


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

"ESTUDO COMPARATIVO DE RESPOSTAS ESTRUTURAIS ANTES
DA CURA DO CONCRETO DE FÔRMAS METÁLICAS
INCORPORADAS ÀS LAJES"

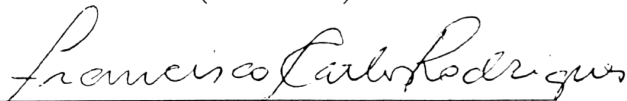
Oswaldo Teixeira Baião Filho

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

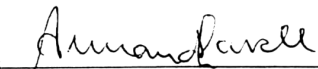
Comissão Examinadora:




Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES-UFMG - (Orientador)



Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES-UFMG



Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall
DEES-UFMG



Prof. Dr. Sebastião Arthur Lopes de Andrade
PUC-RJ

Belo Horizonte, 26 de março de 2003

A minha mãe, Joana d’Arc, ao meu pai, Oswaldo, a
minha esposa, Maria Cristina, e ao meu filho,
Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Gilson Queiroz, pelos sábios ensinamentos que me transmitiu, não só durante a orientação desta dissertação, mas durante toda a minha vida profissional e também pela sua paciência, compreensão e dedicação.

À Faculdade de Engenharia e Arquitetura da FUMEC, pelo incentivo e apoio.

Aos professores do Departamento de Estruturas da EEUFMG, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do Departamento de Estruturas da EEUFMG, pela atenção e solicitude.

Aos amigos, pelo carinho e pela atenção a mim dispensados.

Aos meus pais, minha esposa e meu filho, pelo amor e principalmente pela compreensão nos momentos em que não me fiz presente.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii	
LISTA DE TABELAS.....	ix	
RESUMO.....	x.	
ABSTRACT.....	xi.	
1	INTRODUÇÃO.....	1
	1.1 Conceito de fôrmas metálicas para incorporação às lajes.....	1
	1.2 Vantagens da utilização das lajes com fôrma de aço incorporada.....	3
	1.3 Propriedades do aço da fôrma metálica.....	4
	1.4 Critério de dimensionamento de fôrmas de aço antes da cura do concreto.....	5
2	OBJETIVO E METODOLOGIA.....	7
	2.1 Objetivo.....	7
	2.2 Metodologia.....	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
	3.1 Generalidades.....	10
	3.2 Material.....	12
	3.3 Tolerância.....	13
	3.4 Conformação do perfil.....	14
	3.5 Determinação de propriedades geométricas das fôrmas metálicas	15
	3.6 Tipos principais de fôrmas de aço e suas características básicas...	19
	3.7 Influência da altura final da laje de concreto no comportamento da fôrma antes da cura do concreto.....	22
	3.8 Algumas considerações sobre a influência da altura da fôrma, da distribuição de áreas e da largura de onda no comportamento das fôrmas.....	23
	3.9 Algumas considerações sobre as mossas.....	25
	3.10 Algumas considerações sobre o dimensionamento de fôrmas para incorporação a lajes na fase antes da cura do concreto	27
	3.11 Algumas considerações sobre a utilização, no Brasil, de lajes mistas com fôrma de aço incorporada.....	33
	3.12 Algumas considerações sobre a utilização, em outros países, de lajes mistas com fôrma de aço incorporada.....	34
4	DIMENSIONAMENTO DA FÔRMA METÁLICA – PLANILHA DE CÁLCULO.....	41
	4.1 Considerações iniciais.....	41
	4.2 Características principais do programa	41
	4.3 Considerações sobre as ações atuantes e suas combinações.....	42
	4.3.1 Ações consideradas.....	43
	4.3.2 Combinações de ações consideradas para a verificação dos estados limites últimos.....	43
	4.3.3 Combinações de ações consideradas para a verificação do estado limite de utilização.....	44

4.4	Considerações sobre a geometria das fôrmas.....	44
4.5	O modelo considerado e seus elementos.....	51
4.6	Fluxograma.....	52
4.6.1	Rotina para a determinação da seção efetiva e resistência ao momento fletor conforme NBR 14762 (2001) item 7 e ANEXO C.....	52
4.6.1.1	Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 0/0.....	52
4.6.1.1.1	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção.....	52
4.6.1.1.2	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção.....	55
4.6.1.1.3	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção.....	58
4.6.1.1.4	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção.....	61
4.6.1.2	Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 1/0.....	64
4.6.1.2.1	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção.....	64
4.6.1.2.2	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção.....	67
4.6.1.2.3	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção.....	70
4.6.1.2.4	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção.....	74
4.6.1.3	Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 0/1.....	78
4.6.1.3.1	Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção.....	78

	4.6.1.3.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção.....	82
	4.6.1.3.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção.....	86
	4.6.1.3.4 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção.....	89
	4.6.1.4 Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 1/1.....	92
	4.6.1.4.1 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção.....	92
	4.6.1.4.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção.....	96
	4.6.1.4.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção.....	100
	4.6.2 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência ao momento fletor.....	104
	4.6.3 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência à força cortante.....	105
	4.6.4 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando as resistências às forças concentradas nos apoios.....	106
	4.6.5 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência à combinação do momento fletor com a força cortante.....	109
	4.6.6 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a limitação para a flecha máxima.....	111
	4.7 Resultado final.....	112
5	ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA INFLUÊNCIA DAS MOSSAS.....	112
	5.1 Caracterização do modelo.....	113
	5.2 Análise da influência das mossas na resposta estrutural de um módulo de fôrma semelhante aos estudados no capítulo 7, submetido a uma força de tração.....	113
	5.2.1 Força de tração.....	113
	5.2.2 Resultados da análise da fôrma sujeita à força de tração.....	118
	5.2.3 Análise dos resultados para a fôrma tracionada.....	118

	5.3 Análise da influência das mossas na resposta estrutural de um módulo de fôrma semelhante aos analisados no capítulo 7, submetido a um momento fletor.....	118
	5.3.1 Momento fletor.....	118
	5.3.2 Resultados da análise da fôrma submetida ao momento fletor.....	119
	5.3.3 Análise dos resultados para a fôrma sujeita a momento fletor.....	124
6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	127
	6.1 Modelo de fôrma.....	127
	6.2 Interpretação do resultado da planilha	130
7	COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS FÔRMAS.....	131
	7.1 Tipos de fôrma de aço estudados.....	131
	7.2 Modelos considerados para comparação da eficiência das fôrmas.	132
	7.3 Resultados para o MODELO 1.....	135
	7.4 Resultados para o MODELO 2.....	136
	7.5 Resultados para o MODELO 3.....	137
	7.6 Comparação dos resultados obtidos para o modelo 2.....	137
	7.6.1 Comparação com os valores apresentados em SOUZA NETO (2001).....	138
	7.6.2 Comparação com os valores apresentados em METFORM (2001).....	138
	7.7 Síntese dos resultados das comparações.....	143
8	CONCLUSÕES.....	144
9	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	146
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema para conformação de fôrmas metálicas.....	3
1.2	Fôrma metálica.....	4
3.1	Redistribuição de tensões após a flambagem da chapa.....	17
3.2	Algumas fôrmas de aço disponíveis no mercado europeu (MAASS et al., 2000).....	21
3.3	Ângulo de inclinação das almas das fôrmas de aço.....	21
3.4	Alguns tipos de mossa e algumas de suas possíveis variações nas fôrmas de aço (ASCE, 1992).....	22
4.1	Tipos de geometria básica considerados.....	46
4.2	Fôrma metálica – Tipo 0/0.....	46
4.3	Fôrma metálica – Tipo 0/1.....	47
4.4	Fôrma metálica – Tipo 0/2.....	47
4.5	Fôrma metálica – Tipo 1/0.....	48
4.6	Fôrma metálica – Tipo 1/1.....	48
4.7	Fôrma metálica – Tipo 1/2.....	49
4.8	Fôrma metálica – Tipo 2/0.....	49
4.9	Fôrma metálica – Tipo 2/1.....	50
4.10	Fôrma metálica – Tipo 2/2.....	50
4.11	Modelo básico completo.....	51
5.1	Modelo de fôrma lisa sujeito à força de tração – deslocamentos UZ.....	114
5.2	Modelo de fôrma lisa sujeito à força de tração – tensões equivalentes...	115
5.3	Modelo das mossas.....	116
5.4	Modelo de fôrma com mossas sujeito à força de tração – deslocamentos UZ.....	117
5.5	Modelo de fôrma com mossas sujeito à força de tração – tensões equivalentes.....	118
5.6	Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – deslocamentos UY.....	120
5.7	Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – deslocamentos UZ.....	121
5.8	Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – tensões equivalentes..	122
5.9	Modelo de fôrma com mossas sujeito a momento fletor – deslocamentos UY.....	123
5.10	Modelo de fôrma com mossas sujeito a momento fletor – deslocamentos UZ.....	124
5.11	Modelo de fôrma com mossas sujeito a momento fletor - tensões equivalentes.....	125
6.1	Exemplo de utilização.....	128
6.2	Resultados complementares do exemplo de utilização.....	129
7.1	Fôrma do Modelo 1	132
7.2	Fôrma do Modelo 2	133
7.3	Fôrma do Modelo 3	134
7.4	Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2002) – vão simples	139
7.5	Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2002) – vão	140

	duplo	
7.6	Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2002) – vão simples	141
7.7	Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2002) – vão duplo	142

LISTA DE TABELAS

3.1	Algumas fórmulas propostas para o cálculo da largura efetiva.....	19
7.1	Resultados para o modelo 1.....	135
7.2	Resultados para o modelo 2.....	136
7.3	Resultados para o modelo 3.....	137

RESUMO

As lajes mistas são aquelas em que fôrmas de chapas de aço conformadas a frio e justapostas nas bordas são usadas para suportar o concreto fresco e sobrecargas durante a fase de construção e para atuar como armadura positiva da laje após a cura do concreto. Existe uma grande disparidade entre o mercado nacional e o internacional, quanto à utilização desse sistema construtivo. No mercado nacional da construção civil, apenas alguns tipos de fôrma estão disponíveis e a utilização das lajes mistas ainda se limita a um número reduzido de edificações, se comparado com o volume total de obras no País. Já no mercado internacional, o uso de lajes mistas, em geral, que se apóiam em vigas também mistas, é considerado o sistema de piso mais econômico e eficiente em edifícios de andares múltiplos estruturados em aço, principalmente na América do Norte, na Europa, no Japão e na Austrália, onde o seu uso já tradicional e consolidado vem crescendo continuamente por mais de duas décadas. O conhecimento dos parâmetros que influem no comportamento estrutural das lajes mistas juntamente com um estudo comparativo de alguns modelos podem contribuir ao se desenvolver novos tipos de fôrma de aço para incorporação a lajes a serem fabricadas aqui no Brasil. Os objetivos desta dissertação consistem no estudo teórico dos parâmetros que influenciam no comportamento estrutural de fôrmas de aço antes da cura do concreto e no estudo comparativo de três modelos de fôrmas com base em uma abordagem padronizada de carregamentos e coeficientes de segurança.

Palavras-chave: lajes mistas, fôrmas de aço, aço, concreto.

ABSTRACT

Composite slabs are those in which cold formed steel sheets, fitted in each other at the edges, are used as shuttering, capable of supporting the wet concrete and construction loads, and as a positive reinforcement for the slab after concrete has hardened. There are some means of providing interlocking between the profiled steel sheet and the concrete that result in a composite behavior of the slab as a single structural element. One of the connection means of providing interlocking is the mechanical interlock provided by local deformations in the steel profile called embossments. Concerning the construction market, there is a great difference between the national market, where only a few types of profiled steel sheets for use in composite slabs are available, and the international market, where many kinds of profiled steel sheets and manufactures are available. The use of composite slabs together with composite beams is considered as the most economical and efficient floor system in multistorey steel buildings in USA, Europe, Japan and Australia, where its use has been growing steadily over more than the past twenty years. Knowing the factors and how they affect the behavior of composite slabs, together with a comparative study of some models, may help in developing new kinds of profiled steel sheets to be manufactured in Brazil. The aims of this dissertation are a theoretical study of the factors that affect the structural behavior of profiled steel sheets while acting as a form for the wet concrete during construction and a comparative study of three models subjected to same load conditions and safety coefficients.

Key words: composite slabs, profiled steel sheets, steel, concrete.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Conceito de fôrmas metálicas para incorporação às lajes

Fôrmas metálicas são perfis obtidos por conformação a frio de chapas finas de aço em uma mesa de roletes, onde a fôrma da seção transversal é adquirida gradualmente à medida que a chapa vai passando por diversos roletes adequadamente posicionados. Acoplado à mesa de roletes fica um equipamento que estampa saliências ou ressaltos, comumente chamados de mossas, no perfil da fôrma (FIG. 1.1).

Esses perfis são colocados justapostos nos locais onde serão construídas as lajes, atuando como fôrma para suportar e conter o concreto durante a sua concretagem, antes de sua cura (FIG. 1.2). Após a cura do concreto, a fôrma fica incorporada a ele, constituindo uma laje mista, cuja seção transversal é composta pelo aço da fôrma e pelo concreto.

Considerando a forma da seção transversal do perfil da fôrma, podemos dizer que existem dois tipos básicos de fôrma: a fôrma com seção trapezoidal e a com seção reentrante.

Atualmente a laje de concreto com fôrma de aço incorporada é considerada como um sistema muito adequado para a construção de pisos. Esse tipo de laje já é amplamente

utilizado na América do Norte e na Europa, onde já existem vários tipos de fôrma de aço produzidos por diversos fabricantes.

No mercado brasileiro, ainda existem poucos fabricantes de fôrmas de aço. A necessidade de reduzir custos e de aumentar a rapidez de conclusão das obras está fazendo com que esse sistema de piso seja muito utilizado, e a tendência é aumentar ainda mais.

Já podemos observar como está crescendo a sua utilização na construção de edifícios comerciais, *shopping centers*, hotéis, hospitais, escolas, edifícios-garagem e mezaninos.

A grande diversidade de fôrmas de aço existentes, tanto no que diz respeito ao número de fabricantes quanto ao número de seções diferentes, possibilita-nos dizer que cada fôrma possui um conjunto de características que visa otimizar o seu desempenho na sua fase de construção bem como na sua fase mista.

As poucas informações disponibilizadas pelos fabricantes a respeito de resistência e dos ensaios realizados nas fôrmas são insuficientes para se comparar a eficiência dos diversos tipos de fôrma existentes.

É necessário que se faça um estudo das respostas estruturais, estabelecendo-se parâmetros e critérios de dimensionamento comuns para as diversas fôrmas existentes no mercado, para que se possa comparar a eficiência de fôrmas distintas.



FIGURA 1.1 - Sistema para conformação de fôrmas metálicas

1.2. Vantagens da utilização das lajes com fôrma de aço incorporada

Mediante a combinação das melhores propriedades mecânicas do material da fôrma e do concreto, pode-se obter vantagens, tais como as relacionadas a seguir:

- a) estruturas mais econômicas;
- b) substituição da armadura positiva das lajes pelas fôrmas de aço incorporadas;
- c) eliminação das fôrmas e dos escoramentos usuais da construção civil pelo uso das fôrmas de aço, proporcionando ganho de produtividade e redução do tempo das obras;
- d) elevação do centro de gravidade da área de concreto na seção transversal da viga mista mediante a utilização da fôrma de aço incorporada, obtendo-se maior inércia e resistência da viga;
- e) redução do consumo de concreto, comparando-se com lajes maciças.

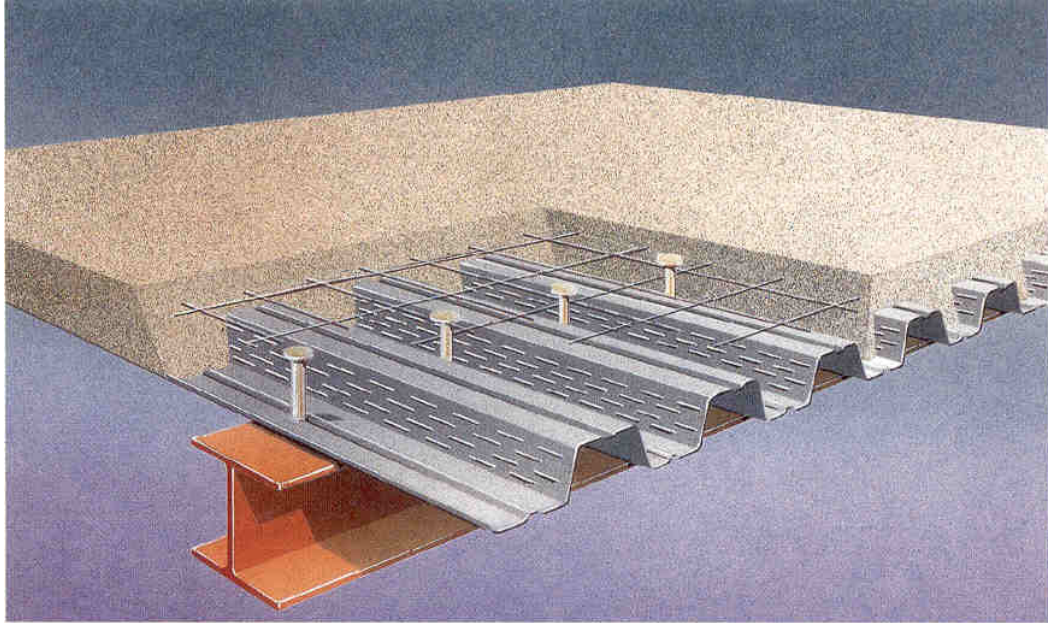


FIGURA 1.2 – Fôrma metálica

1.3 Propriedades do aço da fôrma metálica

Usualmente o aço das fôrmas metálicas tem limite de escoamento da ordem de 280 MPa. Demais propriedades são similares às do aço estrutural, que são as relacionadas a seguir:

O aço estrutural tem de ser soldável e deve ter patamar de escoamento que permita o desenvolvimento de deformações, sujeito a tensão constante. Essas deformação devem ser suficientes para que seja atingida a resistência característica do concreto.

- Resistência última f_u : obtida em ensaio uniaxial;
- Limite de escoamento f_y : obtido em ensaio uniaxial;
- Módulo de elasticidade : $E = 205000 \text{ MPa}$ (NBR 8800);
- Coeficiente de dilatação térmica: $\beta = 1,2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$;
- Densidade: $\rho_a = 7850 \text{ kg} / \text{m}^3$;
- Tensão de escoamento por cisalhamento:

$$f_{vy} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (\text{critério de von Mises})$$

- Coeficiente de Poisson: $\gamma_a = 0,3$

O aço estrutural é mais dúctil do que o aço de armadura, uma vez que tem deformação de ruptura da ordem de 25% a 40% .

1.4 Critério de dimensionamento de fôrmas de aço antes da cura do concreto.

Os critérios atuais para dimensionamento e projeto de estruturas são geralmente baseados no Método dos Estados Limites.

Para que uma estrutura atenda às finalidades para a qual é projetada, é necessário que não sejam atingidos os chamados estados limites. Existem dois tipos de estado limite:

- Estado limite último, que é o relacionado com a segurança da estrutura, ou seja, a sua ocorrência pode implicar colapso total ou de partes da estrutura;
- Estado limite de utilização, que é o relacionado à capacidade da estrutura de atender a critérios associados à sua utilização. Em geral os estados limites de utilização não são associados ao colapso, mas sim ao bem-estar físico e psíquico de pessoas, integridade de material não-estrutural da construção e utilização econômica da estrutura.

A seguir estão relacionados os principais estados limites aplicáveis às fôrmas de aço, na fase de concretagem:

Estados limites últimos

- Colapso devido ao momento fletor positivo;
- Colapso devido ao momento fletor negativo;
- Colapso devido à interação do momento fletor com a força cortante;
- Colapso por esmagamento local na região do apoio;
- Colapso devido à interação do momento fletor com o efeito de cargas concentradas;

- Deformações excessivas que podem causar o efeito de “Ponding” correspondente ao acúmulo exagerado de concreto, o que pode levar a fôrma ao colapso ou, mesmo não havendo colapso, pode-se ter um acréscimo considerável da carga permanente, que deve ser considerado nas situações antes e depois da cura.

Estados limites de utilização

- Deformações excessivas que podem comprometer o desempenho e a estética da construção.

2

OBJETIVO E METODOLOGIA

2.1. Objetivo

O objetivo básico desta dissertação de mestrado é determinar a influência dos fatores que mais afetam as respostas estruturais da fôrma de aço antes da cura do concreto, incluindo um estudo comparativo do comportamento estrutural de três modelos de fôrma, com uma abordagem padronizada de hipóteses de carregamento e coeficientes de segurança.

O conhecimento desses fatores, associado à existência de um *software* que determine as respostas estruturais em função da geometria da seção da fôrma, permite um estudo comparativo de alguns modelos de fôrma existentes e pode orientar no desenvolvimento de novos tipos otimizados de fôrmas de aço, com uma grande relação vão admissível/cargas, a serem fabricados no Brasil.

2.2. Metodologia

O estudo é feito considerando-se o estágio durante a concretagem, antes da cura do concreto; isto é, o concreto suportado pela fôrma metálica. Os principais fatores a serem analisados serão:

- altura da fôrma;
- distância entre nervuras;
- inclinação das paredes laterais das nervuras;
- distribuição de área superior e inferior das partes horizontais;
- enrijecimento dos elementos planos.

Obs.: Utiliza-se um modelo de elementos finitos para determinar a influência das molas nas respostas da fôrma de aço isolada.

A pré-seleção de modelos e parâmetros utilizados nas comparações é listada a seguir:

- Fôrmas metálicas

Foram escolhidas três fôrmas

- Modelo 1 $h = 76 \text{ mm};$
- Modelo 2 $h = 75 \text{ mm};$
- Modelo 3 $h = 59 \text{ mm}.$

- Parâmetros principais com variações dentro de faixas usuais de projeto para uma determinada fôrma:

- Vão (as fôrmas metálicas são calculadas como biapoiadas e como contínuas com dois vãos e com três vãos);
- Altura do concreto acima da fôrma metálica;
- Carga (permanente + sobrecarga) antes da cura do concreto.

A partir de dados relativos às propriedades geométricas da seção transversal típica e de resultados de ensaios fornecidos pelos fabricantes, desenvolve-se um programa de computador que possibilita o cálculo dos seguintes estados limites:

Estados limites últimos

- colapso devido ao momento fletor positivo;
- colapso devido ao momento fletor negativo;
- colapso por esmagamento local na região de apoio;
- colapso por interação do momento fletor com a força cortante.

Nota: O estado limite de colapso devido à interação do momento fletor com o efeito de carga concentrada não foi considerado no programa por não ser previsto na NBR 14762.

Estado limite de utilização

- deformação excessiva.

Os cálculos são realizados segundo a norma brasileira NBR 14762 (2001). Os resultados apresentam, para cada modelo (com espessura variável), o vão permitido para cada condição de carregamento. Indica-se o estado limite predominante em cada caso.

O estudo relativo à fase após a cura do concreto (seção mista) foi desenvolvido por MARTINS (2001).

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Generalidades

As lajes mistas são definidas como um sistema que se compreende em concreto de peso normal ou de baixa densidade, permanentemente colocado sobre uma fôrma de aço conformada a frio, que atua como fôrma durante a construção, suportando as ações permanentes e sobrecargas e, após a cura do concreto, como armadura de tração da laje.

Assim, as fôrmas de aço, escoradas ou não, devem fornecer resistência e rigidez adequadas para suportar o concreto antes da cura e as sobrecargas de construção.

As propriedades da seção e as características de resistência e rigidez são calculadas para essa fase de acordo com a norma brasileira NBR 14762 (2001).

O método de dimensionamento para carregamentos antes da cura do concreto é baseado em princípios elásticos adequados.

Para que a fôrma de aço atue como armadura de tração da laje, é necessário que existam meios de obter uma conexão entre a fôrma de aço e o concreto.

As conexões mecânicas são obtidas geralmente por meio de mossas, que são saliências estampadas na chapa da fôrma. Além disso, a ação mista entre a fôrma de aço e o

concreto pode também ser adquirida por atrito e mediante o emprego de conectores tipo pino com cabeça, ou outro tipo de conector mecânico devidamente aprovado, ancorando a extremidade da fôrma na viga.

Em alguns casos, a fôrma de aço é utilizada somente como tal, não se considerando que haja um comportamento misto, devido à interação do concreto com o aço. Nesse caso, após a cura do concreto, não se conta com a fôrma para a resistência da laje, que deve ser convencionalmente armada para resistir aos carregamentos impostos. Mas em sua grande maioria, as aplicações da fôrma de aço junto com o concreto compõem uma ação mista, com um grande aumento de resistência e muita economia.

Existem casos em que uma fôrma não possui mossa e é indicada para utilização em sistemas mistos, empregando-se outros conectores mecânicos, como, por exemplo, barras de aço soldadas nas superfícies horizontais superiores das fôrmas, conforme ANSI/ASCE 3-91 (1992).

Nesses casos, cada condição de espaçamento dos conectores deve ser tratada separadamente para efeito da determinação de resistência e de testes. O espaçamento entre os conectores mecânicos usualmente é constante ao longo do comprimento da fôrma.

Um método atualmente empregado para verificar a resistência última de lajes com fôrma de aço incorporada é a realização de ensaios de modelos em escala real, que fornecem muitas informações, tais como características de comportamento, modo de ruptura e capacidade de carga. Essas informações são utilizadas na obtenção de constantes que são usadas para o dimensionamento da laje. Atualmente, em alguns países, é muito grande o número de ensaios que já foram feitos em lajes com fôrma de aço incorporada, gerando muitas informações.

Os ensaios em escala real também chamados “full scale test” são muito trabalhosos e caros. Uma maneira de reduzir o custo é a realização de ensaios em modelos de escala reduzida, também chamados “small scale test”. Esses ensaios têm algumas

desvantagens, pois alguns parâmetros não se comportam como no modelo em escala real, reduzindo o número de informações geradas. Mas, mesmo assim, tais ensaios fornecem vários dados que possibilitam ao fabricante ter uma boa noção de como será o comportamento real da laje mista.

Não obstante o grande número de informações existentes, é muito difícil obtê-las, uma vez que cada fabricante trata as informações relativas aos resultados dos ensaios como confidenciais, não as disponibilizando no mercado, tampouco para a comunidade técnico-científica.

O grande número de ensaios já realizados, associados ao grande número de obras construídas com lajes mistas que utilizam fôrmas de aço incorporadas, já consagraram esse tipo de sistema construtivo como muito adequado para os diversos tipos de construção.

A laje com fôrma de aço incorporada é considerada por muitos profissionais e empresas como o sistema mais apropriado de construção de lajes. Nos Estados Unidos, por exemplo, o sistema de laje mista é amplamente utilizado, havendo um alto consumo de aço destinado à construção das fôrmas, conforme CODEME (1997).

No que diz respeito ao uso da fôrma de aço para incorporação a lajes, constata-se uma grande disparidade entre o mercado nacional e o internacional. O mercado nacional dispõe de poucos tipos de fôrma de aço disponíveis; o uso de lajes com fôrmas de aço incorporadas restringe-se a um número reduzido de edificações, se comparado com o volume total de obras no País. Já o mercado internacional dispõe de grande diversidade de fôrmas e fabricantes, atendendo ao processo já bastante consolidado de construção de lajes com fôrmas de aço incorporadas.

3.2. Material

Os tipos comuns de aço estrutural de alta resistência e baixa liga, utilizados na fabricação das fôrmas conformadas a frio, são o ASTM A446 e o ASTM A611. Outros

aços aprovados são indicados na especificação do AISI (1996). A faixa de limites mínimos de escoamento desses aços varia de 230 MPa a 550 MPa.

Cada fabricante de fôrma metálica deve especificar o material que está sendo usado. As propriedades mecânicas do material da fôrma metálica são determinadas de acordo com os requisitos das especificações do AISI ou da norma ASTM pertinente. Muitas fôrmas metálicas são fabricadas de chapas de aço zincadas, podendo ser pintadas ou não posteriormente.

Normalmente as camadas de zinco devem corresponder a uma massa total de 275g/m^2 , incluindo ambos os lados da fôrma para situações onde a face inferior não fica exposta a ambientes agressivos. A especificação, porém, pode variar de acordo com as condições de serviço, conforme EUROCODE 4 (1992).

Algumas fôrmas galvanizadas podem ter tratamento com fosfato na parte superior e ser pintadas no lado inferior. A fôrma deve ficar protegida contra arranhões e estragos na sua superfície antes da sua colocação. Também durante a sua instalação, devem ser tomados cuidados com a sua superfície. Pequenos e poucos arranhões podem ser aceitos para aplicações normais da fôrma onde ela não ficará sujeita a ambiente corrosivo.

Em geral a fôrma precisa ser projetada para durar toda a vida útil da estrutura, uma vez que ela serve de armadura positiva para resistir aos momentos fletores. As espessuras mínimas de chapas são definidas nas especificações de cada projeto; geralmente, a espessura não deve ser inferior a 0,75 mm.

3.3 Tolerância

A espessura nominal é baseada na espessura revestida por galvanização. Entretanto a espessura utilizada no cálculo estrutural é a da chapa do aço. A especificação ANSI/ASCE 3-91 prescreve que a área total da seção transversal da chapa de aço de uma fôrma não deve ser menor que 95% da área utilizada no cálculo.

Nos trechos retos não influenciados pelos efeitos da conformação a frio, a espessura medida não pode ser inferior a 95% da espessura considerada no projeto. A inspeção pode ser feita removendo-se o revestimento, cuidando-se para não remover parte do aço, ou utilizando-se um aparelho eletrônico.

A média da altura das ondas da fôrma não pode ser inferior à altura de projeto subtraída de 1,6 mm e, para cada onda isolada, esse valor não pode ser inferior à altura de projeto subtraída de 3,2 mm.

3.4 Conformação do perfil

Os equipamentos necessários para conformar a fôrma de aço são relativamente bem mais simples que os necessários para laminar ou soldar um perfil. Uma dobradeira com capacidade de conformar perfil com comprimento de seis metros já é suficiente para fabricar pequenas peças, mas, para o caso das fôrmas, é normalmente necessário que se disponha de uma mesa de roletes que permita a fabricação contínua de perfis. Esse método é chamado de perfilagem.

A seção transversal é formada gradualmente quando a tira de chapa de aço vai passando pela série de pares de roletes. A quantidade e a disposição dos roletes dependem da forma da seção final da fôrma que se quer obter. Esse processo é muito vantajoso em virtude de poder permitir uma produção de 600m a 1500m de perfis por hora.

Na dobradeira o processo é bem lento, uma vez que é feita uma dobra de cada vez e o comprimento fica limitado ao tamanho da dobradeira.

As propriedades mecânicas do aço ficam alteradas no local da conformação, ocorrendo um aumento da tensão de escoamento e uma redução de ductilidade. A conformação pode conduzir a três tipos de problema:

- variação na dimensão e na fôrma da seção transversal;
- aparecimento de tensões residuais;

- variação das propriedades f_y e f_v .

3.5 Determinação de propriedades geométricas das fôrmas metálicas

Para a análise estrutural deve ser considerada a espessura da fôrma pura, sem considerar revestimentos.

Para a fase antes da cura, a fôrma metálica é o único elemento capaz de suportar cargas. A consideração mais relevante para o dimensionamento de um elemento estrutural, formado por chapas finas, como é o caso das fôrmas, é a determinação do momento de inércia e do módulo resistente efetivos. Tais propriedades efetivas dependem da largura efetiva dos elementos que compõem a seção. A largura efetiva, por sua vez, depende da relação largura/espessura do elemento, do tipo e da grandeza das tensões de compressão a que esse elemento está sujeito, da efetividade de enrijecedores, e é determinada com base na resistência pós-flambagem local.

O comportamento das chapas esbeltas no regime pós-flambagem é complexo e de análise muito trabalhosa. O método dos elementos finitos pode ser aplicado para esta análise, considerando-se a teoria de grandes deslocamentos.

A determinação de larguras efetivas é feita no Brasil de acordo com o item 7 da NBR 14762, que é dividido em 9 subitens. Para o dimensionamento de fôrmas metálicas, aplicam-se os subitens 7.1, 7.2 (7.2.1, 7.2.2), 7.3, 7.8 (7.8.1, 7.8.1.1, 7.8.2, 7.8.3). Todas as fórmulas principais dessa norma são apresentadas nos fluxogramas do capítulo 4. Uma apresentação dessas fórmulas, com comentários e esclarecimentos, pode ser encontrada em BARROS JÚNIOR (2001).

Nas normas de perfis de chapa fina formados a frio, os elementos são classificados em dois tipos, conforme sua condição de borda. Nos elementos denominados enrijecidos, as duas bordas longitudinais são apoiadas, e, nos elementos denominados não-enrijecidos, uma borda longitudinal é apoiada e a outra é livre.

Considera-se que, antes de ser atingida a tensão crítica de flambagem em uma chapa a distribuição das tensões longitudinais se faz de fôrma uniforme. Assim que a tensão crítica de flambagem é atingida, acontece uma redistribuição não-linear de tensões longitudinais concomitantemente com o aparecimento de deslocamentos perpendiculares ao plano da chapa (flambagem). A tensão crítica é dada por:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (3.1.)$$

Fazendo - se a tensão crítica igual à tensão de escoamento σ_e , obtém - se a largura efetiva b_e :

$$\sigma_{cr}(b_e) = \sigma_e = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_e} \right)^2 \quad (3.2.)$$

A chapa continua a resistir a esforços, mas com rigidez e resistência reduzidas.

Segundo RODRIGUES (1997), a tensão máxima para a chapa flambada de largura (b_e) ocorre quando se atinge a tensão de escoamento, de acordo com a formulação de von Karman. Os esforços aplicados após a flambagem são os que resistiram apenas pelas regiões mais rígidas da chapa (isto é, próximas das bordas enrijecidas), conforme FIG. 3.1.

