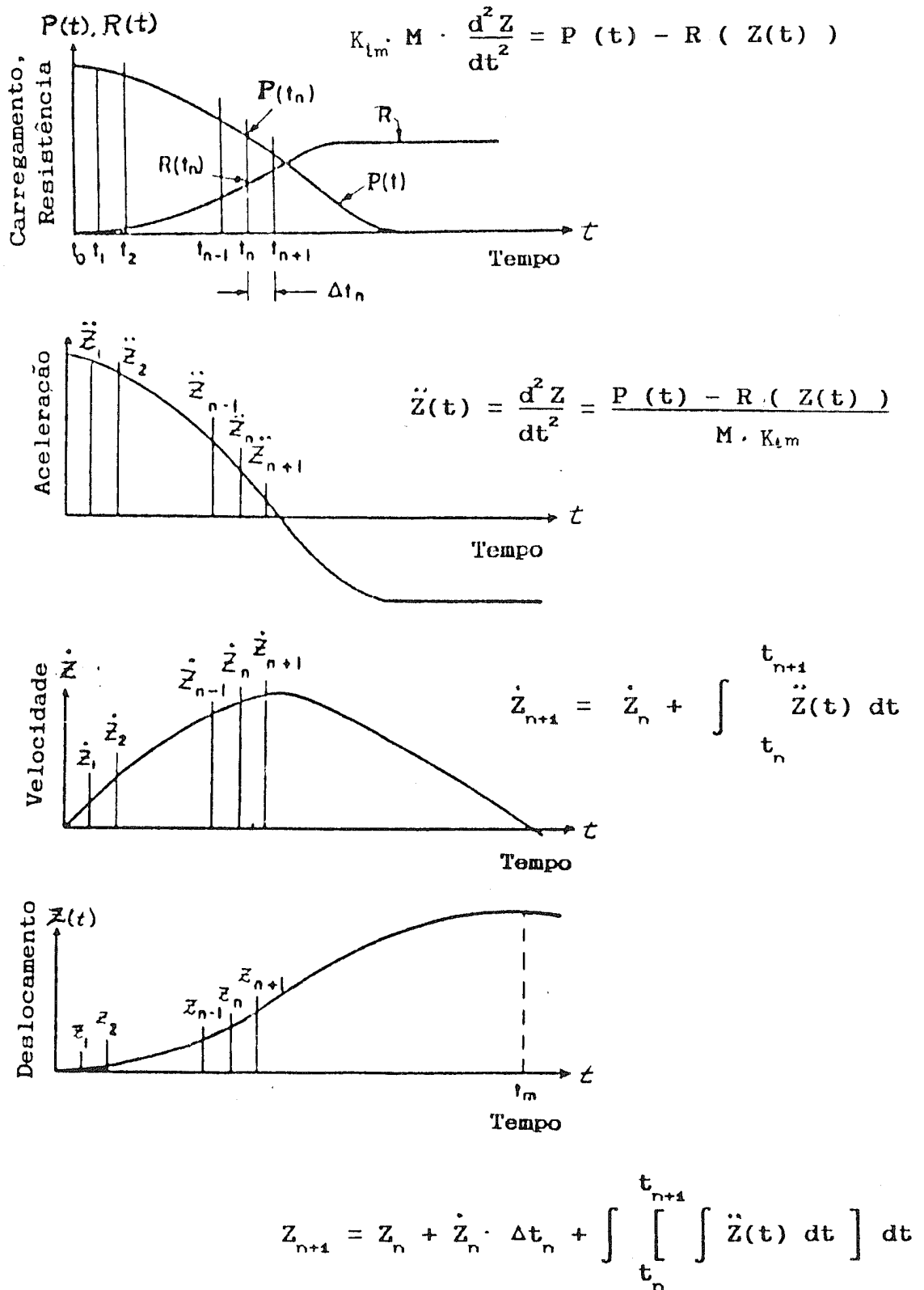


Figura 17 - Ilustração dos parâmetros envolvidos na solução da equação de equilíbrio dinâmico, /3/.

conhecida a expressão da aceleração ao longo do intervalo de tempo " Δt_n ".

Para efeito de avaliação da resposta dinâmica do sistema, será assumido que a velocidade e o deslocamento iniciais serão nulos, ou seja ($\dot{Z}_0 = 0.0$, $Z_0 = 0.0$). Aplicando-se as equações (3.8) e (3.9) ao primeiro intervalo de tempo, obtém-se:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_0 + \int_{t_0}^{t_1} \ddot{Z}(t) \cdot dt \quad (3.10)$$

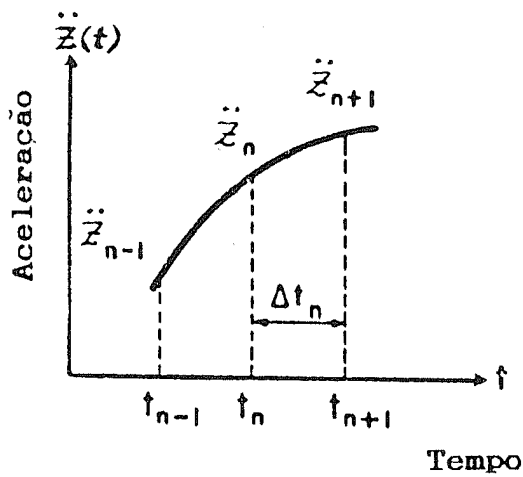
$$Z_1 = Z_0 + \dot{Z}_0 \cdot \Delta t_n + \int_{t_0}^{t_1} \left[\int \ddot{Z}(t) \cdot dt \right] \cdot dt \quad (3.11)$$

Observa-se, assim, que os valores de " \dot{Z}_1 " e " Z_1 " estão automaticamente determinados desde que se conheça a expressão para a aceleração no intervalo entre " t_0 " e " t_1 ". Do mesmo modo, pode-se calcular os valores de " \dot{Z}_2 " e " Z_2 " a partir de " \dot{Z}_1 " e de " Z_1 ". Usando-se o mesmo raciocínio, pode-se estender o processo para obtenção dos valores genéricos " \dot{Z}_n " e " Z_n ". Assim, de acordo com esse procedimento numérico, os deslocamentos " $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n \dots$ " são avaliados numa extrapolação passo a passo, partindo-se de condições iniciais conhecidas.

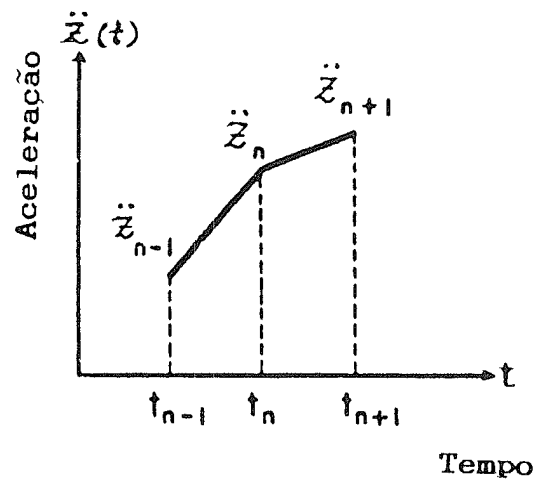
No item seguinte, será apresentado o algoritmo para solução numérica da equação (3.7); nessa etapa será introduzida a hipótese da aceleração linear.

3.3.2 Obtenção de fórmulas de recorrência

Na obtenção da solução numérica da equação (3.7) será utilizado o método da aceleração linear, o qual pressupõe que, ao longo de pequenos intervalos de tempo, a aceleração pode ser considerada como uma função linear.



(a) Aceleração real



(b) Aceleração aproximada

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad \ddot{z}_\alpha(t) = \ddot{z}_n + \left[\frac{\ddot{z}_{n+1} - \ddot{z}_n}{\Delta t_n} \right] \cdot (t - t_n)$$

$$\dot{z}_{n+1} = \dot{z}_n + \left[\frac{\ddot{z}_n + \ddot{z}_{n+1}}{2} \right] \cdot \Delta t_n$$

$$z_{n+1} = z_n + \dot{z}_n \cdot \Delta t_n + \left[\frac{\ddot{z}_n}{3} + \frac{\ddot{z}_{n+1}}{6} \right] \cdot (\Delta t_n)^2$$

$$\ddot{z}_{n+1} = \frac{1}{M \cdot K_{lm}} \cdot \left[P(t_{n+1}) - R(t_{n+1}) \right]$$

Figura 18 - Ilustração de curvas de aceleração real e aproximada (fórmulas de recorrência).

Na Figura 18, são mostradas uma curva de aceleração real e a correspondente curva de aceleração aproximada, obtida a partir da aproximação por meio de trechos lineares.

Considerando-se que os intervalos de tempo sejam constantes, pode-se escrever que

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad (3.12)$$

onde " Δt_n " é o intervalo de tempo e " t_{n+1} " e " t_n " são ilustrados na Figura 18.

A partir da hipótese de que a aceleração é linear por trechos, obtém-se a seguinte expressão para a aceleração num tempo genérico " t ".

$$\ddot{Z}_a(t) = \ddot{Z}_n + \left[\ddot{Z}_{n+1} - \ddot{Z}_n \right] \cdot \left[t - t_n \right] / \Delta t_n \quad (3.13)$$

onde " \ddot{Z}_{n+1} " e " \ddot{Z}_n " são as acelerações correspondentes aos tempos " t_{n+1} " e " t_n ", respectivamente, e " \ddot{Z}_a " é a aceleração aproximada.

Substituindo-se a equação (3.13) nas equações (3.8) e (3.9) obtêm-se as seguintes fórmulas de recorrência para a velocidade e para o deslocamento :

$$\dot{Z}_{n+1} = \dot{Z}_n + \left[\ddot{Z}_n + \ddot{Z}_{n+1} \right] \cdot \Delta t_n / 2 \quad (3.14)$$

$$Z_{n+1} = Z_n + \dot{Z}_n \cdot \Delta t_n + \left[\ddot{Z}_n / 3 + \ddot{Z}_{n+1} / 6 \right] \cdot (\Delta t_n)^2 \quad (3.15)$$

Observa-se que, uma vez conhecidos os valores de " \dot{Z}_n " e de " Z_n ", pode-se calcular os valores da velocidade e do deslocamento no final de cada intervalo de tempo, tendo como base o deslocamento e velocidade no início desse mesmo intervalo de tempo. Com base em (3.7) pode-se escrever que :

$$\ddot{Z}_{n+1} = \left[P(t_{n+1}) - R(t_{n+1}) \right] / \left[M \cdot K_{lm} \right] \quad (3.16)$$

Na equação (3.16) , " $P(t_{n+1})$ " é conhecido; entretanto, a resistência " $R(t_{n+1})$ " pode depender do valor do deslocamento " Z_{n+1} ", deslocamento este ainda não conhecido.

3.3.3 Obtenção da resistência no fim de cada intervalo de tempo

Com base no exposto no parágrafo anterior, para avaliação das equações (3.14) e (3.15), é necessário adotar um procedimento de tentativa e erro, cujas etapas são descritas a seguir:

- a) como primeira tentativa, adota-se um valor aproximado para o deslocamento, " Z^* ", no final do intervalo;

$$Z_{n+1} = Z^* = Z_n + \dot{Z}_n \cdot \Delta t_n \quad (3.17)$$

- b) com base em (3.17) calcula-se a resistência correspondente ao final do intervalo

$$R(t_{n+1}) = R(Z^*) \quad (3.18)$$

c) a partir de (3.18) calcula-se a aceleração correspondente ao final do intervalo

$$\ddot{Z}_{n+1} = \left[P(t_{n+1}) - R(Z^*) \right] / (M \cdot K_{lm}) \quad (3.19)$$

d) calcula-se a seguir o deslocamento " Z_{n+1} " com base na expressão (3.15)

$$Z_{n+1} = Z_n + \dot{Z}_n \cdot \Delta t_n + \left[\ddot{Z}_n / 3 + \ddot{Z}_{n+1} / 6 \right] \cdot (\Delta t_n)^2 \quad (3.20)$$

e) a seguir compara-se o valor de " Z_{n+1} " dado por (3.17) com o valor obtido em (3.20).

f) o procedimento é repetido até que esses valores sejam iguais, com base no erro máximo estabelecido.

Na região plástica, a resistência é constante e , portanto, o valor de " Z_{n+1} " pode ser obtido diretamente a partir da equação (3.15). Nesse caso é dispensável o procedimento de tentativa e erro.

Na Figura 19, está ilustrado, em forma gráfica ,o procedimento adotado.

3.3.4 Considerações sobre o método de cálculo utilizado

O método da aceleração linear é do tipo tentativa e erro, o que é um inconveniente do ponto de vista de processamento manual.

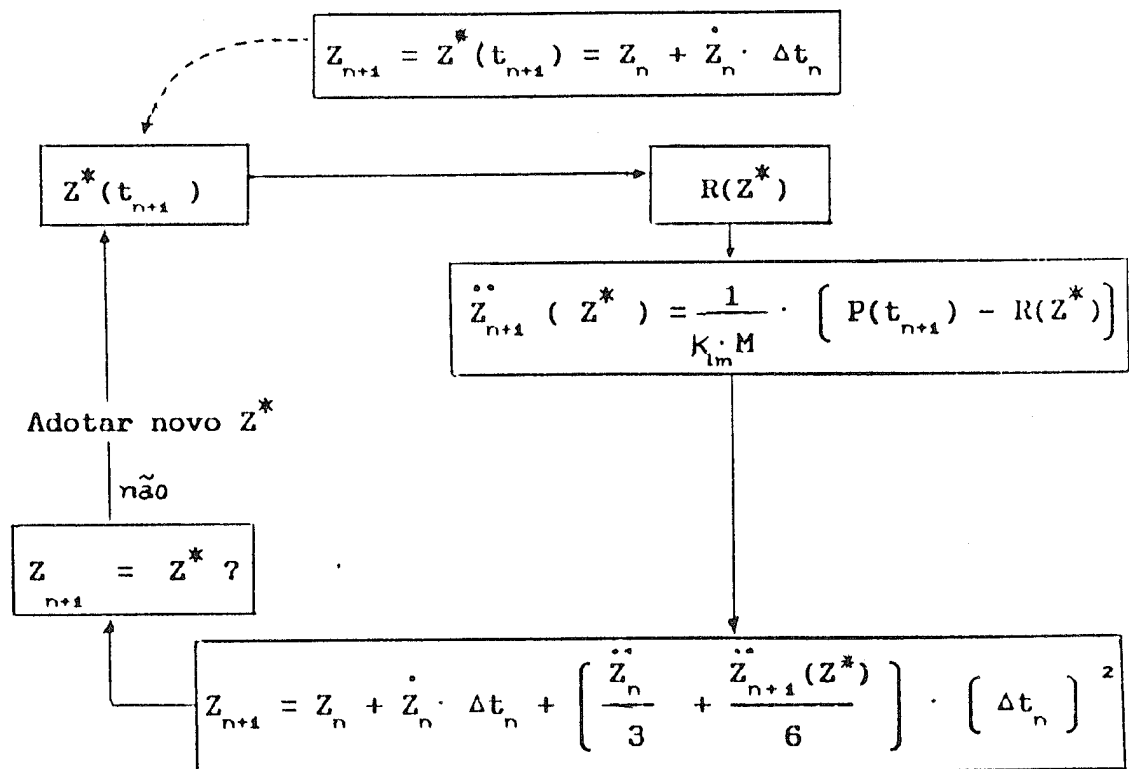
Como a hipótese básica adotada é que a aceleração varia

Obtenção de $R(t_{n+1})$

a) Regiões elástica e elastoplástica

a1) Calcula-se \dot{Z}_n , Z_n

a2) Assume-se um valor inicial para Z_{n+1}



b) Região Plástica (Resistência constante)

$$Z_{n+1} = Z_n + \dot{Z}_n \cdot \Delta t_n + \left[\frac{\ddot{Z}_n}{3} + \frac{\ddot{Z}_{n+1}}{6} \right] \cdot (\Delta t_n)^2$$

Figura 19 - Ilustração do processo de integração numérica.

4.2 Conceituação de carga impulsiva

Uma explosão consiste na liberação de uma grande quantidade de energia, num intervalo de tempo muito curto. A título de exemplo, meio quilo de TNT liberaria aproximadamente 2100 kW (kilowatts) num intervalo de tempo de um segundo.

Durante o processo de explosão, parte da energia é transmitida por meio de ondas de choque, oriundas da parte central da explosão, e que se propagam através do ar e do terreno. Neste trabalho serão abordados somente os efeitos estruturais resultantes da propagação da onda de choque através do ar.

A frente de ondas de choque é semelhante a uma camada de gás altamente comprimido, possuindo uma pressão maior do que a pressão atmosférica. Ao atingir uma determinada estrutura, essa camada provoca um diferencial de pressão denominado de sobrepressão. Além dessa sobrepressão, a estrutura sofre o efeito de pressões dinâmicas decorrentes do vento que acompanha a frente de ondas.

Na Figura 20, é ilustrada a variação da sobrepressão em função do tempo, num determinado ponto no caminho de propagação das ondas de choque. Nessa Figura são ilustrados também os efeitos estruturais decorrentes da passagem da onda de choque.

4.3 Efeitos de ondas de choque em ambiente não-confinado

Quando ocorre uma explosão em ambiente não-confinado, uma frente de ondas de choque, de forma semi-esférica se propaga no ar a partir da fonte de explosão. Essa frente de ondas se propaga no ar com uma velocidade "U" e tem uma sobrepressão de pico " P_{so} ". Na Figura, 21 é ilustrada a distribuição espa-

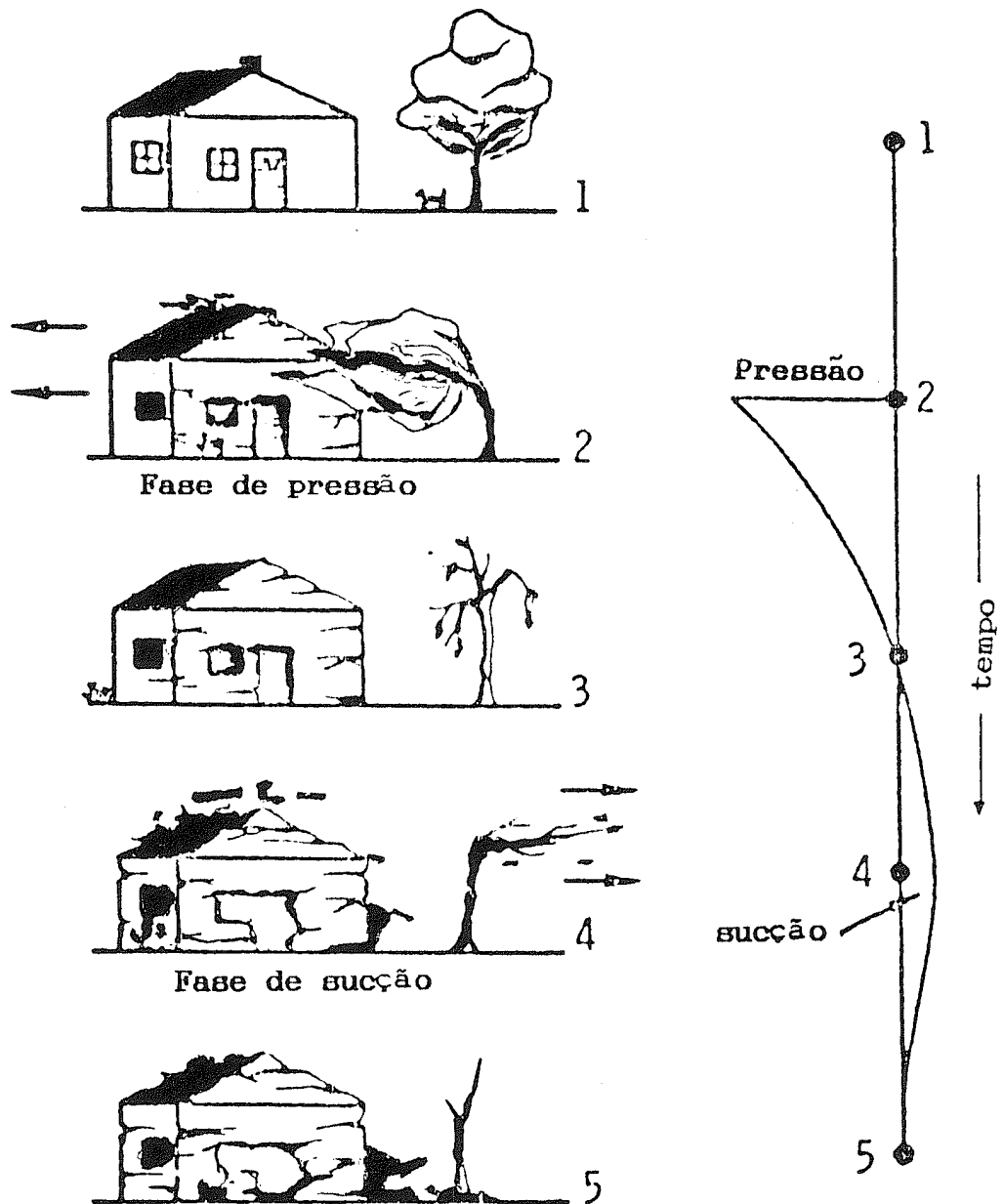


Figura 20 - Variação da sobrepressão com o tempo, num determinado ponto, durante passagem das ondas de choque provenientes de explosão, /27/.

cial da sobrepressão, ao longo de uma linha radial partindo da explosão, num determinado instante de tempo "t".

Quando a onda de choque encontra um objeto, há um efeito de difração, gerando forças sobre o mesmo. Essas forças são devidas a altas pressões geradas pela reflexão da onda na parte frontal do objeto e também devidas ao atraso no tempo que a sobrepressão leva para atingir a parte posterior do objeto. Ao mesmo tempo, o ar da parte traseira da onda de choque se move em alta velocidade, gerando um vento que provoca forças de arraste sobre os objetos encontrados. Assim, o carregamento total é constituído de três parcelas: a) efeito de difração inicial, b) efeito de sobrepressão " P_s " e c) carregamento de arraste.

Na Figura 22, são mostradas as variações da sobrepressão e da pressão dinâmica do vento em função do tempo, para um ponto do terreno situado a uma determinada distância da fonte de explosão.

A pressão dinâmica do vento " P_d " é dada pela expressão seguinte :

$$P_d = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4.1)$$

onde " ρ " é a densidade do ar, e " v " é a velocidade das partículas do ar.

A pressão de arraste de um objeto situado no caminho de propagação do vento é igual a pressão dinâmica multiplicada pelo coeficiente de arraste " c_d " apropriado.

$$P_a = c_d \cdot P_d \quad (4.2)$$

A fase de sobrepressão negativa, ou sucção, indicada na Figura 22, é relativamente de pouca importância e normalmente pode ser desprezada para efeito de projeto estrutural / 2 /.

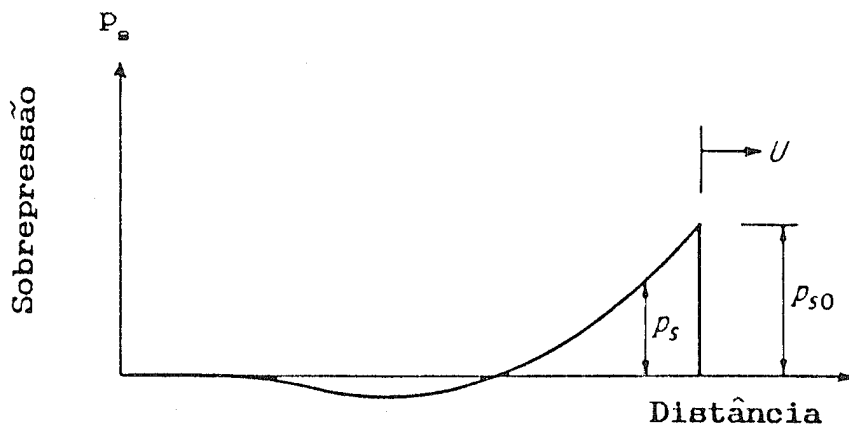


Figura 21 - Distribuição espacial da sobrepressão, /2/.

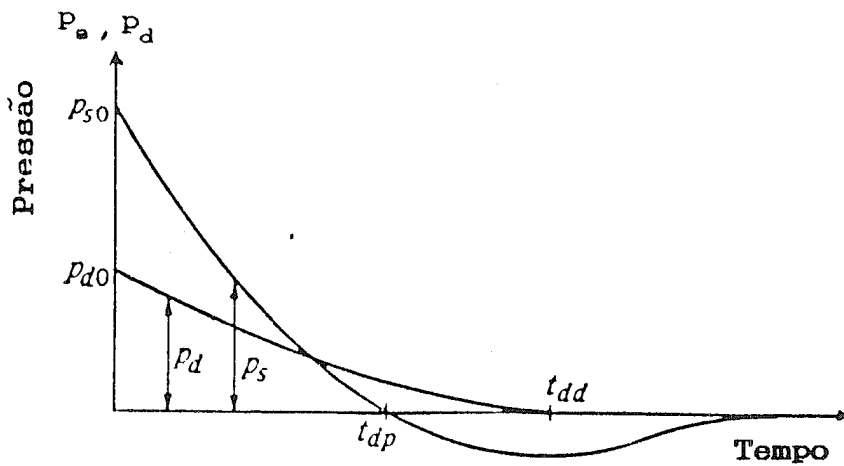


Figura 22 -Variação da sobrepressão provocada pela onda de choque e da pressão dinâmica do vento em função do tempo, /2/.

Na Figura 23 ,são fornecidas curvas de sobrepressão e pressão dinâmica do vento ,obtidas a partir de resultados de testes de explosão de bombas de um megaton . Com a intenção de facilitar referências posteriores, o índice "1" será utilizado para indicar dados relativos a bomba de um megaton. O índice "i" representará dados relativos a uma bomba com a energia que se queira calcular.

Na Figura 23, são mostradas as variações dos valores de pico de sobrepressão e da pressão dinâmica do vento em função da distância a fonte de explosão, para uma bomba de um megaton. Para outro valor de energia, pode-se calcular a distância correspondente a essa nova energia por meio da seguinte fórmula :

$$D_i = D_1 \cdot (Y_i / Y_1)^{1/3} \quad (4.3)$$

onde " D_1 " é a distância na qual uma determinada pressão ocorre , para uma bomba de energia "Y1" ; " D_i " é a distância para a bomba de energia "Yi". Assim, para uma bomba de um quiloton (0,001 megaton), uma mesma pressão ocorreria a uma distância de um décimo daquela correspondente a bomba de energia de um megaton.

Na Figura 24, são apresentadas as durações das fases positivas de sobrepressão e da pressão dinâmica, em função da distância, para uma energia de um megaton. Esses valores podem ser extrapolados para outros valores de energia através da seguinte equação :

$$t_{di} = t_{d1} \cdot (Y_i / Y_1)^{1/3} \quad (4.4)$$

onde " t_{di} " e " t_{d1} " são as durações para uma mesma sobrepressão (ou para uma mesma pressão dinâmica).

Para obter-se a duração correspondente a uma energia "Yi" e a uma distância " D_i " conhecidas, é necessário calcular primeiro a duração " t_{d1} " com base na Figura 24 .