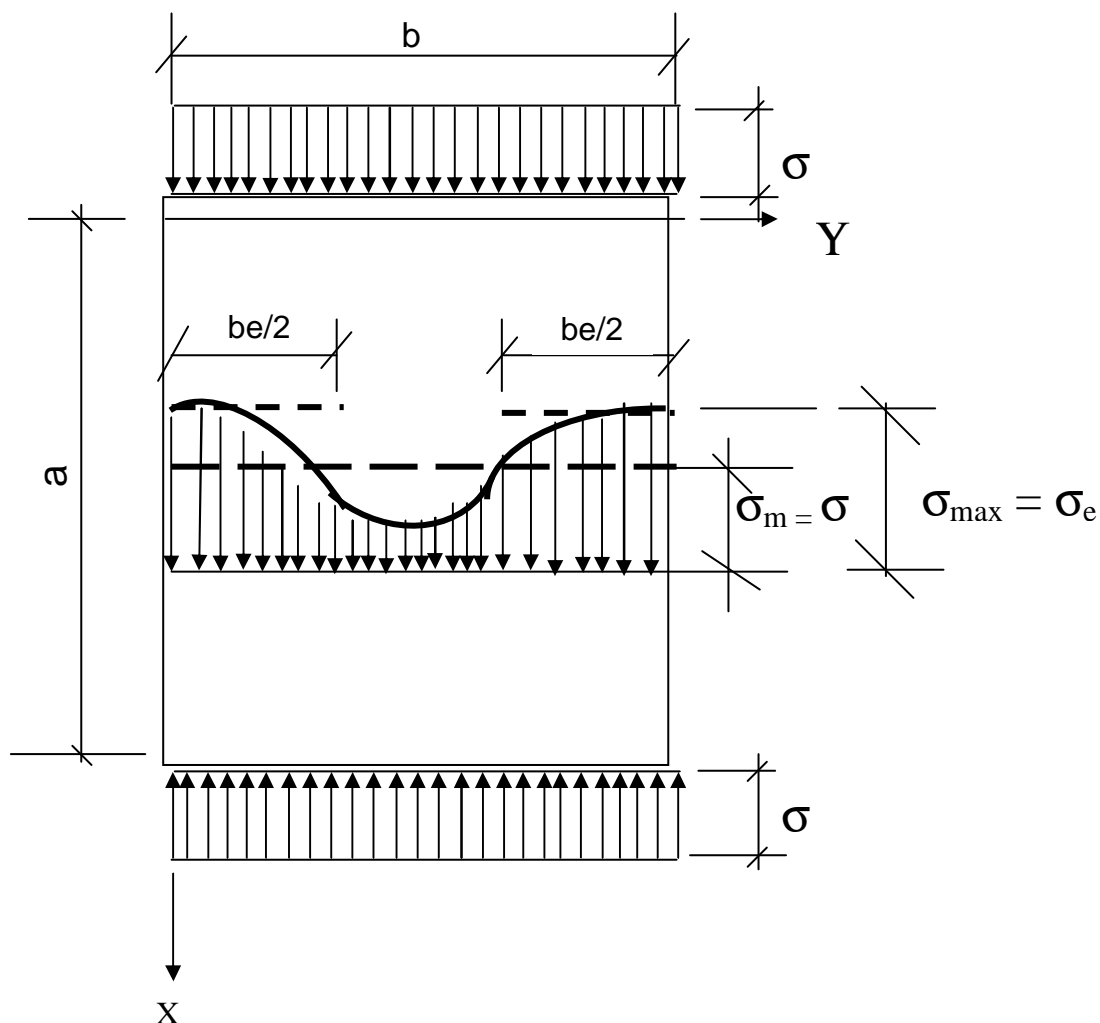


FIGURA 3.1 – Redistribuição de tensões após a flambagem da chapa

No método das larguras efetivas, proposto por von Karman para o estudo de chapas esbeltas em regime pós-crítico, a redução da rigidez da chapa que entrou nesse regime é levada em conta, considerando-se uma redução na largura real da chapa, que passa a ter largura efetiva b_e .

Por definição, a largura efetiva é a largura que, sujeita à tensão máxima (FIG.3.1), produz uma resultante igual à área sob o diagrama não uniforme de tensões.

Considera-se que a chapa atinge seu estado limite crítico quando o valor máximo da tensão na largura efetiva atingir a tensão de escoamento, isto é, quando $\sigma_{cr}(b) = \sigma_e$.

Assim:

A partir da comparação entre as equações (3.1.) e (3.2.), pode-se escrever que:

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}} \quad (3.3.)$$

A partir desta equação, pode-se introduzir o conceito de esbeltez relativa, que é o seguinte:

$$\bar{\lambda}_{pd} = \sqrt{\frac{\sigma_e}{\sigma_{cr}}} \quad (3.4.)$$

Sendo $\bar{\lambda}_{pd}$ a esbeltez relativa da chapa.

Assim, a equação (3.3.) toma nova forma:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{pd}} \quad (3.5.)$$

O conceito de largura efetiva é essencialmente aplicável ao estado limite último. Por estar associado à tensão máxima atuante na chapa, σ_e , esse conceito é também conhecido como “largura efetiva de tensões”.

Para as chapas que são elementos componentes da seção transversal de um perfil conformado a frio, é necessário que se considere ainda uma redução de resistência em relação à análise teórica, para se levar em conta a presença de imperfeições e tensões residuais que aparecem no processo de conformação,

Existem formulações propostas por diversos autores que consideram a influência do processo de conformação na resistência da chapa.

A TAB. 3.1, conforme RODRIGUES (1977), contém algumas formulações e seus respectivos autores.

TABELA 3.1.- Algumas fórmulas propostas para o cálculo da largura efetiva.

Autor ou Especificação	Fórmula $b_e/b =$
BOX (1983)	$0,725 / \bar{\lambda}_p^{-0,5} \leq 1$
CHILVER	$0,724 / \bar{\lambda}_p^{-0,2} \leq 1$
WINTER (1946)	$(1 - 0,22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \leq 1$
GERARD (1957)	$0,824 / \bar{\lambda}_p^{-0,85} \leq 1$
FAULKNER (1965)	$1,05(1 - 0,26 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \leq 1$
ECCS (1986)	$(1 - 0,22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \leq 1$
AISI (1996)	$(1 - 0,22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \leq 1$
EUROCODE 3 (1996)	$(1 - 0,22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \leq 1$

Tanto o AISI/96 quanto o EUROCODE 3 (1993) consideram a formulação de WINTER, conforme TAB. 3.1, para cálculo da largura efetiva de chapas no método dos estados limites.

3.6 Tipos principais de fôrma de aço e suas características básicas

Existem atualmente no mercado internacional diversos tipos de fôrma de aço para incorporação a lajes, como mostrado na FIG. 3.2. (MAASS et al., 2000). Esses diversos tipos podem ser agrupados em duas categorias básicas: as fôrmas trapezoidais e as fôrmas reentrantes, e uma terceira categoria adicional, que é a combinação das duas categorias básicas.

A seguir, relacionam-se as principais características das fôrmas trapezoidais:

- O ângulo θ entre o plano que contém as almas e o plano que contém as mesas inferiores é inferior ou igual a 90° (FIG. 3.3a); na maioria das fôrmas existentes no mercado esse ângulo de inclinação varia de 55° a 90° ;
- As mossas, em geral, ficam localizadas nas almas. Elas variam de um modelo para outro em fôrma, tamanho, profundidade, posicionamento, espaçamento e seqüência ao longo da alma, como mostra a FIG. 3.4.

A seguir, relacionam-se as principais características das fôrmas reentrantes:

- O ângulo θ entre o plano que contém a alma e o plano que contém a mesa inferior é superior a 90° (FIG. 3.3b);
- As mossas, em geral, ficam localizadas na mesa superior da fôrma e variam de um modelo para outro assim como ocorre nas fôrmas trapezoidais;
- Ao interagir com a fôrma de aço, o concreto exerce uma força vertical de cima para baixo nas regiões das mossas, nesse caso localizadas na mesa superior, fazendo com que as almas da fôrma reentrante sejam compelidas contra a laje de concreto, aumentando a ligação por atrito entre os dois materiais, o que melhora a resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista.

Profilblech	Querschnittsform
Holorib 51	
Super Rib 51	
Super Holorib 51	
Haircol 56	
Cofradal 60	
Alphalok	
Ribdeck 60	
Lewis SC 16/63	

FIGURA 3.2. – Algumas fôrmas de aço disponíveis no mercado europeu (MAASS et al, 2000)

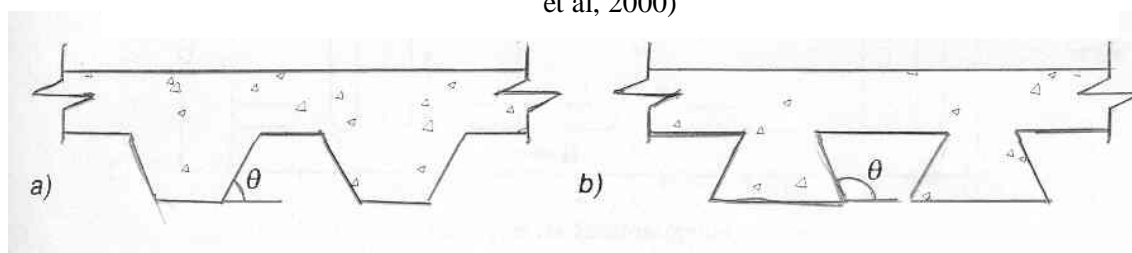
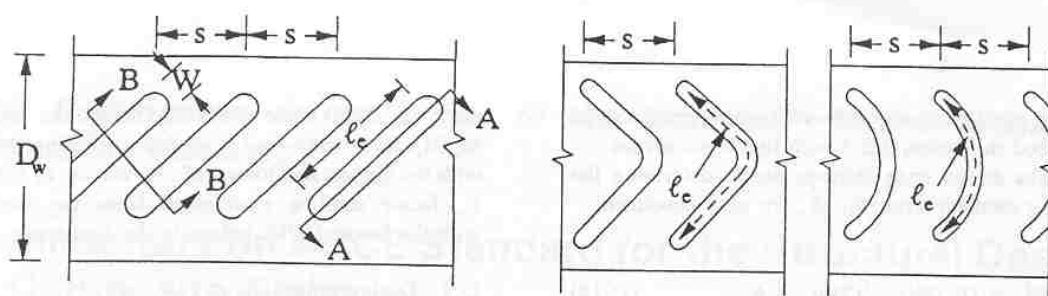
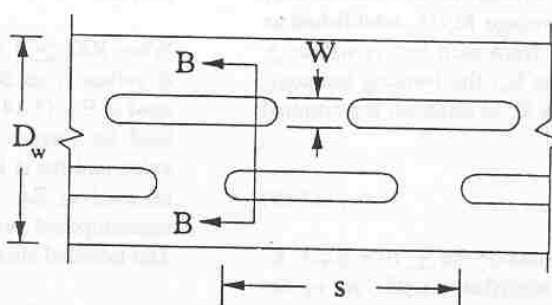


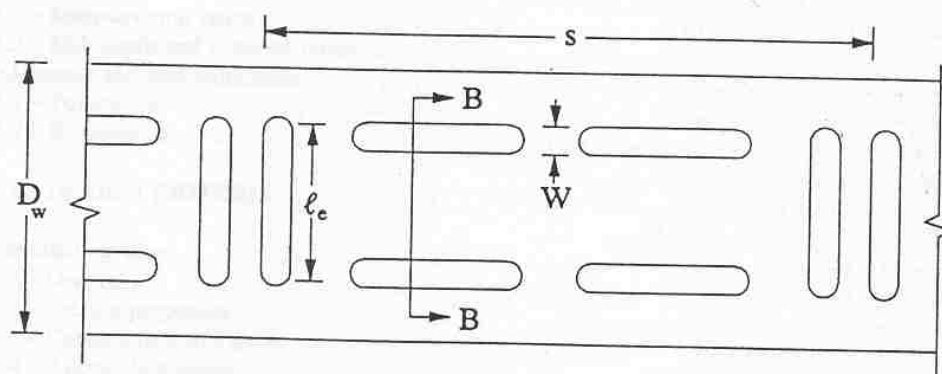
FIGURA 3.3. – Ângulo de inclinação das fôrmas de aço.



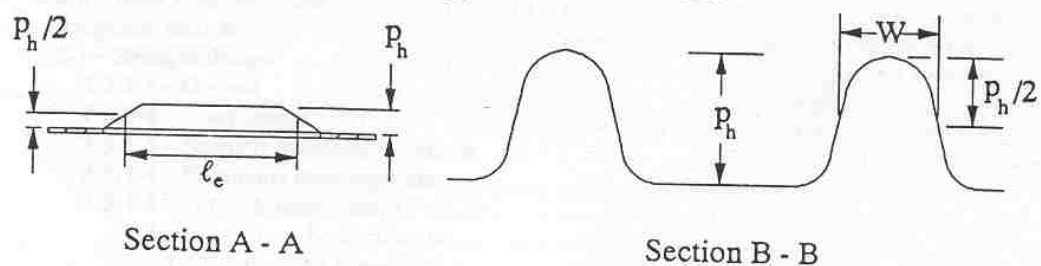
A. Type I Embossments with length measured along centerline



B. Type II Embossments



C. Type III Embossments



Section A - A

Section B - B

FIGURA 3.4 – Alguns tipos de moesa e algumas de suas possíveis variações nas formas de aço (ASCE, 1992)

3.7 Influência da altura final da laje de concreto no comportamento da fôrma antes da cura do concreto.

A altura final da laje desempenha um papel importante no carregamento antes da cura, visto que, quanto mais espessa a laje, maior é a quantidade de concreto que a fôrma deverá suportar. Portanto, ao se aumentar a espessura de uma laje visando obter maior resistência da laje mista, há que se considerar o aumento de carga atuante sobre a fôrma na fase antes da cura.

3.8 Algumas considerações sobre a influência da altura da fôrma, da distribuição de áreas e da largura de onda no comportamento das fôrmas.

Como são escassas as informações disponíveis a respeito de parâmetros que influenciam no comportamento de lajes mistas, apresentam-se a seguir algumas considerações empíricas sobre esses parâmetros.

A capacidade de a laje mista vencer grandes vãos está diretamente relacionada com a sua altura e com a altura da fôrma de aço.

Fôrmas de maior altura permitem que, na maioria dos casos, não se utilizem escoramentos, tornando o sistema construtivo mais eficiente, rápido e econômico. O aumento da altura da fôrma, porém, tem de ser acompanhado de um aumento de espessura ou de enrijecimento, para que as almas não fiquem demasiadamente esbeltas.

Uma esbeltez muito elevada da alma reduz a sua largura efetiva e conduz a uma baixa resistência ao cisalhamento e ao esmagamento nas regiões de apoio, além de favorecer a separação da laje de concreto nas fôrmas de aço trapezoidais.

Com o aumento da altura da fôrma, a linha neutra plástica da seção mista pode passar a cortar a fôrma de aço. Essa situação pode conduzir a diferenças no dimensionamento, de acordo com a norma adotada e também quanto ao nível de precisão dos resultados. Por exemplo, o EUROCODE 4 (1992], com o objetivo de simplificar o cálculo do momento resistente da laje mista, permite desprezar a resistência à compressão do concreto entre

as almas da fôrma de aço. Esse fato faz com que, quanto maior a altura da fôrma de aço, maior será a diferença entre as resistências determinada e efetiva da laje mista. Por outro lado, a norma brasileira NBR 14323 (1999) indica a utilização da NBR 6118 (1978) para o cálculo de resistência da laje mista ao momento fletor, em que se despreza apenas a resistência do concreto tracionado, o que conduz a um valor mais próximo da resistência efetiva da laje mista à flexão.

Na fase mista, ficando parte da fôrma sujeita a tensões de compressão, deve-se verificar a possibilidade de flambagem local e a conseqüente perda de área resistente de elementos situados nessa região.

Fixada a altura da laje mista, o consumo de concreto fica diretamente relacionado com a distribuição de áreas na fôrma de aço.

A distribuição de áreas na seção transversal pode ser simétrica ou assimétrica, ou seja, pode-se ter ou não diferentes larguras para as mesas inferior e superior e também pode-se ter ou não enrijecedores longitudinais nas mesas.

Quanto maior a largura da mesa superior e quanto menor a largura da mesa inferior, menor será o consumo de concreto. Todavia, quanto maior a largura de uma mesa, para uma espessura constante da chapa, menor será a sua rigidez, tornando-se a mesa mais susceptível, para o caso de tensões de compressão, à flambagem local e, conseqüentemente, à perda de área efetiva.

Nesse caso, é conveniente que sejam utilizadas dobras longitudinais, também chamadas de enrijecedores longitudinais, nessas mesas, que promovam o aumento de sua rigidez e, em conseqüência, o aumento da resistência da fôrma de aço às tensões de compressão originárias do momento fletor.

Ao se reduzir a largura da mesa inferior, visando a um menor consumo de concreto, consegue-se adicionalmente uma rigidez local maior da mesa. Mas, em contrapartida, o módulo resistente elástico para a mesa inferior fica reduzido, o que implica redução da

resistência da fôrma aos momentos fletores negativos que ocorrem sobre os apoios intermediários, podendo comprometer seriamente o desempenho da fôrma.

Um aspecto que deve ser salientado é que a diminuição da quantidade de ondas na fôrma de aço, para uma determinada largura da laje, com o conseqüente aumento da largura de suas mesas, pode resultar em uma considerável redução da largura útil, da rigidez e da resistência da fôrma, prejudicando significativamente o seu comportamento antes da cura do concreto.

Podemos observar nos modelos de fôrma existentes no mercado que, em geral, a largura das mesas, superior e inferior, é igual para um grande número de modelos e que as mesas na maioria dos modelos possuem um ou nenhum enrijecedor longitudinal.

Em uma fôrma de aço, a largura de uma onda é função da largura das mesas superior e inferior e da inclinação da alma e da altura da fôrma. Quanto maior o número de ondas por metro de largura da laje, maior será a resistência da fôrma à flexão, devido ao maior número de almas por metro de largura de laje.

É necessário que se observe que o número de almas por metro de largura fica limitado por uma distância mínima entre as almas necessárias para a instalação dos conectores tipo “stud”.

3.9 Algumas considerações sobre as mossas

As mossas são saliências localizadas, existentes em grande número na fôrma de aço. São produzidas por meio de estampagem do perfil já conformado da fôrma, que, no final da linha de perfilagem, passa por um equipamento que executa essa operação.

Nas fôrmas trapezoidais, elas ficam situadas nas almas da fôrma e podem variar de um modelo para outro quanto à fôrma, à dimensão, à quantidade e à disposição. Elas existem em todas as fôrmas trapezoidais para incorporação às lajes e desempenham um papel fundamental no comportamento das lajes mistas.

Na FIG. 3.4, são indicados alguns tipos de moesa e algumas de suas possíveis variações nas fôrmas de aço (ANSI/ASCE 3-91).

Nas lajes mistas, há que se prover uma resistência ao deslizamento na superfície de contato aço/concreto, visto que uma simples justaposição dos dois materiais, aço e concreto, sem um mecanismo de transferência de esforços entre eles, não constitui a formação da laje mista, obtendo-se apenas a soma da resistência isolada de cada elemento às ações atuantes, o que é, significativamente, inferior à resistência do sistema misto.

Ao se prover um mecanismo de ligação entre a fôrma de aço e o concreto é que se constitui um elemento misto, no caso a laje mista, onde existe uma interação aço/concreto fazendo com que a seção composta pelos dois elementos passe a funcionar como um todo.

Existem basicamente três mecanismos de ligação entre a fôrma de aço e o concreto, que estão relacionados a seguir.

a) Ligação por aderência

É produzida pela ação química entre a pasta de cimento e o aço. Esse mecanismo possui baixa resistência e perde a sua eficiência assim que ocorrem as primeiras fissuras no concreto, não podendo mais ser considerado. Em geral, as normas de dimensionamento não consideram a ligação por aderência para a formação do sistema misto, sendo, portanto, desprezado esse tipo de ligação na determinação da resistência da laje mista.

b) Ligação por atrito

Como o próprio nome indica, é produzida pelo atrito em regiões onde ocorre uma compressão na região de contato entre o concreto e a fôrma.

c) Ligação mecânica

É a produzida pelo contato entre o concreto e a fôrma nas regiões das mossas, onde ocorrem mudanças abruptas ao longo das faces planas das chapas (no caso das fôrmas trapezoidais, ao longo das almas).

É a principal responsável pela ligação entre o aço e o concreto para a constituição da seção mista após a perda da aderência. A eficiência dessa ligação depende da fôrma, da dimensão, da disposição e da quantidade das mossas.

Esses mecanismos de ligação são abordados mais detalhadamente no estudo relativo à fase após a cura do concreto desenvolvido por MARTINS (2001).

A influência das mossas no comportamento da fôrma de aço antes da cura do concreto é abordada no capítulo 5.

A ligação mecânica pode ser melhorada por meio de conectores de extremidade.

3.10 Algumas considerações sobre o dimensionamento de fôrmas para incorporação a lajes na fase antes da cura do concreto

Nos Estados Unidos da América, existe um instituto de fôrmas de aço para incorporação a lajes, chamado *Steel Deck Institute*.

Esse instituto fornece informações atualizadas sobre a utilização de fôrmas para incorporação a lajes, além de dispor de bibliografias e prestar consultoria sobre projetos e construção de lajes mistas com fôrmas de aço incorporadas.

As especificações técnicas desse instituto recomendam que as propriedades geométricas da seção da fôrma sejam calculadas de acordo com a última edição do AISI, considerando a fôrma como uma barra sujeita à flexão AISI (1991).

Hoje, no Brasil, já se dispõe da NBR 14762. Esta norma foi elaborada com base em informações e requisitos atualizados constantes em normas estrangeiras conceituadas e

difundidas, incorporando aspectos da realidade brasileira. Ela apresenta compatibilização de termos, notações e coeficientes com as normas brasileiras.

Assim sendo, esta norma brasileira é a escolhida como critério de dimensionamento comum aos modelos de fôrma estudados nesta dissertação.

Segundo QUEIROZ et al. (2001), deve ser utilizada análise global elástica na determinação dos esforços solicitantes para a verificação dos estados limites últimos e dos estados limites de utilização, de acordo com a NBR 14323 (1999).

A consideração de rigidez uniforme ao longo do comprimento de fôrmas contínuas é aceita pela norma brasileira NBR 14323 e também pelo EUROCODE 4 (1992), mesmo quando ocorrer flambagem local em regiões da seção transversal, sujeitas a tensões de compressão.

Quando ocorre flambagem local, partes da seção deixam de contribuir para o momento de inércia da seção transversal da fôrma. Ao se considerar uma rigidez uniforme ao longo da fôrma contínua (desprezando a redução sobre os apoios), obtém-se um momento de inércia maior sobre os apoios, que conduz a maiores momentos fletores sobre tais apoios, normalmente a região crítica para o dimensionamento. Caso não seja adotada essa simplificação, a determinação dos esforços solicitantes deve ser feita por aproximações sucessivas, considerando para cada decréscimo da largura os valores de rigidez das seções efetivas, conduzindo a uma redistribuição dos momentos sobre os apoios, que pode variar de 5% a 15%. Este é um processo bastante trabalhoso.

O cálculo da fôrma de aço para os estados limites últimos e de utilização deve obedecer às prescrições da NBR 14762, salientando-se que apenas a espessura do núcleo de aço deve ser considerada para o dimensionamento da fôrma. Nessa fase, antes da cura do concreto, o único estado limite de utilização que precisa ser verificado é o deslocamento vertical máximo (flecha) da fôrma submetida ao carregamento correspondente ao seu peso próprio e ao peso do concreto fresco, não se incluindo nessa verificação o carregamento correspondente à sobrecarga de construção. Essa flecha tem como valor

máximo recomendado $L/180$ ou 20 mm, o que for menor, sendo L o vão teórico da fôrma na direção das nervuras.

A NBR 14323 apresenta os seguintes procedimentos para a consideração de ações no dimensionamento da fôrma de aço antes da cura do concreto.

Devem ser levadas em conta na determinação da resistência da fôrma antes da cura do concreto as seguintes ações:

- pesos próprios do concreto fresco, da fôrma de aço e da armadura;
- sobrecarga de construção;
- efeito de empoçamento: caso o deslocamento no centro do vão da fôrma, calculado com o seu peso próprio somado ao do concreto fresco, ultrapasse o valor de $L_f/250$, onde L_f é o vão teórico da laje na direção das nervuras, o efeito do empoçamento deverá ser levado em conta, considerando-se um acréscimo na espessura nominal do concreto igual a 70% do valor do deslocamento vertical.

Para a determinação dos esforços solicitantes, deverá ser considerada a sequência de concretagem.

A sobrecarga de construção deverá ser tomada como o mais crítico dos dois carregamentos:

- carga uniformemente distribuída de no mínimo $1,0 \text{ kN/m}^2$;
- carga linear de $2,2 \text{ kN/m}$, perpendicular à direção do vão, na posição mais desfavorável, somente para a verificação do momento fletor.

A consideração de ações para o dimensionamento da fôrma prescrita na NBR 14323 é semelhante ao procedimento adotado pelo ANSI/ASCE 3-91 (1992).

Já em BODE (1998), as ações são levadas em conta baseando-se no EUROCODE 4, que prescreve em seu capítulo 7.3 as considerações relacionadas a seguir sobre ações e

efeitos de ações que devem ser considerados em todas as situações de projeto relevantes no dimensionamento da fôrma, para assegurar um grau adequado de segurança e desempenho.

Na fase antes da cura do concreto, devem ser levados em conta os seguintes carregamentos para o dimensionamento da fôrma:

- peso da fôrma de aço e do concreto fresco;
- sobrecarga de construção, incluindo um acúmulo de concreto durante a concretagem;
- carga de armazenamento de peças, se existir;
- efeito de empoçamento caracterizado pela consideração de um aumento na espessura da laje de concreto devido à flecha da fôrma.

A sobrecarga de construção representa o peso do pessoal e dos equipamentos durante a concretagem e leva em consideração possíveis impactos e vibrações que possam ocorrer nessa fase. Em uma área de 3m por 3m (ou o comprimento do vão, se ele for menor), deve ser considerada uma sobrecarga de construção de $1,5 \text{ kN/m}^2$ adicionada ao peso do concreto; nas áreas adjacentes restantes, uma sobrecarga de serviço de $0,75 \text{ kN/m}^2$ deve ser considerada, também adicionada ao peso do concreto. Essas sobrecargas devem ser posicionadas de modo a obter o máximo momento fletor e/ou a máxima força cortante.

Esses valores mínimos não são necessariamente suficientes para o caso de impactos ou acúmulo de concreto ou cargas de bombas e tubulações excessivos. Se apropriado, devem ser feitas considerações de cargas adicionais para o dimensionamento.

Na ausência de carga devida ao concreto, deve ser comprovado, por teste ou cálculos, que a fôrma deve ser capaz de resistir a uma carga de 1 kN atuando em uma área

quadrada de 300mm de lado na posição mais desfavorável, em qualquer região, exceto sobre o enrijecedor adjacente a uma borda livre.

A consideração do empoçamento indica o mesmo procedimento já descrito para a NBR 14323.

O EUROCODE 4 prescreve em seu item 7.5 as considerações a serem levadas em conta para a verificação do perfil da fôrma de aço na fase antes da cura do concreto quanto aos estados limites últimos e de utilização.

Para a verificação dos estados limites últimos, deve-se obedecer à especificação constante no subitem 1.3. do EUROCODE 3 (1993). Devem ser feitas considerações relativas às influências de mossas ou entalhes na determinação dos propriedades e resistências da seção da fôrma de aço para o seu dimensionamento.

Para a verificação dos estados limites de utilização, deve-se também obedecer à especificação do subitem 1.3 do EUROCODE 3 para a determinação das propriedades geométricas da seção.

A flecha da fôrma de aço devida ao seu peso próprio a ao peso do concreto fresco não deve ultrapassar o limite de $L/180$ ou 20 mm (o que for menor), no qual L é vão efetivo da fôrma entre suportes.

Esses limites podem variar quando:

- uma flecha grande não afetar a resistência ou eficiência do piso; e
- o peso adicional do concreto devido ao empoçamento for levado em consideração para o dimensionamento do piso e das estruturas suportes.

Quando uma flecha muito reduzida for considerada importante, por exemplo em virtude da estética ou do tipo de atividade sobre o piso, pode ser necessário que esses valores sejam reduzidos.

A mesma consideração de cargas e critérios de dimensionamento prescritos no EUROCODE 4 é adotada por MAASS (2000), que até mesmo aborda a utilização de perfis trapezoidais de chapa de aço que são trabalhados estruturalmente de diversas maneiras, tais como em coberturas, em lajes com fôrma de aço incorporada e como alma de vigas com mesas de madeira, em divisórias etc.

JOHNSON et al. (1993), em seu capítulo 7, abordam as lajes mistas com fôrmas de aço incorporadas para edifícios, e adotam também as mesmas considerações de cargas e critérios de dimensionamento constantes do EUROCODE 4.

No item 7.2, JOHNSON salienta que a fôrma de aço para ser incorporada a lajes mistas, onde serão utilizados conectores tipo pino com cabeça, não pode ter a largura de sua onda inferior menor que 50 mm, para assegurar que o concreto fique adequadamente compactado em volta dos conectores. As limitações do tamanho máximo dos agregados estão relacionadas no item 7.2.2. do EUROCODE 4.

O item 7.4, que se refere à determinação dos esforços solicitantes na fôrma antes da cura do concreto, baseia-se no item 7.4.1 do EUROCODE 4 e permite que em fôrmas contínuas se desconsidere a variação de rigidez, em virtude da existência de partes comprimidas não efetivas da seção transversal. Essa redução na rigidez é maior nas regiões dos apoios intermediários. Isso causa uma redistribuição de momento do apoio para o meio do vão. No item 7.5, é ressaltado que o limite de flecha igual a $L/180$ é bem aceito na prática.

JOHNSON (1994) faz uma abordagem profunda e didática sobre as estruturas mistas de aço e concreto, seguindo as diretrizes do EUROCODE 4. Nesta referência, ele enfatiza que as lajes mistas, por diversas décadas, têm sido o sistema de piso mais utilizado em edifícios estruturados em aço na América do Norte.

Nos últimos vinte anos, têm havido muitos avanços nas técnicas de dimensionamento, e uma grande quantidade de tipos de fôrma está hoje disponível no mercado europeu.

3.11 Algumas considerações sobre a utilização, no Brasil, de lajes mistas com fôrma de aço incorporada

A partir de 1997, a utilização pelo sistema construtivo de pisos de lajes mistas com fôrmas de aço incorporadas teve um grande impulso com o aumento do número de fabricantes e, hoje, segundo METFORM (2001), já constitui um sistema construtivo de alta eficiência, com grande aplicação na construção de diversos tipos de edifício. Tal sistema conduz a uma série de vantagens que resultam em praticidade, economia e maior retorno financeiro do empreendimento.

O desenvolvimento da fôrma metálica da METFORM foi feito em conjunto com o Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, gerando vários trabalhos publicados, dentre os quais as dissertações de mestrado de MELO (1999), SOUZA NETO (2001) e MARTINS (2001).

HAIRONVILLE DO BRASIL (2000) também enfatiza as vantagens do uso das fôrmas de aço para incorporações às lajes, ressaltando que o sistema já é conhecido no Brasil há mais de trinta anos e hoje, já bastante otimizado, conta com assistência técnica dos fabricantes durante a fase de projeto e a de aplicação nas obras.

Tanto METFORM (2001) quanto HAIRONVILLE (2000) indicam as normas NBR 14762 e NBR 8800 para o dimensionamento da estrutura em temperatura ambiente, e a NBR 14323 para o dimensionamento da estrutura em situação de incêndio.

Para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, deve-se obedecer também aos critérios da NBR 14432, que estabelece as condições a serem atendidas para a resistência ao fogo de elementos construtivos em edificações.

3.12 Algumas considerações sobre a utilização, em outros países, de lajes mistas com fôrma de aço incorporada

A utilização do sistema construtivo de lajes mistas com fôrma de aço incorporada já está consolidada e acontece em larga escala principalmente nos Estados Unidos, no Canadá, na Alemanha, na França, na Inglaterra, no Japão e na Austrália.

Coincidentemente, nesses países ocorrem as maiores taxas de uso do aço na construção civil por habitante, por esse tipo de construção ser extremamente adequado ao uso em construções metálicas. Mas essa tecnologia é bastante pesquisada e utilizada em outros países também.

Como exemplo, pode-se citar a Suécia onde o desenvolvimento de um novo perfil de fôrma para incorporação a lajes mistas é abordado com profundidade em VELJKOVIC (1996). Nesse trabalho, desenvolvido na Suécia, foi pesquisada uma fôrma com propriedades otimizadas dentro dos parâmetros fornecidos pelo fabricante. Realizaram-se ensaios com modelos em escala reduzida e também em escala real. Os resultados dos ensaios foram comparados com os resultados de análises pelo método dos elementos finitos.

Esse trabalho gerou uma fôrma de aço para incorporação a lajes que é um produto hoje disponível no mercado europeu.

No Canadá, a “Canam Steel Works” é grande fabricante de fôrmas de aço para incorporação a lajes. Em sua publicação, CANAM STEEL WORKS (1998), ela aborda o uso da fôrma metálica como isolante acústico, e também como ela pode funcionar como parte de diafragma horizontal.

Em 1991, o “Canadian Sheet Steel Building Institute” publicou uma literatura intitulada “Design of Steel Deck Diaphragms (CSSBI B13-91)” CSSBI 13-91 (1991). O documento contém tabelas de resistência ao cisalhamento de fôrmas de aço que atuam como diafragmas, para diversos perfis com diferentes espessuras, espaçamentos e tipos de fixação.

Nos Estados Unidos, o Steel Deck Institute desenvolveu uma série de testes na Universidade da Virgínia. No Canadá, a Canam Steel trabalhou com departamentos de engenharia de laboratórios e desenvolveu estudos para avaliar o comportamento das fôrmas de aço que atuam como diafragmas. A Canam Steel produz fôrmas com alturas de 76 mm e 38 mm, com espessuras de chapa de 0,76 mm, 0,91 mm e 1,21 mm, em aço ASTM A653 que tem limite de escoamento de 230 MPa.