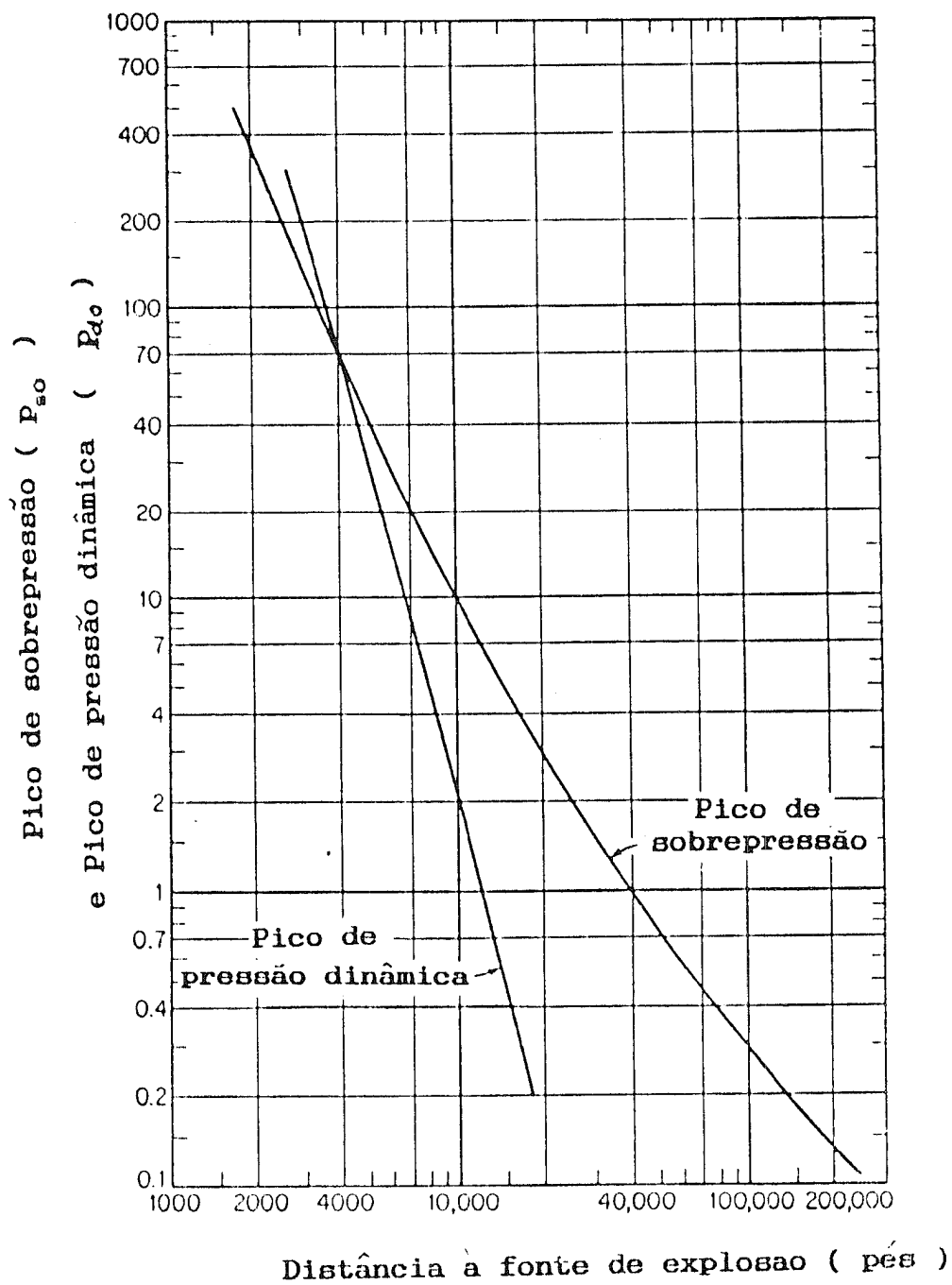


Figura 23 - Sobrepressão e pressão dinâmica em função da distância (para uma bomba de um megaton),/2/.

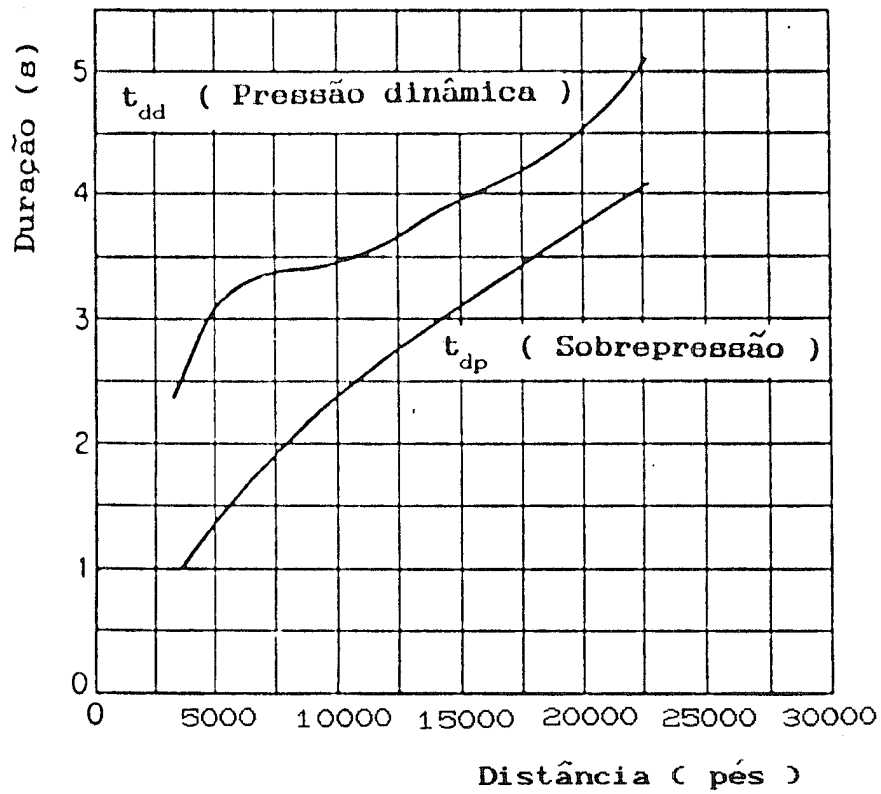


Figura 24 - Duração da fase positiva da sobrepessão e da pressão dinâmica em função da distância (para uma bomba de um megaton), /2/.

A velocidade da frente da onda de choque depende somente da sobrepressão de pico e é dada por :

$$U = U_s \cdot \left[1 + 6 \cdot P_{so} / (7 \cdot P_o) \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

onde " U_s " é a velocidade do som e " P_o " é a pressão atmosférica. Em condições de atmosfera padrão, obtém-se para " U " o seguinte valor :

$$U = 1120 \cdot \left(1 + 6 \cdot P_{so} / 103 \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

onde " U " é dado em pés/segundo.

A taxa de decaimento da pressão com o tempo, num ponto situado no nível do terreno, depende da magnitude da pressão de pico e da duração da fase positiva. Esse decaimento pode ser representado por meio das curvas normalizadas da Figura 25, onde " t " é o tempo de chegada da frente de ondas de choque. Deve-se observar que a pressão dinâmica decai mais rapidamente do que a sobrepressão.

Quando a frente da onda de choque atinge uma superfície sólida, colocada perpendicularmente a direção de seu caminho de propagação, há um aumento instantâneo na pressão, acima daquele valor da própria onda de choque. Isto é devido em parte à formação de uma onda refletida, que tem o efeito de dobrar o valor da sobrepressão e, além disso, aumentar bruscamente a pressão dinâmica. A pressão total, que normalmente é denominada de pressão refletida, é dada pela expressão :

$$P_r = 2 \cdot P_{so} \cdot (7 \cdot P_o + 4 \cdot P_{so}) / (7 \cdot P_o + P_{so}) \quad (4.7)$$

Em condições de atmosfera padrão obtém-se para " P_r " o valor dado por (4.8), sendo " P_r " e " P_{so} " dados em psi.

$$P_r = 2 \cdot P_{so} \cdot (103 + 4 \cdot P_{so}) / (103 + P_{so}) \quad (4.8)$$

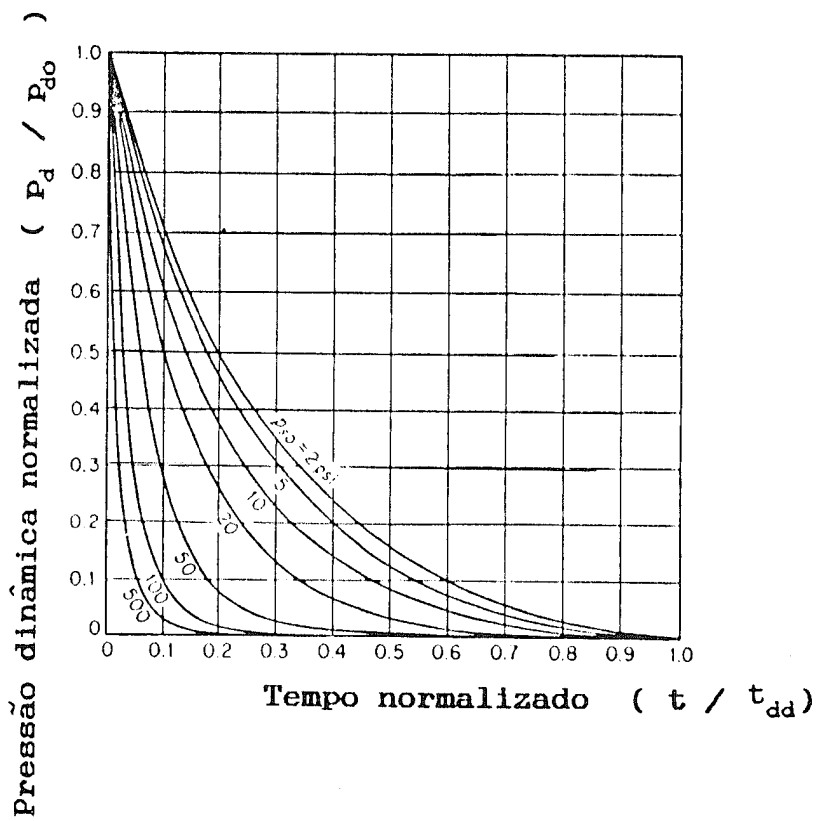
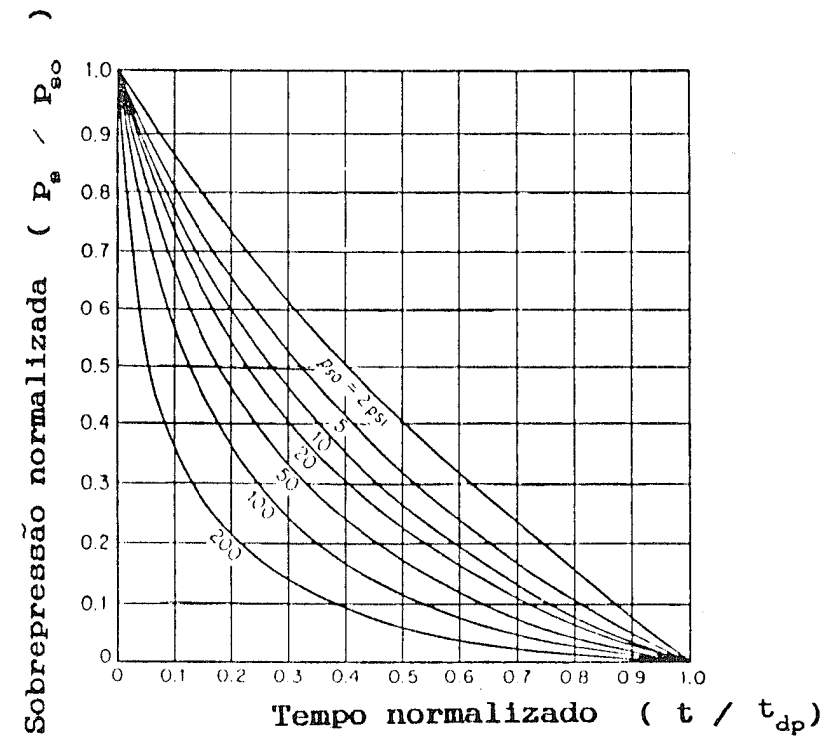


Figura 25 - Curvas de decaimento da sobrepressão e da pressão dinâmica , /2/.

Se a superfície sólida mencionada for inclinada, ou seja se o ângulo entre a frente de ondas de choque e a superfície não for nulo, haverá uma diminuição da pressão refletida. Essa diminuição não é, entretanto, significativa, a menos que o ângulo citado seja maior do que 35 graus. Essa equação pode assim ser usada para ângulos menores que 35 graus.

O efeito de reflexão pode ser assumido como diminuindo linearmente com o tempo e desaparecendo após um intervalo de tempo " t_c ", o qual pode ser aproximado pelo valor

$$t_c = 3 \cdot S_c / U \quad (4.9)$$

onde "U" é dado pela equação (4.5) e " S_c " é o menor dos dois valores a seguir : a) a altura da superfície refletora a partir do nível do terreno ; b) a metade da largura dessa mesma superfície. Assim, para a estrutura em forma de paralelepípedo mostrada na Figura 26, " S_c " será o menor valor entre "N" e "L/2". Após o tempo " t_c ", a pressão sobre a superfície é igual a sobrepressão mais a pressão de arraste. Assim, a variação completa da pressão com o tempo, sobre uma superfície colocada normalmente à direção de propagação da onda de choque, é do tipo mostrado na Figura 26.

As laterais da caixa mostrada na Figura 26 estão sujeitas a sobrepressão mais a pressão de arraste, que nesse caso seria negativa. A face posterior da caixa está sujeita à mesma combinação de cargas que atua na face anterior exposta diretamente à onda de choque. Na realidade, esses dois carregamentos não são idênticos, uma vez que o equilíbrio estacionário na face posterior não é atingido no mesmo tempo daquele da face anterior.

A força horizontal total sobre a caixa é igual a soma algébrica das forças nas faces anterior e posterior da caixa. A presença de aberturas complica significativamente a avaliação do carregamento. Entretanto, se a função da estrutura é

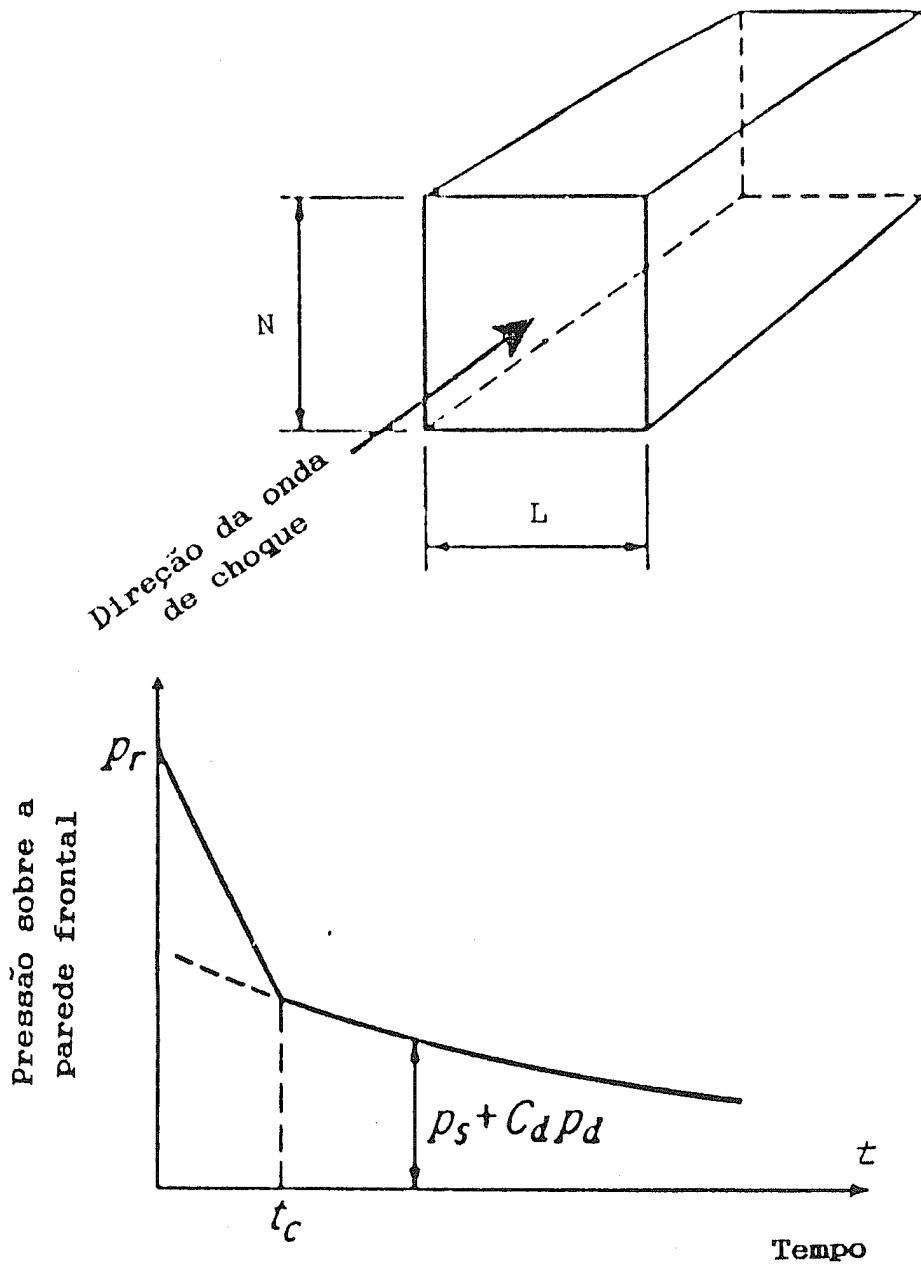


Figura 26 - Pulso de pressão sobre a face frontal de um edifício de forma paralelepipedica, /2/.

proteger alguma coisa contra efeitos de explosão, então ,em princípio ,ela não deverá ter aberturas, pelo menos na direção de propagação das ondas de choque.

No caso de explosões em ambientes confinados, às vezes não se pode fugir de algumas aberturas, denominadas de "venting" , as quais são necessárias para reduzir o valor da pressão de pico que existiria na ausência de tais aberturas /16/. Na Figura 27 é ilustrado esse efeito de redução.

4.4 Referências para avaliação da carga impulsiva

No caso de análise de painéis isolados, que é o caso das lajes abordadas nesta dissertação, o carregamento dinâmico a ser aplicado, para o caso de ambiente não-confinado , tem a forma indicada na Figura 26. Os valores de pressões de pico e das respectivas durações podem ser calculados de acordo com as instruções deste Capítulo.

Nas referências /11,12,13,15,16/, podem ser encontradas diretrizes para quantificação de explosões em ambientes confinados.

Nas referências /17/ a /26/, são abordadas as explosões em ambiente não-confinado e seus efeitos sobre estruturas; algumas dessas referências dão ênfase para a avaliação de efeitos de explosões sobre instalações nucleares.

Na referência /27/, são apresentados procedimentos simplificados para o cálculo de pressão total sobre edifícios de forma paralelepípedica, sendo ainda apresentados alguns resultados de testes de explosão correspondentes a algumas quantidades de TNT (Tabela 3).

Na referência /28/, é fornecida uma curva de sobrepressão versus tempo, aplicável ao caso de edifícios de usinas nuclea-

res , que dá uma idéia da ordem de grandeza das pressões e durações envolvidas no projeto dessas instalações, no caso de segurança contra explosão (Figura 28).

—
Na avaliação de cargas dinâmicas de projeto que envolvam efeitos de explosões, o projetista deverá trabalhar em estreita relação com especialistas da área , principalmente no caso de explosões em ambientes confinados.

Tabela 3 - Resultados de testes de explosões com explosivos TNT (picos de pressões refletidas e de sobrepressões e suas durações), /27/.

Toneladas de TNT →	66	132	264	462
Distância em metros				
457,2	3,42 psi 1,6 psi 0,19 s	5,0 2,35 0,225	7,4 3,5 0,255	10,2 4,4 0,29
487,7	3,20 1,57 0,193	4,5 2,15 0,23	6,4 3,0 0,27	8,8 3,9 0,29
518,2	3,00 1,46 0,20	4,2 2,0 0,24	5,9 2,75 0,275	8,0 3,55 0,30
548,6	2,8 1,35 0,20	3,8 1,85 0,24	5,5 2,6 0,28	7,35 3,35 0,31
579,1	2,60 1,20 0,21	3,55 1,6 0,245	5,0 2,4 0,285	6,7 3,1 0,32

Observação : Na Tabela acima, para cada distância e determinada tonelagem de TNT, tem-se de cima para baixo :

p_r - Pico de pressão refletida (psi)

p_{so} - Pico de sobrepressão (psi)

t - Duração total do evento (s)

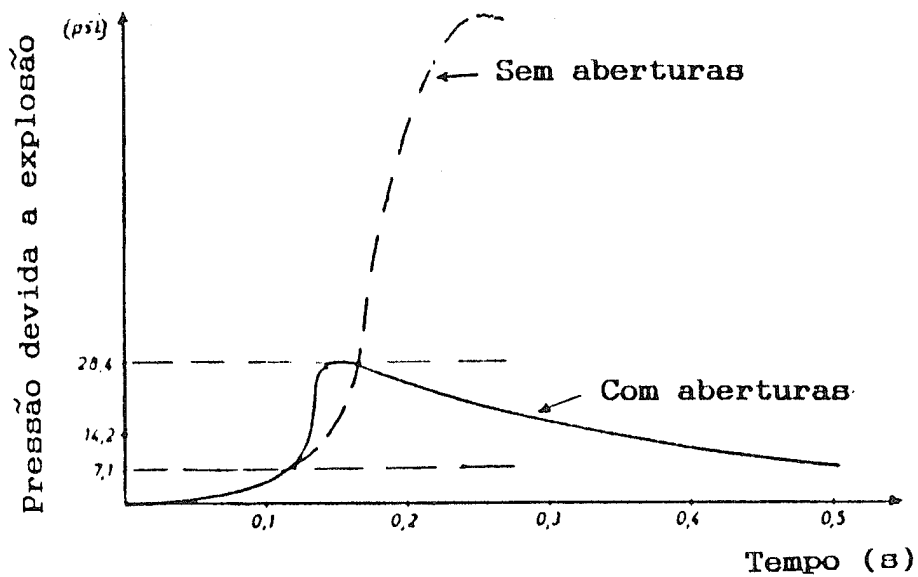


Figura 27 - Curva de pressão em função do tempo para vasos de pressão com e sem aberturas ("venting"), /16/.

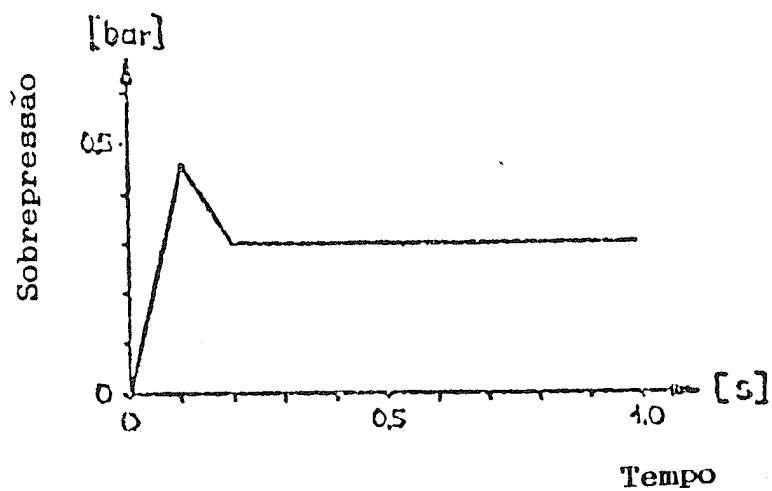


Figura 28 - Curva de sobrepressão em função do tempo para edifícios de centrais nucleares, /28/.

5. PROGRAMA PARA MICROCOMPUTADOR E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

5.1 Apresentação do programa

As teorias constantes nos Capítulos 3 e 4 foram implementadas em microcomputador gerando o programa RESPOD.BAS. O programa foi implementado em linguagem QUICKBASIC e possui recurso gráfico próprio para visualização dos dados de entrada e dos resultados.

O programa aplica-se à análise não-linear de lajes retangulares, engastadas ou simplesmente apoiadas ao longo de todo o contorno, submetidas a cargas impulsivas. A carga impulsiva é admitida como tendo distribuição espacial uniforme ao longo de toda a laje, para um determinado tempo "t". A sua variação é assumida como se dando somente em termos da variável tempo.

A curva de resistência versus deslocamento é do tipo linear por trechos. No caso de laje com apoio simples, a curva de resistência tem dois trechos, um elástico e outro plástico. Já no caso de laje engastada, a curva de resistência tem três trechos : um elástico, um elastoplástico e outro plástico.

Nas curvas de resistências utilizadas não foi incluído o efeito do peso próprio da laje; isto equivale a dizer que no resultado final estará sendo considerado que a carga dinâmica aplicada na laje é muito maior do que o peso próprio da laje. Com o objetivo de verificar a validade dessa hipótese é que, na listagem de resultados, está presente a relação percentual entre a força dinâmica total máxima sobre a laje e o peso próprio da laje.

Para efeito de cálculo, o programa considera que a taxa de armadura é a mesma tanto nos apoios como na parte central da laje , nas direções da largura e comprimento da laje.

Os dados básicos de entrada são :

- tipo, largura e comprimento da laje;
- resistência característica à compressão dinâmica do concreto;
- limite de escoamento dinâmico do aço;
- módulo de elasticidade do concreto armado;
- fator de ductilidade máximo permitido para a laje (relação entre o deslocamento máximo e o deslocamento elástico máximo);
- taxa de armadura a ser utilizada;
- peso específico do concreto armado;
- carga impulsiva por unidade de área;
- tempo, deslocamento e velocidades iniciais.

A altura total da laje e a distância do centro de gravidade da armadura à borda mais tracionada são introduzidas via teclado durante o processamento.

Com base na altura efetiva da laje , o programa calcula os parâmetros que possibilitam a transformação da laje num sistema equivalente, não-amortecido, com um só grau de liberdade. Essa transformação é feita a partir das Tabelas 1 e 2, do Capítulo 2, as quais já estão inseridas no programa. O sistema, assim obtido, tem como propriedade fornecer o deslocamento que ocorre na parte central da laje. Após essa fase , dispõe-se dos parâmetros que definem :

- massa equivalente;
- excitação dinâmica equivalente;
- curva de resistência.

De posse desses três últimos parâmetros citados, o programa passa ,então,a realizar o cálculo dinâmico do sistema com um só grau de liberdade. O parâmetro para avaliação da resposta

do sistema é o deslocamento máximo, o qual é detectado no momento em que a velocidade muda de sinal. Ao longo da resposta dinâmica, cada deslocamento é calculado de forma iterativa. No programa RESPOD, o erro absoluto máximo em cada iteração foi estipulado em 0,001 milímetros; esse valor é passível de alteração.

Como resultado do processamento, têm-se vários resultados gráficos na tela do microcomputador, com os correspondentes valores numéricos sendo armazenados em arquivos com a terminação PRN.

Os dados globais de cada processamento numérico, envolvendo dados de entrada e resultados, são armazenados no arquivo denominado RESPOD.PRN.

O fator de utilidade é o parâmetro de controle da resposta do sistema; com ele, fica-se sabendo se o deslocamento máximo permitido para o sistema foi ou não ultrapassado.

Na Figura 29, apresenta-se um diagrama de blocos para o programa RESPOD. No Anexo I, apresenta-se um fluxograma simplificado e a listagem desse mesmo programa .

5.2 Orientação para utilização do programa RESPOD.BAS

Na Tabela 4, é apresentada uma relação seqüencial dos dados de entrada a serem utilizados na análise não-linear de laje retangular, com apoio simples ao longo de todo o contorno. Já a Tabela 5, aplica-se ao caso de laje retangular , engastada ao longo de todo o contorno.

Nas Tabelas 4 e 5, são definidas todas as variáveis correspondentes aos dados de entrada, bem como as respectivas unidades em que elas deverão ser utilizadas.

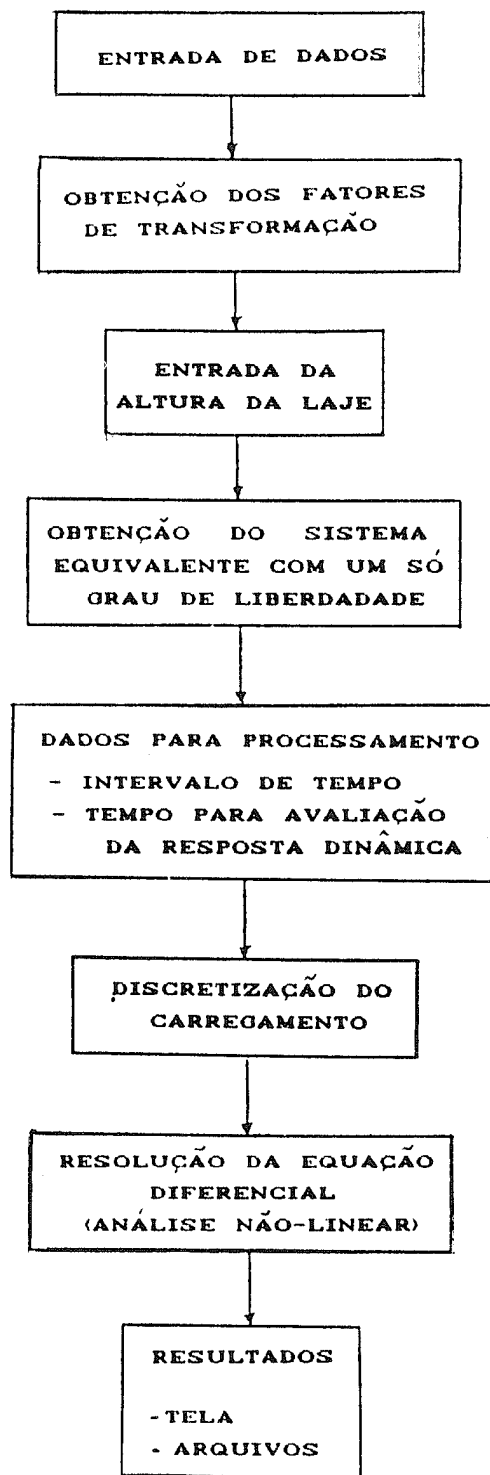


Figura 29-Diagrama de blocos para o programa RESPOD.

Tabela 4 - Arquivo de dados típico para laje com resistência tendo faixas elástica / plástica (apoio simples em todo o contorno)

Conteúdo	Denominação (Unidades)	Valores fixos
ASSU\$	Comentário	
OPAN	Opção/tipo de análise	2
OP	Opção/curva de resistência	2
a,b (a < b)	Largura, comprimento da laje (m,m)	
PESP	Peso específico do concreto armado (kN/m ³)	
FCDI, FCKDI, E	Resistência característica dinâmica à compressão do concreto, Limite de escoamento dinâmico do aço, Módulo de elasticidade do concreto armado (MPa, MPa, MPa)	
RO, MI	Taxa de armadura, Fator de ductilidade,	
NFT (> = 2)	Número de pontos da excitação	
TA(0), FA(0) TA(1), FA(1) . . TA(NFT-1), FA(NFT-1)	Tempo X Excitação (s X kN)	
TO	Tempo inicial (s)	
Z0	Deslocamento inicial (m)	
VO	Velocidade inicial (m/s)	

Tabela 5 - Arquivo de dados típico para laje com resistência tendo faixas elástica / elastoplástica/ plástica (engaste em todo o contorno)

Conteúdo	Denominação (Unidades)	Valores fixos
ASSU\$	Comentário	
OPAN	Opção/tipo de análise	2
OP	Opção/curva de resistência	3
a,b (a < b)	Largura, comprimento da laje (m,m)	
PESP	Peso específico do concreto armado (kN/m ³)	
FCDI, FCKDI, E	Resistência característica dinâmica à compressão do concreto, Limite de escoamento dinâmico do aço, Módulo de elasticidade do concreto armado (MPa, MPa, MPa)	
RO, MI	Taxa de armadura, Fator de ductilidade	
NFT (> = 2)	Número de pontos da excitação	
TA(0),FA(0) TA(1),FA(1) . . TA(NFT-1),FA(NFT-1)	Tempo X Excitação (s X kN)	
TO	Tempo inicial (s)	
ZO	Deslocamento inicial (m)	
VO	Velocidade inicial (m/s)	

5.3 Exemplos de aplicação

Foram selecionados cinco exemplos de aplicação. Dois para laje em apoio simples e três para laje engastada. Para cada tipo de laje, a idéia básica foi manter a geometria e variar o valor da excitação dinâmica, de modo que o deslocamento máximo do sistema se desse nas várias faixas de comportamento previstas. Os dados de entrada correspondentes a esses exemplos são fornecidos nas Tabelas 6 e 7.

Esses exemplos foram processados em um microcomputador do tipo PC, com coprocessador matemático.

5.3.1 Exemplo de laje com apoio simples

Na Tabela 6, são apresentados dois arquivos de dados de entrada (RAPOE.DAT e RAPOP.DAT), para o caso de laje com apoio simples. O primeiro arquivo de dados corresponde ao caso em que o deslocamento máximo se dá na faixa elástica. Já para o segundo arquivo de dados, o deslocamento máximo se dá na faixa plástica.

Nas listagens 1 e 2 do Anexo II e nas Figuras 30 e 31, são apresentados os resultados numérico e gráficos correspondentes a esses dois arquivos citados.

5.3.2 Exemplo de laje com engaste.

Na Tabela 7, são apresentados três arquivos de dados de entrada (RENGE.DAT, RENGEP.DAT e REGP.DAT), para o caso de laje com engaste ao longo do contorno. O primeiro arquivo de dados diz respeito ao caso em que o deslocamento máximo se dá na fase elástica. Para o segundo arquivo de dados, o deslocamento máximo se dá na faixa elastoplástica. Já o terceiro arquivo de dados corresponde ao caso em que o deslocamento máximo se dá na faixa plástica.

Tabela 6 - Arquivos de exemplos para lajes com apoio simples em todo o contorno

NOME	DADOS NO ARQUIVO
RAPOE.DAT	LAJE EM APOIO SIMPLES / MAXIMO NA FAIXA ELASTICA
	2
	2
	3.25,3.25
	25.0
	500,21,20594.7
	0.0053,3.0
	2
	0.0,1000.0
	0.0106,0.
	0.
	0.
	0.
RAPOP.DAT	LAJE EM APOIO SIMPLES / MAXIMO NA FAIXA PLASTICA
	2
	2
	3.25,3.25
	25.0
	500,21,20594.7
	0.0053,3.0
	2
	0.0,2000.0
	0.0106,0.
	0.
	0.
	0.

Observação : Nesses exemplos foram utilizados os seguintes dados:

- Altura total da laje= 0.16 m
- Posição do CG da armadura = 0.019 m

Tabela 7 - Arquivos de exemplos para lajes com engaste em todo o contorno

NOME	DADOS NO ARQUIVO
RENGE.DAT	LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA ELASTICA
	2
	3
	3.25,3.25
	25.0
	500,21,20594.7
	0.0053,3.0
	2
	0.0,1000.0
	0.0106,0.
	0.
	0.
	0.
RENREP.DAT	LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA ELASTOPLASTICA
	2
	3
	3.25,3.25
	25.0
	500,21,20594.7
	0.0053,3.0
	2
	0.0,2000.0
	0.0106,0.
	0.
	0.
	0.
RENGP.DAT	LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA PLASTICA
	2
	3
	3.25,3.25
	25.0
	500,21,20594.7
	0.0053,3.0
	2
	0.0,3400.0
	0.0106,0.
	0.
	0.
	0.

Observação : Nesses exemplos foram utilizados os seguintes dados:

- Altura total da laje= 0,17 m
- Posição do CG da armadura. = 0.019 m

Nas listagens 3, 4 e 5, do Anexo II, e nas Figuras 32, 33 e 34 são apresentados os resultados numéricos e gráficos relativos a esses últimos três tipos de arquivos citados.

5.4 Comentários sobre os resultados gráficos

Ao final de cada processamento numérico, o usuário dispõe de duas telas com gráficos. Na primeira tela, aparecem os gráficos referentes a:

- excitação dinâmica equivalente versus tempo;
- resistência equivalente versus deslocamento;
- deslocamento versus tempo;
- velocidade versus tempo.

Na segunda tela aparecem os gráficos relativos a:

- aceleração versus tempo;
- resistência equivalente versus tempo;
- reação, por unidade de comprimento, ao longo do menor lado da laje;
- reação, por unidade de comprimento, ao longo do maior lado da laje;

Os dados de excitação, deslocamento, velocidade, aceleração e resistência referem-se ao sistema equivalente, com um só grau de liberdade, e traduzem o comportamento do ponto central de cada laje analisada.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 30 a 34, os termos entre parênteses representam o nome do arquivo onde são armazenados os valores numéricos correspondentes a cada gráfico. Nesses gráficos, dispõe-se ainda das unidades em que os resultados são fornecidos.

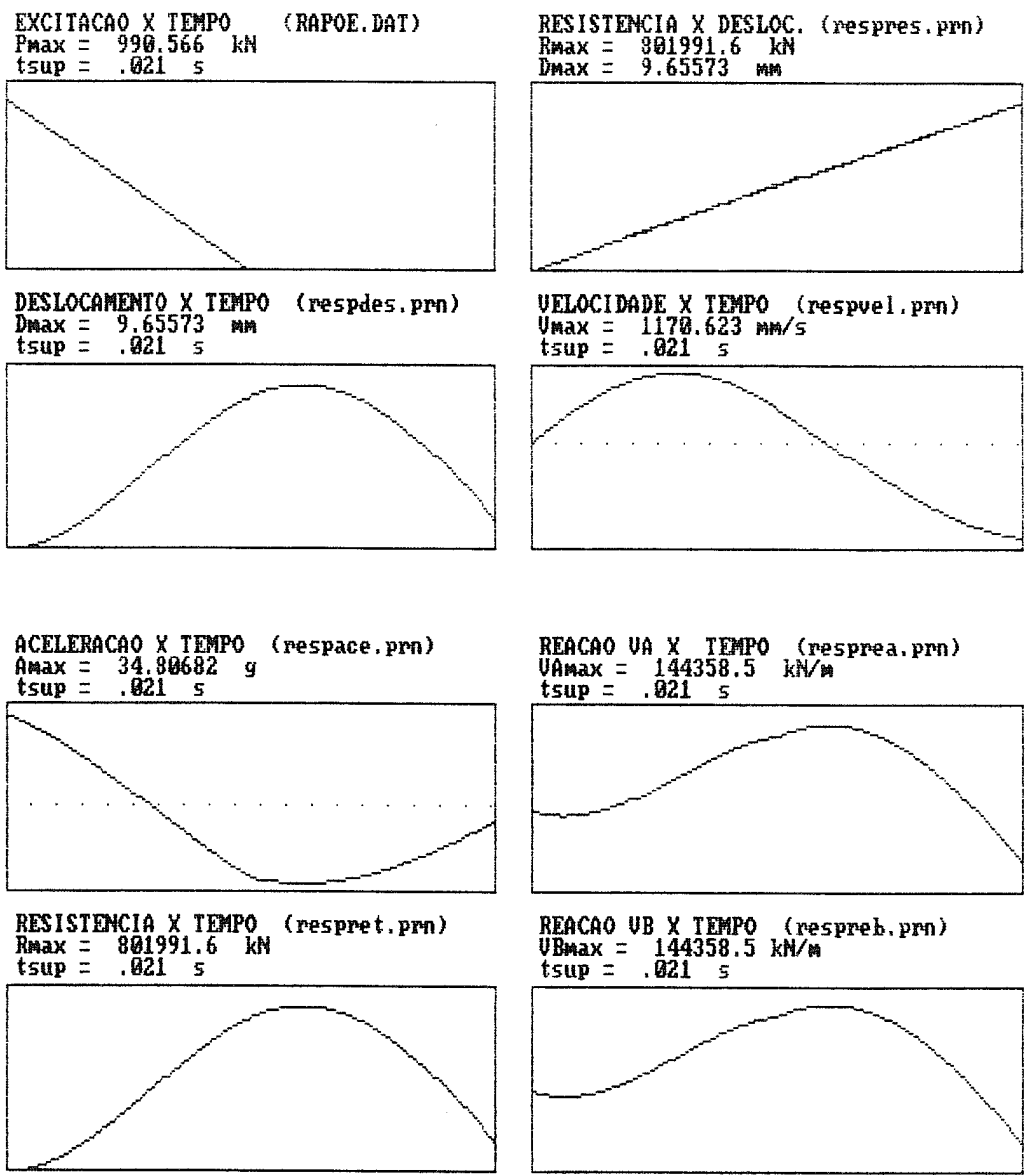


Figura 30 - Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RAPOE.DAT (laje em apoio simples com deslocamento máximo na faixa elástica)

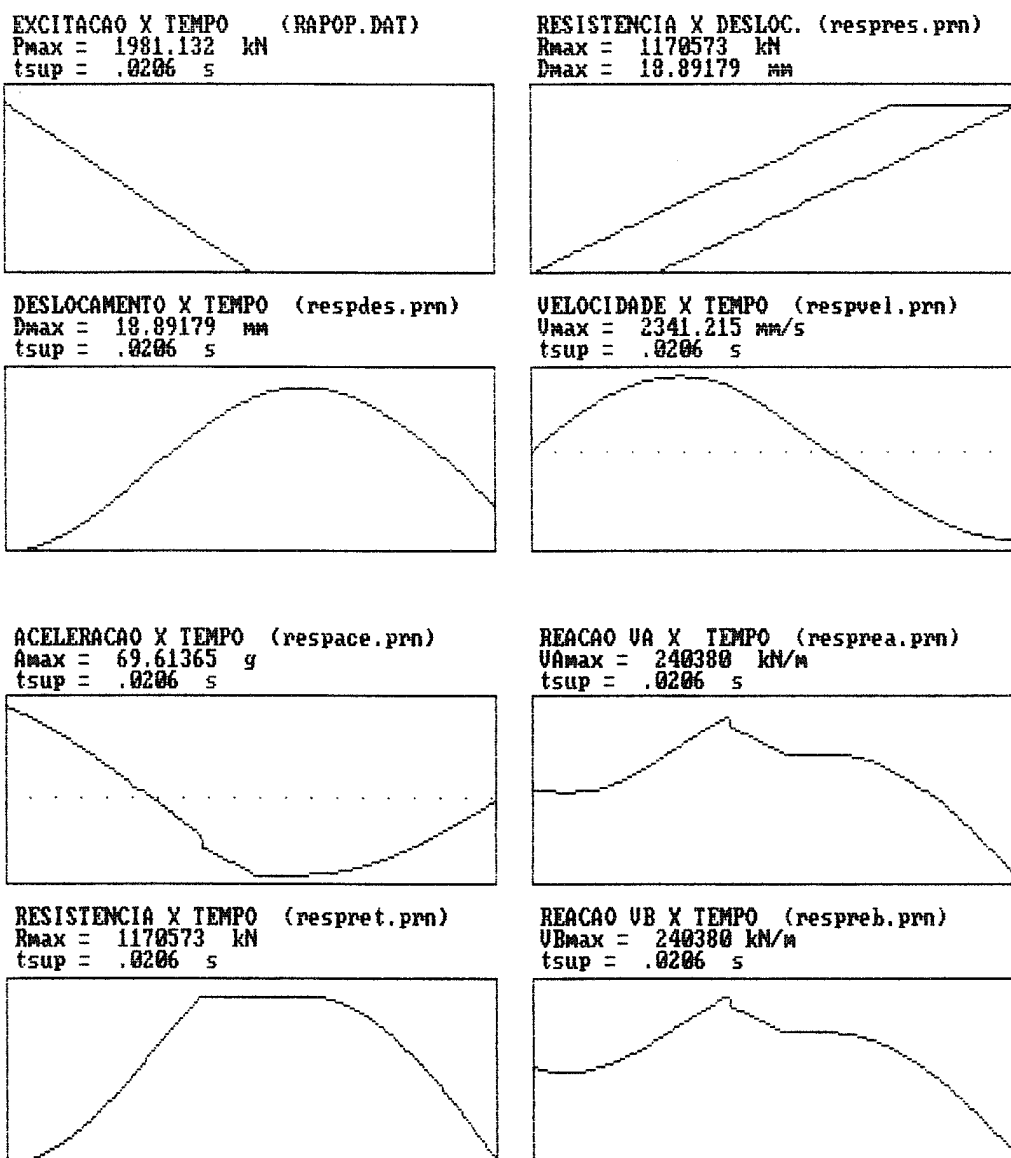
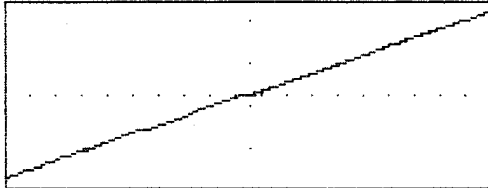


Figura 31 - Resultados gráficos do programa RESPOND para o arquivo de dados RAPOP.DAT (laje em apoio simples com deslocamento máximo na faixa plástica)

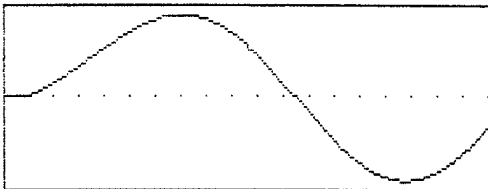
EXCITACAO X TEMPO (RENGE.DAT)
 Pmax = 990.566 kN
 tsup = .021 s



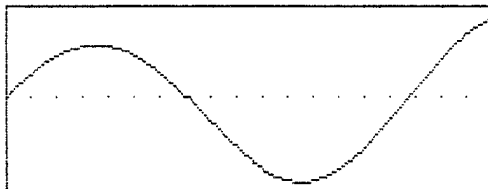
RESISTENCIA X DESLOC. (respres.prn)
 Rmax = 1255644 kN
 Dmax = 3.83406 mm



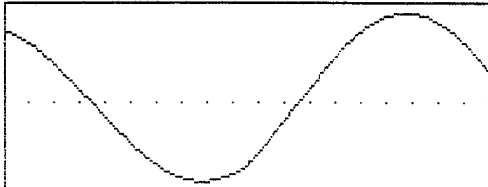
DESLOCAMENTO X TEMPO (respdes.prn)
 Dmax = 3.83406 mm
 tsup = .021 s



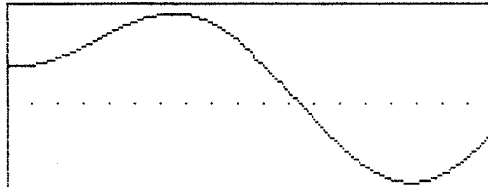
VELOCIDADE X TEMPO (respvel.prn)
 Vmax = 1192.843 mm/s
 tsup = .021 s



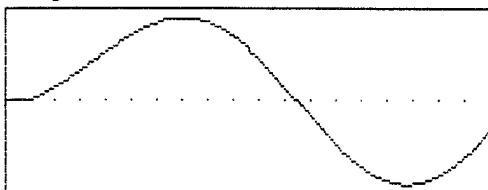
ACELERACAO X TEMPO (respace.prn)
 Amax = 43.25684 g
 tsup = .021 s



REACAO VA X TEMPO (resprea.prn)
 Vmax = 218495 kN/m
 tsup = .021 s



RESISTENCIA X TEMPO (respres.prn)
 Rmax = 1255644 kN
 tsup = .021 s



REACAO VB X TEMPO (respres.prn)
 Vmax = 218495 kN/m
 tsup = .021 s

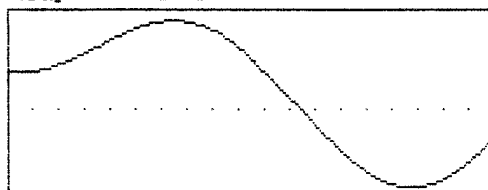
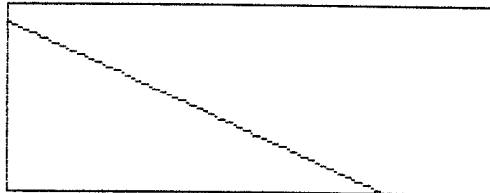
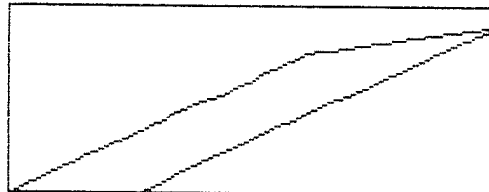


Figura 32 - Resultados gráficos do programa RESP0D para o arquivo de dados RENG.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa elástica)

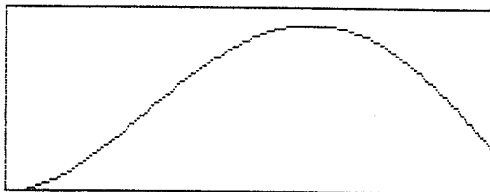
EXCITACAO X TEMPO (RENGEP.DAT)
 Pmax = 1981.132 kN
 tsup = .0134 s



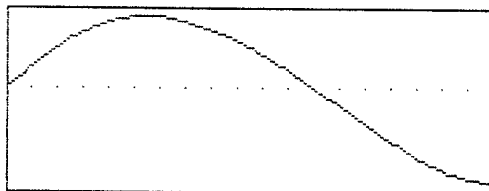
RESISTENCIA X DESLOC. (respres.prn)
 Rmax = 2018346 kN
 Dmax = 8.2396 mm



DESLOCAMENTO X TEMPO (respdes.prn)
 Dmax = 8.2396 mm
 tsup = .0134 s



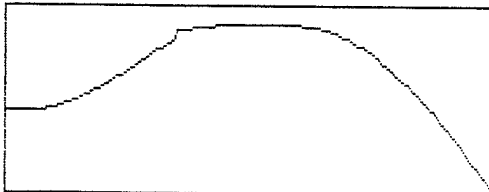
VELOCIDADE X TEMPO (respvel.prn)
 Vmax = 1531.789 mm/s
 tsup = .0134 s



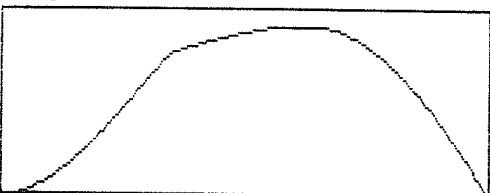
ACELERACAO X TEMPO (respace.prn)
 Amax = 70.71862 g
 tsup = .0134 s



REACAO UA X TEMPO (resprea.prn)
 UAmax = 400510.8 kN/m
 tsup = .0134 s



RESISTENCIA X TEMPO (respres.prn)
 Rmax = 2018346 kN
 tsup = .0134 s



REACAO UB X TEMPO (respres.prn)
 UBmax = 400510.8 kN/m
 tsup = .0134 s



Figura 33 - Resultados gráficos do programa RESP0D para o arquivo de dados RENGEP.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa elastoplástica)

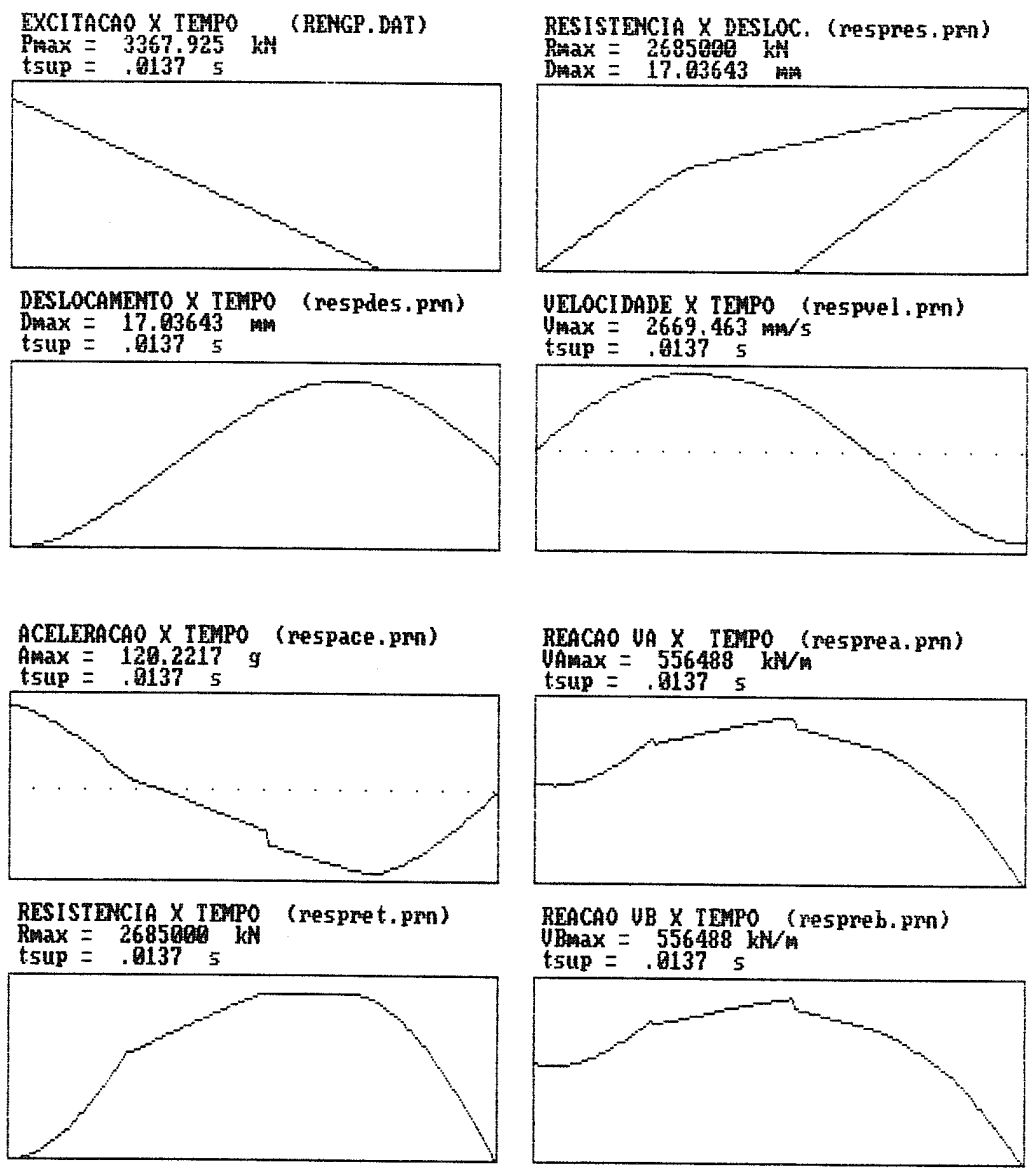


Figura 34 - Resultados gráficos do programa RESPOD para o arquivo de dados RENG.P.DAT (laje engastada com deslocamento máximo na faixa plástica)

Em geral, os eixos "x" e "y" desses gráficos se cruzam na extremidade esquerda inferior de cada retângulo que envolve os resultados. Quando os eixos coordenados não ocuparem essa posição padrão, aparecerão linhas pontilhadas, nesses retângulos, indicando a nova posição desses eixos.

Para que o usuário do programa possa copiar os resultados gráficos da tela para impressora, ele deverá inicialmente acionar o comando "GRAPHICS" do sistema DOS. Uma vez que o gráfico desejado esteja na tela, a cópia para a impressora pode ser obtida, pressionando-se, ao mesmo tempo, as teclas "SHIFT" e "PrtScr" .

5.5 Outras utilizações do programa

O programa RESPOD.BAS pode ser utilizado ,também ,para análise linear e mesmo não-linear de sistema com um só grau de liberdade, que não seja proveniente de lajes . Para isto, basta utilizar uma entrada de dados adequada. No Anexo III , são apresentados os arquivos de dados típicos para utilização desse tipo de análise.

5.6 Aferição do algoritmo para a análise não-linear

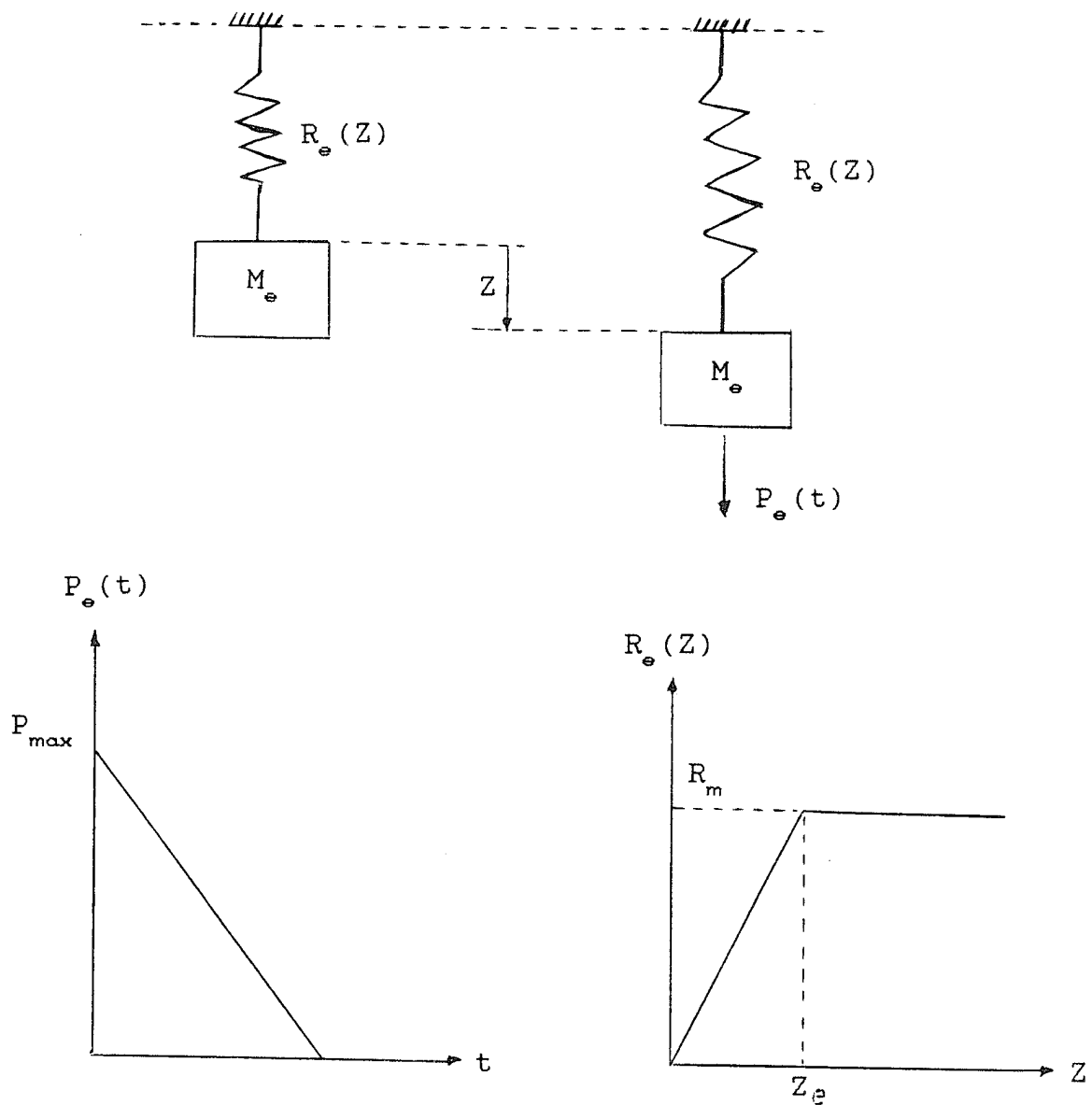
De modo a aferir o algoritmo correspondente à análise dinâmica não-linear, fez-se uma comparação entre os resultados do cálculo analítico /3/ de um determinado exemplo (Figura 35) com os resultados obtidos partir do processamento via programa RESPOD.BAS.