Ainda nos Estados Unidos, foi elaborada uma publicação por FISHER et al. (1991), patrocinada pela “Vulcraft”, subsidiária da “Nucor Corporation”, com muitas informações a respeito do uso de fôrmas de aço para incorporação a lajes.

A seguir são citadas algumas dessas informações:

Em seu capítulo 3, FISHER et al. (1991) fazem comentários sobre tipos de fôrma para incorporação a lajes, arranjos estruturais e condições de uso.

As fôrmas para incorporação às lajes precisam suportar com segurança o seu peso próprio, o peso do concreto fresco e as atividades sobre a fôrma durante a fase de construção.

O Steel Deck Institute especifica que, para os carregamentos durante a fase de construção, a fôrma deve ser dimensionada para suportar o seu peso próprio, o peso de concreto fresco e, ainda, uma sobrecarga representada por uma carga distribuída de 1kN/m^2 ou uma carga distribuída linear na direção perpendicular ao eixo longitudinal da fôrma de 2,2 kN/m na posição mais crítica, a que for mais desfavorável.

Para a verificação da flecha devem ser considerados somente o peso da fôrma de aço e o peso do concreto fresco. A flecha deve ser medida em relação aos apoios da fôrma e deve-se obedecer ao limite de flecha máxima de $L/180$ ou 20 mm, a que for menor.

Em geral, as tabelas de cargas em lajes mistas com fôrma de aço incorporada não incluem o peso das lajes.

Nos Estados Unidos, as fôrmas de aço são fornecidas em três tipos de acabamento: pintadas, galvanizadas e sem acabamento (pretas). Os tipos mais utilizados são o galvanizado e o pintado. O tipo pintado não é adequado ao uso em atmosfera com alto teor de umidade. As fôrmas sem revestimento ou acabamento não são consideradas como permanentes, portanto não podem ser consideradas como incorporadas à laje de concreto, e se constituem um sistema misto.

As fôrmas de aço precisam ser dimensionadas para a fase antes da cura, porque, em geral, considerando o aspecto de custo ou de tempo não é vantajoso que sejam escoradas.

Como a fôrma metálica fornece resistência à tração em regiões com momentos positivos, ela deve ser considerada como permanente.

Ao se instalar as fôrmas metálicas sobre os vigamentos, deve-se cuidar para que não fique umidade entre a fôrma e a viga sobre a qual ela se apoia. A umidade pode comprometer a instalação dos conectores. Em fôrmas pintadas, deve-se atentar para que se obtenha uma soldagem perfeita dos conectores.

Ainda com relação aos Estados Unidos, existe uma empresa, a VULCRAFT, que é grande fabricante de fôrmas de aço para incorporação a lajes; ela produz fôrmas com altura de 37,5 mm, 50 mm e 76 mm. Em sua publicação VULCRAFT (1998), além das tabelas de utilização de seus produtos entre os quais se encontram as fôrmas para incorporação às lajes, são apresentadas as especificações e os comentários para lajes mistas com fôrmas de aço incorporadas do STEEL DECK INSTITUTE SDI (SDI,1987).

Conforme o SDI, o tipo de revestimento da fôrma de aço deve ser especificado pelo projetista e ser adequado ao tipo de atmosfera em que a estrutura vai ficar. Não é

permitido o uso de sal sobre a laje, o que pode provocar corrosão da fôrma que foi projetada para atuar como armadura positiva; assim sendo, deve durar toda a vida útil da estrutura.

Para o carregamento sobre a fôrma a ser considerado na fase antes da cura para um vão biapoiado, o SDI (1987) faz o comentário a seguir: “Uma carga concentrada no meio do vão de 0,75 kN equivale a $\frac{3}{4}$ do peso de uma pessoa que pesa 100 Kg ou 1,0 kN”. A filosofia é permitir um acréscimo de 33% nas tensões devido à natureza temporária da carga da pessoa.

Reduzir a carga em 25% é equivalente a permitir um acréscimo na tensão de 33%. Essa carga da pessoa é considerada aplicada em uma largura de 30,48 cm, o que equivale a uma carga de 2,2 kN em uma largura de 1 metro.

Para vãos biapoiados, a prática mostra que existe certa dificuldade em controlar o acúmulo de concreto e, por isso, é utilizado um coeficiente de 1,5 multiplicado pelo peso do concreto para cobrir essa situação.

No que diz respeito ao controle de flecha, o calculista deve, além de controlar a flecha da fôrma, verificar também a flecha do vigamento, principalmente quando são utilizadas vigas mistas principais e secundárias.

Com referência à estocagem e à instalação, é ressaltado que as fôrmas devem ficar estocadas, antes de sua instalação, em uma posição inclinada para evitar o acúmulo de água, embaladas com material de recobrimento à prova de água e ventiladas para evitar condensação. A sua instalação deve ser feita posicionando-se uma unidade de cada vez.

Devem ser alinhadas com precisão e logo após o posicionamento deve-se fixar as bordas laterais na fôrma adjacente. As fôrmas devem ser posicionadas sobre os suportes e soldadas ou fixadas mecanicamente neles, até no caso de suportes laterais. Essa operação deve ser feita logo após o alinhamento e tem a finalidade de ancorar a fôrma para evitar que ela possa ser desprendida pelo vento, e também a de travar lateralmente

as mesas comprimidas das vigas suportes. A solda direta em chapas com espessura inferior a 0,7 mm pode causar furos devido à queima da chapa e não é recomendada, sendo indicado nesse caso o uso de arruelas para soldagem. A fôrma deve ficar adequadamente apoiada e fixada em todos os suportes para evitar o seu escorregamento e pode servir como plataforma segura de trabalho antes e durante a fase de concretagem.

As áreas de fôrmas sujeitas a tráfego pesado ou repetitivo, cargas concentradas e cargas de rodas devem ser protegidas com tábuas ou chapas para evitar estragos. Caso ocorra algum dano, a fôrma deverá ser substituída ou reparada ou escorada de acordo com orientação do engenheiro responsável.

Outro grande fabricante nos Estados Unidos é o United Steel Deck Inc, que possui uma publicação que consta de catálogo de produtos e manual de projetos USD (1999). Ele produz fôrmas de aço para incorporação às lajes com alturas de 37,5 mm, 50 mm e 76mm. Em sua publicação, é ressaltada a necessidade de evitar grandes concentrações de concreto, impacto durante a concretagem e passagem de equipamentos com rodas diretamente sobre a fôrma.

É salientado ainda que o uso de lajes mistas com fôrma incorporada não é indicado em edifícios-garagem, localizados em regiões muito frias com grande ocorrência de neve, como no norte dos Estados Unidos, pois o sal, nesse caso, trazido pelas rodas, pode deteriorar a fôrma. Assim, a fôrma de aço pode ser usada, somente como uma fôrma permanente, não sendo considerada incorporada à laje para obtenção de uma laje mista, devendo ser usada armadura positiva convencional para o dimensionamento da laje.

É citado também que, sempre que possível, a fôrma deverá se estender por três ou mais apoios e que o dimensionamento da fôrma de aço antes da cura do concreto deve seguir as especificações do SDI.

No Manual do AISC (1999), são fornecidas as especificações para o dimensionamento de vigas mistas, sendo as lajes mistas com fôrma incorporada, restringindo-se ao caso de fôrmas com no máximo 76 mm de altura, e ao uso de conectores tipo pino com

cabeça com diâmetro máximo de 19 mm, estendendo-se acima do topo da fôrma pelo menos 38 mm. Também é especificado que a espessura mínima da laje acima da fôrma seja igual a 50mm.

Na publicação WIDJAJA (1997) sobre o desenvolvimento de lajes mistas para vencer longos vãos, são estudados perfis para fôrmas de aço com alturas de 76 mm, 114 mm e 152,4 mm, todos com espessura de chapa de 1,42 mm. É citado que o uso de lajes mistas com fôrma de aço incorporada é comumente o sistema de piso mais utilizado nos Estados Unidos para edifícios estruturados em aço. É considerado até que o uso da fôrma de aço para incorporação a lajes é um dos motivos que tornou os edifícios em estrutura metálica tão competitivos economicamente como o são hoje.

Nos Estados Unidos, o maior vão sem escoramento usado para lajes com fôrma de aço incorporada é de aproximadamente 4.500 mm, e para isso é necessário o uso de chapa com espessura de 1,42 mm e concreto leve. Esse vão é função da seção transversal da fôrma, da espessura e do peso do concreto. Em geral, os vãos mais utilizados ficam na faixa de 2.500 mm a 3.000 mm. Na grande maioria dos casos, é escolhido o sistema não escorado, que conduz a redução de custos e prazo.

Um aumento de 50% a 100% no valor desses vãos pode conduzir a uma significativa economia, devido à redução do número de vigas secundárias e suas conexões, apesar do aumento do custo da fôrma de aço.

Assim, para o estudo de WIDJAJA (1997), são pesquisados perfis de fôrma que não conduzem a um aumento significativo do peso de aço e da laje, se comparados com os usualmente existentes. Além disso, as fôrmas projetadas devem ser de fabricação e montagem usuais.

Para o caso de grandes vãos na fase antes da cura do concreto, em geral o estado limite de utilização, no caso a flecha, governa o dimensionamento do perfil da fôrma. Mas o dimensionamento final da laje mista pode ser governado tanto pela fase antes da cura quanto pela fase depois da cura, sendo que ambas devem ser criteriosamente analisadas.

O limite de $L/180$ foi utilizado nesse estudo de acordo com as especificações do SDI, mas a recomendação do limite de 20 mm não foi seguida por ser considerada muito restritiva para ser adotada no caso de vãos muito grandes.

Foram feitos estudos e testes em fôrmas com altura de 152 mm vencendo um vão de 6.000 mm sem escoramento. A altura total da laje ficou com 215 mm, e o topo da laje 63,5 mm acima da fôrma de aço. O perfil da fôrma, com comprimento de 6000 mm, largura de 327 mm e altura de 152 mm, pesa 52 kgf e, portanto, pode ser facilmente manuseado por dois montadores, o que atendeu bem nos resultados dos estudos e ensaios

Portanto, as vantagens econômicas em potencial, decorrentes do aumento do vão das lajes com fôrma de aço incorporada em edifícios estruturados em aço, em relação aos vãos tipicamente usados, merecem ser consideradas com atenção.

O aumento do vão para lajes mistas com fôrma de aço incorporada pode resultar em vantagens competitivas para as construções estruturadas em aço sobre outros sistemas construtivos.

4

DIMENSIONAMENTO DA FÔRMA METÁLICA — PLANILHA DE CÁLCULO

4.1 Considerações iniciais

O ambiente de trabalho é o EXCEL. Os procedimentos de cálculo e sub-rotinas estão presentes nas planilhas, mas encontram-se devidamente protegidas contra alterações acidentais.

4.2 Características principais do programa

Uma vez definidos os dados de entrada, que são a geometria da seção da fôrma, as propriedades do aço e os carregamentos atuantes, aciona-se a célula **CALCULAR** e tem-se como resultado o vão máximo que a fôrma de aço vence atendendo a cada um dos estados limites últimos e de utilização, indicados a seguir.

Estados limites últimos

1. Colapso devido ao momento fletor positivo;
2. Colapso devido ao momento fletor negativo;
3. Colapso devido à força cortante;
4. Colapso por esmagamento local na região de apoio;

5. Colapso por interação do momento fletor com a força cortante.

Estado limite de utilização

1. Flecha

O cálculo do vão máximo admissível é feito para as três condições de apoio seguintes:

Caso A - Fôrma biapoiada

Caso B - Fôrma contínua sobre três apoios

Caso C - Fôrma contínua sobre quatro apoios

O quadro com o resultado final contém:

- O vão máximo admissível;
- A indicação do caso mais crítico;
- peso da fôrma.

Ao se alterar algum dado de entrada, é necessário acionar a célula **CALCULAR** para que o programa recalcule os resultados considerando os novos dados.

A planilha permite ainda a entrada dos coeficientes de majoração das cargas, possibilitando ao usuário utilizar coeficientes provenientes de diferentes condições de carregamento.

A planilha permite também a entrada do deslocamento (flecha) limite a ser adotado para a verificação do estado limite de deslocamentos excessivos. Os deslocamentos limites podem ser alterados em função do tipo e da utilização da construção. Eles são fornecidos como uma fração do vão ($L/180$, por exemplo).

4.3 Considerações sobre as ações atuantes e suas combinações

4.3.1 Ações consideradas

Na fase antes da cura do concreto, são consideradas neste trabalho as seguintes ações:

Ações permanentes

- Peso próprio da fôrma de aço
- Peso do concreto armado suportado pela fôrma

Ação variável

- Sobrecarga durante a fase de construção de 1,0 KN/m²

Notas: Não foram consideradas cargas concentradas ou em linha.

4.3.2 Combinações de ações consideradas para a verificação dos estados limites últimos

As combinações de ações consideradas para a verificação dos estados limites últimos, adotadas neste trabalho, atendem aos critérios de combinações últimas especiais ou de construção, estabelecidos no item 5.2b da NBR 14762 (2001).

A combinação adotada é:

$$\sum_{i=1}^2 (\gamma_{gi} F_{Gi}) + \gamma_{q1} F_{Q1}$$

em que:

F_{G1} representa o peso próprio da fôrma de aço

F_{G2} representa o peso do concreto suportado pela fôrma

F_{Q1} representa a sobrecarga suportada pela fôrma

γ_{gi} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes

γ_{q1} é o coeficiente de ponderação da ação variável

Os coeficientes de ponderação das ações recomendados pela NBR 14762 (2001) na TAB. 1 são:

$\gamma_g = 1,3$ (considerando simplificadaamente que o peso da fôrma e do concreto são ações de grande variabilidade)

$\gamma_{q1} = 1,2$ (considerando a sobrecarga como ação especial ou de construção)

4.3.3 Combinações de ações consideradas para a verificação do estado limite de utilização

As combinações de ações para o cálculo da flecha máxima, adotadas nesse programa, atendem aos critérios de combinações raras para os estados limites de utilização, estabelecidos no item 5.3-c da NBR 14762 (2001), que são combinações que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura, correspondendo ao que ocorre com a fôrma metálica no período que vai do início da concretagem até a cura do concreto.

A combinação adotada é

$$\sum_{i=1}^2 F_{Gi} + F_{Q1}$$

em que:

F_{G1} representa o peso próprio da fôrma de aço

F_{G2} representa o peso do concreto suportado pela fôrma

F_{Q1} representa a sobrecarga suportada pela fôrma

Como para o dimensionamento da laje mista é considerada apenas a flecha devida à carga permanente, composta pelo peso do *deck* mais o peso do concreto, o programa fornece a opção de considerar ou não a sobrecarga para verificação da flecha.

4.4 Considerações sobre a geometria das fôrmas

Este trabalho permite que se faça a análise de fôrmas com seções transversais que contêm elementos e subelementos com diversas dimensões.

Pode-se considerar que a largura das mesas superior e inferior é diferente e que cada mesa pode ter até dois enrijecedores longitudinais independentemente do número de enrijecedores que a outra mesa tiver.

A altura da fôrma, a espessura da chapa, a largura das mesas, o ângulo que a alma faz com as mesas, os raios de dobramento, a largura e a altura dos enrijecedores, o comprimento dos apoios na extremidade da fôrma e intermediários (para os casos de dois ou três vãos contínuos) são variáveis consideradas, visando a uma grande flexibilidade para a análise e pesquisa.

Em princípio não estão sendo abordadas fôrmas reentrantes.

Nas páginas seguintes, estão relacionados os nove tipos de geometria básica considerados nesse programa.

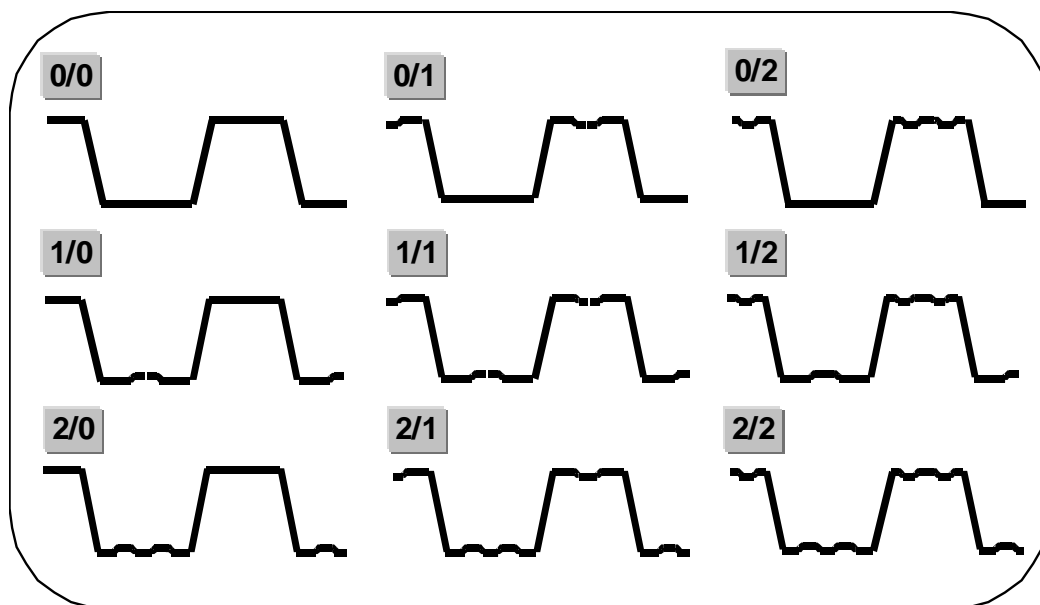


FIGURA 4.1. – Tipos de geometria básica considerados

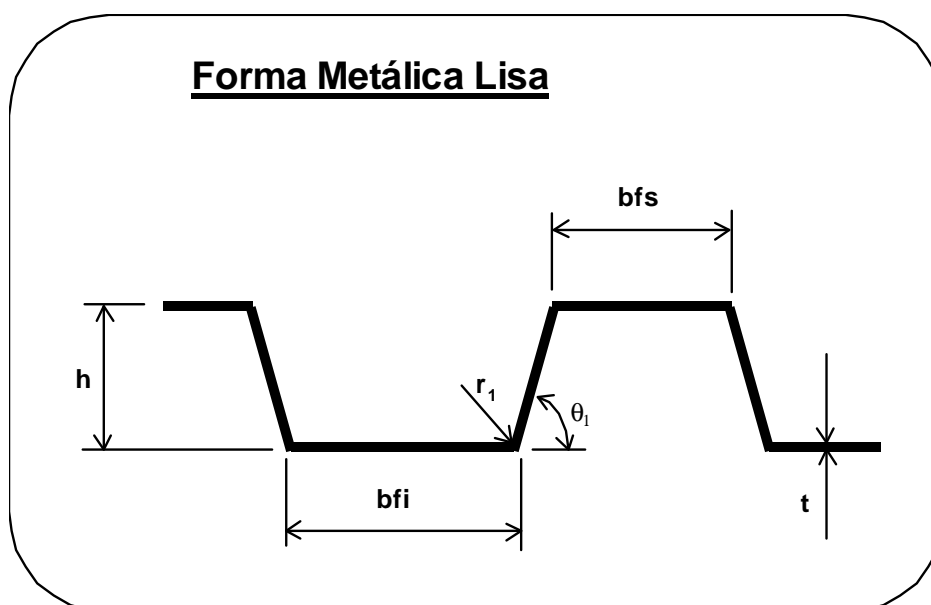


FIGURA 4.2. – Fôrma metálica tipo 0/0

Forma Metálica Tipo 0/1

Nº de enrijecedores superiores: 1

Nº de enrijecedores inferiores: 0

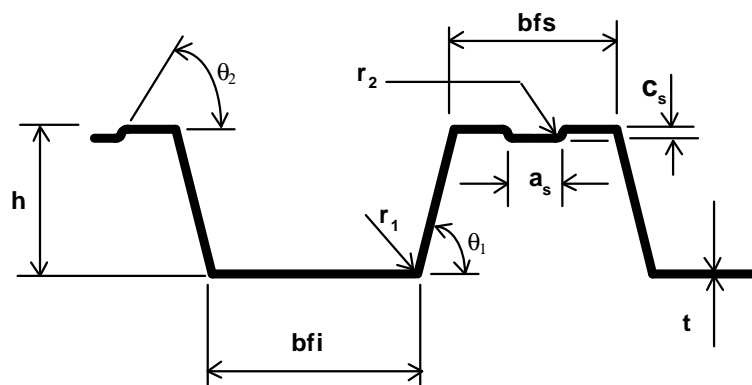


FIGURA 4.3. – Fôrma metálica tipo 0/1

Forma Metálica Tipo 0/2

Nº de enrijecedores superiores: 2

Nº de enrijecedores inferiores: 0

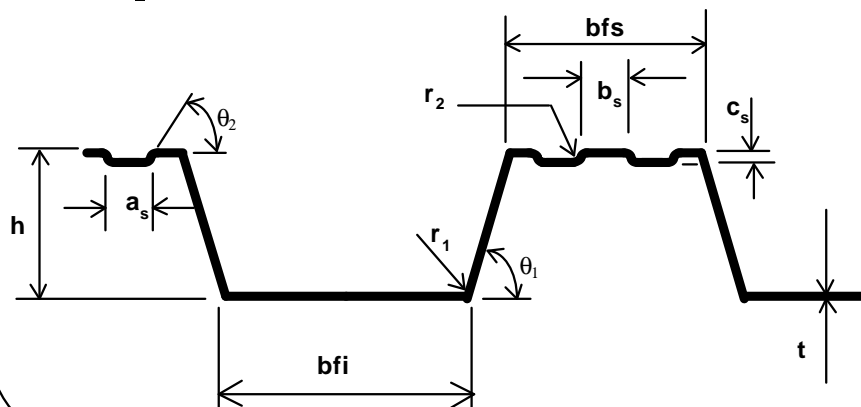


FIGURA 4.4. – Fôrma metálica tipo 0/2

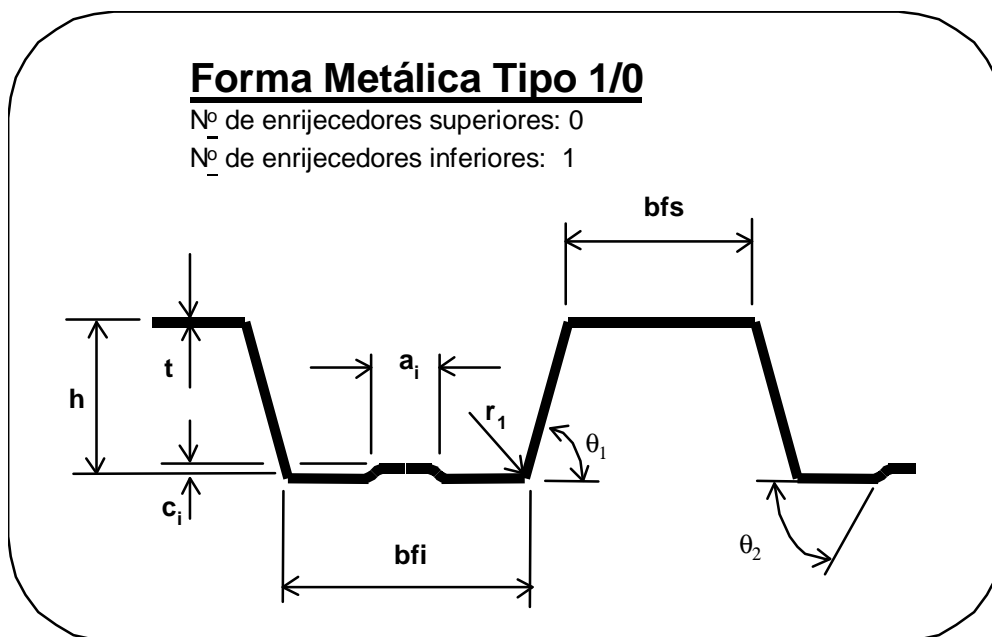


FIGURA 4.5. – Fôrma metálica tipo 1/0

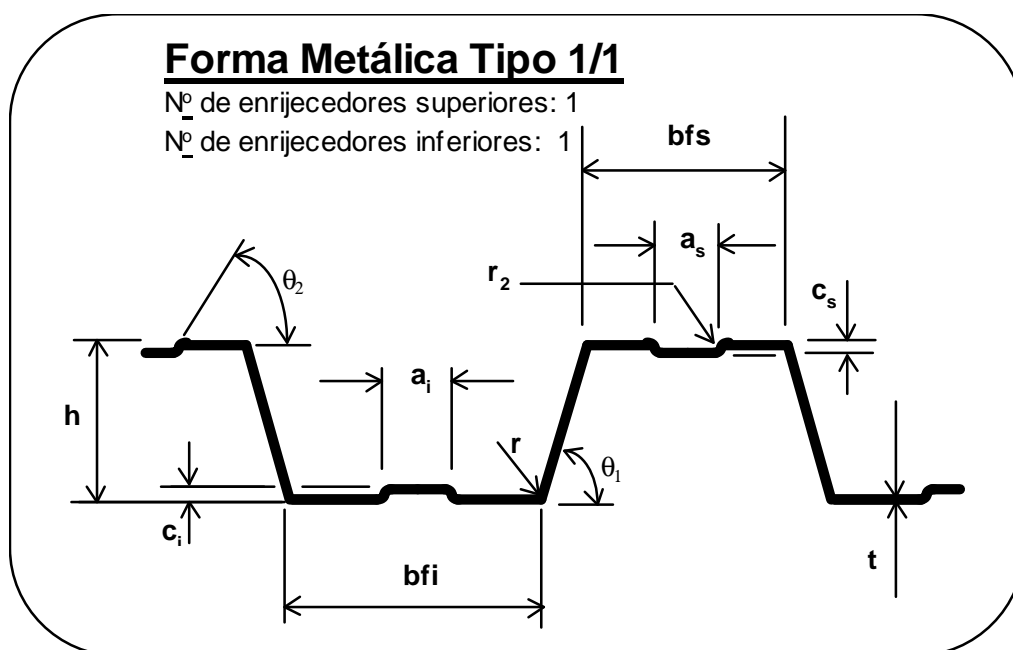


FIGURA 4.6. – Fôrma metálica tipo 1/1

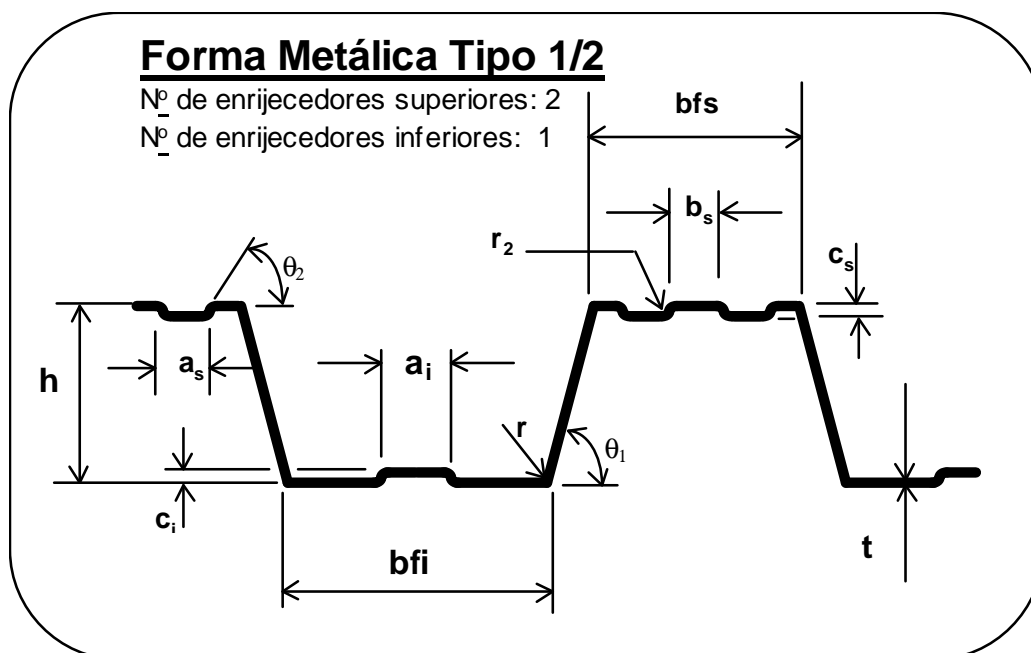


FIGURA 4.7 – Fôrma metálica tipo 1/2

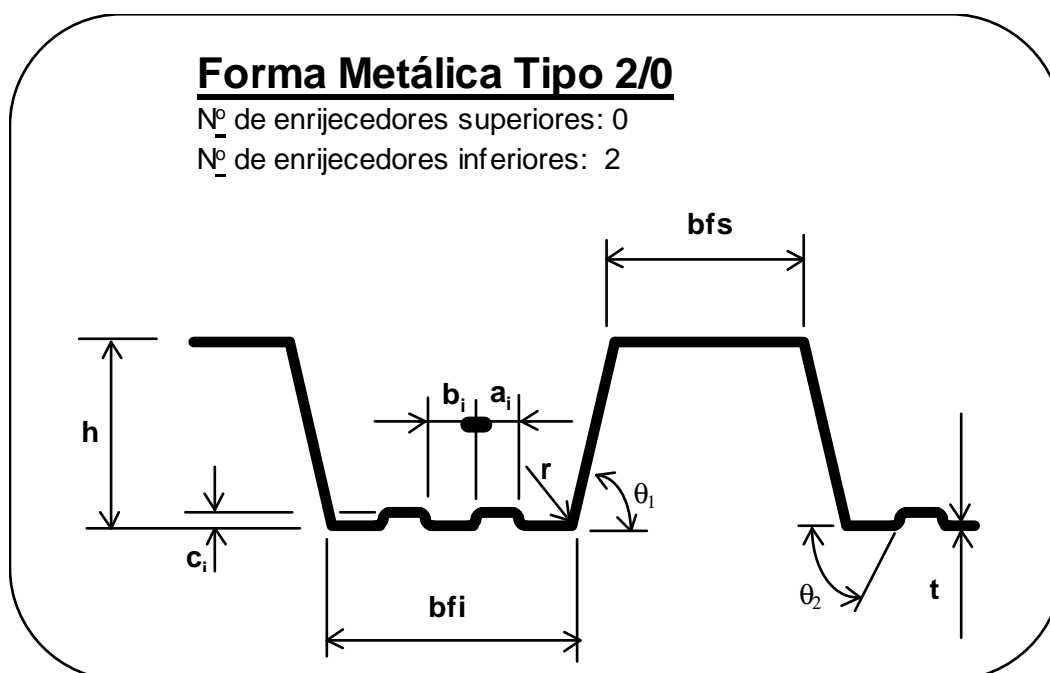


FIGURA 4.8 – Fôrma metálica tipo 2/0

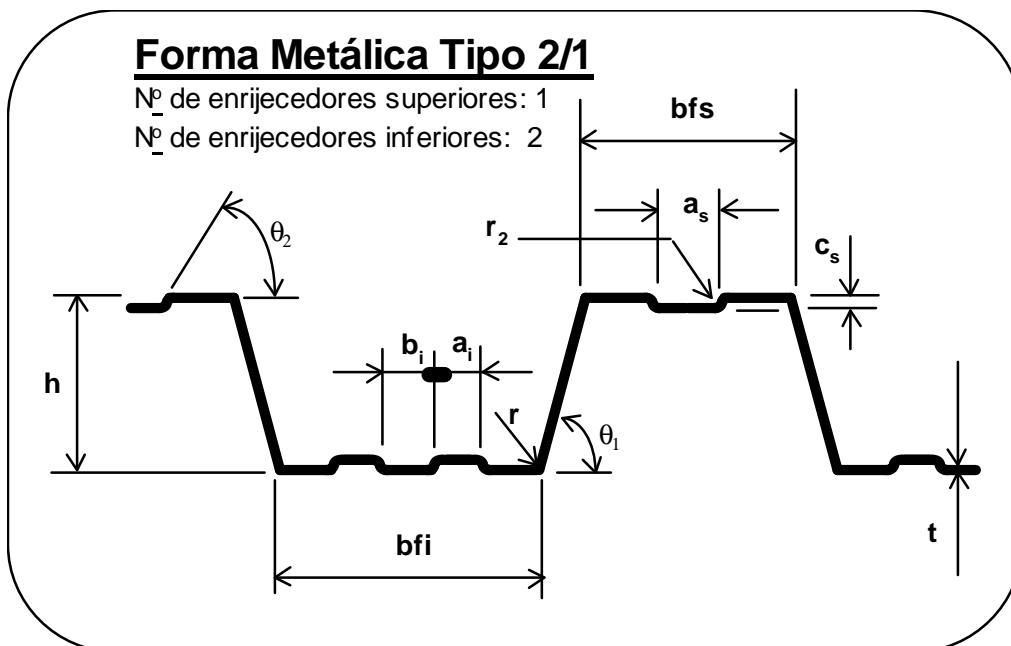


FIGURA 4.9 – Fôrma metálica tipo 2/1

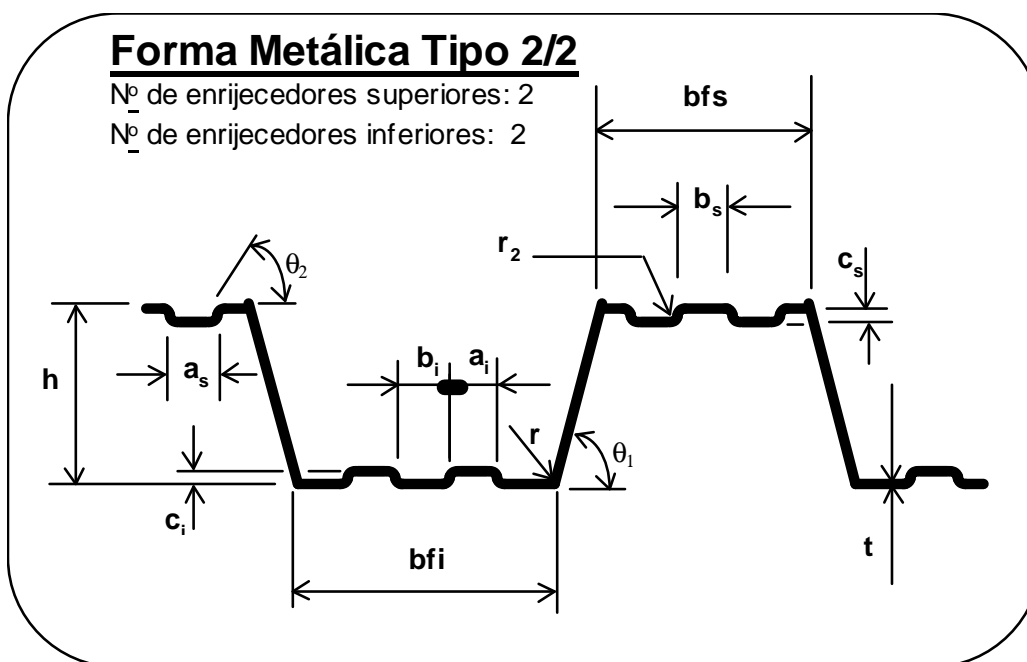


FIGURA 4.10 – Fôrma metálica tipo 2/2

4.5 O modelo considerado e seus elementos

A seguir está representado o modelo básico completo considerado para a análise, que corresponde ao tipo 2/2, que tem dois enrijecedores longitudinais na mesa inferior e dois na mesa superior.