Na Tabela 8, pode-se observar que o erro que existe entre os resultados do cálculo analítico e os resultados do cálculo pelo programa é bem pequeno, para os três valores de incrementos de tempo utilizados.

Tabela 8 - Comparações de resultados de cálculo analítico com cálculo via programa RESPOD (Valores de deslocamentos em milímetros)

Tempo (s)	Cálculo Analítico	Programa RESPOD		
		$\Delta_t = 0.001s$	$\Delta_t = 0.0001s$	$\Delta_t = 0.00005s$
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,01	5,7	5,6	5,7	5,7
0,02	19,9	19,6	19,8	19,8
0,03	36,7	36,0	36,4	36,3
0,04	52,4	51,6	52,3	52,3
0,05	66,6	65,2	66,4	66,4
0,06	77,7	75,7	77,4	77,4
0,07	84,9	81,8	84,1	84,2
0,076	—	82,8	—	—
0,077	86,2		85,6	85,8
0,08	—	82,3	85,4	85,5
0,09	—	76,4	80,2	80,4

Observações : Os resultados dos cálculos analíticos foram extraídos da referência /3/



$$M_e = 36,459 \text{ kN} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$$

$$Z_e = 0,02318 \text{ m}$$

$$R_m = 3336,0 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} = 4448,0 \text{ kN}$$

Figura 35 - Exemplo de sistema com um só grau de liberdade analisado via abordagem analítica e pelo programa RESPOD.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O comportamento de estruturas em concreto armado, sob ação de cargas impulsivas provenientes de explosão, é complexo e influenciado por uma variedade de parâmetros materiais e estruturais. Considerações de caráter econômico requerem que o material seja utilizado além dos limites do comportamento linear. Isto significa que o cálculo deve ser feito por meio de análise dinâmica não-linear. Apesar de existirem programas computacionais para tal análise, estes são pouco utilizados para projeto desses tipos de estruturas, em função do alto custo de processamento.

Os objetivos deste estudo foram :

- a) disseminação, no meio acadêmico e profissional, dos conhecimentos básicos necessários a análise dinâmica não-linear de estruturas sujeitas a cargas impulsivas provenientes de explosão;
- b) apresentar critérios e procedimentos para análise dinâmica não-linear de lajes em concreto armado, de forma retangular, submetidas às citadas cargas impulsivas ;
- c) desenvolver um programa para microcomputador, de modo a agilizar a análise dinâmica não-linear dessas lajes.

As etapas fundamentais apresentadas nesta dissertação consistiram basicamente dos seguintes tópicos :

- transformação de uma laje, que é um sistema com vários graus de liberdade, num sistema não-amortecido com um só grau de liberdade;

- apresentação de um método de análise numérica , não-linear, de um sistema, não-amortecido, com um só grau de liberdade;
- conceituação de carga impulsiva (carga de pressão) decorrente de explosão;
- implementação , em microcomputador, do processo de transformação da laje num sistema equivalente com um só grau de liberdade e do algoritmo para análise dinâmica não-linear deste sistema.

Com a metodologia apresentada neste trabalho , é possível , sem grandes conhecimentos teóricos, fazer-se uma análise dinâmica não-linear de lajes retangulares submetidas a carga impulsiva proveniente de explosão. Essa metodologia pode ser facilmente extendida para outros tipos de condições de apoio das lajes; o trabalho adicional ficaria por conta da obtenção dos fatores de transformação da laje num sistema equivalente com um só grau de liberdade.

Com o programa de computador desenvolvido, pode-se fazer tal análise com rapidez, baixo custo de processamento e com precisão satisfatória. Além dessas facilidades, esse programa permite uma rápida visualização dos resultados ao término do processamento numérico, com possibilidade de documentação gráfica via impressora.

Para utilização do programa é necessário o conhecimento da carga de pressão , resultante da explosão, que irá atuar sobre a laje. Procurou-se, neste trabalho dar-se algumas noções básicas para avaliação desse tipo de carregamento dinâmico, o qual não é de fácil quantificação. Sugere-se, ao projetista, nesses tipos de carregamentos, que trabalhe, em estreita relação com especialistas da área de explosão. Uma avaliação baseada unicamente em ábacos, sem conhecimento do fenômeno de explosão específico poderá, inclusive, levar a um superdimensionamento da estrutura.

Do ponto de vista de engenharia de estruturas, sugere-se , para estudos futuros, que sejam abordados os seguintes tópicos :

- obtenção de fórmulas de transformação para outros tipos de condições de contorno para lajes retangulares;
- inclusão do efeito do peso próprio da laje na curva de resistência;
- estudo da influência de diferentes taxas de armaduras nos apoios e na parte central da laje;
- verificação dos resultados por meio de análise experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- / 1/ EUA. Department of the Army. Design of structures to resist the effects of atomic weapons: structural elements subjected to dynamic loads. Washington, D.C. 1965. (TM 5-856-4).
- / 2/ BIGS, J. M. Introduction to structural dynamics. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1964.
- / 3/ EUA. Department of the Army. Design of structures to resist the effects of atomic weapons : principles of dynamic analysis and design . Washington , D.C., 1957. (TM 5-836-3).
- / 4/ SZILARD, R. Yield-line analysis of plates. In: Theory and analysis of plates - classical and numerical methods. New Jersey, Prentice-Hall, 1974. p. 571-577.
- / 5/ GLASSTONE, S. & DOLAN, P. J. The effects of nuclear weapons. 3.ed .Washington, United State Department of Defense, Energy Research and Development Administration . 1977.
- / 6/ INGERSLEV, A. Om en elementaer Beregningsmetode of keydsarmerede Plader, Ingenioren, 30,69 :507, 1921 .
- / 7/ JOHANSEN, K. W. Brudlinieteorier. Copenhagen, J. Gyelerup, 1943.
- / 8/ TEPEDINO, J. M. Sistemas estruturais II - Lajes retangulares . Belo Horizonte, M.G., EEUFMG, Departamento de Engenharia de Estruturas, 1983. (Edições COTEC).

- / 9/ MONTOYA, P. J. et alii. Hormigon armado. 7.ed. Barcelona, Editorial Gustavo Gill, 1974.
- /10/ CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. Dynamics of structures. New York, McGraw-Hill, International Student Edition. 1975.
- /11/ SOARES, W. & VASCONCELOS, V. Projeto de uma casamata de proteção contra explosão para uma autoclave da Companhia Vale do Rio Doce. Belo Horizonte, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1989. (CNEN - Nota Técnica DETS-008/89).
- /12/ STEERE, N. V. Hazardous reaction cells. Journal of Chemical Education, 48(8): A488-A493, Aug., 1971.
- /13/ STENBERG, J. F. & EDWARD, G. C. Designing a high - pressure laboratory. Chemical Engineering, 69 :115-118 Nov. 1962.
- /14/ LANNOY, A. & GOBERT. Analysis of accidents in petroleum industry. Determination of TNT equivalent for hydrocarbons. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY. Proceedings... Amsterdam, North-Holland Publishing, 1977, v J(b), part J(10/8), p.1-11.
- /15/ KRISHNAN, L. V. & GARG, D. D. Scaling laws for contained explosions. Nuclear Engineering and Design, 56(2):405-12, 1980.
- /16/ DONAT, C. pressure relief as used in explosion protection. Loss Prevention, 11 :87-92, 1977.
- /17/ LANNOY, A. & GOBERT. Evaluation of hazards from industrial activities near nuclear power plants - Deterministic and probabilistic studies. Nuclear Engineering and Design, 57(1):207-214, 1980.

- /18/ GEIGER, W. Conditions of external loading of nuclear power plant structures by vapor cloud explosions and design requirements . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL TECHNOLOGY. Proceedings...Amsterdam, North-Holland Publishing, 1977. v J(b) part J(10/9), p.1-14.
- /19/ GEIGER, W. Generation and propagation of pressure waves due to unconfined chemical explosions and their impact on nuclear power plant structures. Nuclear Engineering and Design, 27 (2):189-198, 1974.
- /20/ PFORTNER, H. Gas cloud explosions and resulting blast effects. Nuclear Engineering and Design, 41(1):59-67, 1977.
- /21/ KOCH, C. & BOKEMEIER, V. Phenomenology of explosions of hydrocarbon gas-air mixtures in the atmosphere. Nuclear Engineering and Design, 41(1):59-64,1977.
- /22/ STREHLOW, R. A. & RICKER, R. E. The blast wave from a bursting sphere. Loss Prevention, 10:115-121.
- /23/ COCKS, R. E. Dust explosions : prevention and control. Chemical Engineering, 86(24):94-101.
- /24/ BRASIE, W. C. The hazard potential of chemicals. Loss Prevention, 10:135-140.
- /25/ JUNGKLAUS, D. Basic ideas of a philosophy to protect nuclear plants against shock waves related to chemical reactions. Nuclear Engineering and Design. 41(1):75-89, 1977.
- /26/ O'BRIEN, J. US regulatory requirements for the blast effects from accidental explosions. Nuclear Engineering and Design, 46(1):145-150, 1978.

/27/ WU, T. S. et alii. Blast effects on safety related structures. In : ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR PLANT FACILITIES, 2., New Orleans, 8-10 Dec., 1975. Proceedings... New York, ASCE, 1975. v. I-A, p. 688-708.

/28/ ALEMANHA. The Federal Minister of the Interior. Guideline for protection of nuclear power plants against pressure waves from chemical reactions by means of the design of nuclear power plants with regard to strength and induced vibrations and by means of the adherence to safety distances. Gesellschaft fur Reaktorsicherheit (GRS), Koln, 1976. (RSI 513 145/1).

/29/ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Code requirements for nuclear safety related concrete structures. Detroit , Michigan, 1976 (ACI 349-376).

A N E X O I

LISTAGEM DO PROGRAMA RESPOND.BAS

RELAÇÃO DAS SUBROTINAS APRESENTADAS NO FLUXOGRAMA
SIMPLIFICADO

<u>NOME</u>	<u>DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DE CADA SUBROTINA</u>
APRETEL	Apresenta dados iniciais sobre o programa
OPANAN	Entra dados para cabeçalho, Tipo de análise
COMLARG	Entra largura, comprimento, peso específico (ou só massa)
ZERAR1	Zera matrizes dos fatores de transformação
PROPAPO	Fornece tabela de fatores de transformação para lajes em apoio simples
PROPENG	Fornece tabela de fatores de transformação para lajes engastadas
INTERVAPO	Verifica posicionamento da relação a/b na Tabela dos fatores de transformação laje em apoio simples)
INTERVENG	Verifica posicionamento da relação a/b na Tabela dos fatores de transformação (laje engastada)
FATORIAPO	Auxilia na interpolação de Fatores de Transformação (laje em apoio simples)
FATORIENG	Auxilia na interpolação de Fatores de Transformação (laje engastada)
FATORAPO	Calcula os Fatores de Transformação (laje em apoio simples)
FATORENG	Calcula os Fatores de Transformação (laje engastada)
ALTUREF	Entra altura efetiva da laje
CONVERT	Converte a laje num sistema equivalente, não amortecido , com um só grau de liberdade
CALCULAK	Calcula constante de mola
PERIODO	Calcula período natural do sistema
EXCITA	Executa leitura da excitação dinâmica
EXCITAMAX	Calcula o valor máximo da excitação dinâmica
DADINARQ2	Grava dados iniciais no arquivo 2

MENORINT	Procura o intervalo de tempo correspondente ao pico mais estreito da excitação dinâmica
SELINTEM	Entra com o incremento de tempo para processamento
ZERA2	Limpa matrizes correspondentes a Excitação, Deslocamento, Velocidade, Aceleração, Resistência, Reações de apoio, Tempo
ZERA3	Limpa matrizes correspondentes a Excitação, Deslocamento, Velocidade, Aceleração, Resistência, Tempo
DISFUNEX	Discretiza excitação dinâmica
DADADIC2	Grava dados adicionais (frequência, período, força máxima, etc.)
CABEDAFIN	Grava cabeçalho de dados finais no arquivo 2
RESISKLM	Obtem o valor da resistência em função do deslocamento
REGISMAX	Registra índice correspondente ao valor do deslocamento máximo
DESLOCIN	Calcula valor do deslocamento inelástico
GRAVARQ1	Grava deslocamento, velocidade, massa e resistência correspondentes ao primeiro processamento numérico (arquivo 2)
GRAVARQ2	Grava deslocamento, velocidade, massa e resistência ao longo do processamento numérico (arquivo 2)
REAPOIO	Calcula reações de apoio por unidade de comprimento ao longo dos lados da laje
CARACREG	Caracteriza tipo de faixa atingida pelo deslocamento máximo (elástica, elastoplástica, plástica)
PONTIMP	Entra número de pontos para impressão dos resultados
REGISDRA	Registra : Deslocamento x Tempo , Excitação x Tempo, Resistência x Deslocamento, Velocidade x Tempo, Aceleração x Tempo, Reação Va x Tempo, Reação Vb x Tempo nos arquivos 3,4,5,6,7,8,9, respectivamente
MAXIMOS	Calcula os valores máximos de Resistência, Velocidade, Aceleração, Reação de apoio Va e Reação de apoio Vb

SELA1 Seleciona os arquivos de resultados a serem mostrados na tela do microcomputador

MAXIMO Calcula valores máximo e mínimo para traçado do gráfico

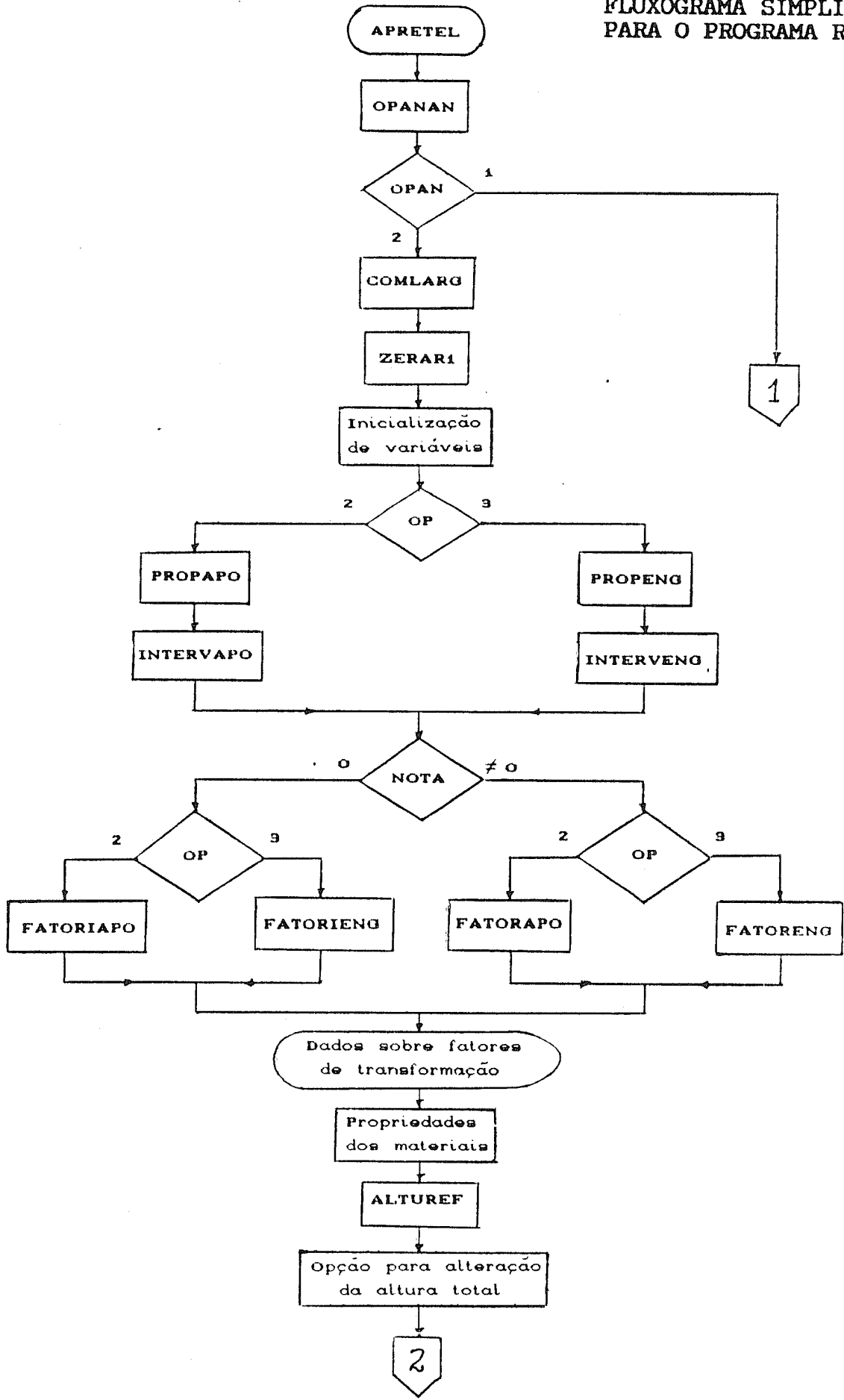
LEITURA Lê arquivos para traçado dos gráficos

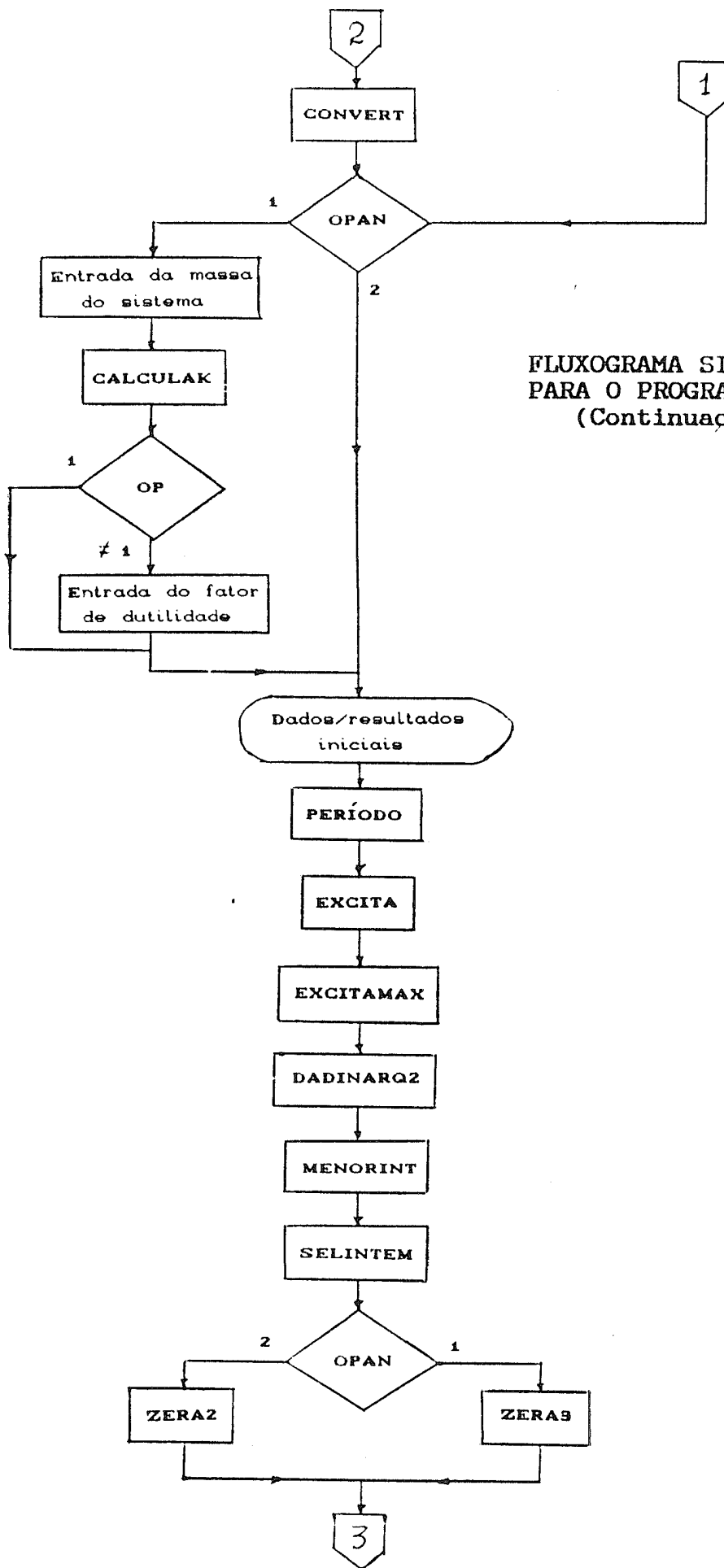
GRAF Desenha os gráficos correspondentes a quatro arquivos numa única tela

LOCA1 Localiza, para os quatro gráficos de cada tela, onde deverão ficar os títulos das figuras e os valores máximos das ordenadas e abcissas

ZEROS Limpa a matrizes onde são armazenados os dados para processamento de cada gráfico, individualmente

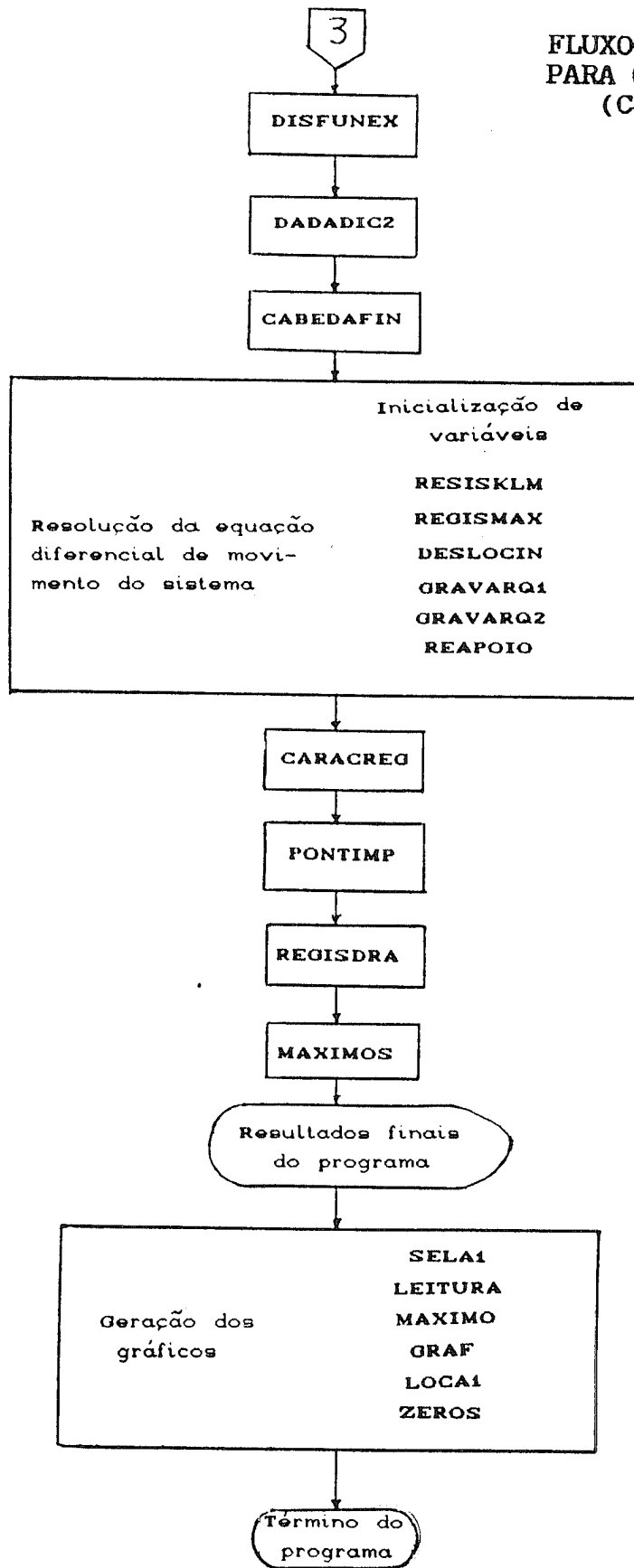
FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO
PARA O PROGRAMA RESPOND





FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO
 PARA O PROGRAMA RESPOD
 (Continuação)

FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO
PARA O PROGRAMA RESPOND
(Continuação)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
PROGRAMA (RESPOND.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJE EM CONCRETO ARMADO
SOB ACOAO DE CARGA IMPULSIVA PROVENIENTE DE EXPLOSAO

METODOLOGIA :

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE , NAO-AMORTECIDO ,
COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

ESCRITO POR WELLINGTON ANTONIO SOARES

BELO HORIZONTE 18/06/91

DECLARE SUB detalvi (y\$)
DECLARE SUB apretel (y\$, NOMEAR\$)
DECLARE SUB opanan (OP, ASSU\$, NOMEAR\$, NTIP, ANA\$, OPAN)
DECLARE SUB comlarg (A, B, PESP, NOMEAR\$, NTIP)
DECLARE SUB calculaK (K1, K2, KEQ, ZE, ZP, ZEQ, RM, R1, R2, OP, NTIP, NOMEAR\$)
DECLARE SUB periodo (AFREA, K1, M, AFRE, pi, PERI, OP, AFREA2, AFRE2, K2, KLM1, KLM2, PERI2)
DECLARE SUB excita (NFT, TA(), FA(), TTMAX, T0, Z0, V0)
DECLARE SUB excitamax (FMAX, NFT, FA())
DECLARE SUB menorint (TEMAX, TA(), NFT)
DECLARE SUB selintem (TSUP, TEMAX, TTMAX, AINT#, NNI, NNF, NDF, MR, NP)
DECLARE SUB disfunex (NP, F(), TTMAX, AINT#, TA(), FA(), NF)
DECLARE SUB dadinarq2 (ASSU\$, OP, M, K1, K2, R1, RM, ZE, ZP, Z0, V0, ZEQ, KEQ, KLM1, KLM2,
KLM3, NFT, TA(), FA(), NOMEAR\$, A, B, D, H, HV, PESP, PESO, FYDI, FCKDI, e, OPAN)
DECLARE SUB dadadic2 (AFREA, AFRE, PERI, OP, AFREA2, AFRE2, PERI2, TTMAX, FMAX, R1, RM,
TA(), NFT, TSUP, AINT#, PESO)
DECLARE SUB cabedafin (y\$, OP, ANA\$, ASSU\$, NOMEAR\$, OPAN)
DECLARE SUB gravarq1 (TN, F(), ZN, VN, M, KLM, RN, AN)
DECLARE SUB gravarq2 (TN, AINT#, F(), ZN1C, VN1C, AN1, M, KLM, RN1, i)
DECLARE SUB destarq (y\$)
DECLARE SUB regismax (TMAX, TN, AINT#, NSIN, FDM, F(), IMAX, i)
DECLARE SUB reapoio (NPLA, F(), RB(), RA(), JJ, i, RN1, FVAE1, FVAE2, FVBE1, FVBE2, FVAEP1,
FVAEP2, FVBEP1, FVBEP2, FVAP1, FVAP2, FVBP1, FVBP2)
DECLARE SUB caracreg (NPLA, OP)
DECLARE SUB siregiao (NPLAF, NPLA, OP)
DECLARE SUB destela (OP, NPLA, NSIN, ZMAX, ZE, ZP, ZEQ, TMAX, TTMAX, NPLAF, FMAX, PESO, AERRO, MI)
DECLARE SUB pontimp (OP, NPLA, ZMAX, ZE, ZP, TMAX, TTMAX, ZRO, NPLAF, NP, JJ, JJA, NSIN, FMAX,
PESO, AERRO, ZEQ, MI)


```

DECLARE SUB regisdra (DESL(), RES(), TEMP(), VEL(), AC(), RA(), RB(), F(), JJ, OPAN)
DECLARE SUB dadosdesc (ZMAX, ZRO, RM, REF, K1, ZE, ZP)
DECLARE SUB numerondf (NNI, NFF, NDF, AINT#, TTMAX)
DECLARE SUB resisKLM (OP, NPLA, NSIN, KLM, KLM1, KLM2, KLM3, K1, Z, ZE, ZP, ZMAX, RN, RM)
DECLARE SUB deslocin (ZRO, ZMAX, RM, K1, ZE, ZP, NPLA, NSIN)
DECLARE SUB leitura (xw(), fw(), NUDAW, nnw)
DECLARE SUB maximo (xw(), fw(), FMINW, FMAXW, XINFW, XSUPW, NUDAW, XMINW, XMAXW)
DECLARE SUB maximos (TEMP(), RES(), VEL(), AC(), RA(), RB(), JJ, RMAX, VELMAX, ACMAX, RAMAX,
RBMAY, TRMAX, TVMAX, TAMAX, TRAMAX, TRBMAX, OPAN)
DECLARE SUB graf (xw(), fw(), XINFW, XSUPW, FMINW, FMAXW, XEW, YEW, XDW, YD, NUDAW, NPXW, NPYW)
DECLARE SUB zeros (xw(), fw(), NUDAW)
DECLARE SUB selal (i, nnw, XEW, YEW, XDW, YDW, AW$, NPXW, NPYW, NJU)
DECLARE SUB local (jjw, FMAXW, FMINW, NOMEAR$, NJU, XMINW, XMAXW)
DECLARE SUB abandona (NOMEAR$, NTIP)
DECLARE SUB propeng (PROPE())
DECLARE SUB propapo (PROPA())
DECLARE SUB interveng (NOTA, PROPE(), NSA, NSD, A, B)
DECLARE SUB intervapo (NOTA, PROPA(), NSA, NSD, A, B)
DECLARE SUB fatoreng (CC(), NOTA, PROPE())
DECLARE SUB fatorapo (CC(), NOTA, PROPA())
DECLARE SUB fatorieng (CC(), NSA, NSD, A, B, PROE())
DECLARE SUB fatoriapo (CC(), NSA, NSD, A, B, PROPA())
DECLARE SUB alturef (H, D, DL)
DECLARE SUB convert (PAM(), OP, A, B, H, D, PESP, FYDI, FCKDI, e, ROA, ROB, PESO, MT, ZE, ZP,
ZEO, K1, K2, KEQ, R1, R2, RM, IA, RESP$)
DECLARE SUB zerar1 (PROPA(), PROPE(), CC(), FTE(), FTEP(), FTP())
DECLARE SUB zerar2 (F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), RA(), RB(), NP)
DECLARE SUB zerar3 (F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), NP)

DECLARE FUNCTION afnr (Z, K1, RM, ZE, ZP)
DECLARE FUNCTION res1d (K1, ZE, ZP, RM, ZMAX, Z)
DECLARE FUNCTION res2d (K1, ZMAX, RM, Z)
DECLARE FUNCTION res1 (K1, ZE, ZP, RM, ZMAX, Z)
DECLARE FUNCTION interpeng (PROPE(), NSD, NSA, NCOL, A, B)
DECLARE FUNCTION interpapo (PROPA(), NSD, NSA, NCOL, A, B)
DECLARE FUNCTION fmoa (RO, D, FYDI, FCKDI)

```

```

ALU$ = "N": pi = 3.1415926535#

```

```

DO

```

```

CLS

```

```

CALL apretel(y$, NOMEAR$) ' Apresentacao de tela inicial e abertura de arquivos

```

```

CALL opanan(OP, ASSU$, NOMEAR$, NTIP, ANA$, OPAN) ' Entrada do assunto e do tipo de opcao

```

```

PRINT : PRINT : PRINT TAB(15); "Deseja ver dados iniciais na tela (S/N) ";

```

```

INPUT RESP$

```

```

IF OPAN = 2 THEN '----- Analise de laje em concreto armado

```

```

CALL comlarg(A, B, PESP, NOMEAR$, NTIP) ' largura, comprimento, peso especifico

```

```

REDIM PROPA(12, 10), PROPE(18, 10), CC(10), FTE(10), FTEP(10), FTP(10)

```

```

CALL zerar1(PROPA(), PROPE(), CC(), FTE(), FTEP(), FTP())

```

```

'Zerando variaveis
TTMAX = 0!: FMAX = 0!: TEMAX = 0!: TTMAX = 0!: TMAX = 0!: IMAX = 0!: ZMAX = 0!
RMAX = 0!: VELMAX = 0!: ACMAX = 0!: RAMAX = 0!: RBMAX = 0!: TRMAX = 0!: TVMAX = 0!
TAMAX = 0!: TRAMAX = 0!: TRBMAX = 0!

IF OP = 3 THEN
  CALL propeng(PROPE()): CALL interveng(NOTA, PROPE(), NSA, NSD, A, B)
END IF

IF OP = 2 THEN
  CALL propapo(PROPA()): CALL intervapo(NOTA, PROPA(), NSA, NSD, A, B)
END IF

IF NOTA <> 0 THEN ' Houve coincidencia com valor tabelado
                  ' NOTA acusa o indice de coincidencia

IF OP = 3 THEN
  CALL fatoreng(FTE(), NOTA, PROPE()): CALL fatoreng(FTEP(), NOTA + 6, PROPE())
  CALL fatoreng(FTP(), NOTA + 12, PROPE())
END IF

IF OP = 2 THEN
  CALL fatorapo(FTE(), NOTA, PROPA()): CALL fatorapo(FTP(), NOTA + 6, PROPA())
END IF

END IF

IF NOTA = 0 THEN

IF OP = 3 THEN
  CALL fatorieng(FTE(), NSA, NSD, A, B, PROPE())
  NSA = NSA + 6: NSD = NSA + 1
  CALL fatorieng(FTEP(), NSA, NSD, A, B, PROPE())
  NSA = NSA + 6: NSD = NSA + 1
  CALL fatorieng(FTP(), NSA, NSD, A, B, PROPE())
END IF

IF OP = 2 THEN
  CALL fatoriapo(FTE(), NSA, NSD, A, B, PROPA())
  NSA = NSA + 6: NSD = NSA + 1
  CALL fatoriapo(FTP(), NSA, NSD, A, B, PROPA())
END IF

END IF

KLE = FTE(1): KME = FTE(2): KLME = FTE(3): FARE = FTE(4): FKE = FTE(5)
FVAE1 = FTE(6): FVAE2 = FTE(7): FVBE1 = FTE(8): FVBE2 = FTE(9)

IF OP = 3 THEN
  KLEP = FTEP(1): KNEP = FTEP(2): KLNEP = FTEP(3): FAREP = FTEP(4): FKEP = FTEP(5)
  FVAEP1 = FTEP(6): FVAEP2 = FTEP(7): FVBEP1 = FTEP(8): FVBEP2 = FTEP(9)
END IF

KLP = FTP(1): KMP = FTP(2): KLMP = FTP(3): FARP = FTP(4): FKP = FTP(5)

```

```
FVAP1 = FTP(6): FVAP2 = FTP(7): FVBP1 = FTP(8): FVBP2 = FTP(9)
```

```
AJU$ = " #####.###"
```

```
IF RESP$ = "S" OR RESP$ = "5" THEN
```

```
CLS : PRINT "DADOS DA FAIXA (ELASTICA)";  
PRINT " A/B = "; : PRINT USING AJU$; A / B: PRINT  
PRINT "KLE = "; : PRINT USING AJU$; KLE: PRINT "KME = "; : PRINT USING AJU$; KME  
PRINT "KLME = "; : PRINT USING AJU$; KLME: PRINT "FARE = "; : PRINT USING AJU$; FARE  
PRINT "FKE = "; : PRINT USING AJU$; FKE: PRINT "FVAE1 = "; : PRINT USING AJU$; FVAE1  
PRINT "FVAE2 = "; : PRINT USING AJU$; FVAE2: PRINT "FVBE1 = "; : PRINT USING AJU$; FVBE1  
PRINT "FVBE2 = "; : PRINT USING AJU$; FVBE2
```

```
IF OP = 3 THEN
```

```
PRINT : PRINT "DADOS DA FAIXA (ELASTOPLASTICA)";  
PRINT " A/B = "; : PRINT USING AJU$; A / B: PRINT  
PRINT "KLEP = "; : PRINT USING AJU$; KLEP: PRINT "KMEP = "; : PRINT USING AJU$; KMEP  
PRINT "KLMEP = "; : PRINT USING AJU$; KLMEP: PRINT "FAREP = "; : PRINT USING AJU$; FAREP  
PRINT "FKEP = "; : PRINT USING AJU$; FKEP: PRINT "FVAEP1 = "; : PRINT USING AJU$; FVAEP1  
PRINT "FVAEP2 = "; : PRINT USING AJU$; FVAEP2: PRINT "FVBEP1 = "; : PRINT USING AJU$; FVBEP1  
PRINT "FVBEP2 = "; : PRINT USING AJU$; FVBEP2
```

```
PRINT TAB(30); "Pressione ENTER para continuar "; : INPUT ARE$
```

```
END IF
```

```
CLS : PRINT : PRINT "DADOS DA FAIXA (PLASTICA)";  
PRINT " A/B = "; : PRINT USING AJU$; A / B: PRINT  
PRINT "KLP = "; : PRINT USING AJU$; KLP: PRINT "KMP = "; : PRINT USING AJU$; KMP  
PRINT "KLMP = "; : PRINT USING AJU$; KLMP: PRINT "FARP = "; : PRINT USING AJU$; FARP  
PRINT "FKP = "; : PRINT USING AJU$; FKP: PRINT "FVAP1 = "; : PRINT USING AJU$; FVAP1  
PRINT "FVAP2 = "; : PRINT USING AJU$; FVAP2: PRINT "FVBP1 = "; : PRINT USING AJU$; FVBP1  
PRINT "FVBP2 = "; : PRINT USING AJU$; FVBP2: PRINT  
PRINT TAB(30); "Pressione ENTER para continuar "; : INPUT ARE$: CLS
```

```
ELSE
```

```
CLS
```

```
END IF
```

```
REDIM PROP(1, 1), PROPE(1, 1), PAM(3, 10)
```

```
FOR i = 1 TO 3: FOR j = 1 TO 10: PAM(i, j) = 0!: NEXT: NEXT
```

```
PAM(1, 1) = KLE: PAM(1, 2) = KME: PAM(1, 3) = KLME: PAM(1, 4) = FARE: PAM(1, 5) = FKE  
PAM(1, 6) = FVAE1: PAM(1, 7) = FVAE2: PAM(1, 8) = FVBE1: PAM(1, 9) = FVBE2
```

```
IF OP = 3 THEN
```

```
PAM(2, 1) = KLEP: PAM(2, 2) = KMEP: PAM(2, 3) = KLMEP: PAM(2, 4) = FAREP: PAM(2, 5) = FKEP  
PAM(2, 6) = FVAEP1: PAM(2, 7) = FVAEP2: PAM(2, 8) = FVBEP1: PAM(2, 9) = FVBEP2
```

```
ELSE
```

```
PAM(2, 1) = 0: PAM(2, 2) = 0: PAM(2, 3) = 0: PAM(2, 4) = 0: PAM(2, 5) = 0
```

```
PAM(2, 6) = 0: PAM(2, 7) = 0: PAM(2, 8) = 0: PAM(2, 9) = 0
END IF
```

```
PAM(3, 1) = KLP: PAM(3, 2) = KMP: PAM(3, 3) = KLMP: PAM(3, 4) = FARP: PAM(3, 5) = 0!
PAM(3, 6) = FVAP1: PAM(3, 7) = FVAP2: PAM(3, 8) = FVBP1: PAM(3, 9) = FVBP2
```

```
KLM1 = PAM(1, 3): KLM2 = PAM(2, 3): KLM3 = PAM(3, 3)
```

```
INPUT #1, FYDI, FCKDI, e 'FYDI Limite de escoamento dinamico do aco em MPa
                        'FCKD Resistencia caracteristica dinamica do concreto a
                        'compressao em MPa
                        'E Modulo de elasticidade do concreto armado em MPa
```

```
INPUT #1, RO, AMI      'RO Taxa de armadura
                        'MI Fator de utilidade desejado
```

```
CALL alturef(H, D, DL) 'Entrada da altura efetiva da laje
```

```
ROA = RO: ROB = RO
```

```
CALL convert(PAM(), OP, A, B, H, D, PESP, FYDI, FCKDI, e, ROA, ROB, PESO, MT, ZE, ZP,
            ZEQ, K1, K2, KEQ, R1, R2, RM, IA, RESP#)
```

```
M = MT
```

```
END IF 'Termino do calculo de paramatros via opcao OPAN=2 -----
```

```
IF OPAN = 1 THEN
```

```
INPUT #1, M          ' Massa em kN.s2/m
APESO = M * 9.8     ' Massa vezes aceleracao da gravidade (kN)
```

```
CALL calculaK(K1, K2, KEQ, ZE, ZP, ZEQ, RM, R1, R2, OP, NTIP, NOMEAR#) ( Constante K2 )
```

```
KLM1 = 1: KLM2 = 1: KLM3 = 1
```

```
IF OP > 1 THEN INPUT #1, MI      ' Fator de utilidade
```

```
END IF
```

```

IF RESP# = "S" OR RESP# = "s" THEN

INPUT "                Pressione ENTER para continuar "; sai$: CLS

PRINT : PRINT "CHECAGEM DE DADOS INICIAIS": PRINT
PRINT "KLM1 = "; KLM1; " KLM2 = "; KLM2; " KLM3 = "; KLM3

IF OPAN = 2 THEN
PRINT "Largura (A).....(m)= "; A; "                Comprimento (B).....(m)= "; B
PRINT "Altura efetiva...(cm)= "; D*100; "                Altura total.....(cm)= "; H*100
PRINT "Volume .....(m3)= "; A * B * H, " Peso especifico..(kN/m3)= "; PESP
END IF

PRINT "Massa ( M ).(kN.s2/m)= "; M; "                Peso.....(kN)= "; PESO

IF OP > 1 THEN PRINT "Fator de dutilidade..= "; MI

IF OPAN = 2 THEN
PRINT "Taxa de armadura.....= "; RO
PRINT "Pico de pressao.....(MPa)= "; P0
PRINT "Modulo de elasticidade .....(MPa)= "; e
PRINT "Limite de escoamento dinamico do acao.....(MPa)= "; FYDI
PRINT "Resistencia caracteristica dinamica do concreto..(MPa)= "; FCKDI
END IF

IF OP > 1 THEN PRINT : PRINT "Deslocamento ZE.....(cm)= "; ZE * 100

IF OP = 3 THEN
PRINT "Deslocamento ZP.....(cm)= "; ZP*100; " Deslocamento ZEQ..(cm) = "; ZEQ*100
END IF
PRINT "Constante de mola K1....(kN/m)= "; K1
IF OP = 3 THEN
PRINT "Constante de mola K2....(kN/m)= "; K2
PRINT "Constante de mola KEQ ..(kN/m)= "; KEQ
END IF
IF OP = 3 THEN
PRINT "Resistencia R1.....(kN)= "; R1
END IF
IF (OP = 2) OR (OP = 3) THEN PRINT "Resistencia RM.....(kN)= "; RM
PRINT : INPUT "Pressione ENTER para continuar "; sai$: CLS

END IF

IF OPAN = 2 THEN
A = A * 1000; B = B * 1000; D = D * 1000; H = H * 1000
END IF
PESO = PESO * 1000; ZE = ZE * 1000; ZP = ZP * 1000; ZEQ = ZEQ * 1000
R1 = R1 * 1000; R2 = R2 * 1000; RM = RM * 1000

CALL periodo(AFREA, K1, M, AFRE, pi, PERI, OP, AFREA2, AFRE2, K2, KLM1, KLM2, PERI2)

INPUT #1, NFT                ' Numero de pontos da excitacao
REDIM TA(NFT), FA(NFT)      ' Dimensionamento da excitacao X tempo

```

```

CALL excita(NFT, TA(), FA(), TTMAX, T0, Z0, V0)' Leitura da excitacao dinamica
'e condicoes iniciais

CALL excitamax(FMAX, NFT, FA()) ' Maximo da excitacao dinamica

CALL dadinarq2(ASSU$, OP, M, K1, K2, R1, RM, ZE, ZP, Z0, V0, ZEQ, KEQ, KLM1, KLM2,
KLM3, NFT, TA(), FA(), NOMEAR$, A, B, D, H, HV, PESP, PESD, FYDI, FCKDI, e, OPAN)
'( Gravacao de dados iniciais no arquivo 2 )
CALL menorint(TEMAX, TA(), NFT) ' Menor intervalo / pico

CALL selintem(TSUP, TEMAX, TTMAX, AINT#, NNI, NNF, NDF, MR, NP) ' ( Selecao do
'intervalo de tempo )

IF OPAN = 2 THEN
REDIM F(NP), TEMP(NP), DESL(NP), VEL(NP), AC(NP), RES(NP), RA(NP), RB(NP)
CALL zerar2(F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), RA(), RB(), NP)
ELSE
REDIM F(NP), TEMP(NP), DESL(NP), VEL(NP), AC(NP), RES(NP)
CALL zerar3(F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), NP)
END IF

CALL disfunex(NP, F(), TTMAX, AINT#, TA(), FA(), NFT) ' Discretizacao

CALL dadadic2(AFREA, AFRE, PERI, OP, AFREA2, AFRE2, PERI2, TTMAX, FMAX, R1, RM,
TA(), NFT, TSUP, AINT#, PESD)
'( Gravacao de dados adicionais no arquivo 2 )

CALL cabedafin(y$, OP, ANA$, ASSU$, NOMEAR$, OPAN)' ( Cabecalho de dados finais no
'arquivo 2 e espera de execucao )

'INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL - RESOLUCAO DA EQUACAO DIFERENCIAL

ZN = Z0: VN = V0: VNA = 1: NSIN = 0: NPLA = 1: JJ = 0 ' Inicializacao
ZN1C = 0!: VN1C = 0!: ACN1C = 0!: ZRO = 0! ' Inicializacao

AERRO = .001 'Erro maximo atribuido para calculo do deslocamento

FOR i = 0 TO (NP - 1)

TN = T0 + i * AINT#: PN = F(i)

IF i = 0 THEN ZN = Z0: VN = V0 ELSE ZN = ZN1C: VN = VN1C

Z = ZN
CALL resisKLM(OP, NPLA, NSIN, KLM, KLM1, KLM2, KLM3, K1, Z, ZE, ZP, ZMAX, RN, RM)

AN = (PN - RN) / (M * KLM)

IF i = 0 THEN
RN1 = RN: AN1 = AN: ZN1C = ZN: VN1C = VN: PN1 = PN: JJ = JJ + 1
ELSE '(8)

ZNAS = ZN + VN * AINT#: PN1 = F(i + 1)

DO

```

```

Z = ZNAS
CALL resisKLM(OP, NPLA, NSIN, KLM, KLM1, KLM2, KLM3, K1, Z, ZE, ZP, ZMAX, RN, RM)
RN1 = RN

AN1 = (PN1 - RN1) / (M * KLM): VN1C = VN + ((AN + AN1) / 2!) * AINT#
ZN1C = ZN + VN * AINT# + ((AN / 3!) + (AN1 / 6!)) * (AINT# ^ 2)
AER = ABS(ZN1C - ZNAS): ZNAS = ZN1C

LOOP WHILE AER >= AERRO

VNA = VN1C

IF NSIN = 1 THEN
ELSE '(1)
SVEL = VN * VN1C
IF SVEL < 0 THEN
ZMAX = ZN1C: CALL regismax(TMAX, TN, AINT#, NSIN, FDM, F(), IMAX, i)
CALL deslocin(ZRO, ZMAX, RM, K1, ZE, ZP, NPLA, NSIN)
END IF
END IF '(1)

JJ = JJ + 1

IF NPLA = 1 THEN
ELSE
IF ABS(ZN1C) < ABS(ZRO) THEN
EXIT FOR
END IF
END IF

END IF '(0)

IF i = 0 THEN
CALL gravarq1(TN, F(), ZN, VN, M, KLM, RN, AN)
ELSE
CALL gravarq2(TN, AINT#, F(), ZN1C, VN1C, AN1, M, KLM, RN1, i)
END IF

TEMP(JJ) = TN: DESL(JJ) = ZN1C: VEL(JJ) = VN1C: AC(JJ) = AN1 / 9800: RES(JJ) = RN1

IF OPAN = 2 THEN
CALL reapoio(NPLA, F(), RB(), RA(), JJ, i, RN1, FVAE1, FVAE2, FVBE1, FVBE2, FVAEP1,
FVAEP2, FVBEP1, FVBEP2, FVAP1, FVAP2, FVBP1, FVBP2)
END IF

NEXT i

'TERMINO DO PROGRAMA PRINCIPAL - RESOLUCAO DA EQUACAO DIFERENCIAL

CALL caracreg(NPLA, OP)
CALL pontimp(OP, NPLA, ZMAX, ZE, ZP, TMAX, TTMAX, ZRO, NPLAF, NP, JJ, JJA, NSIN, FMAX,
PESO, AERRO, ZEQ, MI)
CALL regisdra(DESL(), RES(), TEMP(), VEL(), AC(), RA(), RB(), F(), JJ, OPAN)
CALL maximos(TEMP(), RES(), VEL(), AC(), RA(), RB(), JJ, RMAX, VELMAX, ACMAX, RAMAX,

```

RBMAX, TRMAX, TVMAX, TAMAX, TRAMAX, TRBMAX, OPAN)

AVR\$ = " #####.##": AVD\$ = " #####.##": AVT\$ = "#####"

IF NSIN = 0 THEN
ELSE

PRINT #2, TAB(10); "Dados correspondentes ao deslocamento maximo"
PRINT #2, TAB(10); "-----": PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "Deslocamento maximo.....(mm) = ";
PRINT #2, USING AVD\$; ZMAX
PRINT #2, TAB(10); "Forca excitadora.....(KN) = ";
PRINT #2, USING AVR\$; FDM / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Resistencia.....(KN) = ";
PRINT #2, USING AVR\$; RES(IMAX) / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Tempo de ocorrencia.....(s) = ";
PRINT #2, USING AVT\$; TMAX: RW = RES(IMAX)

IF OPAN = 2 THEN

IF NPLA = 1 THEN

VA = FVAE1 * FDM + FVAE2 * RW: VB = FVBE1 * FDM + FVBE2 * RW

ELSE

IF NPLA = 2 THEN

VA = FVAEP1 * FDM + FVAEP2 * RW: VB = FVBEP1 * FDM + FVBEP2 * RW

ELSE

IF NPLA = 3 THEN

VA = FVAP1 * FDM + FVAP2 * RW: VB = FVBP1 * FDM + FVBP2 * RW

ELSE

END IF

END IF

END IF

PRINT #2, TAB(10); "Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) = ";
PRINT #2, USING AVR\$; VA / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Reacao de apoio (RB).....(kN/m) = ";
PRINT #2, USING AVR\$; VB / 1000

END IF

IF OP = 1 THEN

ELSE

IF ZE = 0 THEN

ELSE

FATD = ZMAX / ZE

IF OP = 2 THEN

PRINT #2, TAB(10); "Fator de dutilidade calculado.....(ZMAX/ZE) = ";

PRINT #2, USING AVD\$; FATD

PRINT #2, TAB(10); "Fator de dutilidade maximo especificado....(MI) = ";

PRINT #2, USING AVD\$; MI

END IF


```

        IF OP = 3 THEN
        PRINT #2, TAB(10); "Fator de dutilidade calculado.....(ZMAX/ZEQ) = ";
        PRINT #2, USING AVD%; FATD
        PRINT #2, TAB(10); "Fator de dutilidade maximo especificado....(MI) = ";
        PRINT #2, USING AVD%; MI
        END IF

        END IF
    END IF

END IF

CALL destarq(y%); AKK$ = "      ####.####"

PRINT #2, TAB(30); "Valores maximos      Tempos de ocorrencia (s)"
PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "Velocidade (mm/s) ", VELMAX, " "; : PRINT #2, USING AKK%; TVMAX
PRINT #2, TAB(10); "Aceleracao ( g ) ", ACMAX, " "; : PRINT #2, USING AKK%; TAMAX
PRINT #2, TAB(10); "Resistencia (kN ) ", RMAX / 1000
IF OPAN = 2 THEN
PRINT #2, TAB(10); "Reacao RA (kN/m ) ", RAMAX, " "; : PRINT #2, USING AKK%; TRAMAX
PRINT #2, TAB(10); "Reacao RB (kN/m ) ", RBMAX, " "; : PRINT #2, USING AKK%; TRBMAX
END IF

CLS : CALL destarq(y%)

IF NPLA = 3 AND NSIN = 1 THEN CALL dadosdesc(ZMAX, ZRO, RM, REF, K1, ZE, ZP)
IF NPLA = 2 AND NSIN = 1 THEN CALL dadosdesc(ZMAX, ZRO, RM, REF, K1, ZE, ZP)

PRINT
PRINT "          Para usar a opacao ( S ) voce devera antes ter usado o "
PRINT "          comando GRAPHICS do DOS"
PRINT
INPUT "          Deseja saida de graficos para a impressora ( S / N ) "; ALO$
IF ALO$ = "S" OR ALO$ = "s" THEN
PRINT
PRINT "          Para copiar as telas para a impressora , presssione ao"
PRINT "          mesmo tempoas teclas SHIFT e PRTSCR "
END IF
CALL detalvi(y%)
PRINT TAB(13); "----> Aguarde : Geracao de dados para os GRAFICOS <----"
PRINT STRING$(80, "-")

CLOSE 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

```

Geracao de graficos

NJU = 1

FOR i = 1 TO 4

CALL selal(i, nnw, XEW, YEW, XDW, YDW, AW\$, NPXW, NPYW, NJU)

OPEN AW\$ FOR INPUT AS #nnw

INPUT #nnw, tituluw\$: INPUT #nnw, well\$: INPUT #nnw, NUDAW

```

REDIM xw(NUDAW), fw(NUDAW)
CALL leitura(xw(), fw(), NUDAW, nnw)
CALL maximo(xw(), fw(), FMINW, FMAXW, XINFW, XSUPW, NUDAW, XMINW, XMAXW)
CALL graf(xw(), fw(), XINFW, XSUPW, FMINW, FMAXW, XEW, YEW, XDW, YDW, NUDAW, NPXW, NPYW)
CALL local(i, FMAXW, FMINW, NOMEAR$, NJU, XMINW, XMAXW)
CALL zeros(xw(), fw(), NUDAW)
NEXT i

```

```

K$ = INPUT$(1): CLS 0: NJU = 2: FOR i = 1 TO 10: PRINT : NEXT
PRINT TAB(15); "Aguarde : Geracao de dados para proximo grafico"

```

```

IF ALD$ = "S" OR ALD$ = "s" THEN FOR i = 1 TO 15: LPRINT : NEXT

```

```

FOR i = 1 TO 4
  IF (i = 2 AND OPAN = 1) OR (i = 4 AND OPAN = 1) THEN
  ELSE
    CALL selal(i, nnw, XEW, YEW, XDW, YDW, AW$, NPXW, NPYW, NJU)
    OPEN AW$ FOR INPUT AS #nnw
    INPUT #nnw, titulw$: INPUT #nnw, well$: INPUT #nnw, NUDAW
    REDIM xw(NUDAW), fw(NUDAW)
    CALL leitura(xw(), fw(), NUDAW, nnw)
    CALL maximo(xw(), fw(), FMINW, FMAXW, XINFW, XSUPW, NUDAW, XMINW, XMAXW)
    IF i = 1 THEN CLS 0
    CALL graf(xw(), fw(), XINFW, XSUPW, FMINW, FMAXW, XEW, YEW, XDW, YDW, NUDAW, NPXW, NPYW)
    CALL local(i, FMAXW, FMINW, NOMEAR$, NJU, XMINW, XMAXW)
    CALL zeros(xw(), fw(), NUDAW)
  END IF
NEXT i

```

```

K$ = INPUT$(1): CLS 0: SCREEN 0: FOR i = 1 TO 10: PRINT : NEXT
INPUT "           Deseja rodar um proximo caso ( S / N ) "; ALU$

```

```

LOOP WHILE ALU$ = "s" OR ALU$ = "S"

```

```

END

```

```

SUB abandona (NOMEAR$, NTIP) ' Abandona programa em funcao de erro

```

```

CLS : FOR i = 1 TO 10: PRINT : NEXT
PRINT TAB(15); "Foi detectado ERRO no arquivo de dados "; NOMEAR$
PRINT
IF NTIP = 1 THEN PRINT TAB(15); "A opcao usada (OP) tem que ser 1,2 ou 3"
IF NTIP = 2 THEN PRINT TAB(15); "O menor lado deve ser fornecido primeiro que o maior"
IF NTIP = 5 THEN PRINT TAB(15); "O deslocamento ZP tem que ser maior que ZE"
PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
INPUT "           Pressione ENTER para terminar"; CV$: CLS 0: STOP

```

```

END SUB

```

```

FUNCTION afnr (Z, K1, RM, ZE, ZP) ' Calculo da resistencia

```

```

R1 = K1 * ZE: afnr = R1 + ((RM - R1) / (ZP - ZE)) * (Z - ZE)

```

```

END FUNCTION

```

```

SUB alturef (H, D, DL)

PRINT
PRINT TAB(10); "Entrada da altura total da laje e do distancia do CG da armadura"
PRINT
PRINT TAB(15); "Entre com a altura total da laje ( H ) em metros = ";
INPUT H
DO
PRINT TAB(15); "Entre com a distancia do CG ( D' ) em metros... = ";
INPUT DL
LOOP WHILE DL <= 0 OR DL > H / 2
PRINT
D = H - DL      'Altura efetiva da laje

END SUB