Para os demais modelos, o programa anula os elementos que não fazem parte da seção transversal.

MODELO

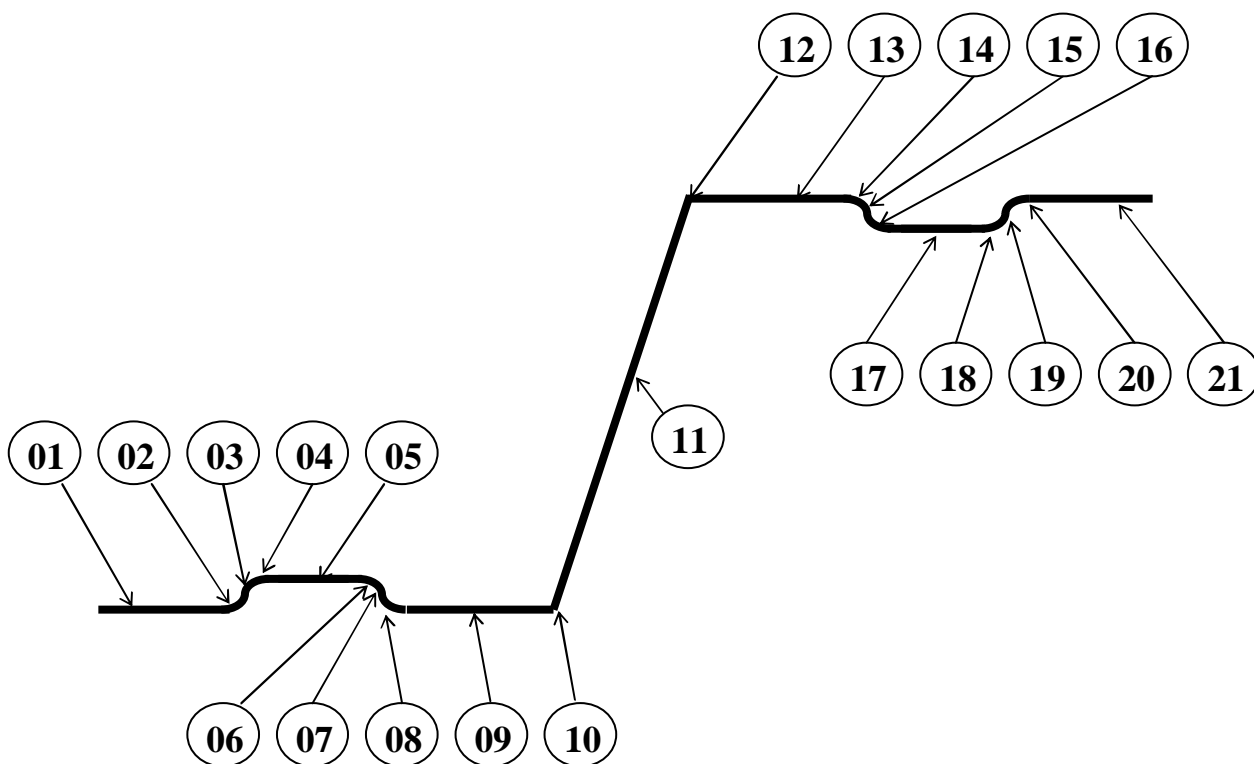


FIGURA 4.11 – Modelo básico completo

4.6 Fluxogramas

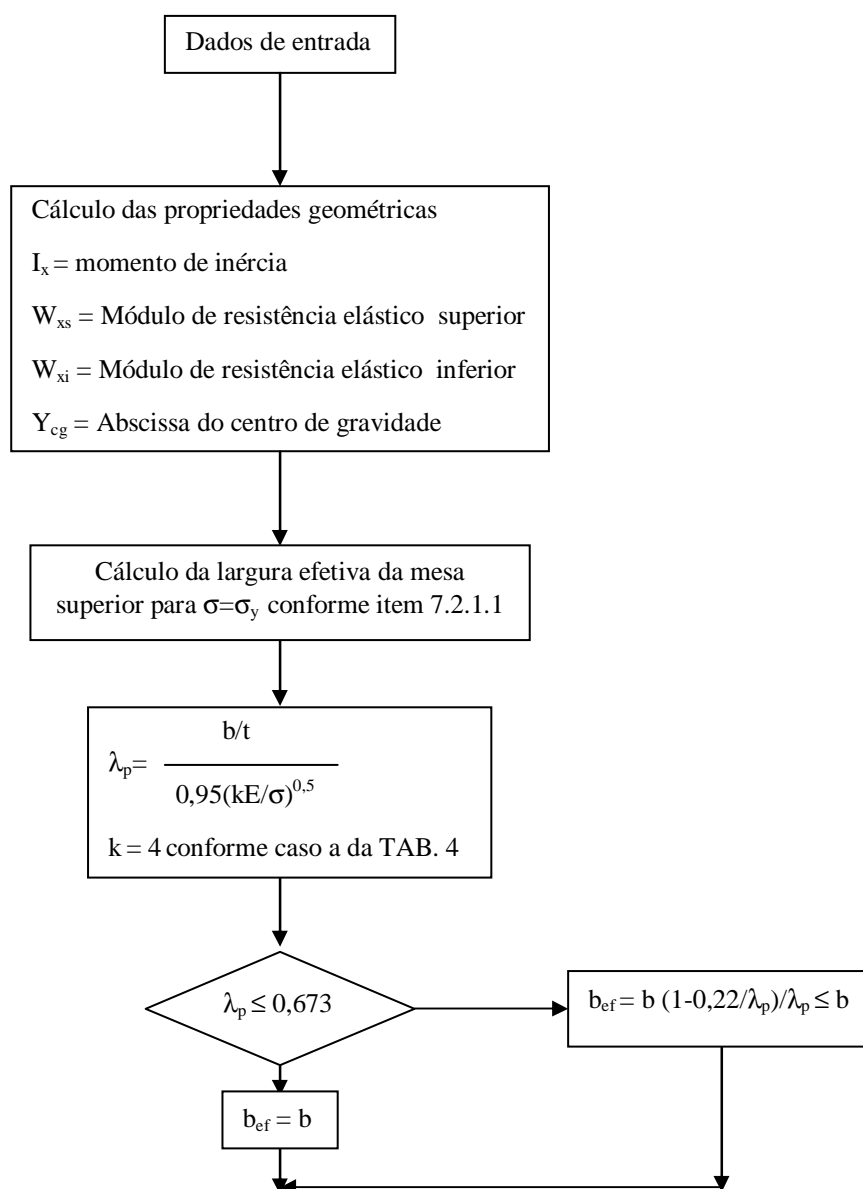
Estão inseridas nesta dissertação somente as rotinas referentes aos modelos 0/0, 1/0, 0/1 e 1/1.

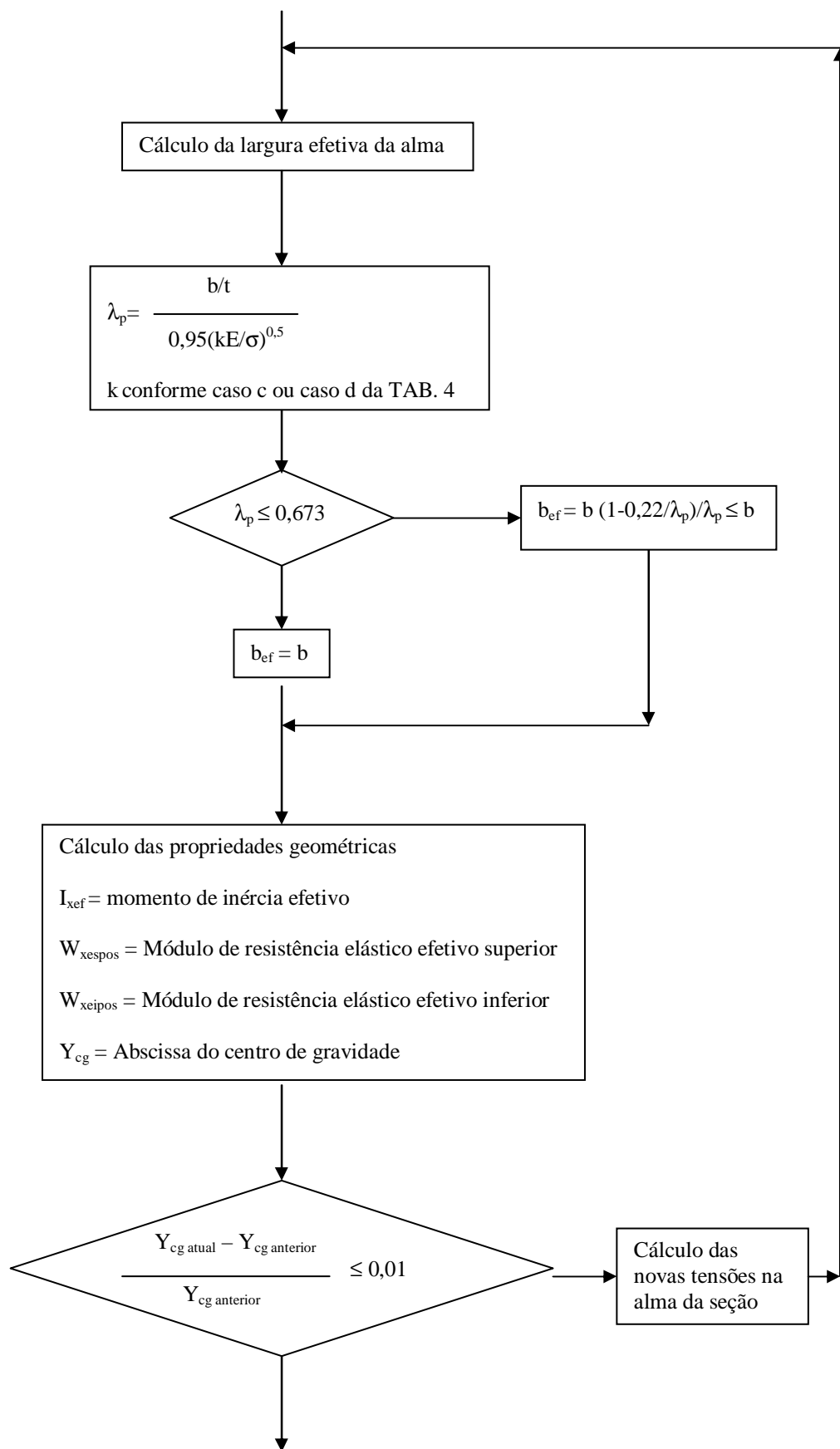
As outras rotinas também foram desenvolvidas, mas não foram inseridas em virtude da grande quantidade de páginas que seria gerada.

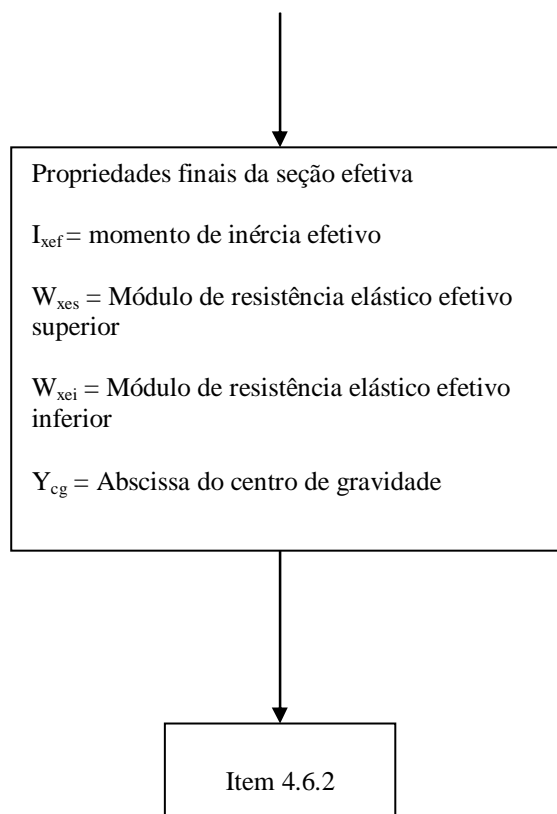
4.6.1 Rotina para a determinação da seção efetiva e resistência ao momento fletor conforme NBR 14762 (2001) item 7 e ANEXO C

4.6.1.1 Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 0/0

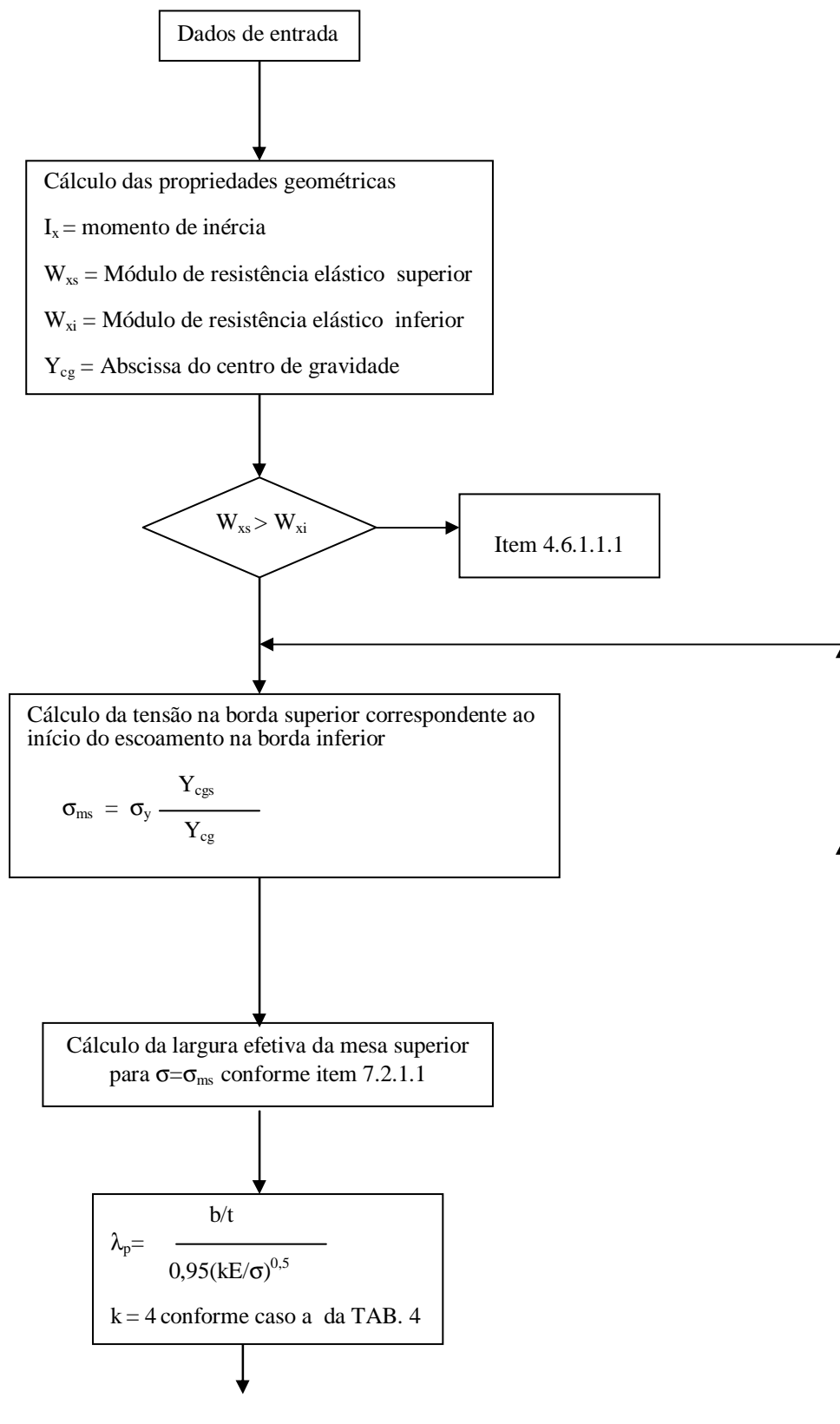
4.6.1.1.1 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção

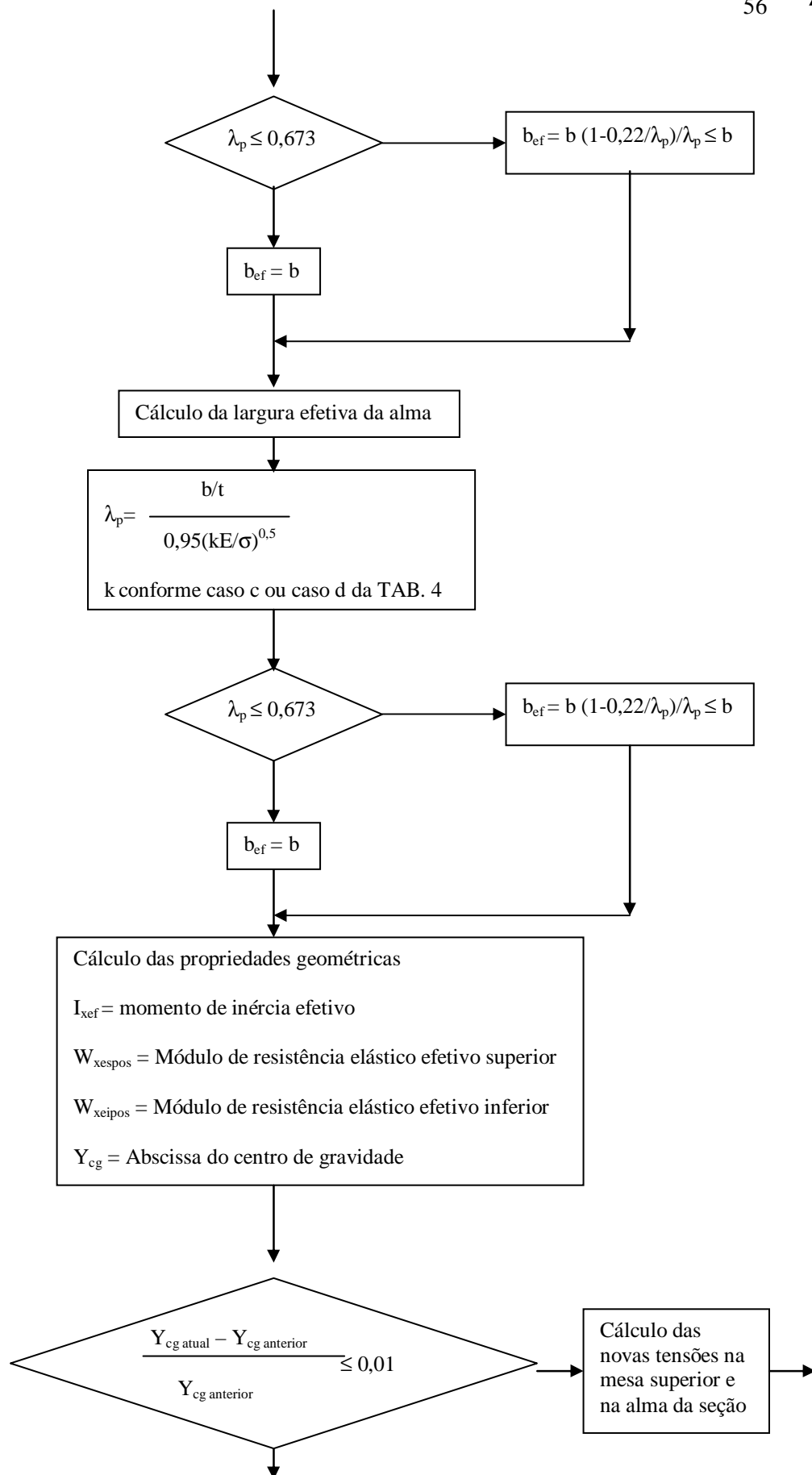


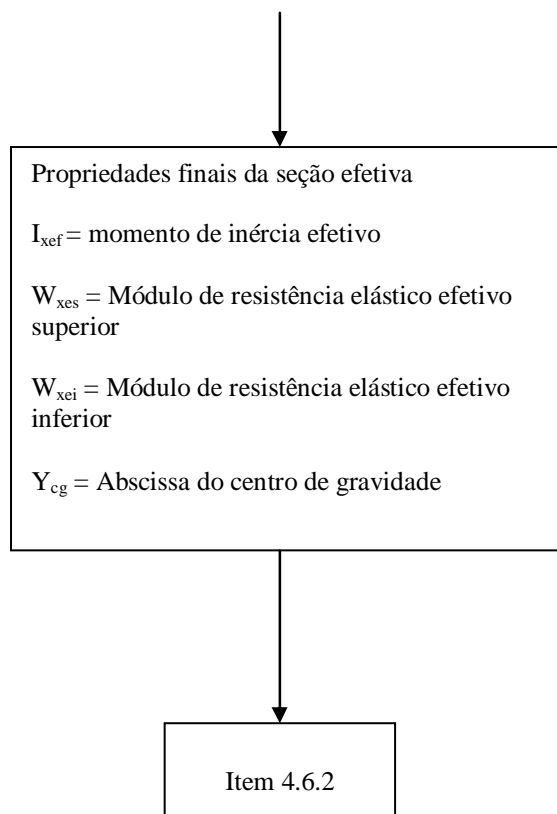




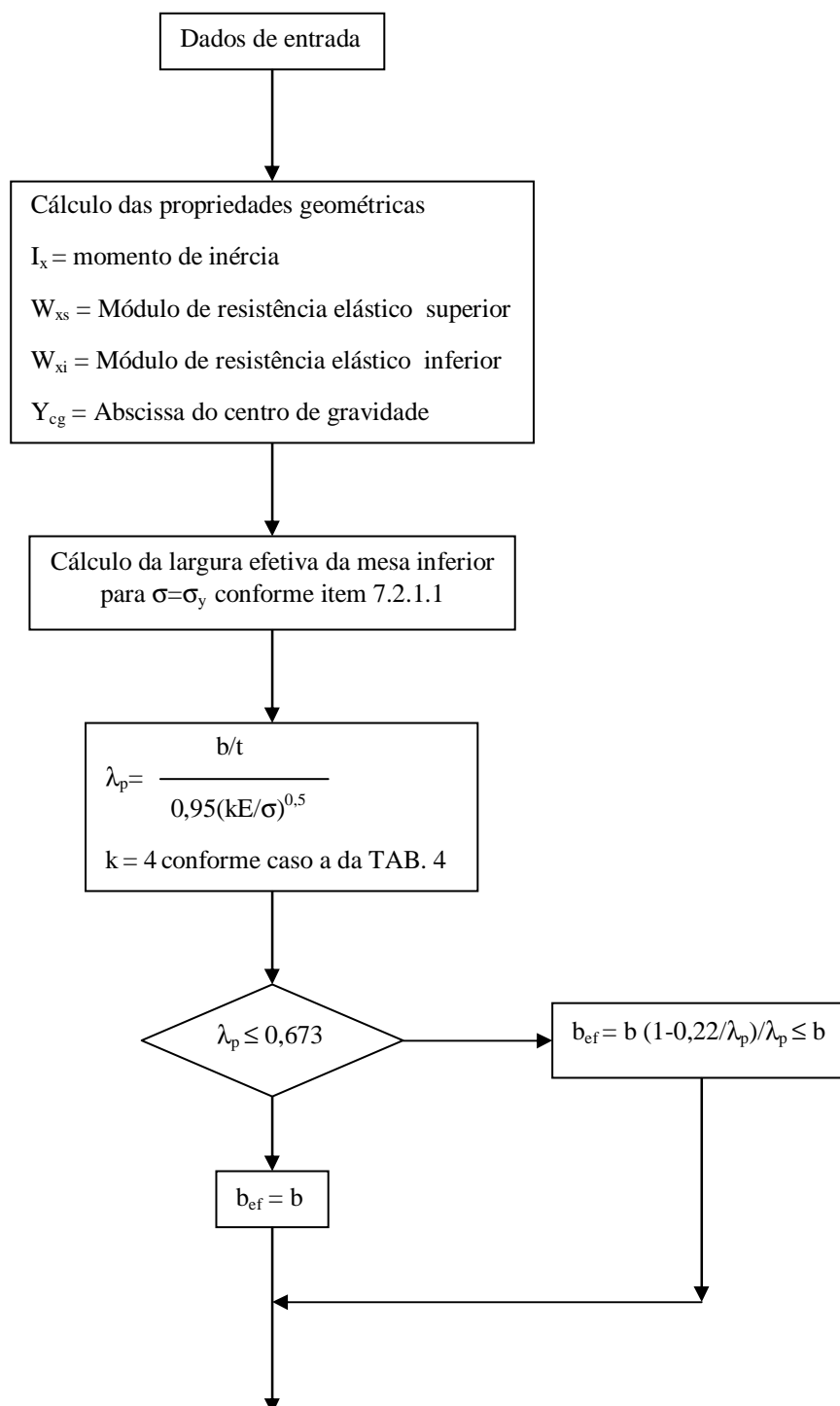
4.6.1.1.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção

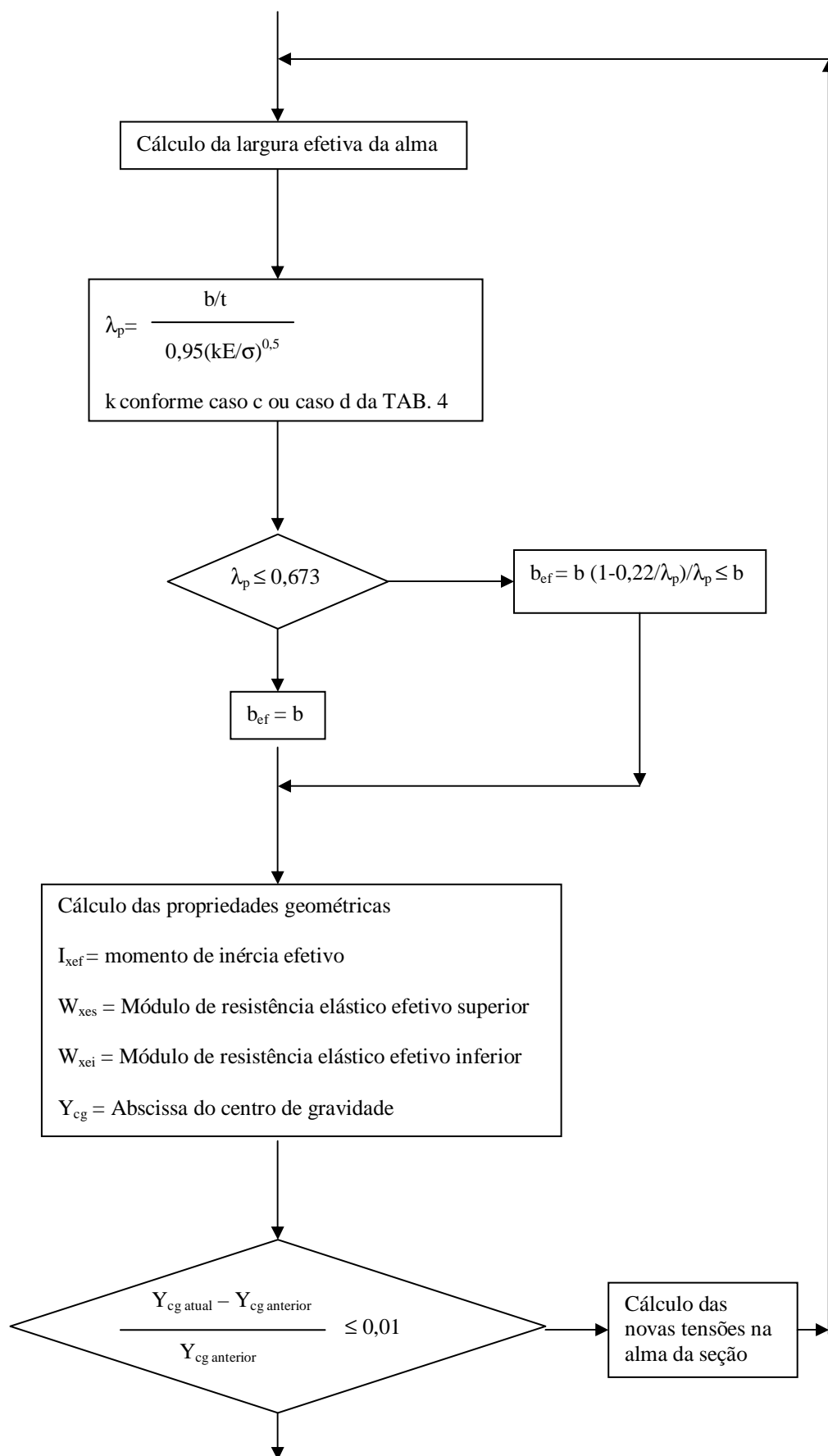


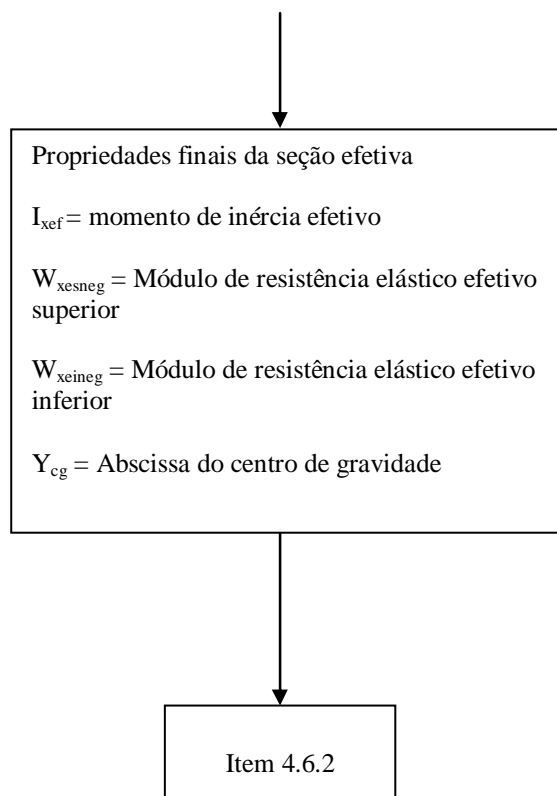




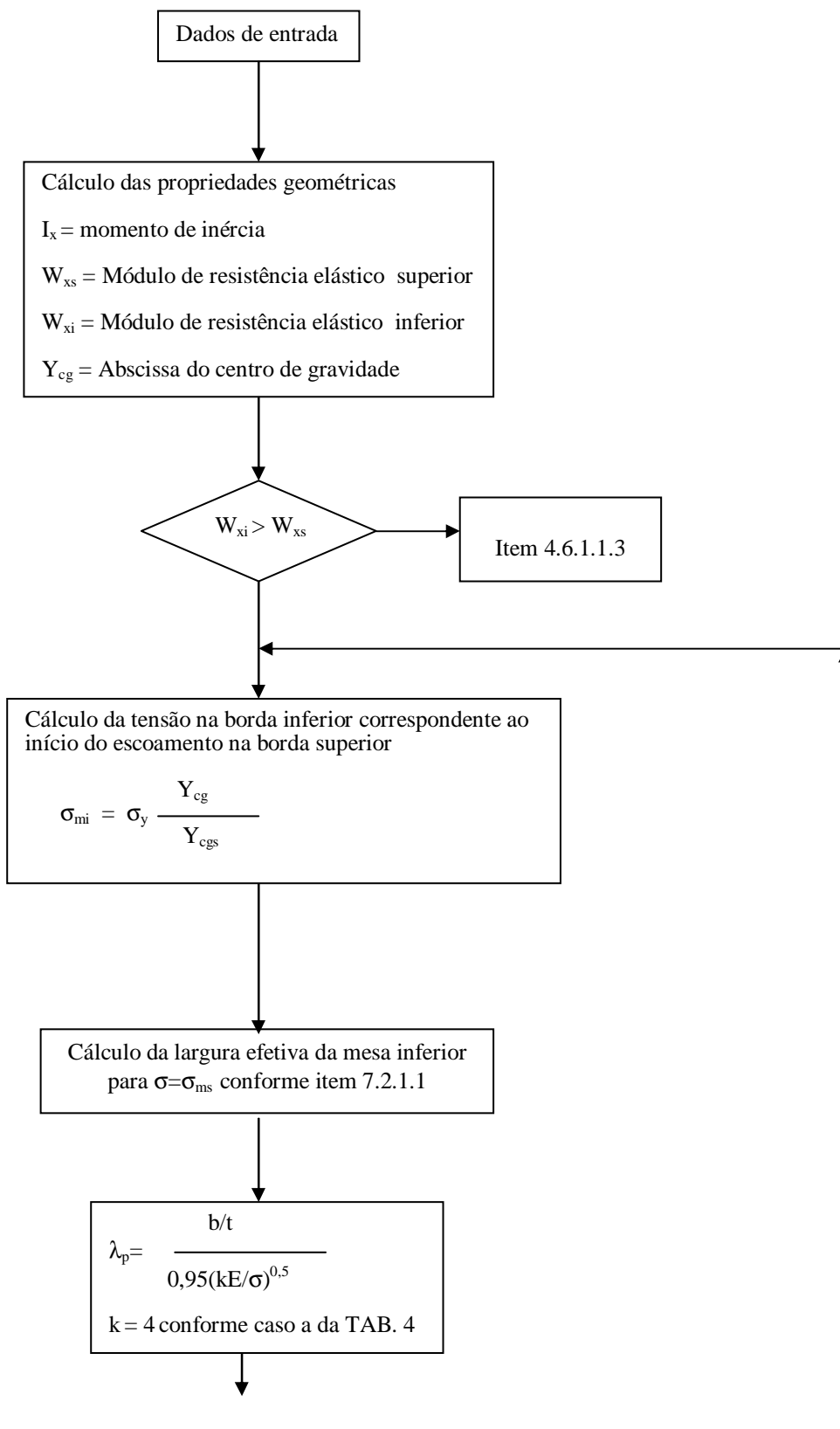
4.6.1.1.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção

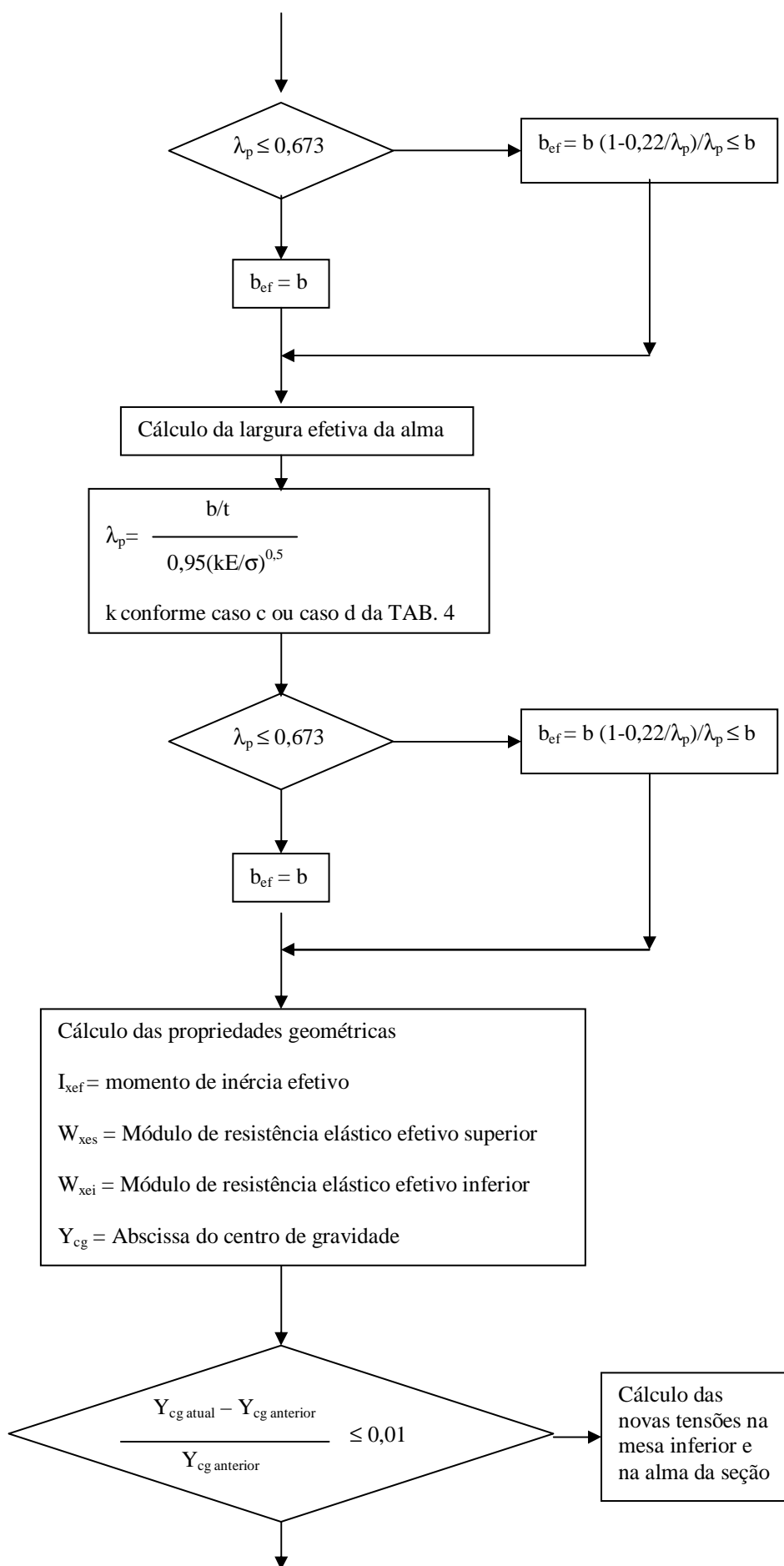






4.6.1.1.4 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção

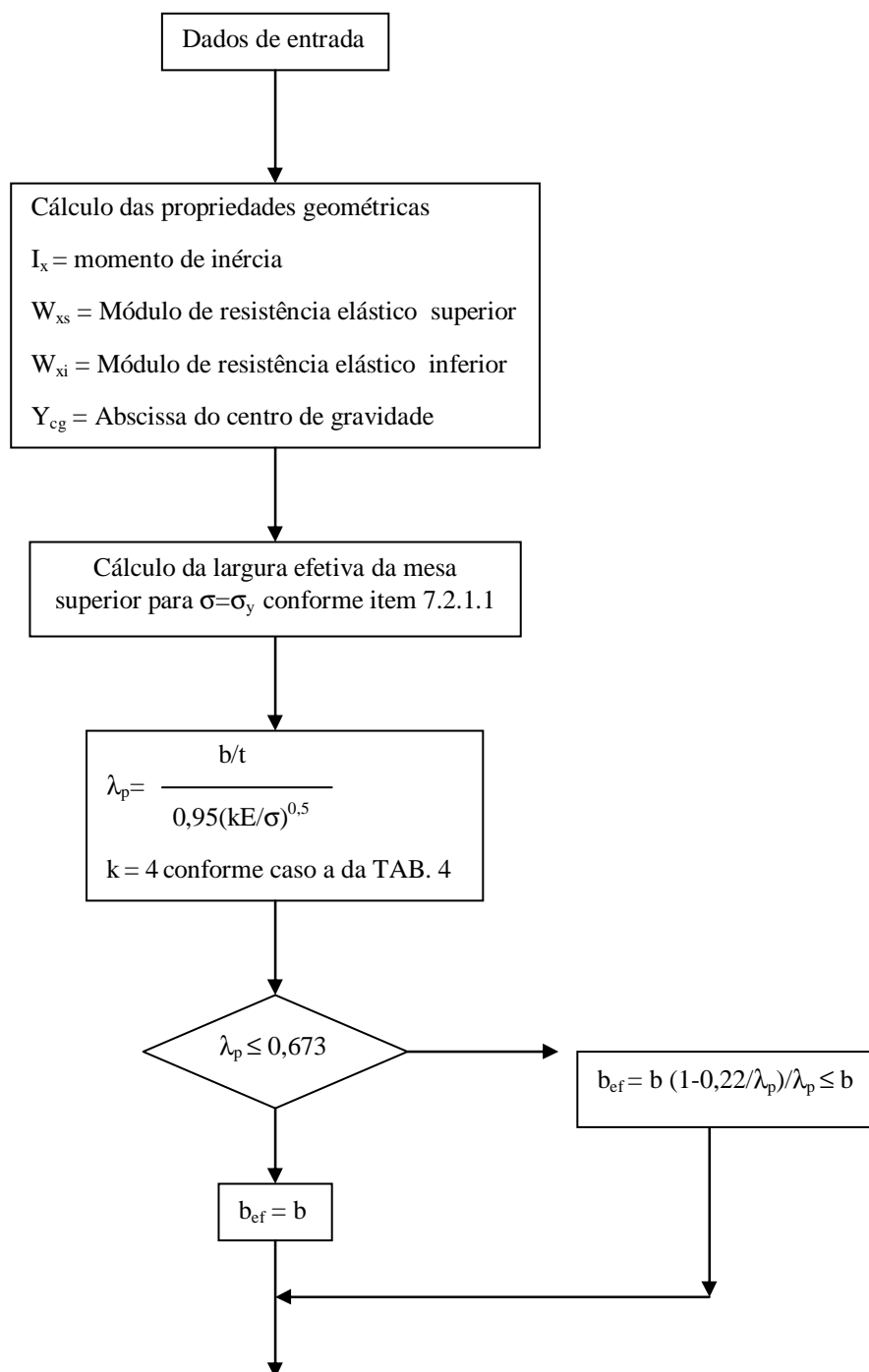


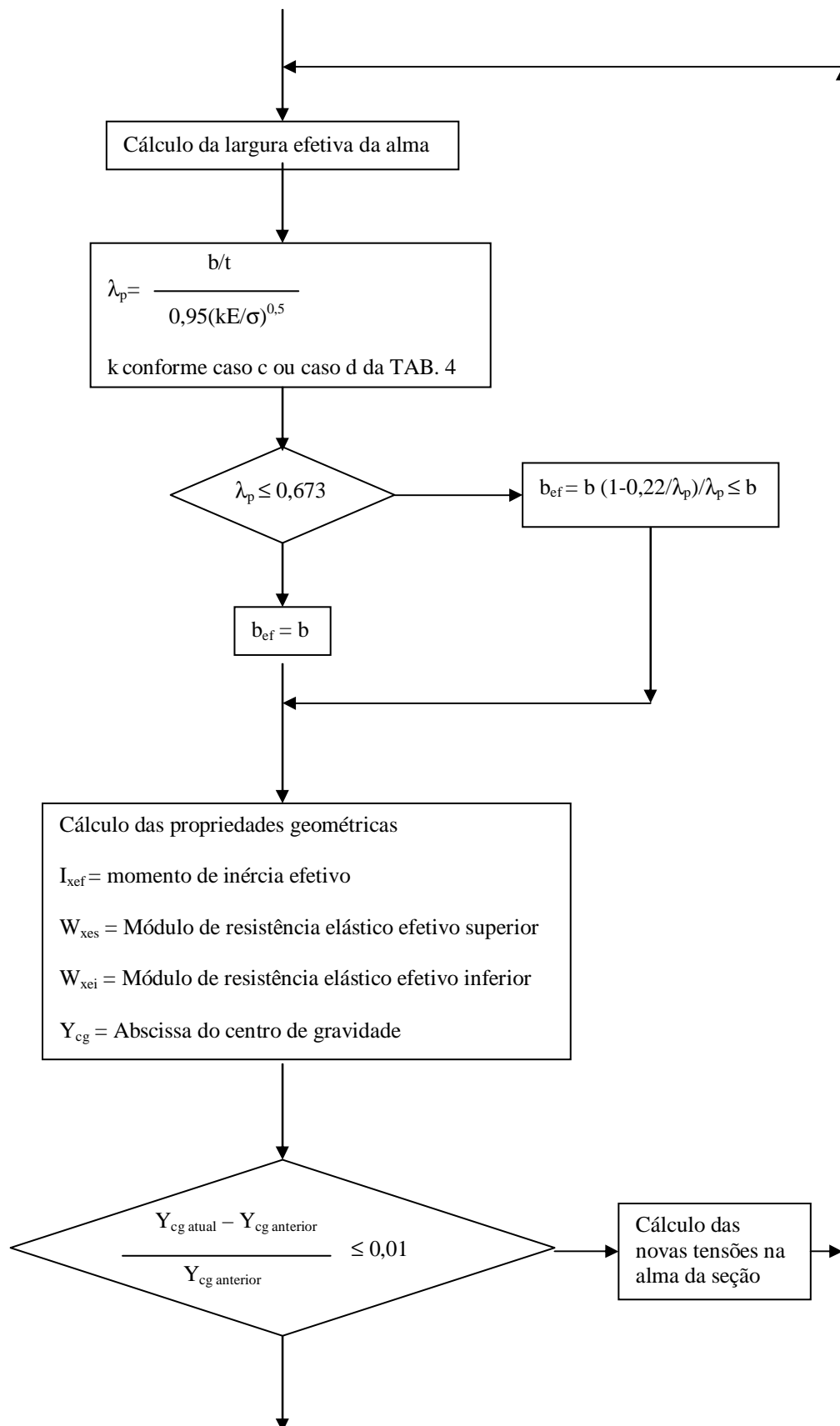


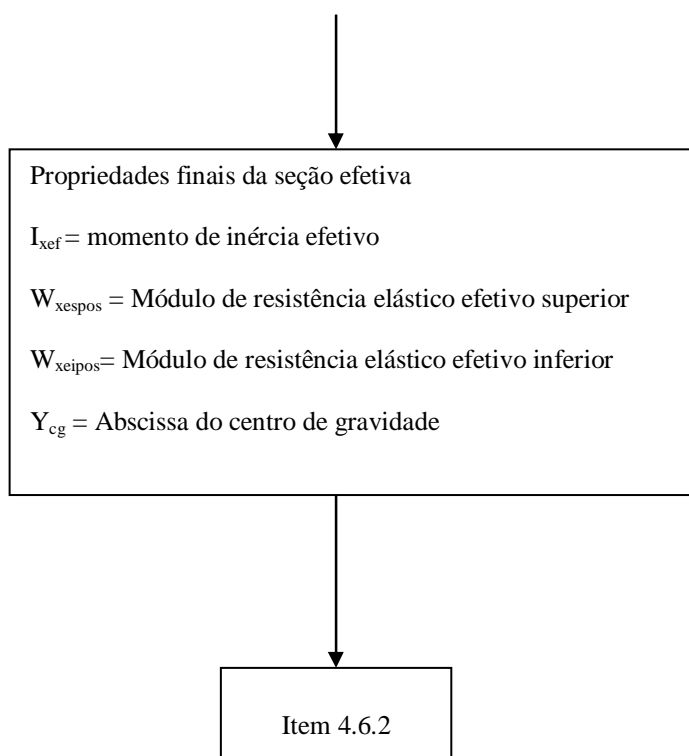


4.6.1.2 Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 1/0

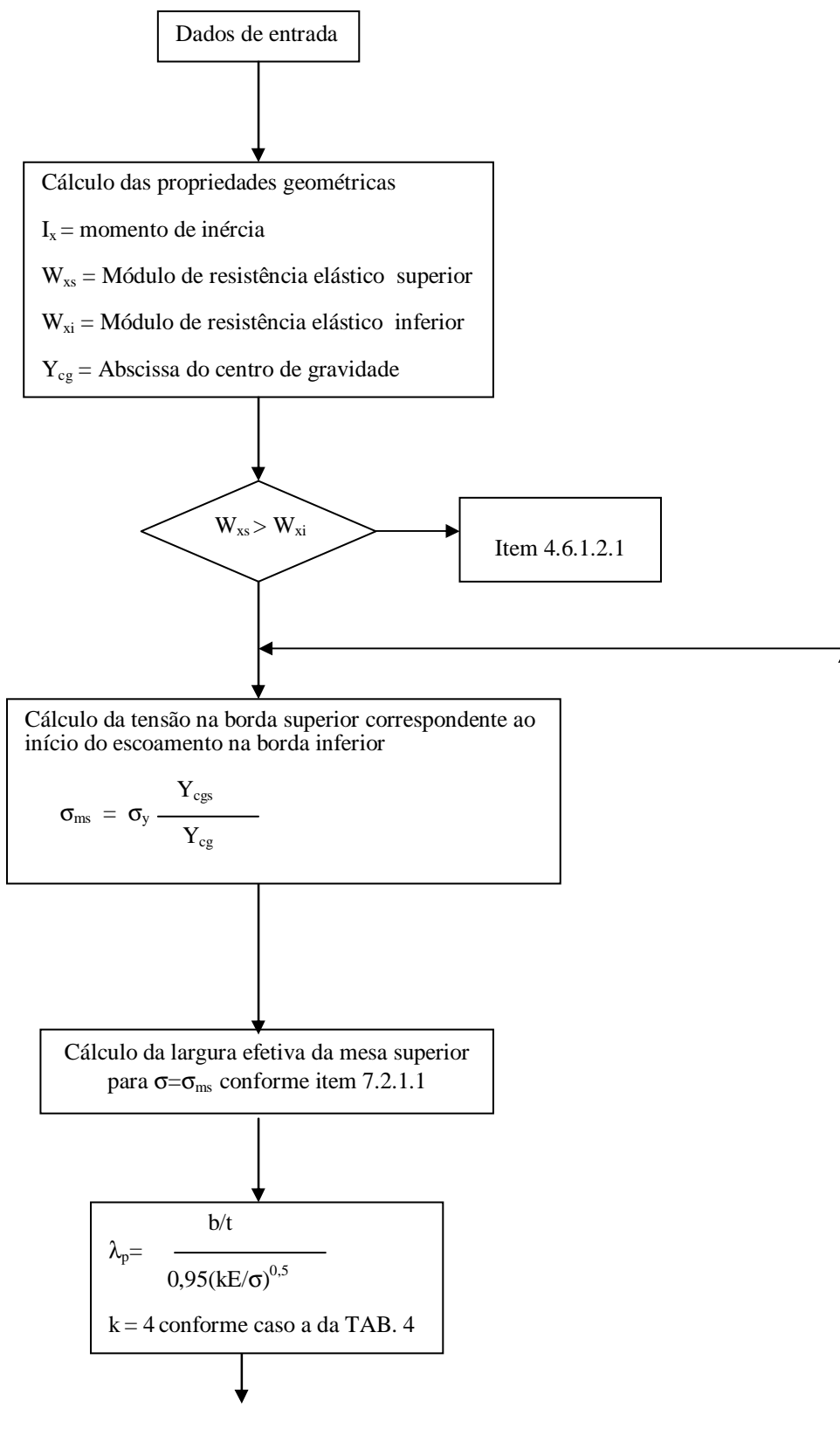
4.6.1.2.1 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção

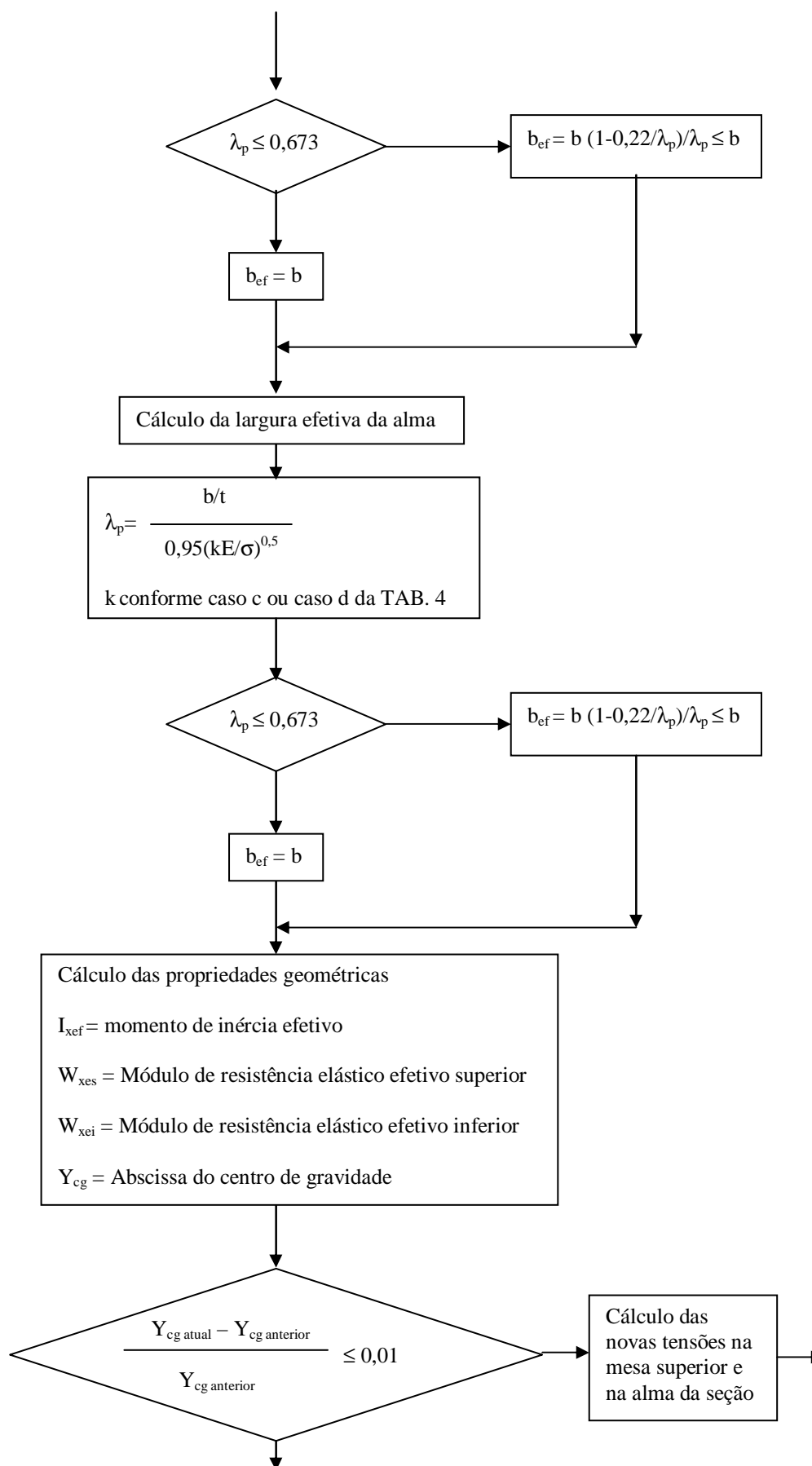


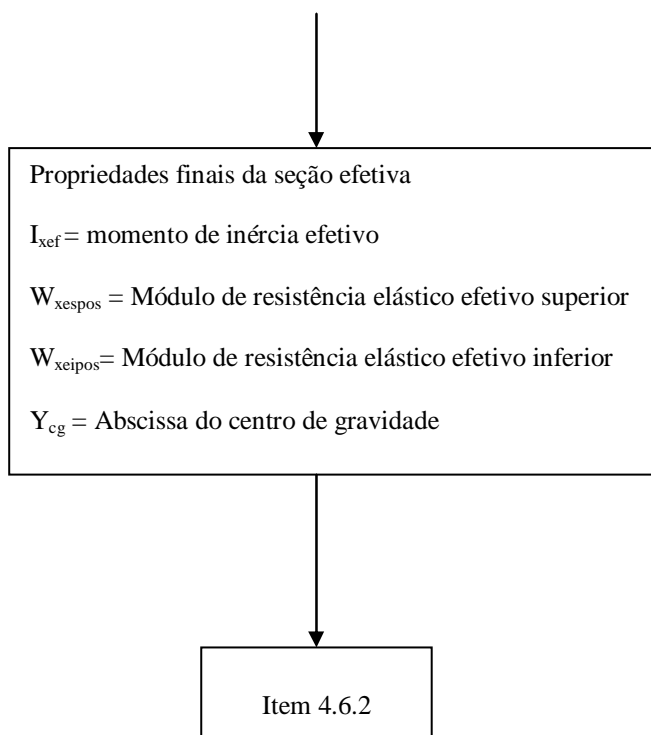




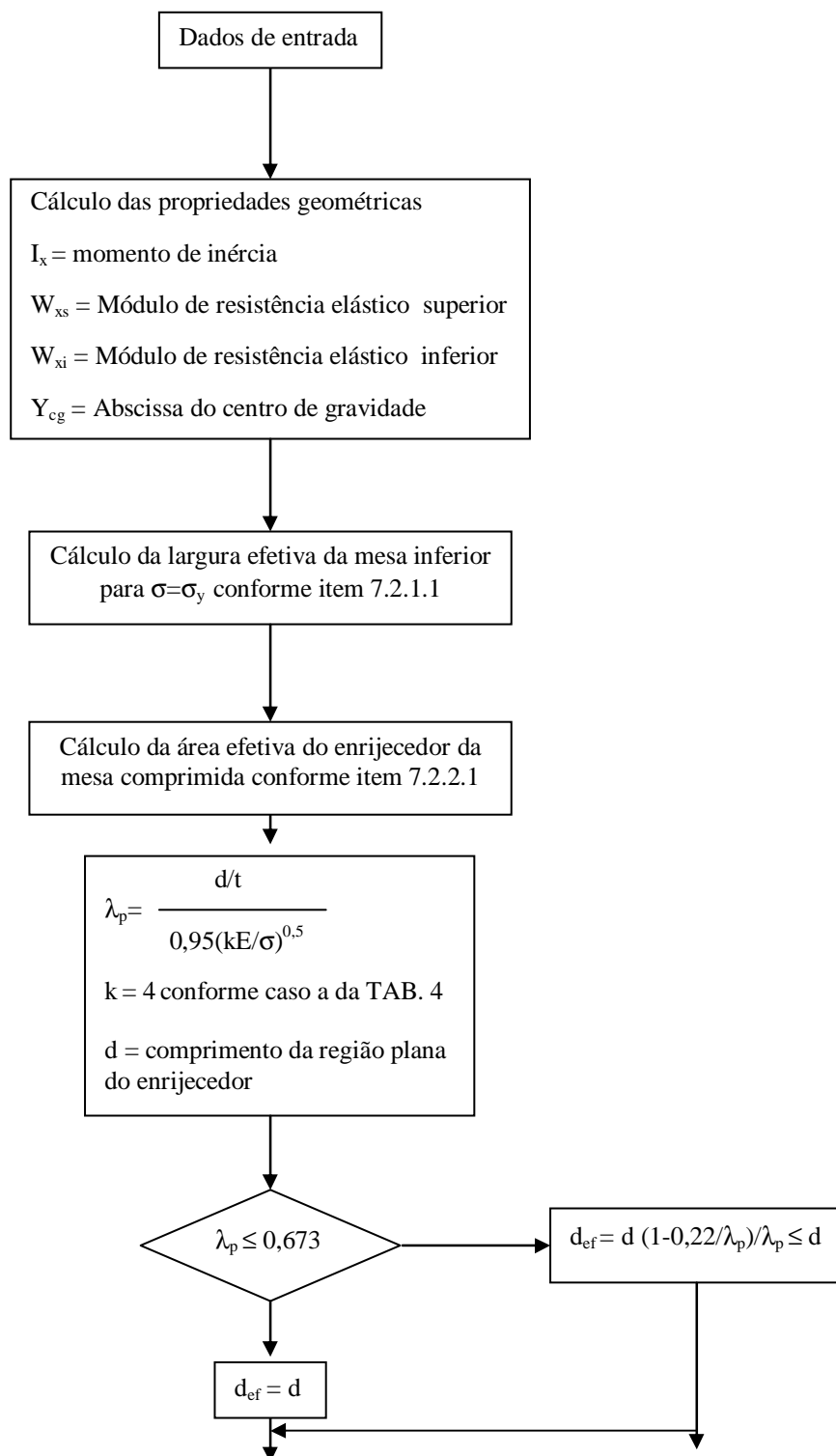
4.6.1.2.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção

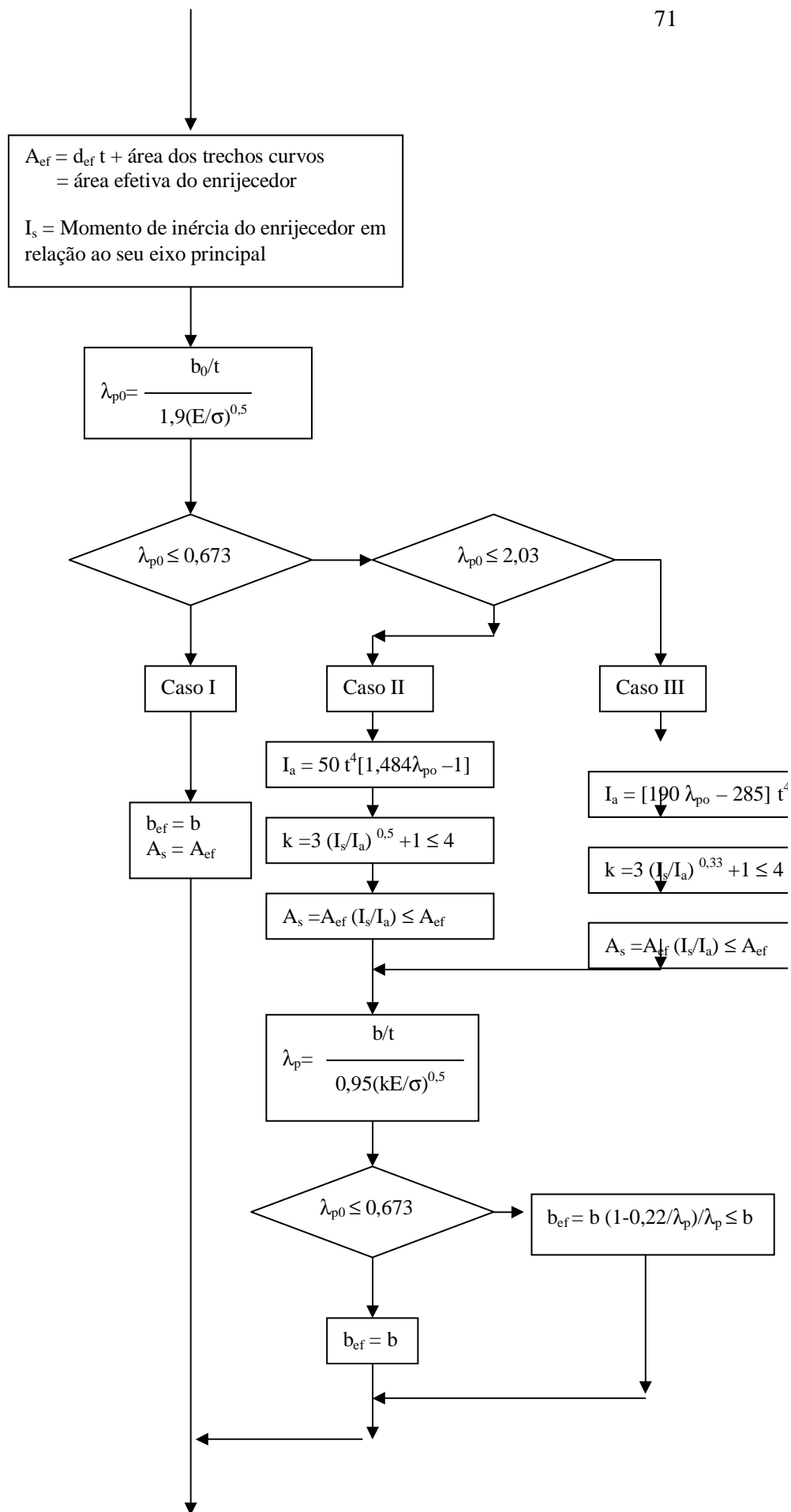


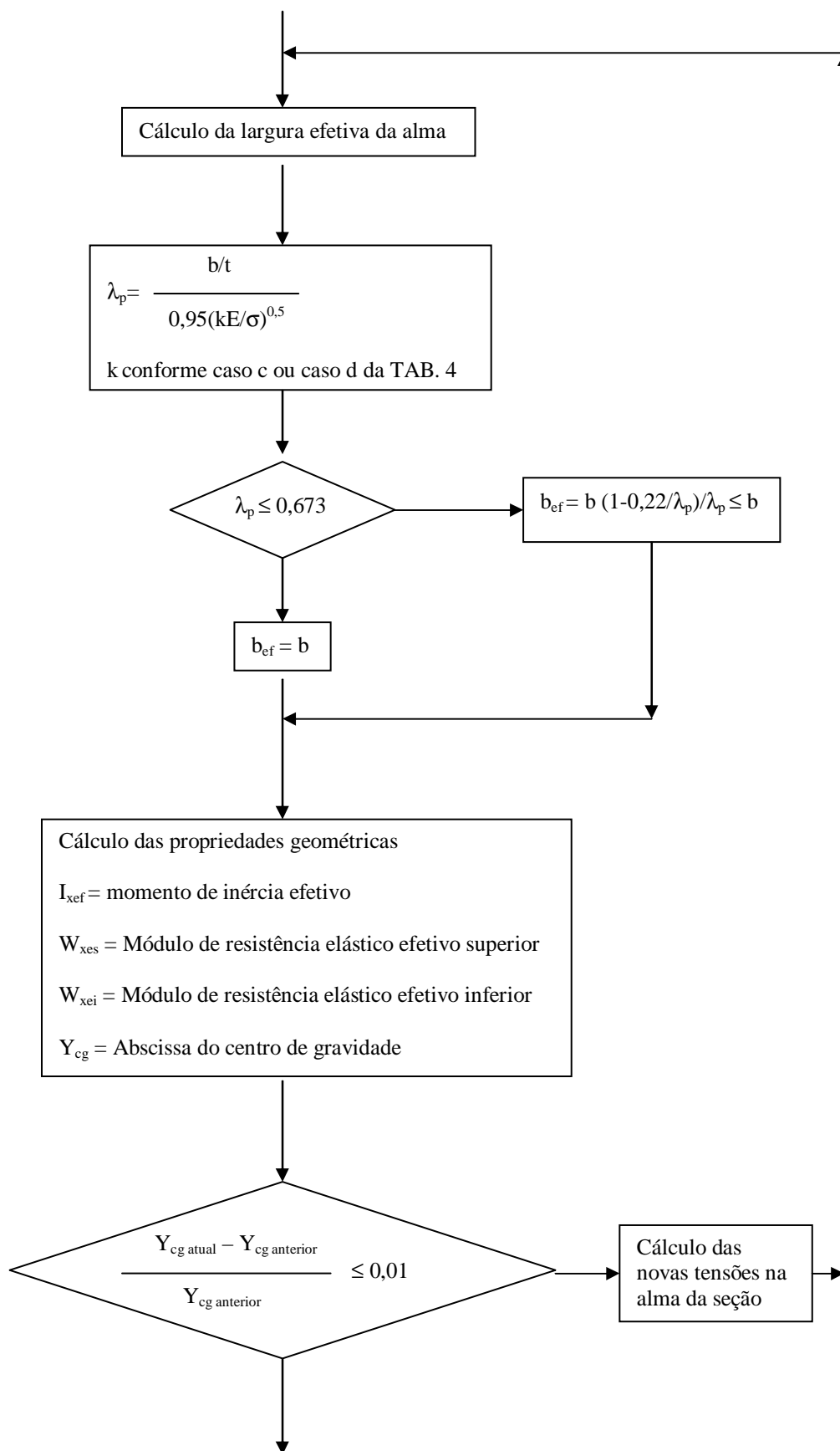


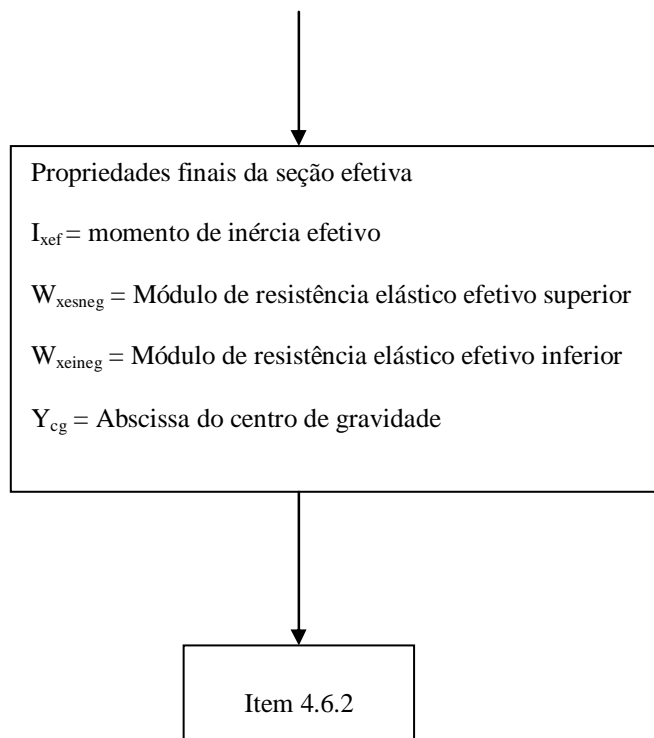


4.6.1.2.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção

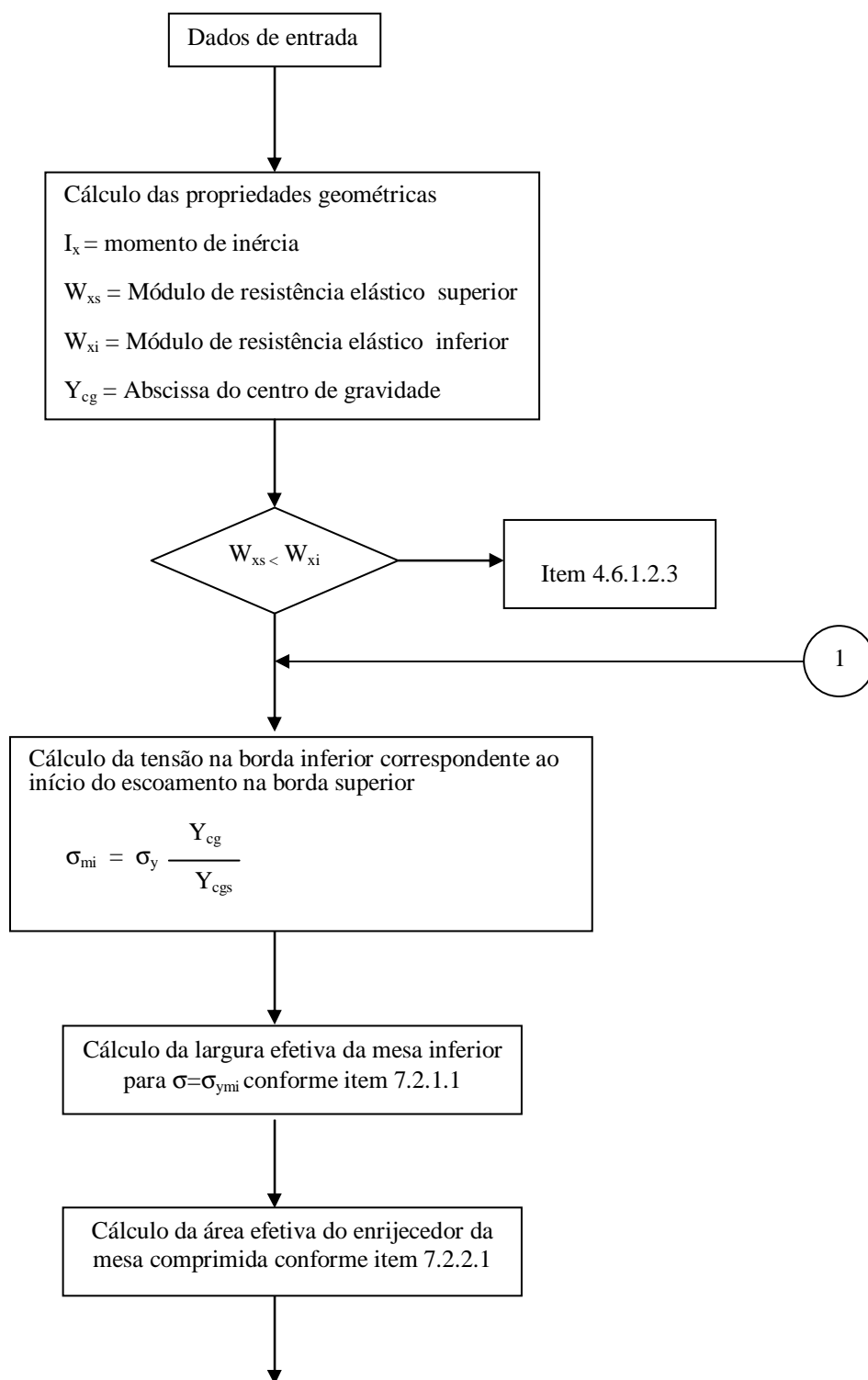


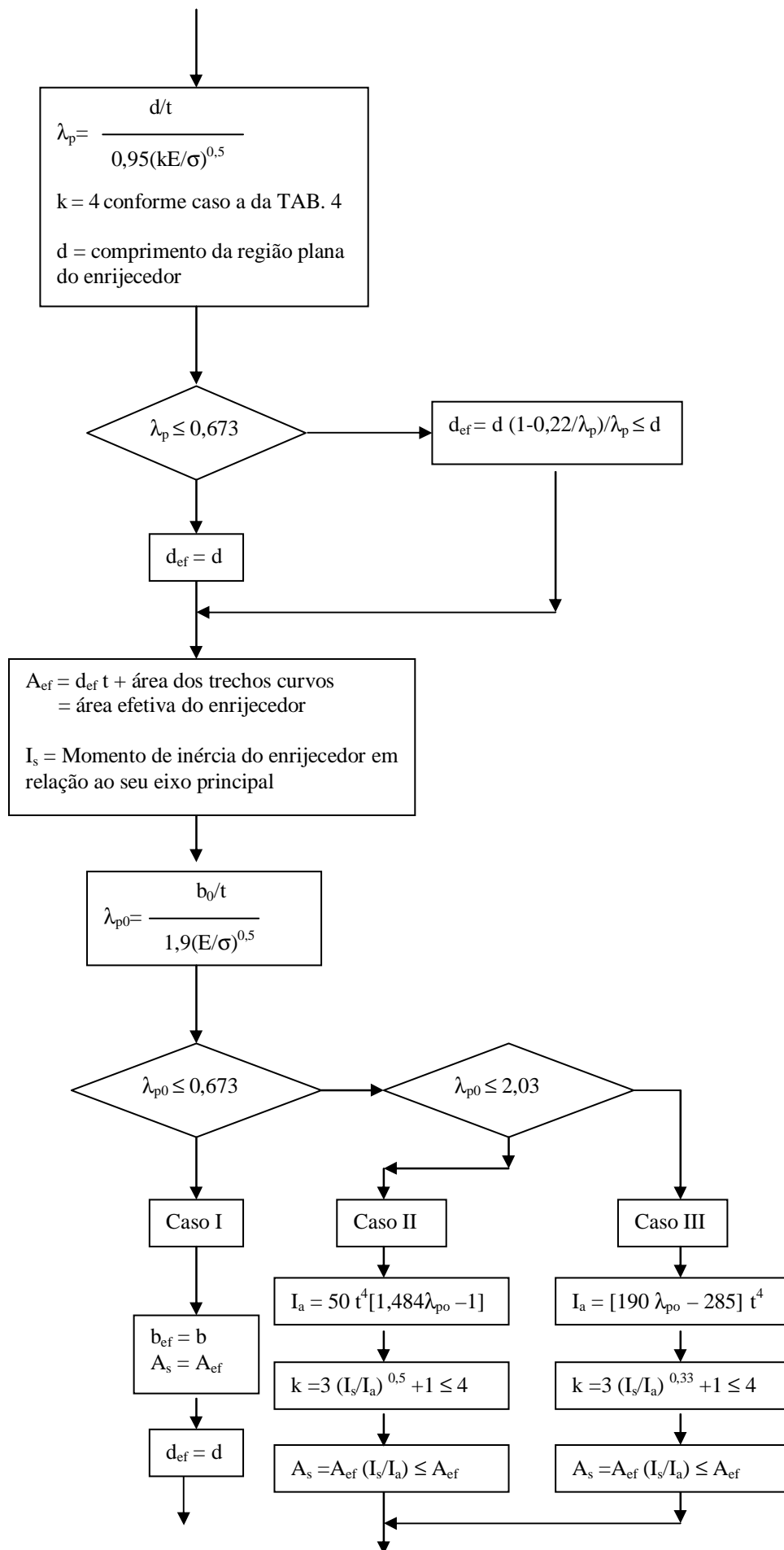


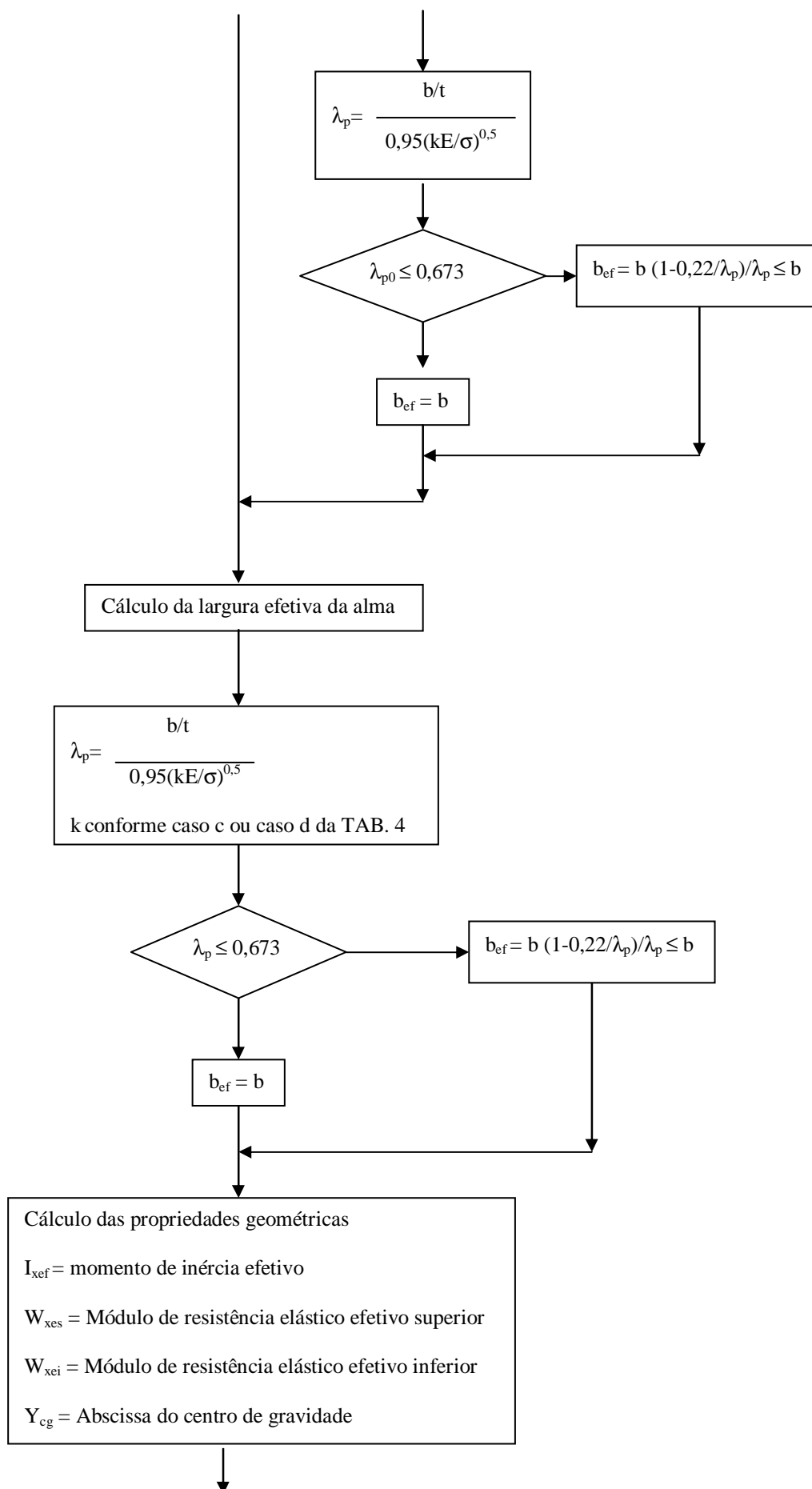


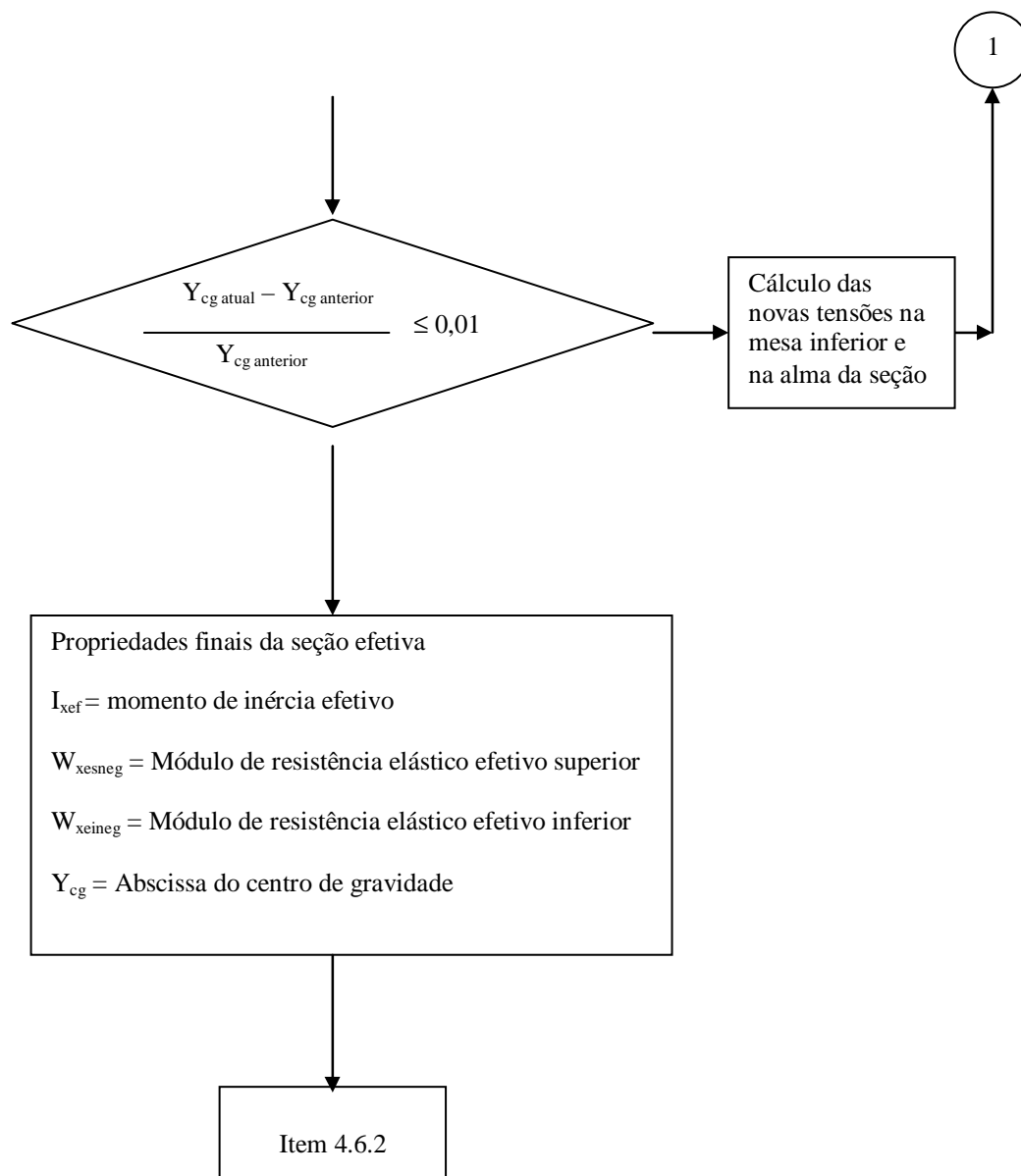


4.6.1.2.4 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção



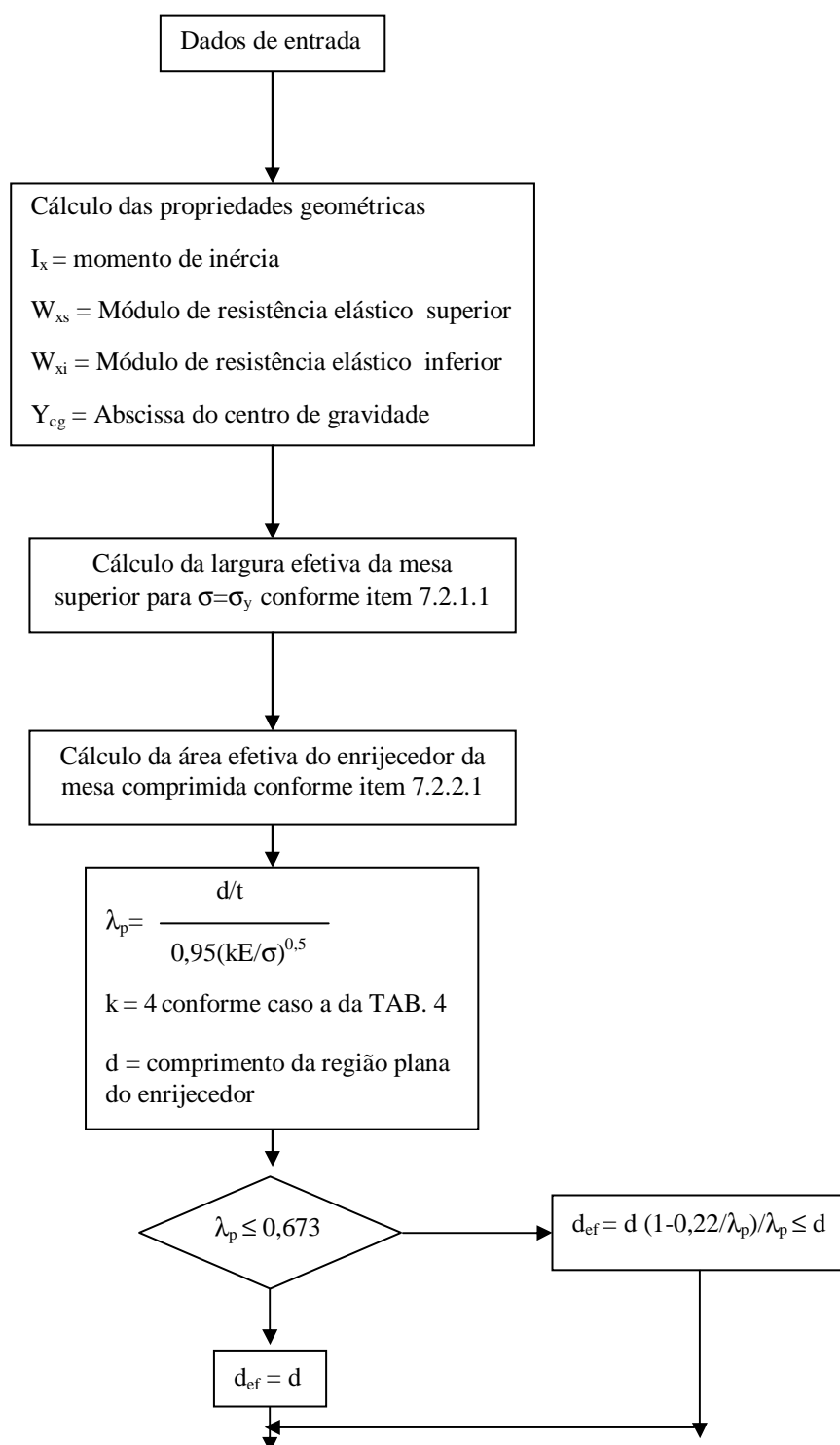


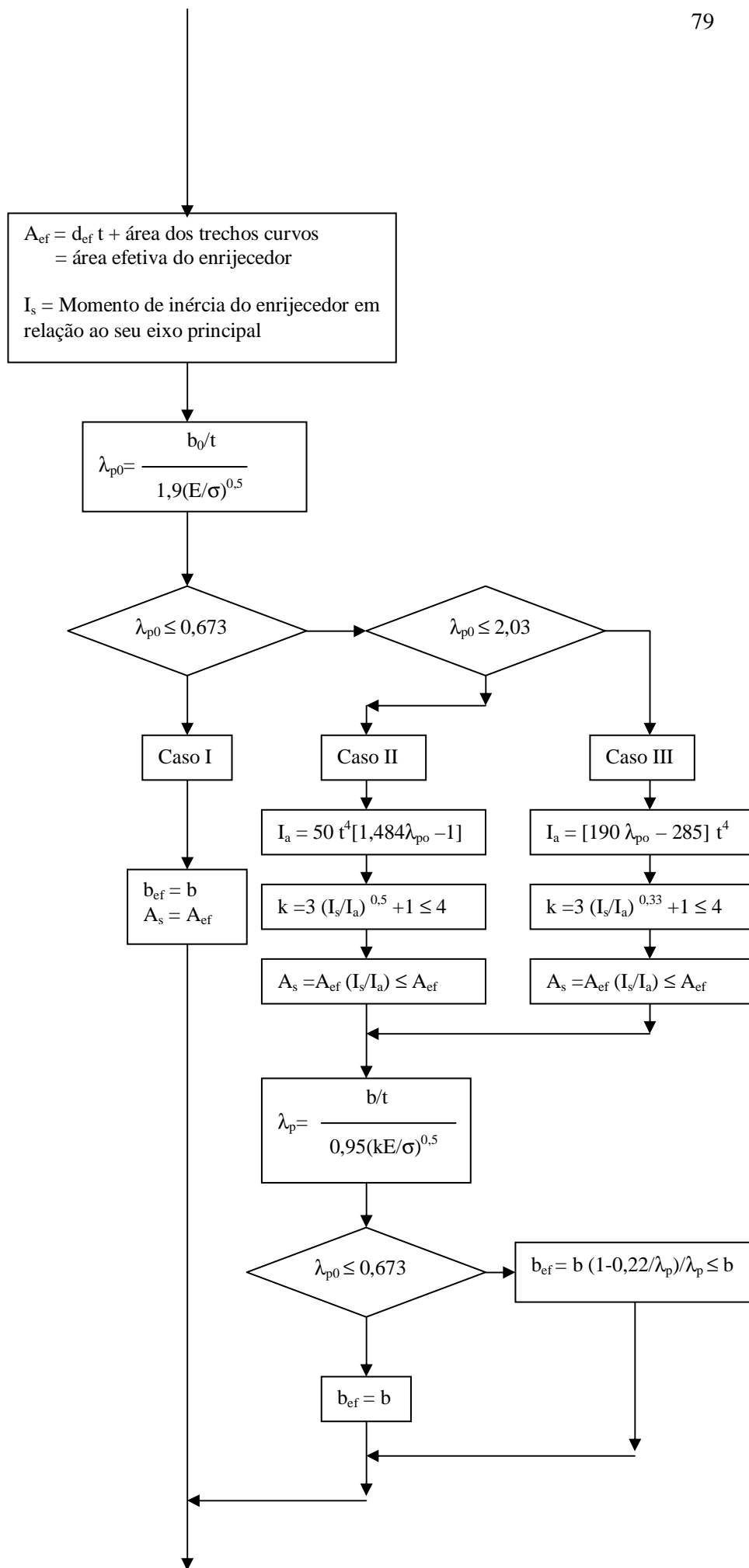


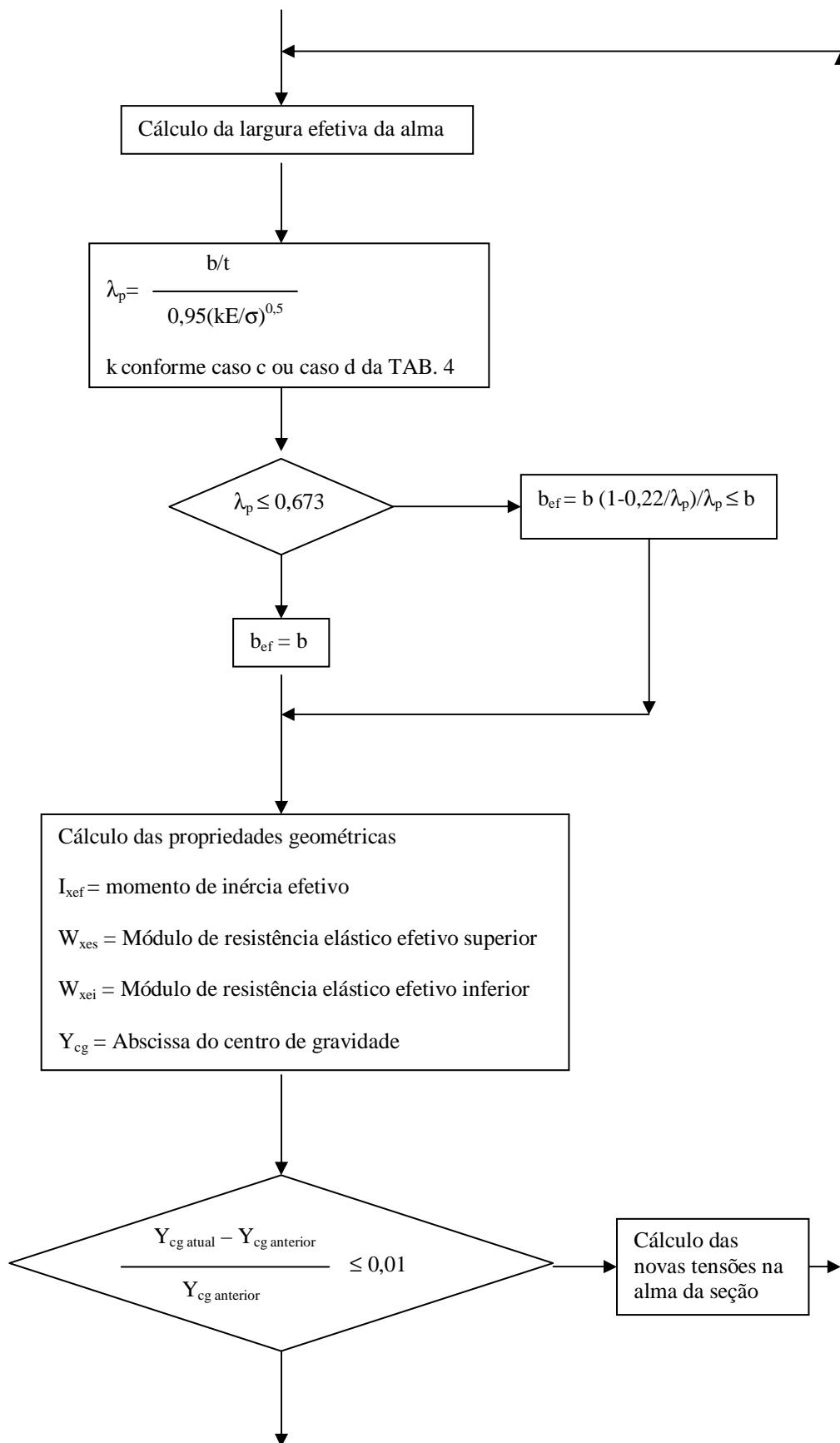


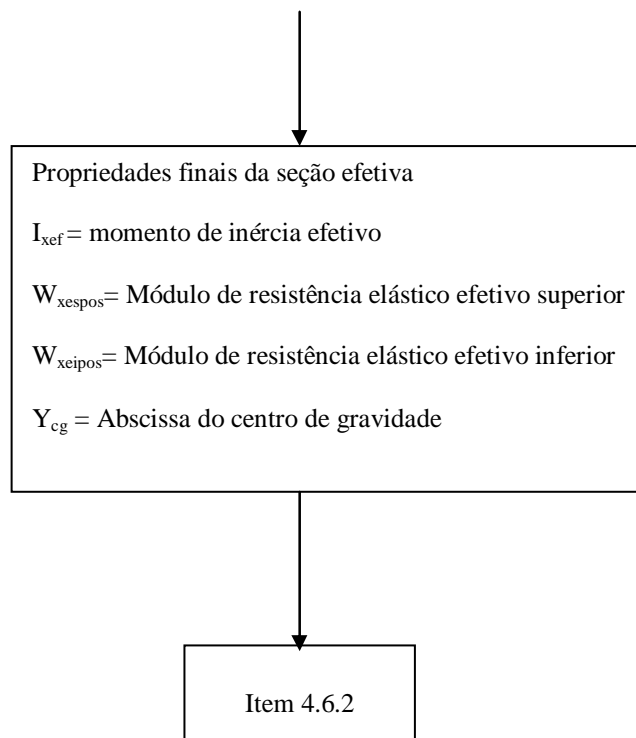
4.6.1.3 Sub-rotinas para determinação efetiva da fôrma tipo 0/1