```

```

SUB apretel (y$, NOMEAR$)

CALL detalvi(y$)
PRINT TAB(25); "Programa RESPOD.BAS"
PRINT TAB(25); "-----"
PRINT TAB(10); "Resposta dinamica de sistema com um so grau de liberdade"
PRINT TAB(10); "      regido pela equacao diferencial seguinte": PRINT
PRINT TAB(20); "KLM * M * Z(t)'' + R(Z(t)) * Z(t) = P(t)": PRINT
PRINT TAB(20); " t   = Tempo"
PRINT TAB(20); " Z   = Deslocamento"
PRINT TAB(20); " Z'' = Aceleracao"
PRINT TAB(20); " R   = Funcao de resistencia (linear por trechos)"
PRINT TAB(20); " P   = Funcao excitadora"
PRINT TAB(20); " M   = Massa total do sistema"
PRINT TAB(20); " KLM = Fator ponderador massa-carga"
PRINT STRING$(80, "-")
PRINT TAB(20); "Belo Horizonte      "; DATE$
PRINT TAB(20); "Inicio de execucao "; TIME$
PRINT STRING$(80, "-")
INPUT "      Nome do arquivo a ser processado --> "; NOMEAR$

OPEN NOMEAR$ FOR INPUT AS #1

OPEN "RESPOD.PRN" FOR OUTPUT AS #2      ' Resultados globais
OPEN "respdes.prn" FOR OUTPUT AS #3    ' Deslocamento X tempo
OPEN "respexc.prn" FOR OUTPUT AS #4    ' Excitacao X tempo
OPEN "respres.prn" FOR OUTPUT AS #5    ' Resistencia X Deslocamento
OPEN "respvel.prn" FOR OUTPUT AS #6    ' Velocidade X tempo
OPEN "respace.prn" FOR OUTPUT AS #10   ' Aceleracao X tempo
OPEN "resprea.prn" FOR OUTPUT AS #8    ' Reacao VA X tempo
OPEN "respreb.prn" FOR OUTPUT AS #9    ' Reacao VB X tempo
OPEN "respret.prn" FOR OUTPUT AS #7    ' Resistencia X tempo

END SUB

```

SUB cabedafin (y\$, OP, ANA\$, ASSU\$, NOMEAR\$, OPAN)

' Gravacao de cabecalho de dados finais no arquivo 2 e espera de execucao

```
CALL destarq(y$): PRINT #2, TAB(20); "Resultados finais"
PRINT #2, TAB(20); "-----"
PRINT #2,
PRINT #2, "      Tempo      Forca      Desl      Veloc      Massa      Resist"
PRINT #2, "      -----      -----      -----      -----      -----      -----"
PRINT #2, "      ( s )      (kN)      (mm)      ( mm/s )      (kN.s2/m)      (kN)"
PRINT #2,

PRINT TAB(10); ANA$: PRINT : PRINT TAB(20); "OPAN = "; OPAN; TAB(45); "OP = "; OP
PRINT : PRINT TAB(15); ASSU$: PRINT
PRINT TAB(20); "Arquivo de dados : "; UCASE$(NOMEAR$): PRINT
PRINT TAB(10); "----->  Aguarde : Programa em execucao  <-----": CALL detalvi(y$)
```

END SUB

SUB calculaK (K1, K2, KEQ, ZE, ZP, ZEQ, RM, R1, R2, OP, NTIP, NOMEAR\$)

' Calculo das constantes de molas K1 e/ou K2

```
IF OP = 2 THEN
INPUT #1, ZE: INPUT #1, RM:      K1 = RM / ZE
END IF

IF OP = 3 THEN
INPUT #1, ZE: INPUT #1, R1: INPUT #1, ZP
IF ZP <= ZE THEN NTIP = 5: CALL abandona(NOMEAR$, NTIP)
INPUT #1, RM
K1 = R1 / ZE: K2 = (RM - R1) / (ZP - ZE)
R2 = RM: R1SR2 = R1 / R2: ZEQ = ZP * (1 - R1SR2) + ZE: KEQ = R2 / ZEQ
END IF

IF OP = 1 THEN
INPUT #1, K1
ZE = 1000000: ZMAX = 10000000: ZP = ZE * 1000
R1 = ZE * K1: RM = R1 * 1000
END IF
```

END SUB

SUB caracreg (NPLA, OP) ' Caracterizacao da regioao

```
CALL destarq(y$)

IF OP > 1 THEN
IF NPLA = 3 THEN PRINT #2, TAB(10); "Foi atingida a faixa PLASTICA do material"
IF NPLA = 1 THEN PRINT #2, TAB(10); "Nao foi ultrapassada a faixa ELASTICA do material"
IF NPLA = 2 THEN PRINT #2, TAB(10); "Foi atingida a faixa ELASTOPLASTICA do material"
PRINT #2, " "
ELSE
```

END IF

END SUB

SUB comlarg (A, B, PESP, NOMEAR\$, NTIP)

'Entrada de largura, comprimento,

INPUT #1, A, B (Unidades : metro, metro)
IF A > B THEN NTIP = 2: CALL abandona(NOMEAR\$, NTIP)
INPUT #1, PESP (Unidade : KN/m3)

END SUB

SUB convert (PAM(), OP, A, B, H, D, PESP, FYDI, FCKDI, e, ROA, ROB, PESO, MT, ZE, ZP,
ZEQ, K1, K2, KEQ, R1, R2, RM, IA, RESP\$)

pi = 3.1415926535#

IF RESP\$ = "S" OR RESP\$ = "s" THEN
PRINT : PRINT SPC(30); "Subrotina CONVERT "
PRINT SPC(30); "-----": PRINT
PRINT SPC(5); " Calculo de parametros para simulacao de laje em concreto"
PRINT SPC(5); "armado por meio de um sistema dinamico com um so grau de liberdade"
PRINT
END IF

G = 9.8: D = D * 100: ASB = A / B
MT = (PESP * H * A * B) / G (Unidade : kN.s2/m = N.s2/mm)
PESO = PESP * A * B * H

FARE = PAM(1, 4): FKE = PAM(1, 5): FAREP = PAM(2, 4): FKEP = PAM(2, 5): FARP = PAM(3, 4)

IF OP = 3 THEN
RO = ROA: MOPSB = fmom(RO, D, FYDI, FCKDI) 'Momento distribuido na borda A
RO = ROB: MOPSA = fmom(RO, D, FYDI, FCKDI) 'Momento distribuido na borda B
MPSB = MOPSB * B 'Momento total MPSB
MPSA = MOPSA * A 'Momento total MPSA
END IF

RO = ROA: MICB = fmom(RO, D, FYDI, FCKDI) 'Momento MICB
RO = ROB: MICA = fmom(RO, D, FYDI, FCKDI) 'Momento MICA

'Momentos distribuidos ao longo da linha de ruptura / Partes inclinadas
A1 = COS(pi / 4): A12 = A1 ^ 2: A2 = COS(pi / 4 + pi / 2): A22 = A2 ^ 2
MR2 = MICB * A12 + MICA * A22: MR3 = MR2

'MOMENTO DISTRIBUIDO NA PARTE CENTRAL DA LINHA DE RUPTURA
RO = ROA: MIC = fmom(RO, D, FYDI, FCKDI): MR1 = MIC

'MOMENTOS RESULTANTES AO LONGO DA LINHA DE RUPTURA
MPFB = (A / 2) * (MR2 + MR3) + (B - A) * MR1 'Dados da area (A)
MPFA = (A / 2) * (MR2 + MR3) 'Dados da area (B)

IA = (1 * ((D / 100) ^ 3) / 2) * (5.5 * ROA + .083) 'Momento de Inercia equivalente

```

'CALCULO DOS PARAMETROS PARA ANALISE DINAMICA

'FAIXA ELASTICA
'Resistencia Maxima R1
IF OP = 2 THEN R1 = (1 / A) * (12 * MPFA + FARE * MPFB)
IF OP = 3 THEN R1 = FARE * MOPSB
K1 = FKE * (e * 1000) * IA / (A ^ 2) 'Constante de Mola
ZE = R1 / K1 'Deslocamento elastico maximo

IF OP = 3 THEN
'FAIXA ELASTOPLASTICA
'Resistencia Maxima R2
R2 = (1 / A) * (12 * (MPFA + MPSA) + FARP * (MPFB + MPSB))
K2 = FKEP * (e * 1000) * IA / (A ^ 2) 'Constante de Mola

END IF

'FAIXA PLASTICA
'Resistencia Maxima RM
IF OP = 2 THEN RM = R1 ELSE RM = R2
IF OP = 3 THEN
  ZP = ((R2 - R1) / K2) + ZE: R1SR2 = R1 / R2: ZEQ = ZE * (1 - R1SR2) + ZE: KEQ = R2/ZEQ
END IF

D = D / 100

END SUB

SUB dadadic2 (AFREA, AFRE, PERI, DP, AFREA2, AFRE2, PERI2, TTMAX, FMAX, R1, RM,
  TA(), NFT, TSUP, AINT#, PESO)

' Gravacao de dados adicionais no arquivo 2

  DX$ = "#####.####": CX$ = "#####.##"

  PRINT #2, TAB(10); "Dados adicionais"
  PRINT #2, TAB(10); "-----": PRINT #2,
  PRINT #2, TAB(10); "Trecho ELASTICO :": PRINT #2, " "
  PRINT #2, TAB(10); "Frequencia angular.....( rad/s ) = ";
  PRINT #2, USING DX$; AFREA
  PRINT #2, TAB(10); "Frequencia .....( Hz ) = ";
  PRINT #2, USING DX$; AFRE
  PRINT #2, TAB(10); "Periodo ( TN ).....( s ) = ";
  PRINT #2, USING DX$; PERI
  PRINT #2, " "

  IF OP = 3 THEN
    PRINT #2, TAB(10); "Trecho ELASTOPLASTICO :": PRINT #2, " "
    PRINT #2, TAB(10); "Frequencia angular.....( rad/s ) = ";
    PRINT #2, USING DX$; AFREA2
    PRINT #2, TAB(10); "Frequencia .....( Hz ) = ";
    PRINT #2, USING DX$; AFRE2
    PRINT #2, TAB(10); "Periodo.....( s ) = ";
    PRINT #2, USING DX$; PERI2
  
```

```

PRINT #2, " "
END IF

PRINT #2, TAB(10); "Duracao do carregamento (T).....(s) = ";
PRINT #2, USING DX#; TMAX

IF OP = 1 THEN

ELSE
PRINT #2, TAB(10); "Forca maxima (FMAX).....( kN ) = ";
PRINT #2, USING CX#; FMAX / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Resistencia (R1).....( kN ) = ";
PRINT #2, USING CX#; R1 / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Resistencia (RM).....( kN ) = ";
PRINT #2, USING CX#; RM / 1000
PRINT #2, TAB(10); "Relacao (FMAX/RM).....( % ) = ";
PRINT #2, USING DX#; (FMAX / RM) * 100
PRINT #2, TAB(10); "Relacao (FMAX/PESO).....( % ) = ";
PRINT #2, USING DX#; (FMAX / PESO) * 100
END IF

PRINT #2, TAB(10); "Relacao (duracao/periodo T/TN )..... = ";
PRINT #2, USING DX#; TA(NFT - 1) / PERI
PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "Incremento de tempo limite (TEMAX/10)....( s ) = ";
PRINT #2, USING "###.#####"; TSUP
PRINT #2, TAB(10); "Incremento de tempo adotado (AINT).....( s ) = ";
PRINT #2, USING "###.#####"; AINT#
PRINT #2, TAB(10); "Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento= ";
PRINT #2, USING "###.#####"; AERRO

END SUB

SUB dadinarq2 (ASSU#, OP, M, K1, K2, R1, RM, ZE, ZP, ZO, VO, ZEQ, KEQ, KLM1, KLM2,
KLM3, NFT, TA(), FA(), NOMEAR#, A, B, D, H, HV, PESP, PESO, FYDI, FCKDI, e, OPAN)

' Gravacao de dados iniciais no arquivo 2

CALL destarq(y#)
PRINT #2, " ": PRINT #2, TAB(10); "          UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS"
PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "          CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS"
PRINT #2, " "; CALL destarq(y#)
PRINT #2, TAB(10); "          PROGRAMA ( RESPOD.BAS )"
PRINT #2, TAB(10); "          -----"
PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADADO SOB"
PRINT #2, TAB(14); "ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO "
PRINT #2, " ";
PRINT #2, TAB(1); "ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE"
PRINT #2, " ": CALL destarq(y#); PRINT #2, TAB(10); " Assunto : "; ASSU#
PRINT #2, TAB(10); " Arquivo de dados : "; UCASE#(NOMEAR#)
PRINT #2, " ": PRINT #2, TAB(10); " Belo Horizonte "; DATE#; CALL destarq(y#)

IF OP = 1 THEN
PRINT #2, TAB(10); "Analise linear ELASTICA "

```

```

ELSEIF OP = 3 THEN PRINT #2, TAB(10); "Analise nao-linear ELASTICA-ELASTOPLASTICA-PLASTICA"
  ELSEIF OP = 2 THEN PRINT #2, TAB(10); "Analise nao-linear ELASTICA - PLASTICA "
END IF
PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "OPAN = "; OPAN; " OP = "; OP
CALL destarq(y#); PRINT #2, TAB(10); "Dados iniciais"
PRINT #2, TAB(10); "-----"

IF OPAN = 2 THEN

  PRINT #2, " "
  PRINT #2, TAB(10); "Geometria e peso da laje :": PRINT #2, " "

  PRINT #2, TAB(10); "Largura da laje (A).....( m ) = "; A / 1000
  PRINT #2, TAB(10); "Comprimento da laje (B).....( m ) = "; B / 1000
  PRINT #2, TAB(10); "Relacao (A/B)..... = "; A / B
  PRINT #2, TAB(10); "Altura efetiva (D).....( cm ) = "; D / 10
  PRINT #2, TAB(10); "Altura total da laje (H).....( cm ) = "; H / 10
  PRINT #2, TAB(10); "Distancia do CG da armadura....( cm ) = "; (H - D) / 10
  PRINT #2, TAB(10); "Peso especifico do concreto.( kN/m3 ) = "; PESP
  PRINT #2, TAB(10); "Peso total da laje (PESO).....( kN ) = "; PESO / 1000
  PRINT #2, TAB(10); "Massa total da laje (M)..( kN.s2/m ) = "; M: PRINT #2, " "
  PRINT #2, TAB(10); "Propriedades dos materiais :": PRINT #2, " "
  PRINT #2, TAB(10); "Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = "; FYDI
  PRINT #2, TAB(10); "Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = "; FCKDI
  PRINT #2, TAB(10); "Modulo de elasticidade do concreto armado (E) .....(MPa) = "; e
  ELSE
  PRINT #2, " "
  PRINT #2, TAB(10); "Massa do sistema (M).....( kN.s2/m ) = "; M
  PRINT #2, TAB(10); "Peso correspondente (PESO)....( kN ) = "; PESO / 1000
  END IF

  PRINT #2, " ": PRINT #2, TAB(10); "Funcao de resistencia : ": PRINT #2, " "

  IF OP = 1 THEN
    PRINT #2, TAB(10); "Constante de mola (K1).....( kN/m ) = "; K1
  END IF

  IF OP = 3 THEN
    ELSE
      IF OP <> 2 THEN

        ELSE
          PRINT #2, TAB(10); "Deslocamento elastico maximo permitido (ZE)...( mm ) = "; ZE
          PRINT #2, TAB(10); "Constante de mola (K1).....( kN/m ) = "; K1
          PRINT #2, TAB(10); "Resistencia plastica (RM).....( kN ) = "; RM / 1000
        END IF

      END IF

      IF OP = 2 THEN
        ELSE
          IF OP = 1 THEN

```



```

ELSE
PRINT #2,TAB(10); "Resistencia elastica maxima / lo. trecho.(R1).( kN ) = "; R1/1000
PRINT #2,TAB(10); "Resistencia plastica (RM).....( kN ) = "; RM/1000
PRINT #2,TAB(10); "Deslocamento elastico maximo (ZE) .....( mm ) = "; ZE
PRINT #2,TAB(10); "Deslocamento elastoplastico maximo (ZP).....( mm ) = "; ZP
PRINT #2,TAB(10); "Deslocamento elastico maximo equivalente (ZEQ)( mm ) = "; ZEQ
PRINT #2,TAB(10); "Contante de mola / trecho elastico (K1).....( kN/m ) = "; K1
PRINT #2,TAB(10); "Constante de mola/trecho elastoplastico (K2)..( kN/m ) = "; K2
PRINT #2,TAB(10); "Constante de mola equivalente (KEQ).....( kN/m ) = "; KEQ
END IF

END IF

IF OPAN = 2 THEN

PRINT #2,
PRINT #2, TAB(10); "Fatores de correcao da massa (KLME ) ..... = "; KLM1

IF OP = 1 THEN
ELSE
PRINT #2, TAB(10); " (KLMEP) ..... = "; KLM2
PRINT #2, TAB(10); " (KLMP ) ..... = "; KLM3
END IF

END IF

PRINT #2, " "
PRINT #2, TAB(10); "Deslocamento inicial (Z0).....( mm ) = "; Z0
PRINT #2, TAB(10); "Velocidade inicial (V0).....( m/s ) = "; V0/1000
CALL destarq(y$)
PRINT #2, TAB(15); "Dados do carregamento"
PRINT #2, TAB(15); "-----"
PRINT #2,
PRINT #2, TAB(15); "Tempo      Forca excitadora"
PRINT #2, TAB(15); "( s )      ( kN )"
PRINT #2,

FOR i = 0 TO (NFT - 1)
PRINT #2, USING "      #####.### " ; TA(i);
PRINT #2, USING "      #####.### " ; FA(i) / 1000
NEXT i

PRINT #2, " ": CALL destarq(y$)

END SUB

SUB dadosdesc (ZMAX, ZRO, RM, REF, K1, ZE, ZP) ' Dados da fase de descarregamento

PRINT #2, TAB(10); "Dados da fase de descarregamento"
PRINT #2, TAB(10); "-----"
PRINT #2, TAB(10); "Deslocamento maximo.....( mm ) = "; ZMAX
PRINT #2, TAB(10); "Deslocamento inelastico.....( mm ) = "; ZRO
CALL destarq(y$)

END SUB

```

```

SUB desloclin (ZRO, ZMAX, RM, K1, ZE, ZP, NPLA, NSIN)

' Deslocamento inelastico

IF NPLA = 1 AND NSIN = 1 THEN ZRO = 10000000000#
IF NPLA = 2 AND NSIN = 1 THEN ZRO = ZMAX - afnr(ZMAX, K1, RM, ZE, ZP) / K1
IF NPLA = 3 AND NSIN = 1 THEN ZRO = ZMAX - RM / K1

END SUB

SUB destarq (y%) ' Impressao de destaque no arquivo 2

PRINT #2, STRING$(80, "-")

END SUB

SUB destela (OP, NPLA, NSIN, ZMAX, ZE, ZP, ZEQ, TMAX, TTMAX, NPLAF, FMAX, PESO, AERRO, MI)

' Mostrando os deslocamentos na tela

IF NSIN = 0 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(22); " NSIN = "; NSIN; " ( 0 maximo NAO foi atingido )"
ELSE
PRINT TAB(10); CHR$(22); " NSIN = "; NSIN; " ( 0 maximo foi atingido )"
END IF

PRINT : CALL siregiao(NPLAF, NPLA, OP)

IF OP = 1 THEN
ELSE
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Deslocamento fim faixa elastica....( mm ) = ";
PRINT USING "#####.####"; ZE
IF OP = 2 THEN
ELSE
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Deslocamento inicio faixa plastica.( mm ) = ";
PRINT USING "#####.####"; ZP
END IF
END IF

IF NSIN = 1 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Deslocamento maximo.....( mm ) = ";
PRINT USING "#####.####"; ZMAX: PRINT
ELSE
END IF

IF NSIN = 1 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Tempo correspondente desl. maximo...( s ) = ";
PRINT USING "#####.####"; TMAX
ELSE
END IF

PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Duracao do carregamento.....( s ) = ";
PRINT USING "#####.####"; TTMAX: PRINT

```

```

IF OP = 2 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Fator de utilidade maximo especificado.. = ";
PRINT USING "    ###"; MI
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Fator de utilidade calculado...(ZMAX/ZE) = ";
PRINT USING "    ###"; ZMAX / ZE
  IF ZMAX / ZE > MI THEN
    PRINT "--> ATENCAO : Foi ultrapassado o fator de utilidade maximo especificado <--"
  END IF
END IF

IF OP = 3 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Fator de utilidade maximo especificado.. = ";
PRINT USING "    ###"; MI
PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Fator de utilidade calculado...(ZMAX/ZEQ) = ";
PRINT USING "    ###"; ZMAX / ZEQ
  IF ZMAX / ZEQ > MI THEN
    PRINT TAB(10); "ATENCAO : Foi ultrapassado o fator de utilidade maximo especificado"
  END IF
END IF

PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Relacao (FMAX/PESO).....( % ) = ";
PRINT USING "#####.###"; (FMAX / PESO) * 100

PRINT TAB(10); CHR$(16); CHR$(16); "Erro absoluto maximo calculo/deslocamento = ";
PRINT USING "    ###.###"; AERRO: CALL detalvi(y$)

END SUB

SUB detalvi (y$) ' Detalhe no video - separacao por meio de linha

  PRINT : PRINT STRING$(80, "-"): PRINT

END SUB

SUB disfunex (NP, F(), TTMAX, AINT#, TA(), FA(), NFT) ' Discretizacao da funcao excitadora

  FOR i = 0 TO NP
    F(i) = 0!
  NEXT i

  j = 0: TFRAC = TTMAX / AINT#: TINT = INT(TFRAC)

  IF TINT = TFRAC THEN
    NFIN = TINT + 1
  ELSE
    IF TINT < TFRAC THEN NFIN = TINT + 2: TA(NFT - 1) = NFIN * AINT#
  END IF

  FOR i = 0 TO (NFIN - 1)
    DELT = TA(i + 1) - TA(i): DELP = FA(i + 1) - FA(i)

    DO
      j = j + 1
    
```

```

        IF j > NFIN THEN
        EXIT FOR
        END IF

        TT = AINT# * (j - 1)

        IF TT = TA(i + 1) THEN
        F(j - 1) = FA(i + 1)
        ELSE
        IF TT > TA(i + 1) THEN
        j = j - 1
        ELSE
        F(j - 1) = FA(i) + (DELP / DELT) * (TT - TA(i))
        END IF
        END IF

        LOOP WHILE TT <= TA(i + 1)

    NEXT i

END SUB

SUB excita (NFT, TA(), FA(), TTMAX, T0, Z0, V0)
' Leitura da excitacao dinamica no arquivo 1 e dados iniciais

CALL detalvi(y#): PRINT TAB(18); "Dados da excitacao dinamica fornecida": PRINT

FOR i = 0 TO (NFT - 1)
INPUT #1, TA(i), FA(i) ' ( Unidades : segundo, kN )
FA(i) = FA(i) * 1000
PRINT TAB(20); "TA("; i; ")="; TA(i); TAB(40); " FA("; i; ")="; FA(i)
NEXT i

TTMAX = TA(NFT - 1) - TA(0)

INPUT #1, T0 ' Tempo inicial (T0) ( Unidade : segundo )
INPUT #1, Z0 ' Deslocamento inicial (Z0) ( Unidade : metro )
INPUT #1, V0 ' Velocidade inicial (V0) ( Unidade : metro/segundo )
Z0 = Z0 * 1000: V0 = V0 * 1000

END SUB

SUB excitamax (FMAX, NFT, FA()) ' Maximo da excitacao

FMAX = FA(0)
FOR i = 0 TO (NFT - 1)
IF ABS(FA(i)) >= FMAX THEN FMAX = ABS(FA(i))
NEXT

END SUB

SUB fatorapo (CC(), NOTA, PROPA())

CC(1) = PROPA(NOTA, 2): CC(2) = PROPA(NOTA, 3): CC(3) = PROPA(NOTA, 4)

```

```
SUB gravarq2 (TN, AINT#, F(), ZN1C, VN1C, AN1, M, KLM, RN1, i) 'Gravacao de dados em arquivo
```

```
PP$ = "#####.### " : RR$ = "#####.#### "
```

```
PRINT #2, USING RR$: TN; : PRINT #2, USING PP$: F(i + 1) / 1000;
```

```
PRINT #2, USING RR$: ZN1C, VN1C, M * KLM; : PRINT #2, USING PP$: RN1 / 1000
```

```
END SUB
```

```
FUNCTION interpapo (PROPA(), NSA, NSD, NCOL, A, B)
```

```
' Interpolacao de fatores de transformacao para lajes em apoio simples
```

```
V1 = (A / B) - PROPA(NSD, 1): V2 = PROPA(NSA, NCOL) - PROPA(NSD, NCOL)
```

```
V3 = PROPA(NSA, 1) - PROPA(NSD, 1): interpapo = PROPA(NSD, NCOL) + (V1 * V2) / V3
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION interpeng (PROPE(), NSD, NSA, NCOL, A, B)
```

```
' Interpolacao de fatores de transformacao para lajes engastadas
```

```
V1 = (A / B) - PROPE(NSD, 1): V2 = PROPE(NSA, NCOL) - PROPE(NSD, NCOL)
```

```
V3 = PROPE(NSA, 1) - PROPE(NSD, 1): interpeng = PROPE(NSD, NCOL) + (V1 * V2) / V3
```

```
END FUNCTION
```

```
SUB intervapo (NOTA, PROPA(), NSA, NSD, A, B)
```

```
' Verificacao do posicionamento de A/B na Tabela de fatores de transformacao  
' de lajes em apoio simples
```

```
FOR i = 1 TO 6
```

```
IF ((A / B) = PROPA(i, 1)) THEN
```

```
NOTA = i
```

```
EXIT FOR
```

```
END IF
```

```
NEXT
```

```
IF NOTA = 0 THEN
```

```
FOR i = 2 TO 6
```

```
IF ((A / B) > PROPA(i, 1)) THEN
```

```
NSA = i - 1: NSD = NSA + 1
```

```
EXIT FOR
```

```
END IF
```

```
NEXT
```

```
END IF
```

```
END SUB
```

```
SUB interveng (NOTA, PROPE(), NSA, NSD, A, B)
```

```
' Verificacao do posicionamento de A/B na Tabela de fatores de transformacao  
' em lajes engastadas
```

```
FOR i = 1 TO 6
```

```

IF ((A / B) = PROPE(i, 1)) THEN
  NOTA = i
  EXIT FOR
END IF
NEXT

```

```

IF NOTA = 0 THEN
  FOR i = 2 TO 6
    IF ((A / B) > PROPE(i, 1)) THEN
      NSA = i - 1: NSD = NSA + 1
      PRINT "NSA = "; NSA; "          NSD = "; NSD
    END IF
  NEXT
END IF

```

```

END SUB

```

```

SUB leitura (xw(), fw(), NUDAW, nnw) ' Leitura para geracao de graficos

```

```

  FOR i = 1 TO NUDAW: INPUT #nnw, xw(i), fw(i): NEXT i: CLOSE #nnw

```

```

END SUB

```

```

SUB local (jjw, FMAXW, FMINW, NOMEAR$, NJU, XMINW, XMAXW)

```

```

  IF NJU = 1 THEN

```

```

    IF jjw = 1 THEN

```

```

      LOCATE 1, 2: PRINT "EXCITACAO X TEMPO " + " ("; UCASE$(NOMEAR$); ")"

```

```

      LOCATE 2, 2: PRINT "Pmax = "; FMAXW; " kN": LOCATE 3, 2: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"

```

```

    END IF

```

```

    IF jjw = 2 THEN

```

```

      LOCATE 1, 43: PRINT "RESISTENCIA X DESLOC." + " (respres.prn)"

```

```

      LOCATE 2, 43: PRINT "Rmax = "; FMAXW; " kN": LOCATE 3, 43: PRINT "Dmax = "; XMAXW; " mm"

```

```

    END IF

```

```

    IF jjw = 3 THEN

```

```

      LOCATE 14, 2: PRINT "DESLOCAMENTO X TEMPO " + " (respdes.prn)"

```

```

      LOCATE 15, 2: PRINT "Dmax = "; FMAXW; " mm": LOCATE 16, 2: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"

```

```

    END IF

```

```

    IF jjw = 4 THEN

```

```

      LOCATE 14, 43: PRINT "VELOCIDADE X TEMPO " + " (respvel.prn)"

```

```

      LOCATE 15, 43: PRINT "Vmax = "; FMAXW; " mm/s": LOCATE 16, 43: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"

```

```

    END IF

```

```

  ELSE

```

```

    IF jjw = 1 THEN

```

```

      LOCATE 1, 2: PRINT "ACELERACAO X TEMPO " + " (respace.prn)"

```

```

      LOCATE 2, 2: PRINT "Anax = "; FMAXW; " g": LOCATE 3, 2: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"