4.6.1.3.1 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção

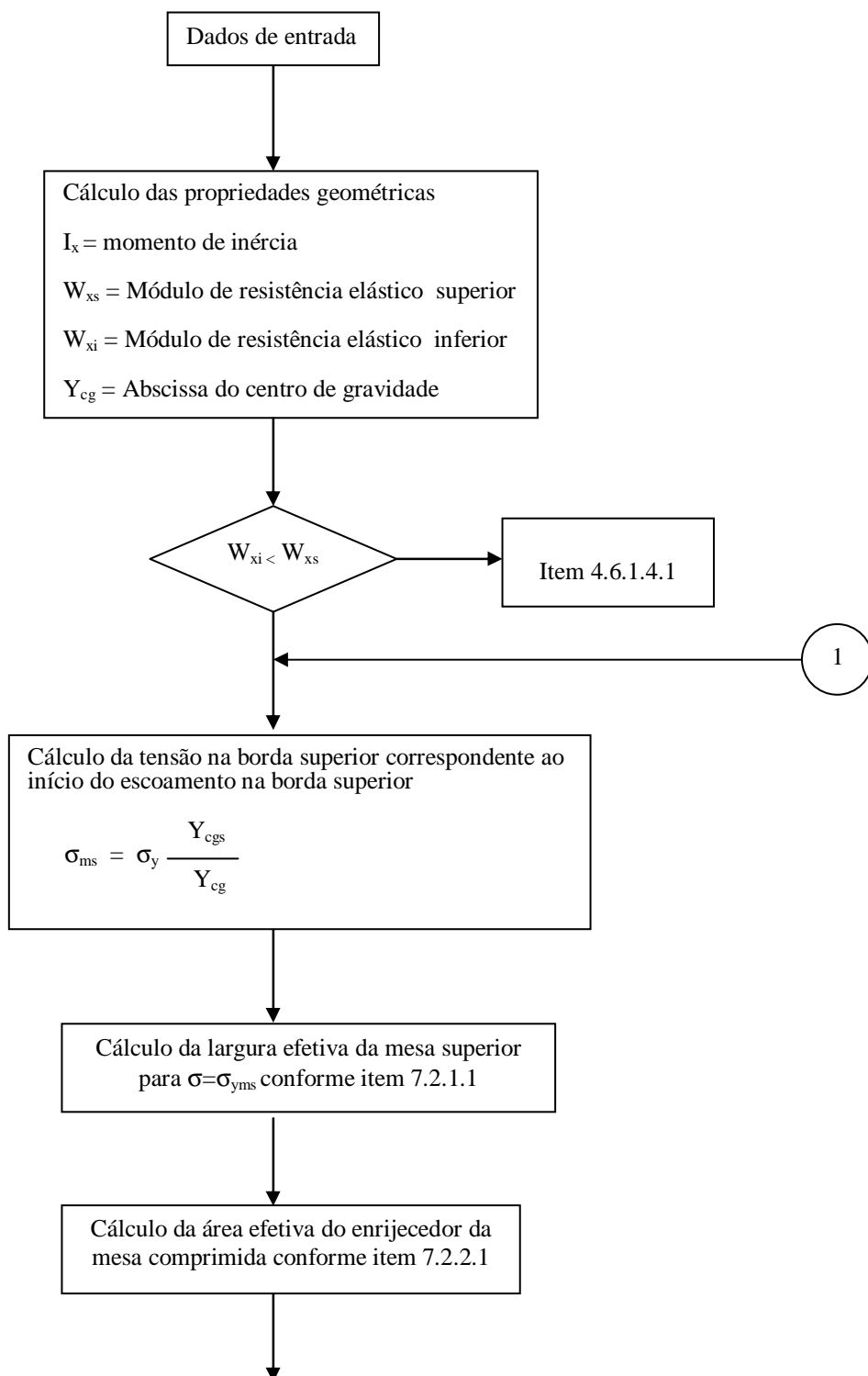


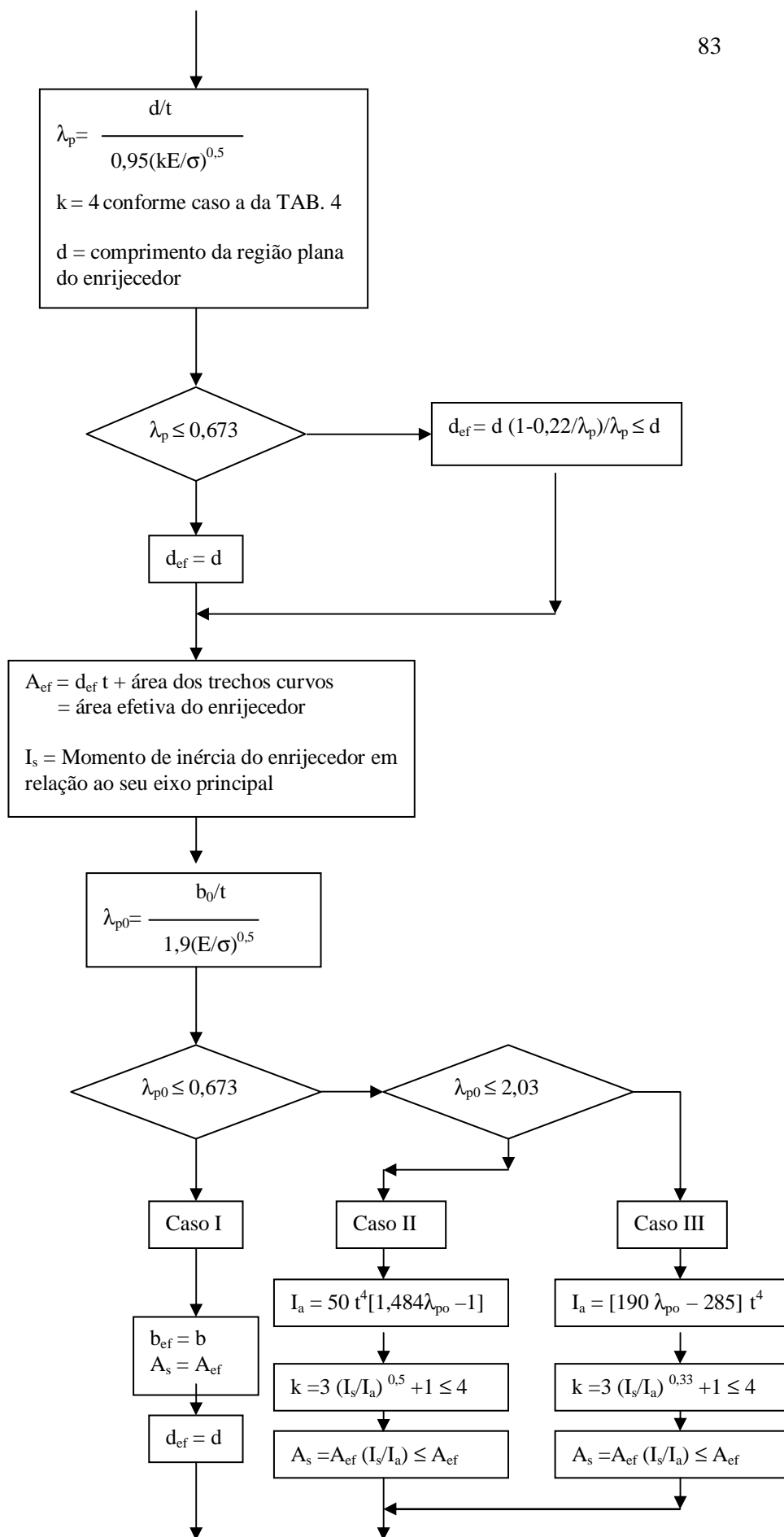


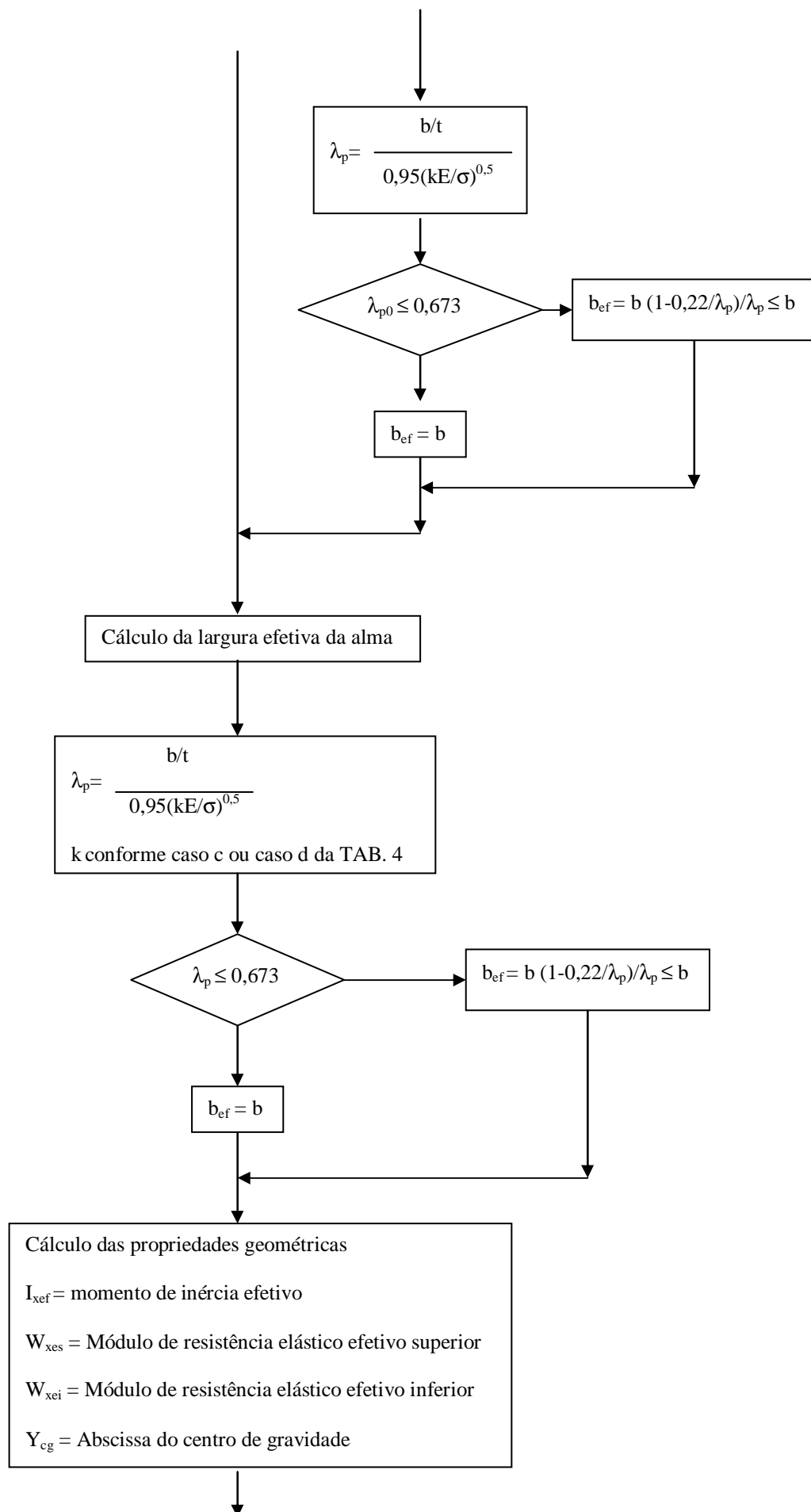


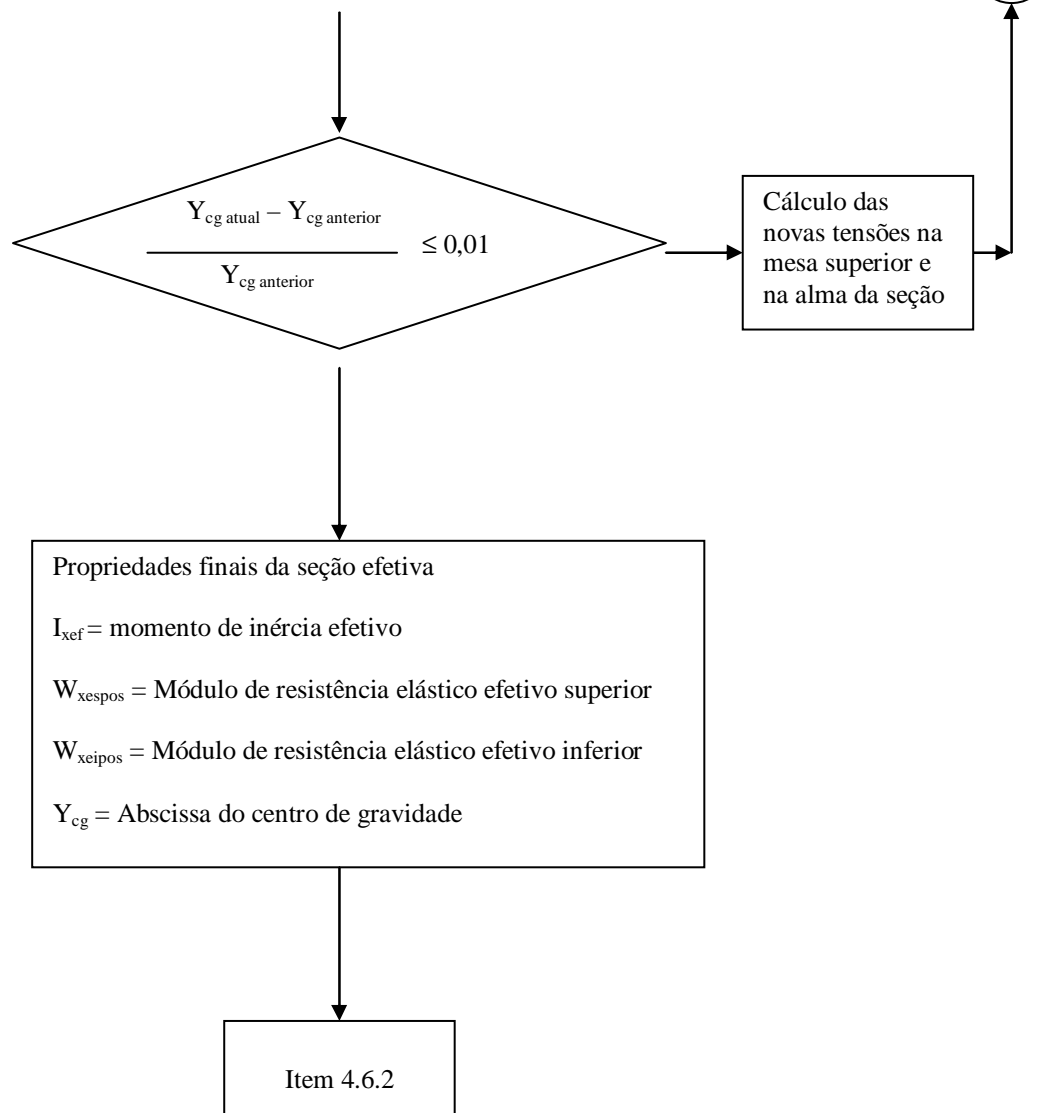


4.6.1.3.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção

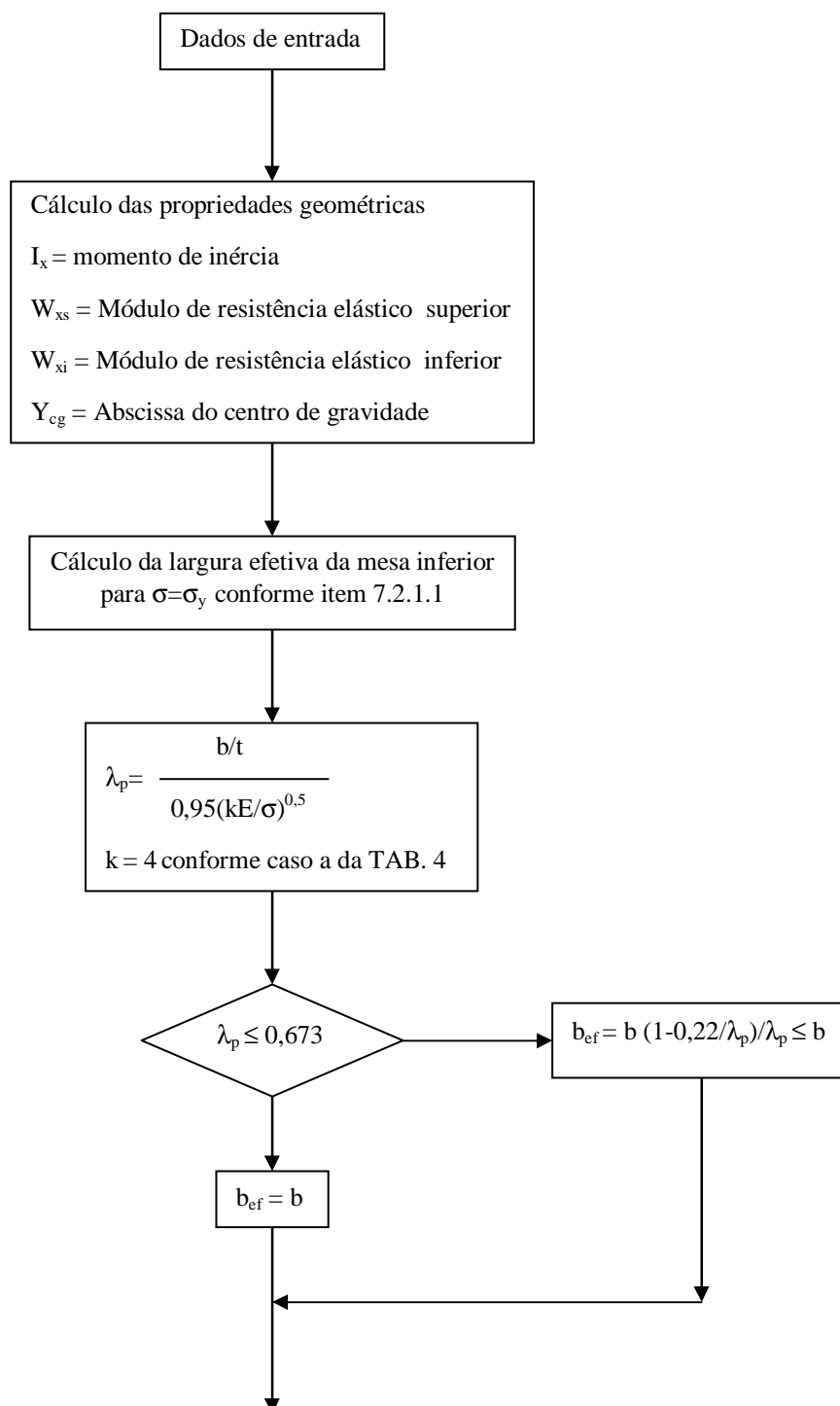


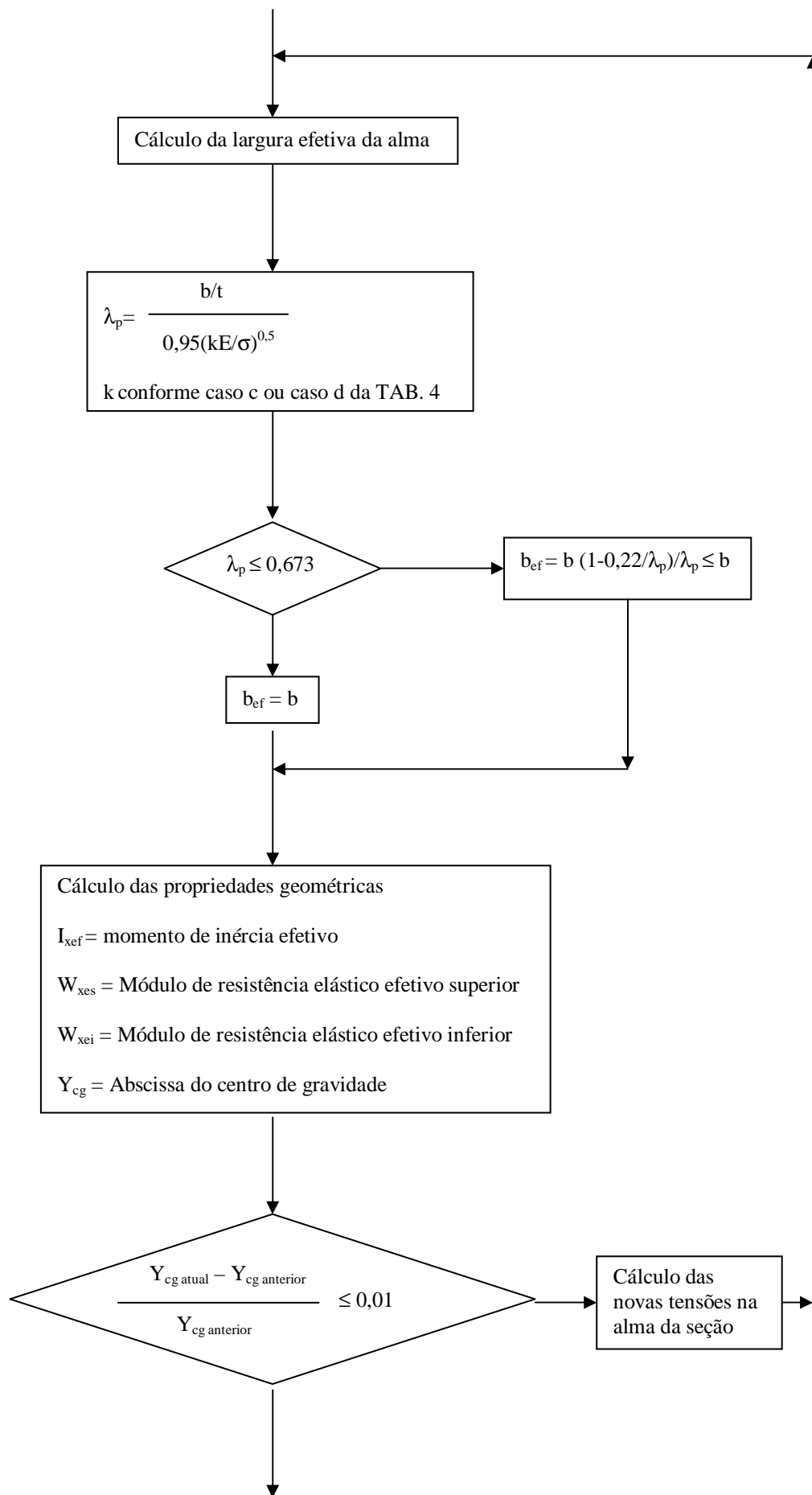


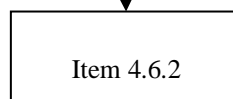
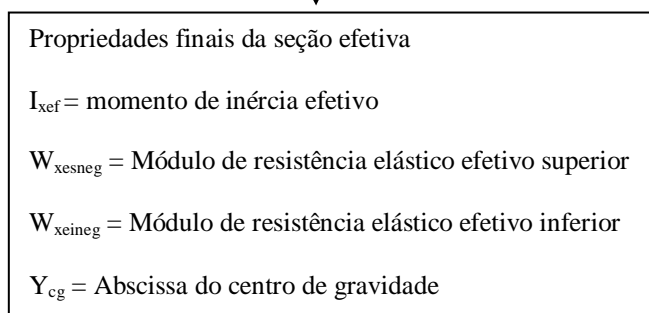




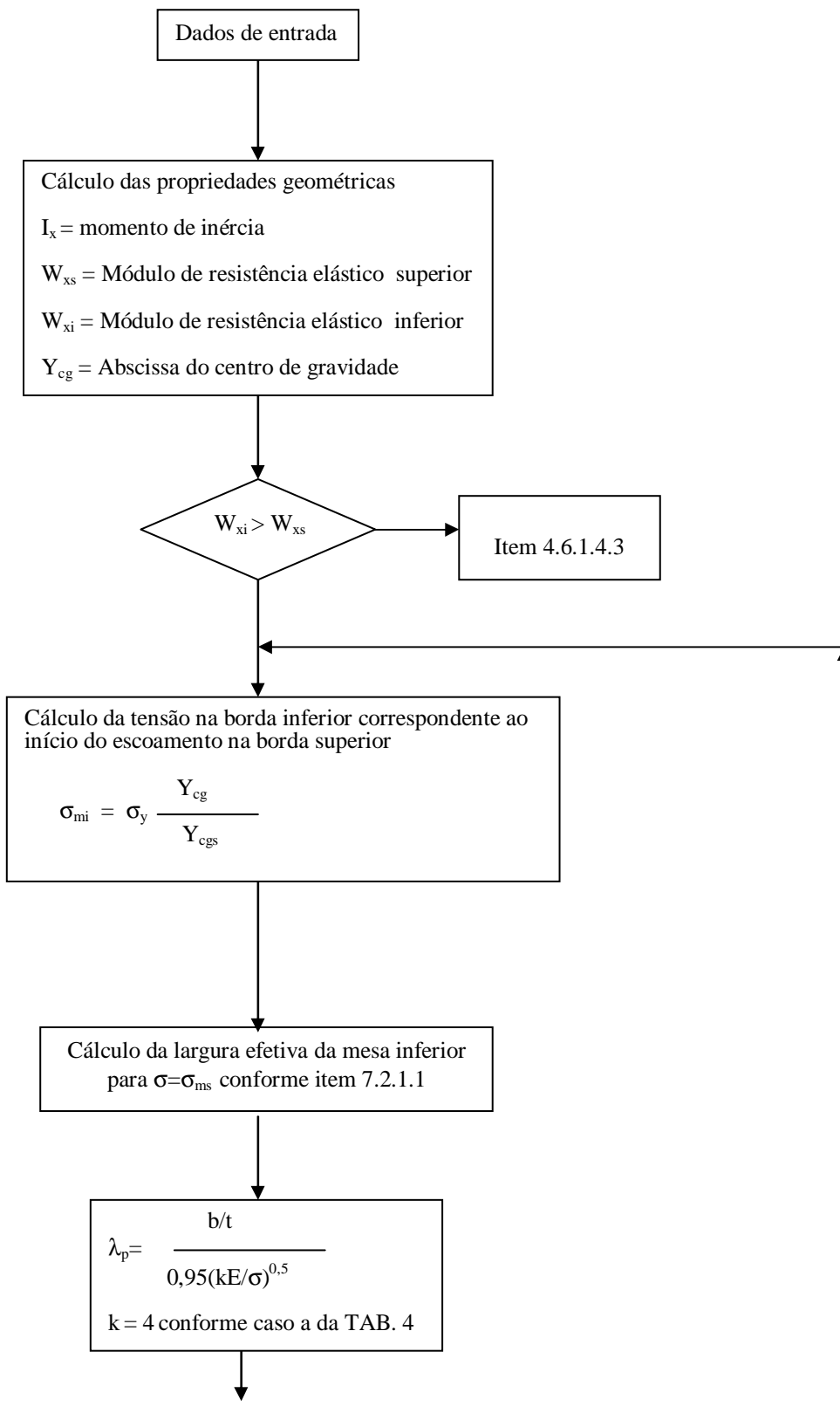
4.6.1.3.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção

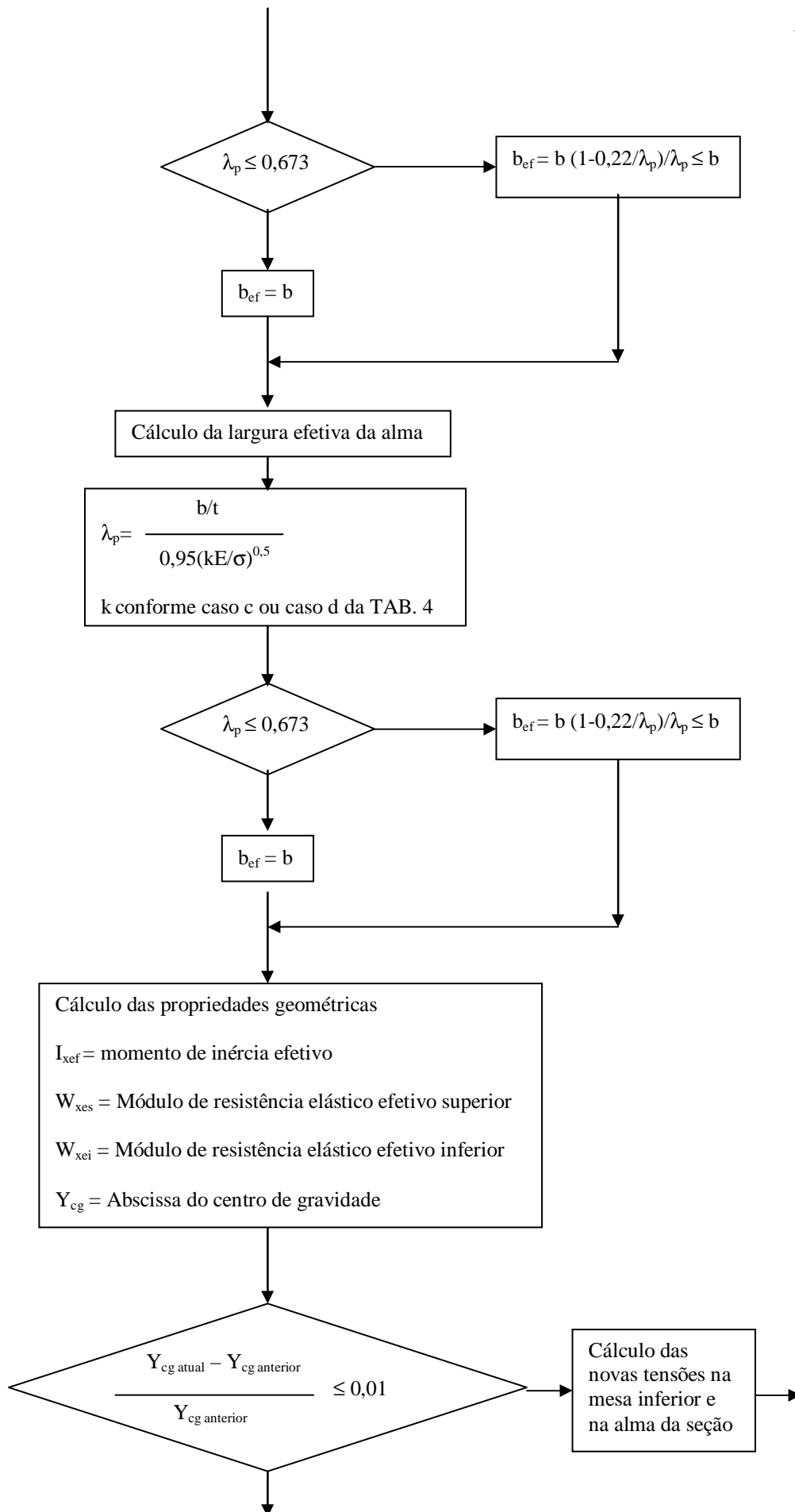


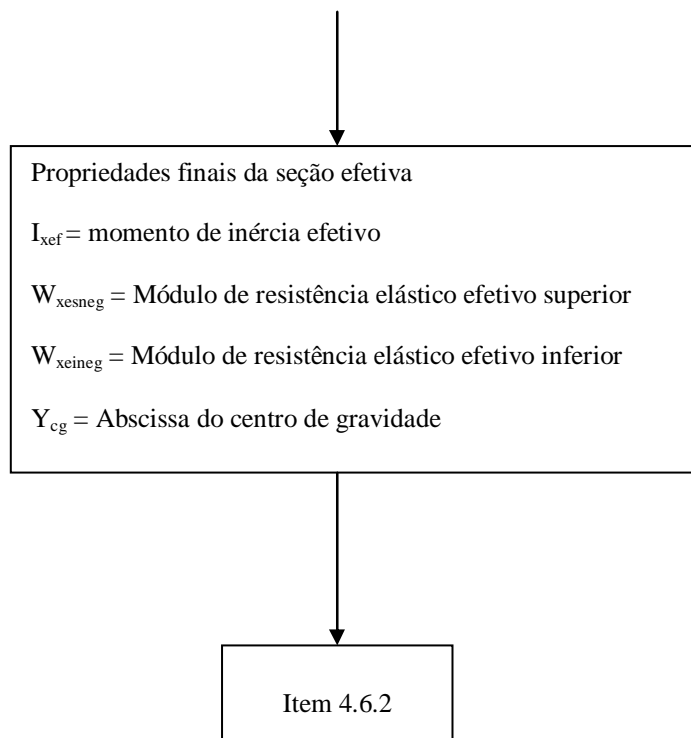




4.6.1.3.4 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior tracionada da seção