```

```

    END IF

```

```

IF jjw = 2 THEN
LOCATE 1, 43: PRINT "REACAO VA X TEMPO " + " (resprea.prn)"
LOCATE 2, 43: PRINT "Vmax = "; FMAXW; " kN/m": LOCATE 3, 43: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"
END IF

IF jjw = 3 THEN
LOCATE 14, 2: PRINT "RESISTENCIA X TEMPO " + " (respret.prn)"
LOCATE 15, 2: PRINT "Rmax = "; FMAXW; " kN": LOCATE 16, 2: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"
END IF

IF jjw = 4 THEN
LOCATE 14, 43: PRINT "REACAO VB X TEMPO " + " (respreb.prn)"
LOCATE 15, 43: PRINT "Vbmax = "; FMAXW; " kN/m": LOCATE 16, 43: PRINT "tsup = "; XMAXW; " s"
END IF

END IF

END SUB

SUB maximo (xw(), fw(), FMINW, FMAXW, XINFW, XSUPW, NUDAW, XMINW, XMAXW)

'Obtencao de pontos de maximo e de minimo

FMAXW = fw(1): FMINW = fw(1): XMAXW = xw(NUDAW): XMINW = xw(1)

FOR i = 1 TO NUDAW
YW = fw(i)
IF FMAXW >= YW THEN ELSE FMAXW = YW: XMAXW = xw(i)
IF FMINW < YW THEN ELSE FMINW = YW: XMINW = xw(i)
NEXT

FOR i = 1 TO NUDAW
XXW = xw(i)
IF XMAXW >= XXW THEN ELSE XMAXW = XXW
IF XMINW < XXW THEN ELSE XMINW = XXW
NEXT

XSUPW = XMAXW: XINFW = XMINW

END SUB

SUB maximos (TEMP(), RES(), VEL(), AC(), RA(), RB(), JJ, RMAX, VELMAX, ACMAX, RAMAX,
RBMAX, TRMAX, TVMAX, TAMAX, TRAMAX, TRBMAX, OPAN)

'Obtencao de maximos

IF OPAN = 2 THEN
RAMAX = RA(1): RBMAX = RB(1): TRAMAX = TEMP(1): TRBMAX = TEMP(1)

IRAMAX = 1: IRBMAX = 1
END IF

RMAX = ABS(RES(1)): VELMAX = ABS(VEL(1)): ACMAX = ABS(AC(1))
IRMAX = 1: IVMAX = 1: IAMAX = 1

```

```

TRMAX = TEMP(1): TVMAX = TEMP(1): TAMAX = TEMP(1)

FOR i = 1 TO JJ - 1
  IF ABS(RES(i)) > RMAX THEN RMAX = ABS(RES(i)): IRMAX = i
  IF ABS(VEL(i)) > VELMAX THEN VELMAX = ABS(VEL(i)): IVMAX = i
  IF ABS(AC(i)) > ACMAX THEN ACMAX = ABS(AC(i)): IAMAX = i
  IF OPAN = 2 THEN
    IF ABS(RA(i)) > RAMAX THEN RAMAX = ABS(RA(i)): IRAMAX = i
    IF ABS(RB(i)) > RBMAX THEN RBMAX = ABS(RB(i)): IRBMAX = i
  END IF
NEXT

IF OPAN = 2 THEN
  RAMAX = RA(IRAMAX): RBMAX = RB(IRBMAX)
  TRMAX = TEMP(IRAMAX): TRBMAX = TEMP(IRBMAX)
END IF

RMAX = RES(IRMAX): VELMAX = VEL(IVMAX): ACMAX = AC(IAMAX)
TRMAX = TEMP(IRMAX): TVMAX = TEMP(IVMAX): TAMAX = TEMP(IAMAX)

END SUB

SUB menorint (TEMAX, TA(), NFT) 'Procura do menor intervalo / pico

  DIM DIF(NFT): TEMAX = TA(1) - TA(0)

  FOR i = 0 TO (NFT - 2)
    DIF(i) = TA(i + 1) - TA(i)
    IF DIF(i) <= TEMAX AND DIF(i) <> 0 THEN TEMAX = DIF(i)
  NEXT

  PRINT : PRINT TAB(15); "Menor intervalo caracterizacao da funcao = "; TEMAX

END SUB

SUB numerondf (NNI, NFF, NDF, AINT#, TTMAX) 'Numero de pontos para analise

  NNI = TTMAX / AINT#: NNF = INT(NNI)
  IF NNF = NNI THEN
    NDF = NNF
  ELSE
    IF NNF < NNI THEN NDF = NNF + 1
  END IF

END SUB

SUB opanan (OP, ASSU$, NOMEAR$, NTIP, ANA$, OPAN)

  ' Entrada de assunto e do tipo de opcao de analise

  INPUT #1, ASSU$
  PRINT #3, ASSU$: PRINT #3, "Deslocamento X tempo"
  PRINT #4, ASSU$: PRINT #4, "Excitacao X tempo"
  PRINT #5, ASSU$: PRINT #5, "Resistencia X deslocamento"

```



```

PRINT #6, ASSU$: PRINT #6, "Velocidade X tempo"

PRINT #10, ASSU$: PRINT #10, "Aceleracao X tempo"
PRINT #8, ASSU$: PRINT #8, "Reacao VA X tempo"
PRINT #9, ASSU$: PRINT #9, "Reacao VB X tempo"
PRINT #7, ASSU$: PRINT #7, "Resistencia X tempo"

INPUT "          Pressione ENTER para continuar "; AVV$: CLS

INPUT #1, OPAN '(OPAN = 1 Analise de sistema discreto convencional)
              '(OPAN = 2 Analise de laje em concreto armado)
INPUT #1, OP
IF OP < 1 OR OP > 3 THEN NTIP = 1: CALL abandona(NOMEAR$, NTIP)

IF OP = 1 THEN ANA$ = "Resistencia somente com faixa.....ELASTICA"
IF OP = 3 THEN ANA$ = "Resistencia com faixas ELASTICA/ELASTOPLASTICA/PLASTICA"
IF OP = 2 THEN ANA$ = "Resistencia com faixas .....ELASTICA/PLASTICA"

END SUB

SUB periodo (AFREA, K1, M, AFRE, pi, PERI, OP, AFREA2, AFRE2, K2, KLM1, KLM2, PERI2)

'Obtencao do(s) periodo(s) do sistema

AFREA = SQR(K1 / (M * KLM1)): AFRE = AFREA / (2 * pi): PERI = 1 / AFRE

IF OP = 3 THEN
AFREA2 = SQR(K2 / (M * KLM2)): AFRE2 = AFREA2 / (2 * pi): PERI2 = 1 / AFRE2
END IF

END SUB

SUB pontimp (OP, NPLA, ZMAX, ZE, ZP, TMAX, TTMAX, ZRO, NPLAF, NP, JJ, JJA, NSIN, FMAX,
PESO, AERRO, ZEQ, MI)

'Numero de pontos para impressao

JJB = JJ

CALL destela(OP, NPLA, NSIN, ZMAX, ZE, ZP, ZEQ, TMAX, TTMAX, NPLAF, FMAX, PESO, AERRO, MI): JJA = JJ

IF NSIN = 0 THEN
PRINT TAB(10); "Nao foi atingido o maximo da funcao no intervalo especificado"
CALL detalvi(y$)
END IF

PRINT TAB(25); "NP = "; NP, "          JJ = "; JJB: PRINT

DO

PRINT TAB(10); "Entre com o numero de pontos para impressao ( <= "; JJB; " ) =";
INPUT JJ

LOOP WHILE JJ <= 2 OR JJ > JJA

```

```

CALL detalvi(y#): PRINT #3, JJ - 1: PRINT #4, JJ - 1: PRINT #5, JJ - 1: PRINT #6, JJ - 1
PRINT #7, JJ - 1: PRINT #8, JJ - 1: PRINT #9, JJ - 1: PRINT #10, JJ - 1

CALL destela(OP, NPLA, NSIN, ZMAX, ZE, ZP, ZEQ, TMAX, TTMAX, NPLAF, FMAX, PESO, AERRO, MI)

END SUB

SUB propapo (PROPA()) ' Tabela de fatores de transformacao para lajes em apoio simples

PROPA(1,1) = 1!: PROPA(1,2) = .45: PROPA(1,3) = .31: PROPA(1,4) = .68: PROPA(1,5) = 12!
PROPA(1,6) = 271!
PROPA(1,7) = .07: PROPA(1, 8) = .18: PROPA(1, 9) = .07: PROPA(1, 10) = .18

PROPA(2,1) = .9: PROPA(2,2) = .47: PROPA(2, 3) = .33: PROPA(2, 4) = .7: PROPA(2, 5) = 11!
PROPA(2,6) = 248!
PROPA(2,7) = .06: PROPA(2, 8) = .16: PROPA(2, 9) = .08: PROPA(2, 10) = .2

PROPA(3,1) = .8: PROPA(3,2) = .49: PROPA(3,3) = .35: PROPA(3, 4) = .71: PROPA(3, 5) = 10.3
PROPA(3,6) = 228!
PROPA(3,7) = .06: PROPA(3, 8) = .14: PROPA(3, 9) = .08: PROPA(3, 10) = .22

PROPA(4,1) = .7: PROPA(4, 2) = .51: PROPA(4, 3) = .37: PROPA(4, 4) = .73: PROPA(4, 5) = 9.8
PROPA(4,6) = 216!
PROPA(4,7) = .05: PROPA(4, 8) = .13: PROPA(4, 9) = .08: PROPA(4, 10) = .24

PROPA(5,1) = .6: PROPA(5, 2) = .53: PROPA(5, 3) = .39: PROPA(5, 4) = .74: PROPA(5, 5) = 9.3
PROPA(5,6) = 212!
PROPA(5,7) = .04: PROPA(5, 8) = .11: PROPA(5, 9) = .09: PROPA(5, 10) = .26

PROPA(6,1) = .5: PROPA(6, 2) = .55: PROPA(6, 3) = .41: PROPA(6, 4) = .75: PROPA(6, 5) = 9!
PROPA(6,6) = 216!
PROPA(6,7) = .04: PROPA(6, 8) = .09: PROPA(6, 9) = .09: PROPA(6, 10) = .28

PROPA(7,1) = 1!: PROPA(7, 2) = .33: PROPA(7, 3) = .17: PROPA(7, 4) = .51: PROPA(7, 5) = 12!
PROPA(7,6) = 0!
PROPA(7,7) = .09: PROPA(7, 8) = .16: PROPA(7, 9) = .09: PROPA(7, 10) = .16

PROPA(8,1) = .9: PROPA(8, 2) = .35: PROPA(8, 3) = .18: PROPA(8, 4) = .51: PROPA(8, 5) = 11!
PROPA(8,6) = 0!
PROPA(8,7) = .08: PROPA(8, 8) = .15: PROPA(8, 9) = .09: PROPA(8, 10) = .18

PROPA(9,1) = .8: PROPA(9, 2) = .37: PROPA(9, 3) = .2: PROPA(9, 4) = .54: PROPA(9, 5) = 10.3
PROPA(9,6) = 0!
PROPA(9,7) = .07: PROPA(9, 8) = .13: PROPA(9, 9) = .1: PROPA(9, 10) = .2

PROPA(10,1) = .7: PROPA(10,2) = .38: PROPA(10,3) = .22: PROPA(10,4) = .58: PROPA(10,5) = 9.8
PROPA(10,6) = 0!
PROPA(10, 7) = .06: PROPA(10, 8) = .12: PROPA(10, 9) = .1: PROPA(10, 10) = .22

PROPA(11,1) = .6: PROPA(11,2) = .4: PROPA(11,3) = .23: PROPA(11,4) = .58: PROPA(11, 5) = 9.3
PROPA(11,6) = 0!
PROPA(11,7) = .05: PROPA(11, 8) = .1: PROPA(11, 9) = .1: PROPA(11, 10) = .25

```

PROPA(12,1) = .5: PROPA(12,2) = .42: PROPA(12,3) = .25: PROPA(12, 4) = .59: PROPA(12, 5) = 9!
PROPA(12,6) = 0!
PROPA(12,7) = .04: PROPA(12, 8) = .08: PROPA(12, 9) = .11: PROPA(12, 10) = .27

END SUB

SUB propeng (PROPE()) ' Tabela de fatores de transformacao para lajes engastadas

PROPE(1, 1) = 1!: PROPE(1, 2) = .33: PROPE(1, 3) = .21: PROPE(1, 4) = .63: PROPE(1, 5) = 30.2
PROPE(1, 6) = 870!
PROPE(1, 7) = .1: PROPE(1, 8) = .15: PROPE(1, 9) = .1: PROPE(1, 10) = .15

PROPE(2, 1) = .9: PROPE(2, 2) = .34: PROPE(2, 3) = .23: PROPE(2, 4) = .68: PROPE(2, 5) = 27.8
PROPE(2, 6) = 798!
PROPE(2, 7) = .09: PROPE(2, 8) = .14: PROPE(2, 9) = .1: PROPE(2, 10) = .17

PROPE(3, 1) = .8: PROPE(3, 2) = .36: PROPE(3, 3) = .25: PROPE(3, 4) = .69: PROPE(3, 5) = 26!
PROPE(3, 6) = 757!
PROPE(3, 7) = .08: PROPE(3, 8) = .12: PROPE(3, 9) = .11: PROPE(3, 10) = .19

PROPE(4, 1) = .7: PROPE(4, 2) = .38: PROPE(4, 3) = .27: PROPE(4, 4) = .71: PROPE(4, 5) = 26!
PROPE(4, 6) = 744!
PROPE(4, 7) = .07: PROPE(4, 8) = .11: PROPE(4, 9) = .11: PROPE(4, 10) = .21

PROPE(5, 1) = .6: PROPE(5, 2) = .41: PROPE(5, 3) = .29: PROPE(5, 4) = .71: PROPE(5, 5) = 26.4
PROPE(5, 6) = 778!
PROPE(5, 7) = .06: PROPE(5, 8) = .09: PROPE(5, 9) = .12: PROPE(5, 10) = .23

PROPE(6, 1) = .5: PROPE(6, 2) = .43: PROPE(6, 3) = .31: PROPE(6, 4) = .72: PROPE(6, 5) = 25!
PROPE(6, 6) = 866!
PROPE(6, 7) = .05: PROPE(6, 8) = .08: PROPE(6, 9) = .12: PROPE(6, 10) = .25

PROPE(7, 1) = 1!: PROPE(7, 2) = .46: PROPE(7, 3) = .31: PROPE(7, 4) = .67: PROPE(7, 5) = 12!
PROPE(7, 6) = 271!
PROPE(7, 7) = .07: PROPE(7, 8) = .18: PROPE(7, 9) = .07: PROPE(7, 10) = .18

PROPE(8, 1) = .9: PROPE(8, 2) = .47: PROPE(8, 3) = .33: PROPE(8, 4) = .7: PROPE(8, 5) = 11!
PROPE(8, 6) = 248!
PROPE(8, 7) = .06: PROPE(8, 8) = .16: PROPE(8, 9) = .08: PROPE(8, 10) = .2

PROPE(9, 1) = .8: PROPE(9, 2) = .49: PROPE(9, 3) = .35: PROPE(9, 4) = .71: PROPE(9, 5) = 10.3
PROPE(9, 6) = 228!
PROPE(9, 7) = .06: PROPE(9, 8) = .14: PROPE(9, 9) = .08: PROPE(9, 10) = .22

PROPE(10,1) = .7: PROPE(10,2) = .51: PROPE(10,3) = .37: PROPE(10,4) = .73: PROPE(10, 5) = 9.8
PROPE(10,6) = 216!
PROPE(10,7) = .05: PROPE(10, 8) = .13: PROPE(10, 9) = .08: PROPE(10, 10) = .24

PROPE(11,1) = .6: PROPE(11,2) = .53: PROPE(11,3) = .39: PROPE(11,4) = .74: PROPE(11, 5) = 9.3
PROPE(11,6) = 212!
PROPE(11,7) = .04: PROPE(11, 8) = .11: PROPE(11, 9) = .09: PROPE(11, 10) = .26

PROPE(12,1) = .5: PROPE(12,2) = .55: PROPE(12,3) = .41: PROPE(12, 4) = .75: PROPE(12, 5) = 9!

```

PROPE(12,6) = 216!
PROPE(12,7) = .04: PROPE(12, 8) = .09: PROPE(12, 9) = .09: PROPE(12, 10) = .28

PROPE(13,1) = 1!: PROPE(13,2) = .33: PROPE(13,3) = .17: PROPE(13,4) = .51: PROPE(13, 5) = 12!
PROPE(13,6) = 0!
PROPE(13,7) = .09: PROPE(13, 8) = .16: PROPE(13, 9) = .09: PROPE(13, 10) = .16

PROPE(14,1) = .9: PROPE(14,2) = .35: PROPE(14,3) = .18: PROPE(14,4) = .51: PROPE(14, 5) = 11!
PROPE(14,6) = 0!
PROPE(14,7) = .08: PROPE(14, 8) = .15: PROPE(14, 9) = .09: PROPE(14, 10) = .18

PROPE(15,1) = .8: PROPE(15,2) = .37: PROPE(15,3) = .2: PROPE(15,4) = .54: PROPE(15,5) = 10.3
PROPE(15,6) = 0!
PROPE(15,7) = .07: PROPE(15, 8) = .13: PROPE(15, 9) = .1: PROPE(15, 10) = .2

PROPE(16,1) = .7: PROPE(16,2) = .38: PROPE(16,3) = .22: PROPE(16,4) = .58: PROPE(16,5) = 9.8
PROPE(16,6) = 0!
PROPE(16,7) = .06: PROPE(16, 8) = .12: PROPE(16, 9) = .1: PROPE(16, 10) = .22

PROPE(17,1) = .6: PROPE(17,2) = .4: PROPE(17,3) = .23: PROPE(17, 4) = .58: PROPE(17, 5) = 9.3
PROPE(17,6) = 0!
PROPE(17,7) = .05: PROPE(17, 8) = .1: PROPE(17, 9) = .1: PROPE(17, 10) = .25

PROPE(18,1) = .5: PROPE(18,2) = .42: PROPE(18,3) = .25: PROPE(18, 4) = .59: PROPE(18, 5) = 9!
PROPE(18,6) = 0!
PROPE(18,7) = .04: PROPE(18, 8) = .08: PROPE(18, 9) = .11: PROPE(18, 10) = .27

END SUB

SUB reapoio (NPLA, F(), RB(), RA(), JJ, i, RN1, FVAE1, FVAE2, FVBE1, FVBE2, FVAEP1, FVAEP2,
FVBEP1, FVBEP2, FVAP1, FVAP2, FVBP1, FVBP2)

'Calculo das reacoes de apoio

IF NPLA = 1 THEN
RA(JJ) = FVAE1 * F(i) + FVAE2 * RN1: RB(JJ) = FVBE1 * F(i) + FVBE2 * RN1
ELSEIF NPLA = 2 THEN RA(JJ) = FVAEP1*F(i) + FVAEP2*RN1:RB(JJ) = FVBEP1 * F(i) + FVBEP2*RN1
ELSEIF NPLA = 3 THEN RA(JJ) = FVAP1*F(i) + FVAP2*RN1: RB(JJ) = FVBP1 * F(i) + FVBP2 * RN1
END IF

END SUB

SUB regista (DESL(), RES(), TEMP(), VEL(), AC(), RA(), RB(), F(), JJ, DPAN)

' Registro de deslocamento e resistencia em arquivos - Calculo de maximo

PRINT TAB(15); "----" Aguarde : GRAVACAO DE DADOS EM ARQUIVO <----"
PRINT STRING$(60, "-")

AV$ = "#####.#####"

FOR i = 1 TO JJ - 1

```

```

PRINT #3, USING AV#; TEMP(i), DESL(i): PRINT #4, USING AV#; TEMP(i), F(i) / 1000
PRINT #5, USING AV#; DESL(i), RES(i): PRINT #6, USING AV#; TEMP(i), VEL(i)
PRINT #7, USING AV#; TEMP(i), AC(i)
IF OPAN = 2 THEN
PRINT #8, USING AV#; TEMP(i), RA(i): PRINT #9, USING AV#; TEMP(i), RB(i)
END IF
PRINT #10, USING AV#; TEMP(i), RES(i)

NEXT

END SUB

SUB regismax (TMAX, TN, AINT#, NSIN, FDM, F(), IMAX, i) ' Registro do valor maximo

TMAX = TN: NSIN = 1: FDM = F(i + 1): IMAX = i + 1

END SUB

FUNCTION res1 (K1, ZE, ZP, RM, ZMAX, Z)

'Resistencia no trecho elastoplastico - (NSIN=0 Maximo nao atingido)

R1 = K1 * ZE: res1 = R1 + ((RM - R1) / (ZP - ZE)) * (Z - ZE)

END FUNCTION

FUNCTION resid (K1, ZE, ZP, RM, ZMAX, Z)

'Resistencia no trecho elastoplastico (NSIN=1 Maximo ja' atingido)

resid = -K1 * (ZMAX - Z) + afnr(ZMAX, K1, RM, ZE, ZP)

END FUNCTION

FUNCTION res2d (K1, ZMAX, RM, Z)

'Resistencia no trecho plastico (NSIN=1 Maximo ja atingido)

res2d = RM - K1 * (ZMAX - Z)

END FUNCTION

SUB resisKLM (OP, NPLA, NSIN, KLM, KLM1, KLM2, KLM3, K1, Z, ZE, ZP, ZMAX, RN, RM)

' Obtencao da resistencia

IF NPLA = 1 AND NSIN = 1 THEN
RN = K1 * Z: KLM = KLM1
ELSE '(2)

IF OP = 2 THEN
ELSE '(4)

IF NPLA = 2 AND NSIN = 1 THEN RN = resid(K1,ZE,ZP,RM,ZMAX,Z): KLM = KLM2: EXIT SUB

```

```

END IF '(4)

IF NPLA = 3 AND NSIN = 1 THEN RN = res2d(K1, ZMAX, RM, Z): KLM = KLM3: EXIT SUB
IF ABS(Z) < ABS(ZE) THEN RN = K1 * Z: KLM = KLM1: EXIT SUB

IF OP = 2 THEN
ELSE '(6)
IF ABS(Z)>=ABS(ZE) AND ABS(Z)<ABS(ZP) THEN NPLA=2:RN=res1(K1,ZE,ZP,RM,ZMAX,Z):KLM=KLM2:EXIT SUB
END IF '(6)

RN = RM: NPLA = 3: KLM = KLM3

END IF '(2)

END SUB

SUB selal (iw, nnw, XEW, YEW, XDW, YDW, AW$, NPXW, NPYW, NJU)

IF NJU = 1 THEN

IF iw = 1 THEN nnw = 4: IF iw = 2 THEN nnw = 5
IF iw = 3 THEN nnw = 3: IF iw = 4 THEN nnw = 6

IF iw = 1 THEN XEW = 2: YEW = 25: XDW = 308: YDW = 95: AW$ = "respexc.prn"
IF iw = 2 THEN XEW = 331: YEW = 25: XDW = 637: YDW = 95: AW$ = "respres.prn"
IF iw = 3 THEN XEW = 2: YEW = 130: XDW = 308: YDW = 199: AW$ = "respdes.prn"
IF iw = 4 THEN XEW = 331: YEW = 130: XDW = 637: YDW = 199: AW$ = "respvel.prn"

ELSE

IF iw = 1 THEN nnw = 10: IF iw = 2 THEN nnw = 8
IF iw = 3 THEN nnw = 7: IF iw = 4 THEN nnw = 9

IF iw = 1 THEN XEW = 2: YEW = 25: XDW = 308: YDW = 95: AW$ = "respres.prn"
IF iw = 2 THEN XEW = 331: YEW = 25: XDW = 637: YDW = 95: AW$ = "respres.prn"
IF iw = 3 THEN XEW = 2: YEW = 130: XDW = 308: YDW = 199: AW$ = "respres.prn"
IF iw = 4 THEN XEW = 331: YEW = 130: XDW = 637: YDW = 199: AW$ = "respres.prn"

END IF

NPXW = (XDW - XEW) + 1: NPYW = (YDW - YEW) + 1

END SUB

SUB selintem (TSUP, TEMAX, TTMAX, AINT#, NNI, NNF, NDF, MR, NP)

'Selecao do incremento de tempo

TSUP = TEMAX / 10: CALL detalvi(y$)

PRINT TAB(10); "Tempo de duracao do carregamento (TTMAX)..... = "; TTMAX: PRINT
PRINT TAB(10); "Incremento de tempo limite (TEMAX/10)..... = ";
PRINT USING "####.####"; TSUP: PRINT

```

```

DO
PRINT TAB(10); "Incremento de tempo desejado ( 0 < AINT < TMAX/10) = ";
INPUT AINT#
LOOP WHILE AINT# <= 0! OR AINT# >= TMAX / 10

CALL numerondf(NNI, NNF, NDF, AINT#, TTMAX)

PRINT : PRINT TAB(23); "TTMAX / AINT = "; NNI: CALL detalvi(y$)
PRINT TAB(5); "Numero de pontos correspondentes a duracao da excitacao (NDF) = "; NDF
PRINT

DO
PRINT TAB(5); "Numero multiplo de (NDF) para obtencao da resposta"
PRINT TAB(5); "dinamica do sistema .....( MR >= 1 ) = ";
INPUT MR
LOOP WHILE MR < 1

NP = MR * NDF: PRINT
PRINT TAB(5); "Numero de pontos previstos para avaliacao da resposta (NP)... = "; NP
CALL detalvi(y$)

END SUB

SUB siregiao (NPLAF, NPLA, OP) ' Sinal da regioao

NPLAF = NPLA

IF OP <> 1 THEN
IF NPLAF = 1 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(22); " NPLA = "; NPLAF; " ( Atingida somente a faixa ELASTICA )"
END IF

IF NPLAF = 2 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(22); " NPLA = "; NPLAF; " ( Atingida a faixa ELASTOPLASTICA )"
END IF

IF NPLAF = 3 THEN
PRINT TAB(10); CHR$(22); " NPLA = "; NPLAF; " ( Atingida a faixa PLASTICA )"
END IF

PRINT
END IF

END SUB

SUB zerar1 (PROPA(), PROPE(), CC(), FTE(), FTEP(), FTP())

FOR i = 1 TO 12: FOR j = 1 TO 10: PROPA(i, j) = 0!: NEXT: NEXT
FOR i = 1 TO 18: FOR j = 1 TO 10: PROPE(i, j) = 0!: NEXT: NEXT
FOR i = 1 TO 10: CC(i) = 0!: FTE(i) = 0!: FTEP(i) = 0!: FTP(i) = 0!: NEXT

END SUB

SUB zerar2 (F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), RA(), RB(), NP)

```

```
FOR i = 0 TO NP
F(i) = 0!: TEMP(i) = 0!: DESL(i) = 0!: VEL(i) = 0!: AC(i) = 0!
RES(i) = 0!: RA(i) = 0!: RB(i) = 0!
NEXT
```

```
END SUB
```

```
SUB zerar3 (F(), TEMP(), DESL(), VEL(), AC(), RES(), NP)
```

```
FOR i = 0 TO NP
F(i) = 0!: TEMP(i) = 0!: DESL(i) = 0!: VEL(i) = 0!: AC(i) = 0!: RES(i) = 0!:
NEXT
```

```
END SUB
```

```
SUB zeros (xw(), fw(), NUDAW)
```

```
FOR kw = 1 TO NUDAW: xw(kw) = 0: fw(kw) = 0: NEXT kw
```

```
END SUB
```


A N E X O I I

LISTAGENS DOS RESULTADOS DOS EXEMPLOS
PROCESSADOS COM O PROGRAMA RESPOND.BAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PROGRAMA (RESPOND.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADAO SOB
ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

Assunto : LAJE EM APOIO SIMPLES / MAXIMO NA FAIXA ELASTICA
Arquivo de dados : RAPDE.DAT

Belo Horizonte 06-15-1991

Analise nao-linear ELASTICA - PLASTICA

OPAN = 2 OP = 2

Dados iniciais

Geometria e peso da laje :

Largura da laje (A).....(m) = 3.25
Comprimento da laje (B).....(m) = 3.25
Relacao (A/B)..... = 1
Altura efetiva (D).....(cm) = 14.1
Altura total da laje (H).....(cm) = 16
Distancia do CG da armadura....(cm) = 1.9
Peso especifico do concreto.(kN/m³) = 25
Peso total da laje (PESO).....(kN) = 42.25
Massa total da laje (M)..(kN.s²/m) = 4.311224

Propriedades dos materiais :

Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = 500
Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = 21
Modulo de elasticidade do concreto armado (E)(MPa) = 20594.7

Funcao de resistencia :

Deslocamento elastico maximo permitido (ZE)...(mm) = 14.09334
Constante de mola (K1).....(kN/m) = 83058.61
Resistencia plastica (RM).....(kN) = 1170.573

Fatores de correcao da massa (KLME) = .68
(KLMEP) = 0
(KLMP) = .51

Deslocamento inicial (Z0).....(mm) = 0
 Velocidade inicial (V0).....(m/s) = 0

 Dados do carregamento

Tempo (s)	Forca excitadora (kN)
0.0000	1000.000
0.0106	0.000

 Dados adicionais

Trecho ELASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 168.32071
 Frequencia(Hz) = 26.78907
 Período (TN).....(s) = 0.03733

Duracao do carregamento (T).....(s) = 0.01060
 Forca maxima (P_{MAX}).....(kN) = 1000.00
 Resistencia (R1).....(kN) = 1170.57
 Resistencia (R_M).....(kN) = 1170.57
 Relacao (P_{MAX}/R_M).....(%) = 85.42822
 Relacao (P_{MAX}/P_{ESQ}).....(%) = 2366.86401
 Relacao (duracao/período T/TN)..... = 0.28396

Incremento de tempo limite (T_{EMAX}/10)....(s) = 0.0010600
 Incremento de tempo adotado (A_{INT}).....(s) = 0.0001000
 Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento = 0.001

 Resultados finais

Tempo (s)	Forca (kN)	Desl (mm)	Veloc (mm/s)	Massa (kN.s2/m)	Resist (kN)
0.0000	1000.000	0.0000	0.0000	2.9316	0.000
0.0001	981.132	0.0017	33.6256	2.9316	0.140
0.0002	971.698	0.0067	66.9199	2.9316	0.558
0.0118	0.000	9.5220	269.6177	2.9316	790.880
0.0119	0.000	9.5476	242.6039	2.9316	793.007
0.0120	0.000	9.5705	215.5215	2.9316	794.910
0.0121	0.000	9.5907	188.3779	2.9316	796.587
0.0122	0.000	9.6081	161.1810	2.9316	798.039
0.0123	0.000	9.6229	133.9384	2.9316	799.265
0.0124	0.000	9.6349	106.6579	2.9316	800.264
0.0125	0.000	9.6442	79.3472	2.9316	801.036

0.0126	0.000	9.6508	52.0140	2.9316	801.582
0.0127	0.000	9.6546	24.6661	2.9316	801.900
0.0128	0.000	9.6557	-2.6889	2.9316	801.992
0.0129	0.000	9.6541	-30.0430	2.9316	801.856
0.0130	0.000	9.6497	-57.3887	2.9316	801.493
0.0131	0.000	9.6426	-84.7181	2.9316	800.902
0.0132	0.000	9.6328	-112.0235	2.9316	800.085
0.0133	0.000	9.6202	-139.2971	2.9316	799.042
0.0134	0.000	9.6049	-166.5313	2.9316	797.771
0.0135	0.000	9.5869	-193.7183	2.9316	796.275
0.0136	0.000	9.5662	-220.8504	2.9316	794.554
0.0137	0.000	9.5427	-247.9200	2.9316	792.607
0.0209	0.000	1.9727	-1590.9910	2.9316	163.875
0.0210	0.000	1.8133	-1596.3546	2.9316	150.636
0.0211	0.000	1.6535	-1601.2660	2.9316	137.355

 Nao foi ultrapassada a faixa ELASTICA do material

Dados correspondentes ao deslocamento maximo

Deslocamento maximo.....(mm) =	9.66
Forca excitadora.....(KN) =	0.00
Resistencia.....(KN) =	801.99
Tempo de ocorrencia.....(s) =	0.0128000
Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) =	144.36
Reacao de apoio (RB).....(kN/m) =	144.36
Fator de ductilidade calculado.....(ZMAX/ZE) =	0.69
Fator de ductilidade maximo especificado....(MI) =	3.00

Valores maximos	Tempos de ocorrencia (s)	
Velocidade (mm/s)	-1596.355	0.0210
Aceleracao (g)	34.80682	0.0000
Resistencia (kN)	801.9916	0.0128
Reacao RA (kN/m)	144358.5	0.0128
Reacao RB (kN/m)	144358.5	0.0128

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PROGRAMA (RESPOND.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADO SOB
ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

Assunto : LAJE EM APOIO SIMPLES / MAXIMO NA FAIXA PLASTICA
Arquivo de dados : RAPOP.DAT

Belo Horizonte 06-15-1991

Analise nao-linear ELASTICA - PLASTICA

OPAN = 2 DP = 2

Dados iniciais

Geometria e peso da laje :

Largura da laje (A).....(m) = 3.25
Comprimento da laje (B).....(m) = 3.25
Relacao (A/B)..... = 1
Altura efetiva (D).....(cm) = 14.1
Altura total da laje (H).....(cm) = 16
Distancia do CG da armadura....(cm) = 1.9
Peso especifico do concreto.(kN/m³) = 25
Peso total da laje (PESO).....(kN) = 42.25
Massa total da laje (M)..(kN.s²/m) = 4.311224

Propriedades dos materiais :

Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = 500
Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = 21
Modulo de elasticidade do concreto armado (E)(MPa) = 20594.7

Funcao de resistencia :

Deslocamento elastico maximo permitido (ZE)....(mm) = 14.09334
Constante de mola (K1).....(kN/m) = 83058.61
Resistencia plastica (RM).....(kN) = 1170.573

Fatores de correcao da massa (KLME) = .68
(KLMEP) = 0
(KLMP) = .51

Deslocamento inicial (Z0).....(mm) = 0
 Velocidade inicial (V0).....(m/s) = 0

 Dados do carregamento

Tempo (s)	Forca excitadora (kN)
0.0000	2000.000
0.0106	0.000

 Dados adicionais

Trecho ELASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 168.32071
 Frequencia(Hz) = 26.78907
 Período (TN).....(s) = 0.03733

Duracao do carregamento (T).....(s) = 0.01060
 Forca maxima (P_{MAX}).....(kN) = 2000.00
 Resistencia (R1).....(kN) = 1170.57
 Resistencia (R_M).....(kN) = 1170.57
 Relacao (P_{MAX}/R_M).....(%) = 170.85645
 Relacao (P_{MAX}/P_{ESQ}).....(%) = 4733.72803
 Relacao (duracao/período T/TN)..... = 0.28396

Incremento de tempo limite (T_{EMAX}/10)....(s) = 0.0010600
 Incremento de tempo adotado (AINT).....(s) = 0.0001000
 Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento= 0.001

 Resultados finais

Tempo ----- (s)	Forca ----- (kN)	Desl ----- (mm)	Veloc ----- (mm/s)	Massa ----- (kN.s ² /m)	Resist ----- (kN)
0.0000	2000.000	0.0000	0.0000	2.9316	0.000
0.0001	1962.264	0.0034	67.2512	2.9316	0.280
0.0002	1943.396	0.0134	133.8398	2.9316	1.115
0.0116	0.000	18.6360	521.9998	2.1987	1170.573
0.0117	0.000	18.6855	468.7610	2.1987	1170.573
0.0118	0.000	18.7297	415.5223	2.1987	1170.573
0.0119	0.000	18.7686	362.2835	2.1987	1170.573
0.0120	0.000	18.8022	309.0448	2.1987	1170.573
0.0121	0.000	18.8304	255.8060	2.1987	1170.573
0.0122	0.000	18.8534	202.5673	2.1987	1170.573
0.0123	0.000	18.8709	149.3285	2.1987	1170.573

0.0124	0.000	18.8832	96.0898	2.1987	1170.573
0.0125	0.000	18.8902	42.8510	2.1987	1170.573
0.0126	0.000	18.8918	-10.3877	2.1987	1170.573
0.0127	0.000	18.8881	-63.6195	2.1987	1170.266
0.0128	0.000	18.8791	-116.8272	2.1987	1169.516
0.0129	0.000	18.8647	-169.9908	2.1987	1168.325
0.0130	0.000	18.8451	-223.0902	2.1987	1166.693
0.0131	0.000	18.8201	-276.1053	2.1987	1164.620
0.0132	0.000	18.7899	-329.0161	2.1987	1162.107
0.0133	0.000	18.7543	-381.8027	2.1987	1159.155
0.0134	0.000	18.7135	-434.4450	2.1987	1155.765
0.0135	0.000	18.6674	-486.9232	2.1987	1151.938
0.0204	0.000	5.5172	-2735.6133	2.1987	59.709
0.0205	0.000	5.2435	-2737.8115	2.1987	36.973
0.0206	0.000	4.9696	-2738.9756	2.1987	14.224

Foi atingida a faixa PLASTICA do material

Dados correspondentes ao deslocamento maximo

Deslocamento maximo.....(mm) =	18.89
Forca excitadora.....(KN) =	0.00
Resistencia.....(KN) =	1170.57
Tempo de ocorrencia.....(s) =	0.0126000
Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) =	187.29
Reacao de apoio (RB).....(kN/m) =	187.29
Fator de dutilidade calculado.....(ZMAX/ZE) =	1.34
Fator de dutilidade maximo especificado....(MI) =	3.00

Valores maximos	Tempos de ocorrencia (s)
Velocidade (mm/s)	-2738.976 0.0206
Aceleracao (g)	69.61365 0.0000
Resistencia (kN)	1170.573 0.0083
Reacao RA (kN/m)	240380 0.0082
Reacao RB (kN/m)	240380 0.0082

Dados da fase de descarregamento

Deslocamento maximo.....(mm) =	18.89179
Deslocamento inelastico.....(mm) =	4.798445

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PROGRAMA (RESPOD.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADO SOB
ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

Assunto : LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA ELASTICA
Arquivo de dados : RENGE.DAT

Belo Horizonte 06-15-1991

Analise nao-linear ELASTICA - ELASTOPLASTICA - PLASTICA

OPAN = 2 DP = 3

Dados iniciais

Geometria e peso da laje :

Largura da laje (A).....(m) = 3.25
Comprimento da laje (B).....(m) = 3.25
Relacao (A/B)..... = 1
Altura efetiva (D).....(cm) = 15.1
Altura total da laje (H).....(cm) = 17
Distancia do CG da armadura....(cm) = 1.899998
Peso especifico do concreto.(kN/m³) = 25
Peso total da laje (PESO).....(kN) = 44.89063
Massa total da laje (M)..(kN.s²/m) = 4.580676

Propriedades dos materiais :

Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = 500
Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = 21
Modulo de elasticidade do concreto armado (E)(MPa) = 20594.7

Funcao de resistencia :

Resistencia elastica maxima / 1o. trecho.(R1).(kN) = 1689.312
Resistencia plastica (RM).....(kN) = 2685
Deslocamento elastico maximo (ZE)(mm) = 5.158243
Deslocamento elastoplastico maximo (ZP).....(mm) = 14.91858
Deslocamento elastico maximo equivalente (ZEQ)(mm) = 5.158243
Contante de mola / trecho elastico (K1).....(kN/m) = 327497.6
Constante de mola/trecho elastoplastico (K2)..(kN/m) = 102013.6

Constante de mola equivalente (KEQ).....(kN/m) = 0
 Fatores de correcao da massa (KLME) = .63
 (KLMEP) = .67
 (KLMP) = .51
 Deslocamento inicial (ZO).....(mm) = 0
 Velocidade inicial (VO).....(m/s) = 0

 Dados do carregamento

Tempo (s)	Forca excitadora (kN)
0.0000	1000.000
0.0106	0.000

 Dados adicionais

Trecho ELASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 336.87518
 Frequencia(Hz) = 53.61535
 Periodo (TN).....(s) = 0.01865

Trecho ELASTOPLASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 182.31688
 Frequencia(Hz) = 29.01663
 Periodo.....(s) = 0.03446

Duracao do carregamento (T).....(s) = 0.01060
 Forca maxima (PMA).....(kN) = 1000.00
 Resistencia (R1).....(kN) = 1689.31
 Resistencia (RM).....(kN) = 2685.00
 Relacao (PMA/RM).....(%) = 37.24395
 Relacao (PMA/PESO).....(%) = 2227.63672
 Relacao (duracao/periodo T/TN)..... = 0.56832

Incremento de tempo limite (TEMAX/10)....(s) = 0.0010600
 Incremento de tempo adotado (AINT).....(s) = 0.0001000
 Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento= 0.001

 Resultados finais

Tempo ----- (s)	Forca ----- (kN)	Desl ----- (mm)	Veloc ----- (mm/s)	Massa ----- (kN.s ² /m)	Resist ----- (kN)
0.0000	1000.000	0.0000	0.0000	2.8858	0.000
0.0001	981.132	0.0017	34.1521	2.8858	0.560

0.0002	971.698	0.0068	67.9385	2.8858	2.233
0.0067	358.491	3.6726	317.6923	2.8858	1202.783
0.0068	349.057	3.7029	288.1004	2.8858	1212.704
0.0069	339.623	3.7302	257.8548	2.8858	1221.646
0.0070	330.189	3.7545	226.9898	2.8858	1229.587
0.0071	320.755	3.7756	195.5404	2.8858	1236.507
0.0072	311.321	3.7936	163.5422	2.8858	1242.389
0.0073	301.887	3.8083	131.0317	2.8858	1247.214
0.0074	292.453	3.8198	98.0457	2.8858	1250.966
0.0075	283.019	3.8279	64.6215	2.8858	1253.631
0.0076	273.585	3.8327	30.7972	2.8858	1255.194
0.0077	264.151	3.8341	-3.3889	2.8858	1255.644
0.0078	254.717	3.8320	-37.8980	2.8858	1254.969
0.0079	245.283	3.8265	-72.6909	2.8858	1253.158
0.0080	235.849	3.8174	-107.7282	2.8858	1250.205
0.0081	226.415	3.8049	-142.9702	2.8858	1246.100
0.0082	216.981	3.7888	-178.3767	2.8858	1240.839
0.0083	207.547	3.7692	-213.9077	2.8858	1234.415
0.0084	198.113	3.7461	-249.5228	2.8858	1226.827
0.0085	188.679	3.7193	-285.1817	2.8858	1218.071
0.0086	179.245	3.6890	-320.8438	2.8858	1208.147
0.0209	0.000	-1.3081	1178.6667	2.8858	-428.650
0.0210	0.000	-1.1895	1192.8427	2.8858	-389.792
0.0211	0.000	-1.0696	1205.6648	2.8858	-350.491

 Nao foi ultrapassada a faixa ELASTICA do material

Dados correspondentes ao deslocamento maximo

Deslocamento maximo.....(mm) =	3.83
Forca excitadora.....(KN) =	264.15
Resistencia.....(KN) =	1255.64
Tempo de ocorrencia.....(s) =	0.0077000
Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) =	214.76
Reacao de apoio (RB).....(kN/m) =	214.76
Fator de ductilidade calculado.....(ZMAX/ZEQ) =	0.74
Fator de ductilidade maximo especificado....(MI) =	3.00

	Valores maximos	Tempos de ocorrencia (s)
Velocidade (mm/s)	-1258.267	0.0126
Aceleracao (g)	43.25684	0.0173
Resistencia (kN)	1255.644	0.0077
Reacao RA (kN/m)	218495	0.0071
Reacao RB (kN/m)	218495	0.0071

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PROGRAMA (RESPOND.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADO SOB
ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

Assunto : LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA ELASTOPLASTICA
Arquivo de dados : RENGEF.DAT

Belo Horizonte 06-15-1991

Analise nao-linear ELASTICA - ELASTOPLASTICA - PLASTICA

OPAN = 2 OP = 3

Dados iniciais

Geometria e peso da laje :

Largura da laje (A).....(m) = 3.25
Comprimento da laje (B).....(m) = 3.25
Relacao (A/B)..... = 1
Altura efetiva (D).....(cm) = 15.1
Altura total da laje (H).....(cm) = 17
Distancia do CG da armadura....(cm) = 1.899998
Peso especifico do concreto.(kN/m³) = 25
Peso total da laje (PESO).....(kN) = 44.89063
Massa total da laje (M)..(kN.s²/m) = 4.580676

Propriedades dos materiais :

Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = 500
Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = 21
Modulo de elasticidade do concreto armado (E)(MPa) = 20954.7

Funcao de resistencia :

Resistencia elastica maxima / 1o. trecho.(R1).(kN) = 1689.312
Resistencia plastica (RM).....(kN) = 2685
Deslocamento elastico maximo (ZE)(mm) = 5.069625
Deslocamento elastoplastico maximo (ZF).....(mm) = 14.66228
Deslocamento elastico maximo equivalente (ZEQ)(mm) = 5.069625
Contante de mola / trecho elastico (K1).....(kN/mm) = 333222.3
Constante de mola/trecho elastoplastico (K2)..(kN/mm) = 103796.8

Constante de mola equivalente (KEQ).....(kN/m) = 0

Fatores de correcao da massa (KLME) = .63
 (KLMEP) = .67
 (KLMP) = .51

Deslocamento inicial (Z0).....(mm) = 0
 Velocidade inicial (V0).....(m/s) = 0

Dados do carregamento

Tempo (s)	Forca excitadora (kN)
0.0000	2000.000
0.0106	0.000

Dados adicionais

Trecho ELASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 339.80673
 Frequencia(Hz) = 54.08192
 Periodo (TN).....(s) = 0.01849

Trecho ELASTOPLASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 183.90344
 Frequencia(Hz) = 29.26914
 Periodo.....(s) = 0.03417

Duracao do carregamento (T).....(s) = 0.01060
 Forca maxima (P_{MAX}).....(kN) = 2000.00
 Resistencia (R₁).....(kN) = 1689.31
 Resistencia (R_M).....(kN) = 2685.00
 Relacao (P_{MAX}/R_M).....(%) = 74.48790
 Relacao (P_{MAX}/P_{ESD}).....(%) = 4455.27344
 Relacao (duracao/periodo T/TN)..... = 0.57327

Incremento de tempo limite (T_{EMAX}/10)....(s) = 0.0010600
 Incremento de tempo adotado (A_{INT}).....(s) = 0.0001000
 Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento= 0.001

Resultados finais

Tempo (s)	Forca (kN)	Desl (mm)	Veloc (mm/s)	Massa (kN.s ² /m)	Resist (kN)
0.0000	2000.000	0.0000	0.0000	2.8858	0.000
0.0001	1962.264	0.0034	68.3038	2.8858	1.140

0.0002	1943.396	0.0136	135.8750	2.8858	4.544
0.0075	566.038	7.9899	494.4440	3.0691	1992.427
0.0076	547.170	8.0370	447.5805	3.0691	1997.316
0.0077	528.302	8.0794	399.9508	3.0691	2001.715
0.0078	509.434	8.1170	351.5711	3.0691	2005.616
0.0079	490.566	8.1497	302.4578	3.0691	2009.011
0.0080	471.698	8.1774	252.6275	3.0691	2011.893
0.0081	452.830	8.2002	202.0969	3.0691	2014.253
0.0082	433.962	8.2178	150.8833	3.0691	2016.086
0.0083	415.094	8.2303	99.0039	3.0691	2017.383
0.0084	396.226	8.2376	46.4763	3.0691	2018.139
0.0085	377.358	8.2396	-6.6818	3.0691	2018.346
0.0086	358.491	8.2362	-60.4398	3.0691	2017.229
0.0087	339.623	8.2275	-114.7469	3.0691	2014.312
0.0088	320.755	8.2133	-169.5441	3.0691	2009.576
0.0089	301.887	8.1936	-224.7720	3.0691	2003.007
0.0090	283.019	8.1683	-280.3705	3.0691	1994.592
0.0091	264.151	8.1375	-336.2793	3.0691	1984.319
0.0092	245.283	8.1011	-392.4377	3.0691	1972.178
0.0093	226.415	8.0590	-448.7848	3.0691	1958.163
0.0094	207.547	8.0113	-505.2593	3.0691	1942.268
0.0132	0.000	2.6546	-1966.3845	3.0691	157.398
0.0133	0.000	2.4577	-1970.4420	3.0691	91.765
0.0134	0.000	2.2606	-1972.3599	3.0691	26.032

Foi atingida a faixa ELASTOPLASTICA do material

Dados correspondentes ao deslocamento maximo

Deslocamento maximo.....(mm) =	8.24
Forca excitadora.....(KN) =	377.36
Resistencia.....(KN) =	2018.35
Tempo de ocorrencia.....(s) =	0.0085000
Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) =	389.72
Reacao de apoio (RB).....(kN/m) =	389.72
Fator de ductilidade calculado.....(ZMAX/ZEQ) =	1.63
Fator de ductilidade maximo especificado....(MI) =	3.00

	Valores maximos	Tempos de ocorrencia (s)
Velocidade (mm/s)	-1972.36	0.0134
Aceleracao (g)	70.71862	0.0000
Resistencia (kN)	2018.346	0.0085
Reacao RA (kN/m)	400510.8	0.0070
Reacao RB (kN/m)	400510.8	0.0070

Dados da fase de descarregamento

Deslocamento maximo.....(mm) =	8.239601
Deslocamento inelastico.....(mm) =	2.182547

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PROGRAMA (RESPOND.BAS)

ANALISE DINAMICA NAO-LINEAR DE LAJES EM CONCRETO ARMADO SOB
ACAO DE CARGAS IMPULSIVAS PROVENIENTES DE EXPLOSAO

ANALISE VIA SISTEMA EQUIVALENTE, NAO-AMORTECIDO, COM UM SO GRAU DE LIBERDADE

Assunto : LAJE ENGASTADA / MAXIMO NA FAIXA PLASTICA
Arquivo de dados : RENG.DAT

Belo Horizonte 06-15-1991

Análise nao-linear ELASTICA - ELASTOPLASTICA - PLASTICA

OPAN = 2 OP = 3

Dados iniciais

Geometria e peso da laje :

Largura da laje (A).....(m) = 3.25
Comprimento da laje (B).....(m) = 3.25
Relacao (A/B)..... = 1
Altura efetiva (D).....(cm) = 15.1
Altura total da laje (H).....(cm) = 17
Distancia do CG da armadura....(cm) = 1.899998
Peso especifico do concreto.(kN/m³) = 25
Peso total da laje (PESO).....(kN) = 44.89063
Massa total da laje (M)..(kN.s²/m) = 4.580676

Propriedades dos materiais :

Limite de escoamento dinamico do aco (FYDI).....(MPa) = 500
Resistencia caracteristica dinamica do concreto (FCKDI).(MPa) = 21
Modulo de elasticidade do concreto armado (E)(MPa) = 20594.7

Funcao de resistencia :

Resistencia elastica maxima / 1o. trecho.(R1).(kN) = 1689.312
Resistencia plastica (RM).....(kN) = 2685
Deslocamento elastico maximo (ZE)(mm) = 5.158243
Deslocamento elastoplastico maximo (ZP).....(mm) = 14.91858
Deslocamento elastico maximo equivalente (ZEQ){ mm } = 5.158243
Contante de mola / trecho elastico (K1).....(kN/m) = 327497.6
Constante de mola/trecho elastoplastico (K2)..(kN/m) = 102013.6

Constante de mola equivalente (KEQ).....(kN/m) = 0
 Fatores de correcao da massa (KLME) = .63
 (KLMEP) = .67
 (KLMP) = .51
 Deslocamento inicial (Z0).....(mm) = 0
 Velocidade inicial (V0).....(m/s) = 0

 Dados do carregamento

Tempo (s)	Forca excitadora (kN)
0.0000	3400.000
0.0106	0.000

 Dados adicionais

Trecho ELASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 336.87518
 Frequencia(Hz) = 53.61535
 Periodo (TN).....(s) = 0.01865

Trecho ELASTOPLASTICO :

Frequencia angular.....(rad/s) = 182.31688
 Frequencia(Hz) = 29.01663
 Periodo.....(s) = 0.03446

Duracao do carregamento (T).....(s) = 0.01060
 Forca maxima (PMAX).....(kN) = 3400.00
 Resistencia (R1).....(kN) = 1689.31
 Resistencia (RM).....(kN) = 2685.00
 Relacao (PMAX/RM).....(%) = 126.62943
 Relacao (PMAX/PESO).....(%) = 7573.96436
 Relacao (duracao/periodo T/TN)..... = 0.56832

Incremento de tempo limite (TEMAX/10)....(s) = 0.0010600
 Incremento de tempo adotado (AINT).....(s) = 0.0001000
 Erro absoluto maximo no calculo do deslocamento= 0.001

 Resultados finais

Tempo (s)	Forca (kN)	Desl (mm)	Veloc (mm/s)	Massa (kN.s2/m)	Resist (kN)
0.0000	3400.000	0.0000	0.0000	2.8858	0.000
0.0001	3335.849	0.0058	116.1170	2.8858	1.905

0.0002	3303.773	0.0232	230.9910	2.8858	7.592
0.0085	641.509	16.6005	896.1451	2.3361	2685.000
0.0086	609.434	16.6857	807.9858	2.3361	2685.000
0.0087	577.358	16.7621	718.4535	2.3361	2685.000
0.0088	545.283	16.8294	627.5482	2.3361	2685.000
0.0089	513.208	16.8875	535.2699	2.3361	2685.000
0.0090	481.132	16.9364	441.6186	2.3361	2685.000
0.0091	449.056	16.9758	346.5943	2.3361	2685.000
0.0092	416.981	17.0057	250.1969	2.3361	2685.000
0.0093	384.906	17.0258	152.4266	2.3361	2685.000
0.0094	352.830	17.0361	53.2833	2.3361	2685.000
0.0095	320.754	17.0364	-47.2331	2.3361	2685.000
0.0096	288.679	17.0266	-149.0537	2.3361	2681.789
0.0097	256.604	17.0066	-252.0381	2.3361	2675.224
0.0098	224.528	16.9762	-356.0420	2.3361	2665.269
0.0099	192.453	16.9353	-460.9195	2.3361	2651.894
0.0100	160.377	16.8840	-566.5237	2.3361	2635.071
0.0101	128.302	16.8220	-672.7066	2.3361	2614.780
0.0102	96.226	16.7494	-779.3194	2.3361	2591.004
0.0103	64.151	16.6661	-886.2126	2.3361	2563.732
0.0104	32.075	16.5722	-993.2365	2.3361	2532.957
0.0135	0.000	9.4909	-3051.2747	2.3361	214.055
0.0136	0.000	9.1854	-3058.2903	2.3361	113.930
0.0137	0.000	8.8794	-3061.0181	2.3361	13.645

Foi atingida a faixa PLASTICA do material

Dados correspondentes ao deslocamento maximo

Deslocamento maximo.....(mm) =	17.04
Forca excitadora.....(KN) =	320.75
Resistencia.....(KN) =	2685.00
Tempo de ocorrencia.....(s) =	0.0095000
Reacao de apoio.(RA).....(kN/m) =	458.47
Reacao de apoio (RB).....(kN/m) =	458.47
Fator de ductilidade calculado.....(ZMAX/ZE0) =	3.30
Fator de ductilidade maximo especificado....(MI) =	3.00

	Valores maximos	Tempos de ocorrencia (s)
Velocidade (mm/s)	-3061.018	0.0137
Aceleracao (g)	120.2217	0.0000
Resistencia (kN)	2685	0.0073
Reacao RA (kN/m)	556488	0.0072
Reacao RB (kN/m)	556488	0.0072

Dados da fase de descarregamento

Deslocamento maximo.....(mm) =	17.03643
Deslocamento inelastico.....(mm) =	8.837894

A N E X O I I I

ARQUIVOS DE DADOS TÍPICOS PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA
RESPOD.BAS NA ANÁLISE DINÂMICA CONVENCIONAL

Arquivo de dados típico para análise linear convencional

(resistência somente com faixa elástica)

Conteúdo	Denominação (Unidades)	Valores fixos
ASSU\$	Comentário	
OPAN	Opção/tipo de análise	1
OP	Opção/curva de resistência	1
M	Massa (kN.s ² /m)	
K1	Constante de mola (kN/m)	
NFT (> = 2)	Número de pontos da excitação	
TA(0),FA(0) TA(1),FA(1) . . TA(NFT-1),FA(NFT-1)	Tempo X Excitação (s X kN)	
T0	Tempo inicial (s)	
Z0	Deslocamento inicial (m)	
V0	Velocidade inicial (m/s)	

Arquivo de dados típico para análise não-linear convencional

(resistência com faixas elástica / plástica)

Conteúdo	Denominação (Unidades)	Valores fixos
ASSU\$	Comentário	
OPAN	Opção/tipo de análise	1
OP	Opção/curva de resistência	2
M	Massa (kN.s ² /m)	
ZE	Deslocamento elástico máximo (m)	
RM	Resistência plástica (kN)	
MI	Fator de ductilidade	
NFT (> = 2)	Número de pontos da excitação	
TA(0),FA(0) TA(1),FA(1) . . TA(NFT-1),FA(NFT-1)	Tempo X Excitação (s X kN)	
T0	Tempo inicial (s)	
Z0	Deslocamento inicial (m)	
V0	Velocidade inicial (m/s)	

Arquivo de dados típico para análise não-linear convencional

(resistência com faixas elástica / elastoplástica / plástica)

Conteúdo	Denominação (Unidades)	Valores fixos
ASSU\$	Comentário	
OPAN	Opção/tipo de análise	1
OP	Opção/curva de resistência	3
M	Massa (kN.s ² /m)	
ZE	Deslocamento elástico máximo (m)	
R1	Resistência elástica máxima (kN)	
ZP	Deslocamento elastoplástico máximo (m)	
RM	Resistência plástica (kN)	
MI	Fator de ductilidade	
NFT (> = 2)	Número de pontos da excitação	
TA(0),FA(0) TA(1),FA(1) . . TA(NFT-1),FA(NFT-1)	Tempo X Excitação (s X kN)	
T0	Tempo inicial (s)	
Z0	Deslocamento inicial (m)	
V0	Velocidade inicial (m/s)	

ARQUIVOS DE DADOS EXEMPLOS PARA ANÁLISE CONVENCIONAL

Exemplo 1:

ANALISE CONVENCIONAL / FAIXA ELASTICA

1
1
2.810678
115250.5
2
0.0,1000.0
0.0106,0.
0.
0.
0.

Exemplo 2:

ANALISE CONVENCIONAL / FAIXAS ELASTICA/PLASTICA

1
2
2.810768
0.01111953
2036.876
3
2
0.0,2500.0
0.0106,0.
0.
0.
0.

Exemplo 3:

ANALISE CONVENCIONAL / FAIXAS ELASTICA/ELASTOPLASTICA/PLASTICA

1
3
2.810678
0.01111953
1281.532
0.03215982
2036.876
3
2
0.0,2000.0
0.0106,0.
0.
0.
0.