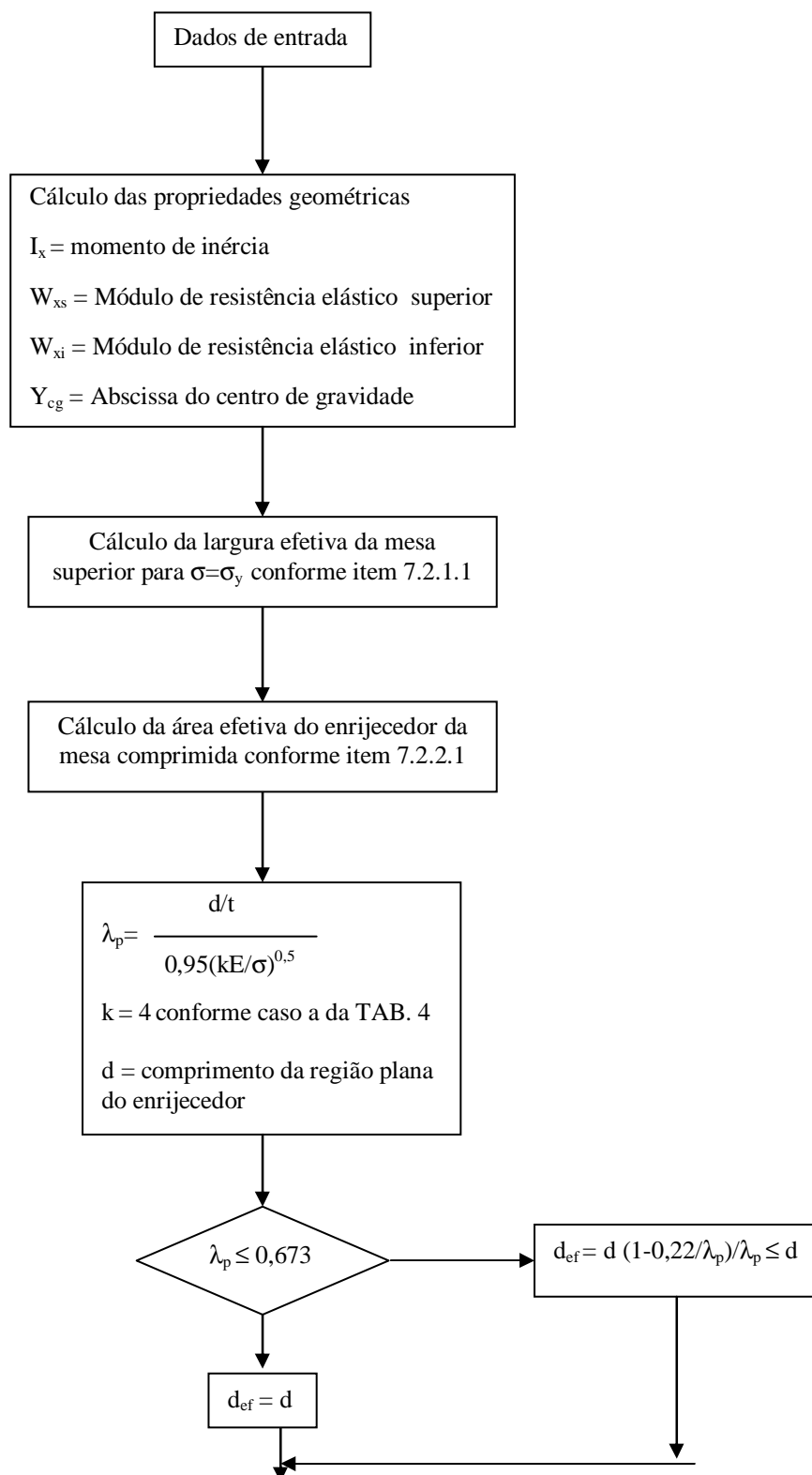


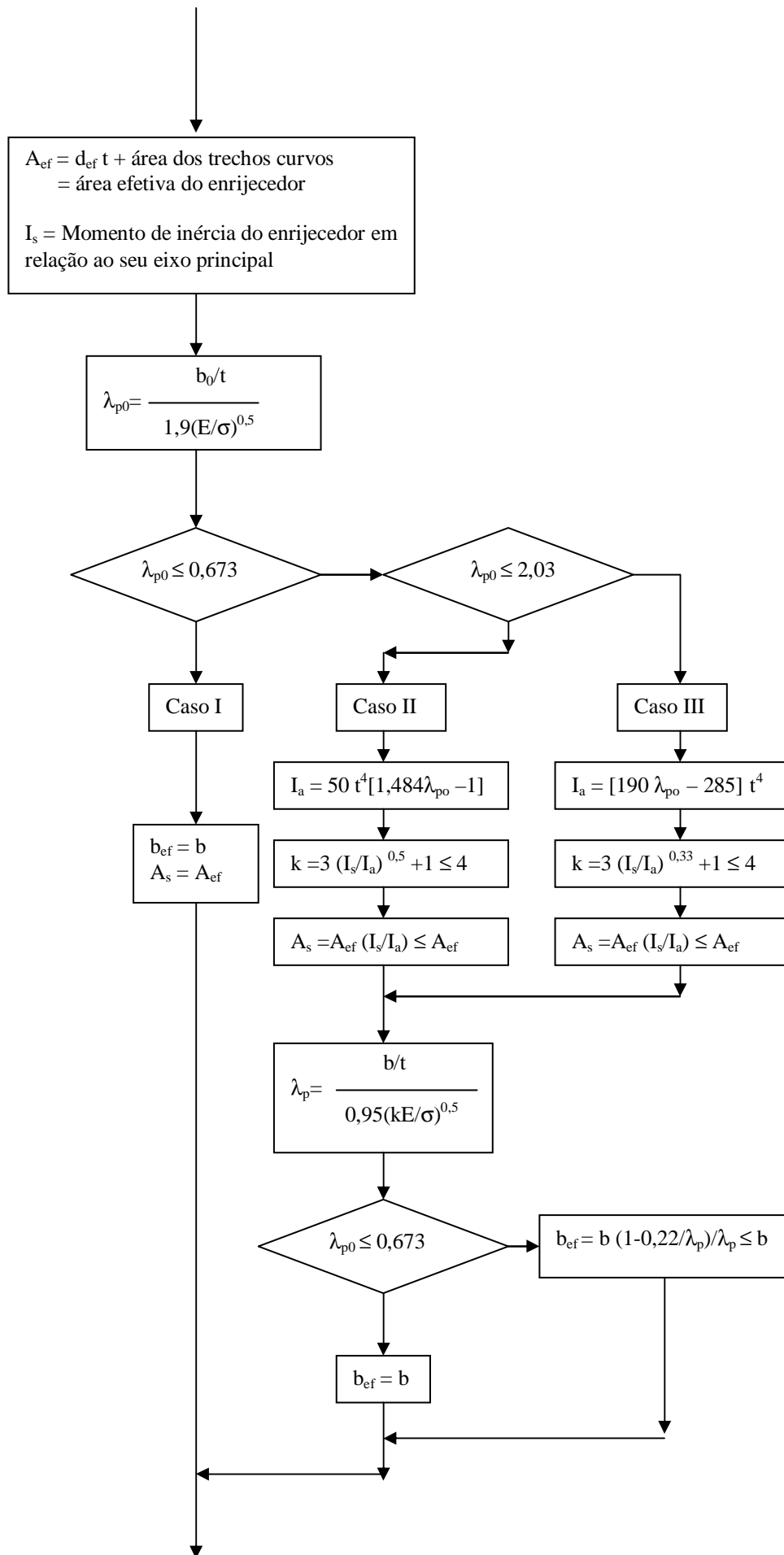


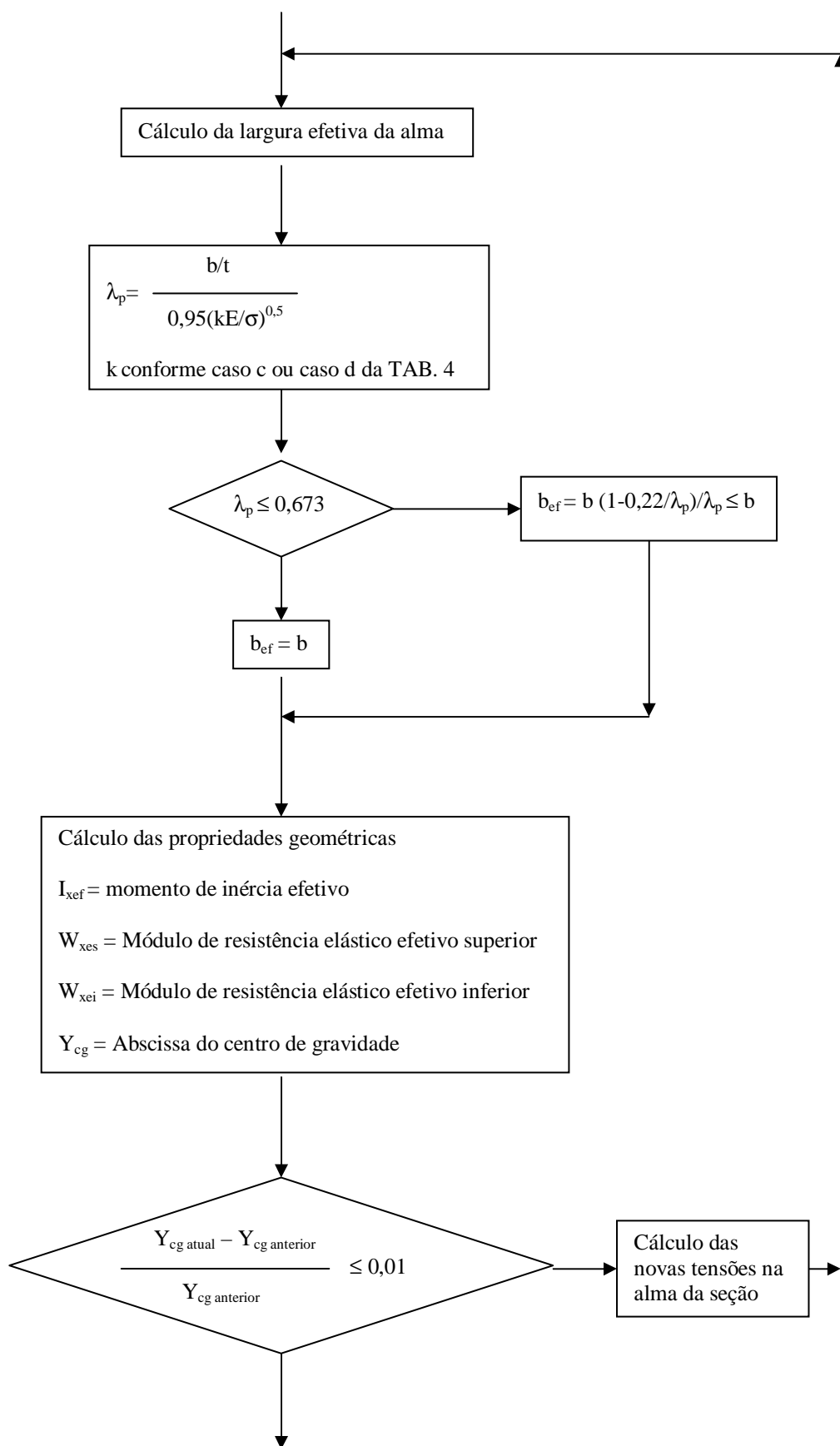


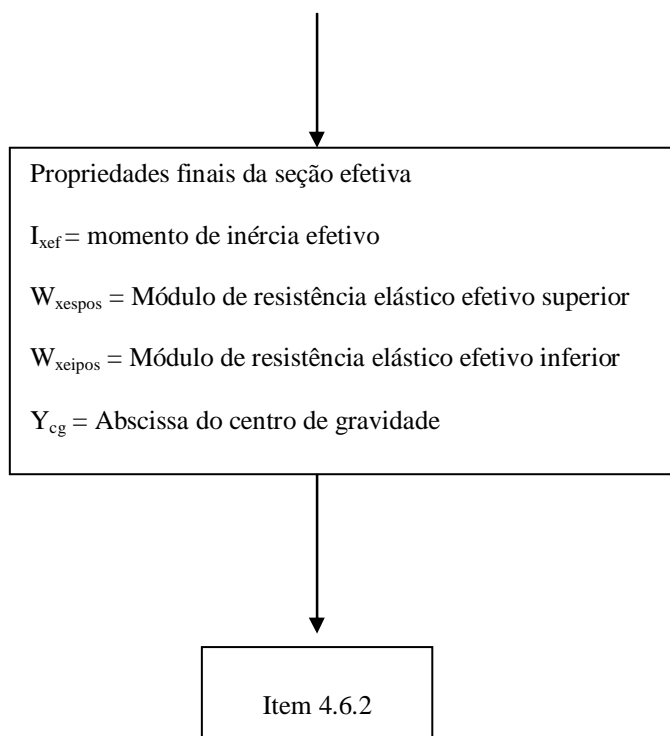
4.6.1.4 Sub-rotinas para determinação da seção efetiva da fôrma tipo 1/1

4.6.1.4.1 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda superior comprimida da seção

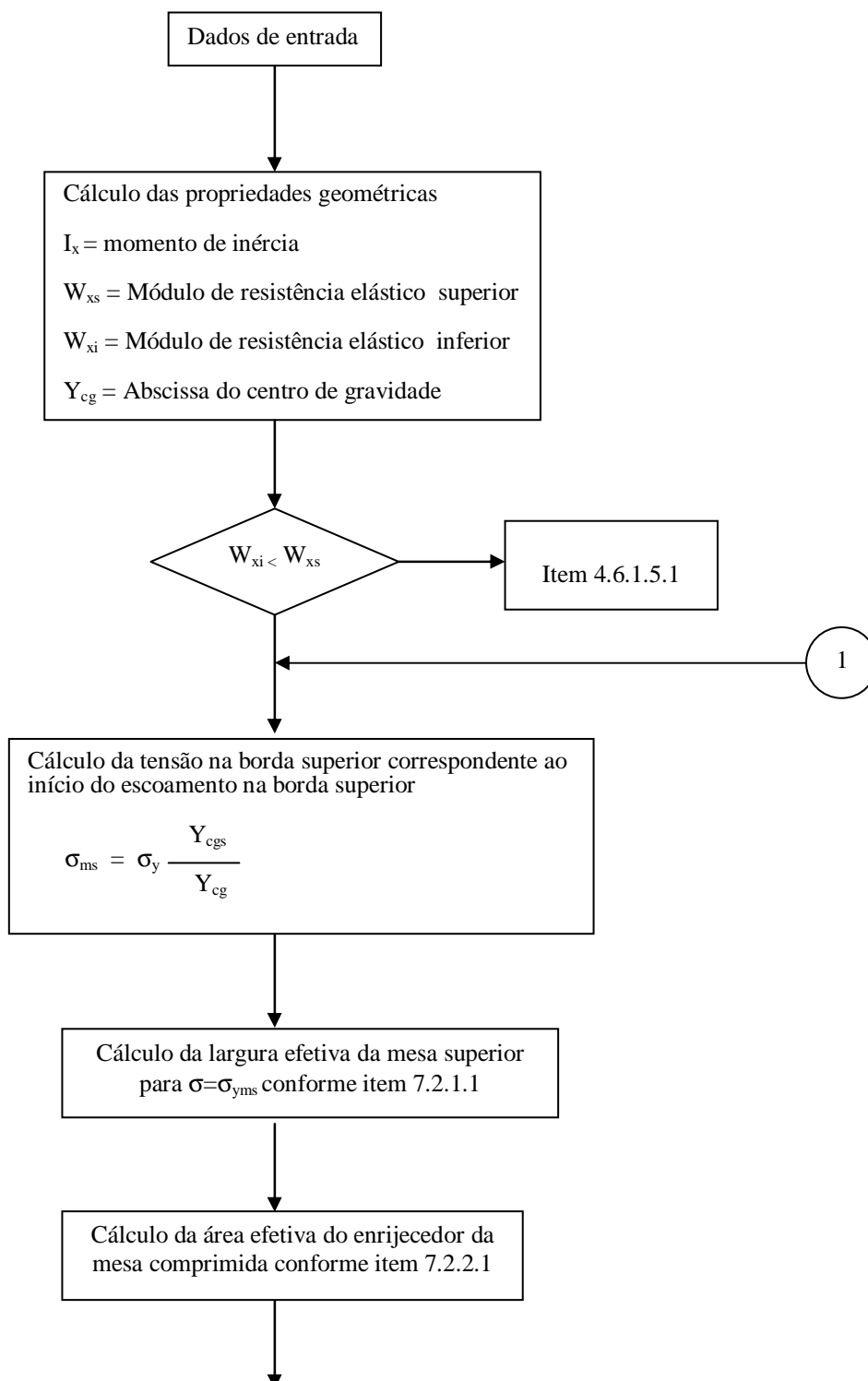


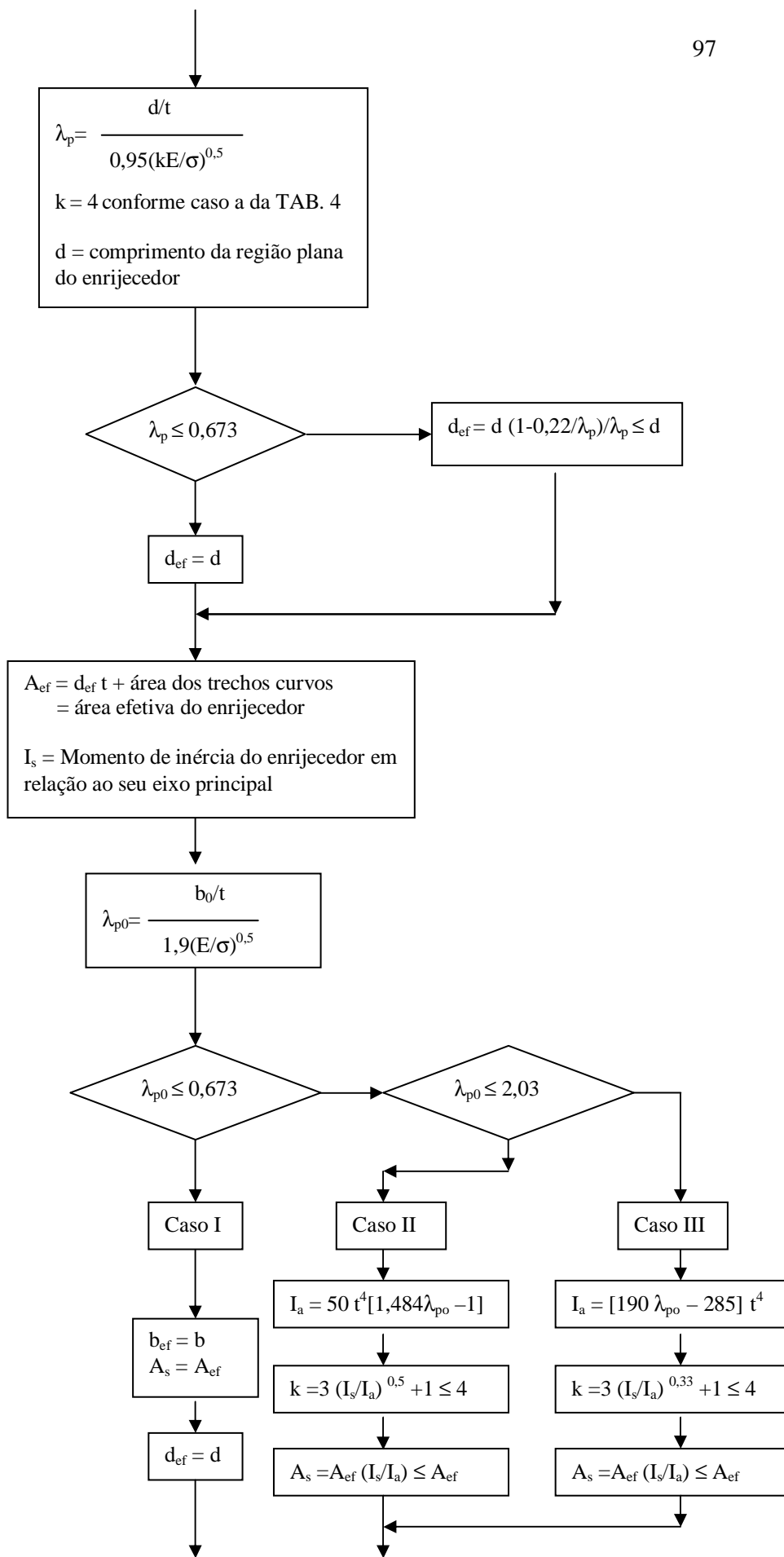


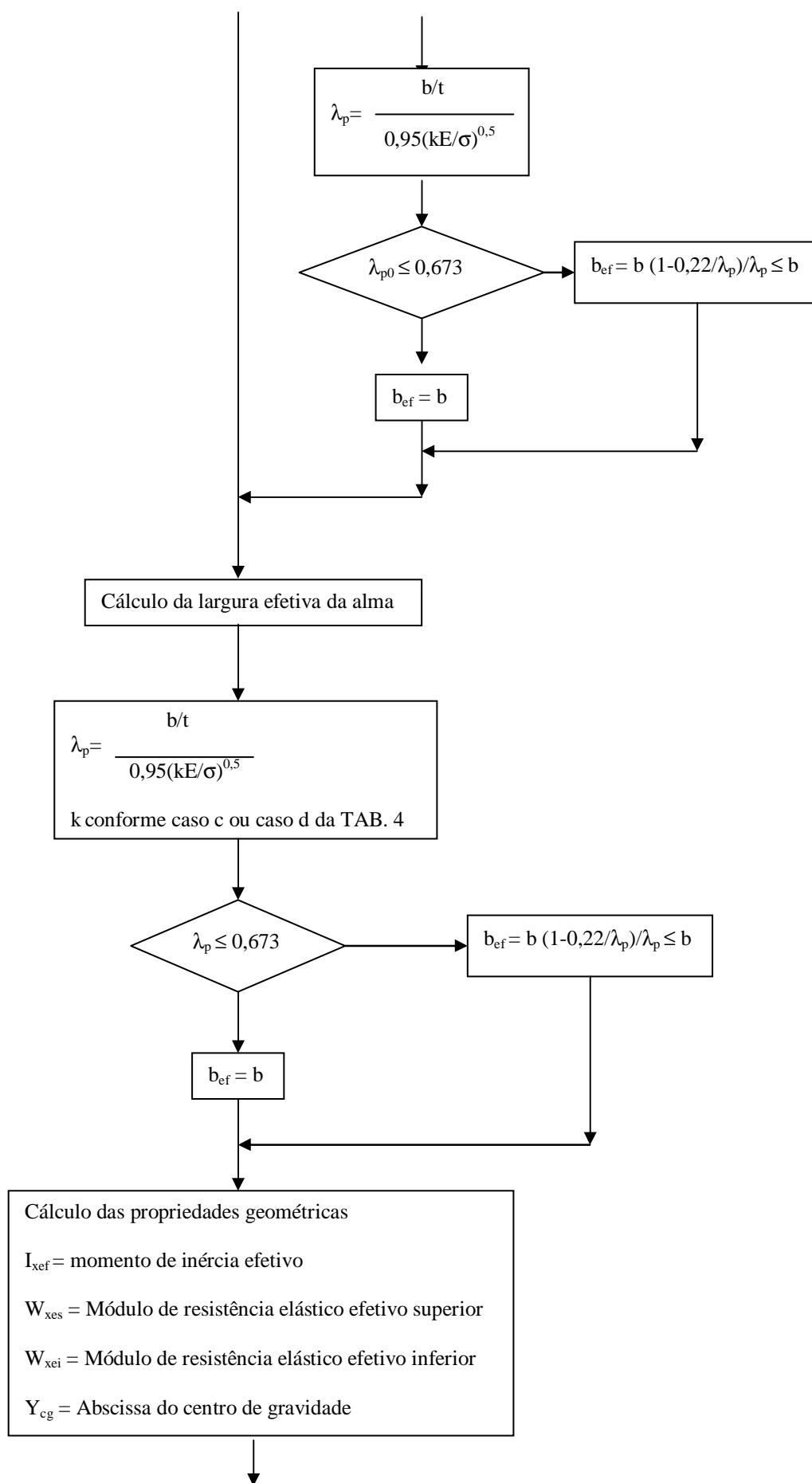


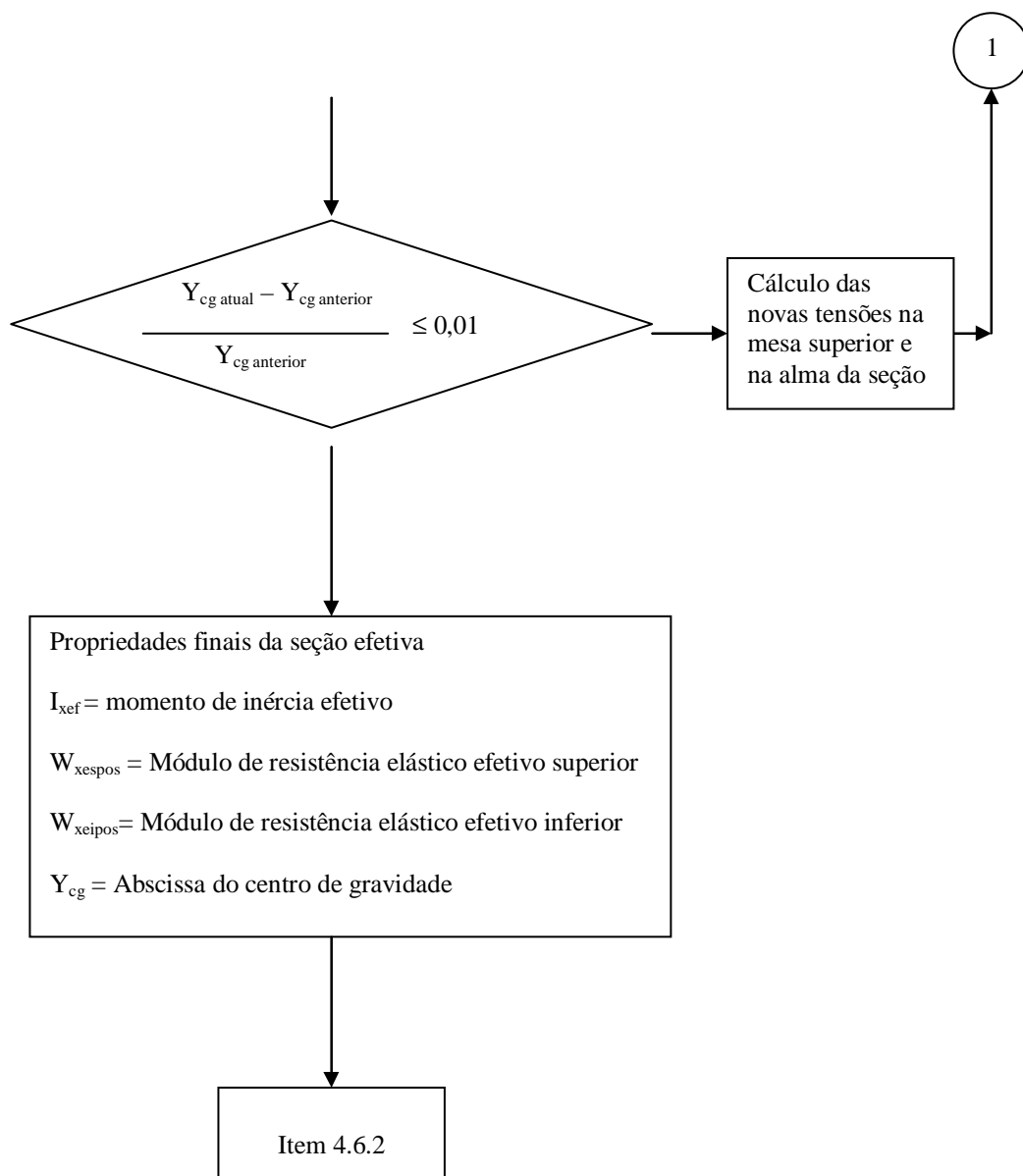


4.6.1.4.2 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor positivo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior tracionada da seção

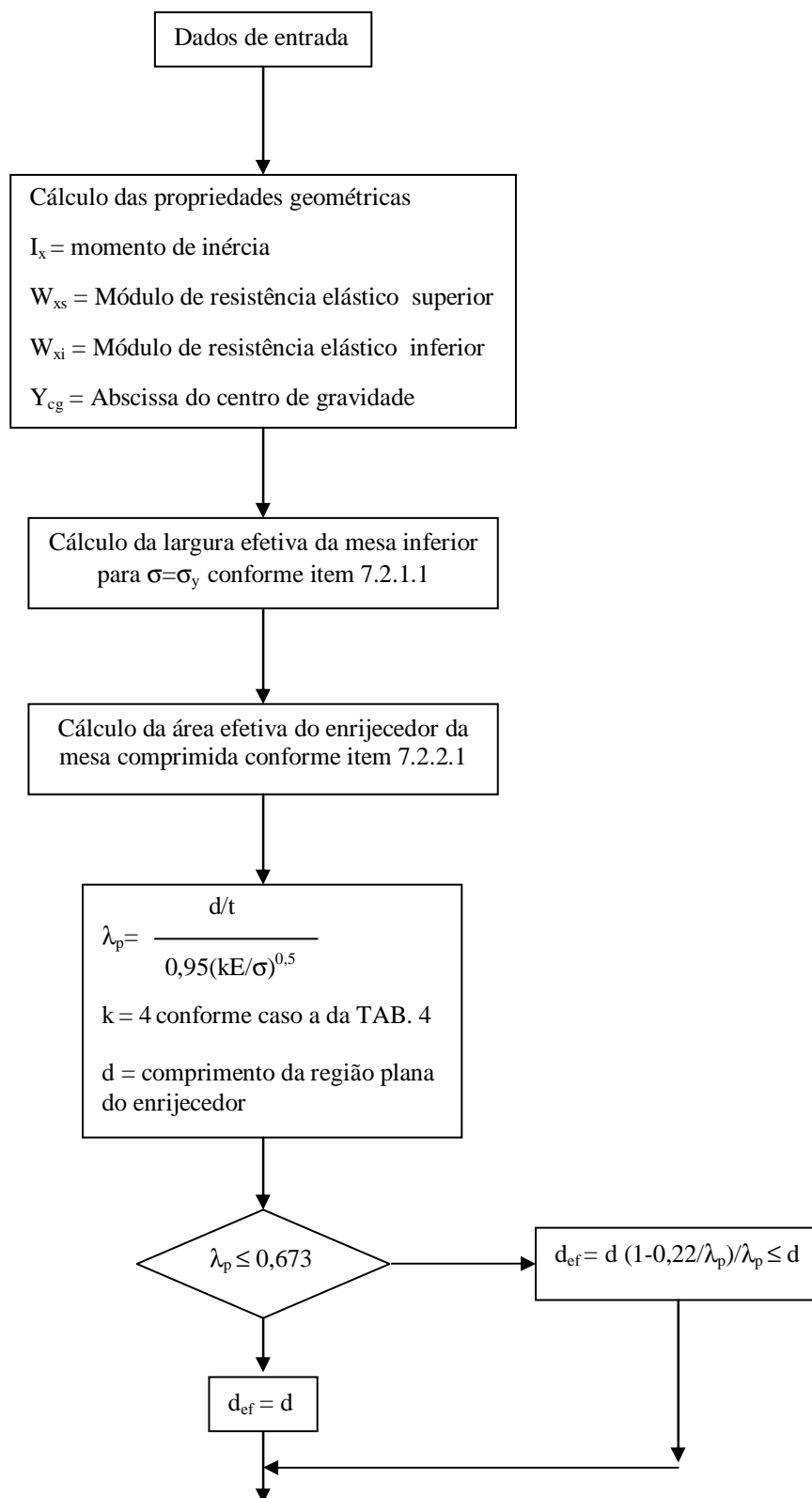


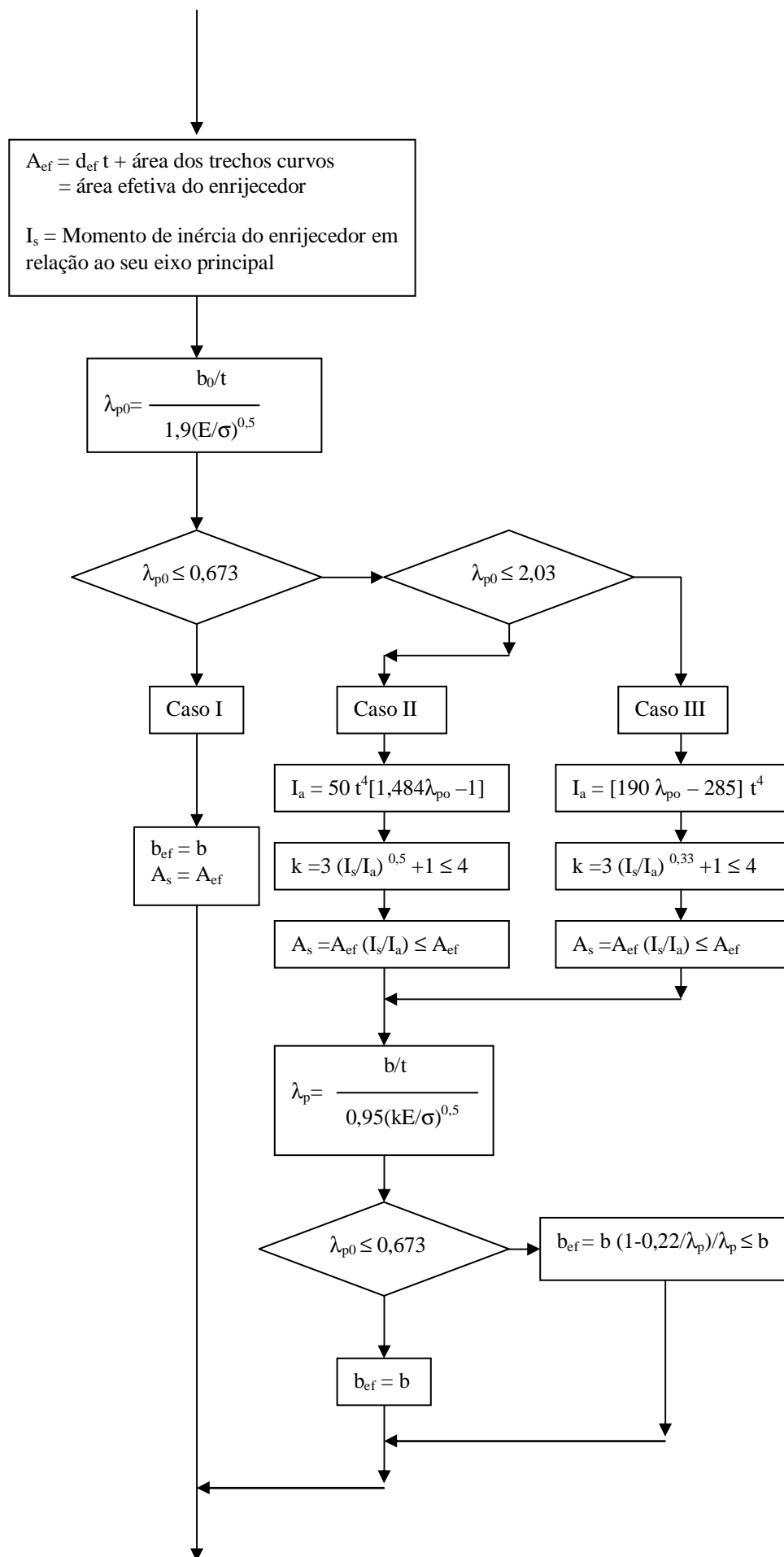


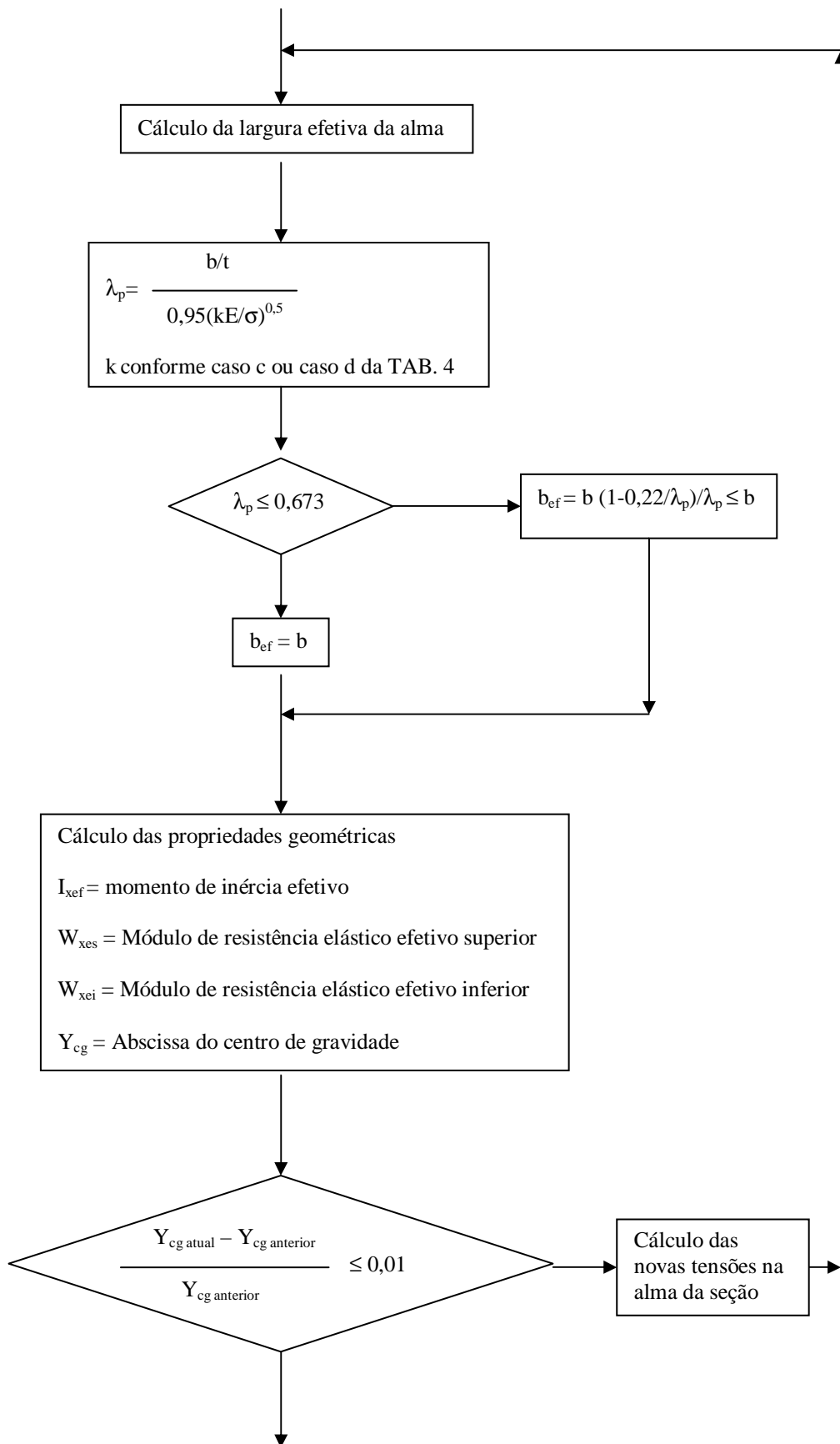


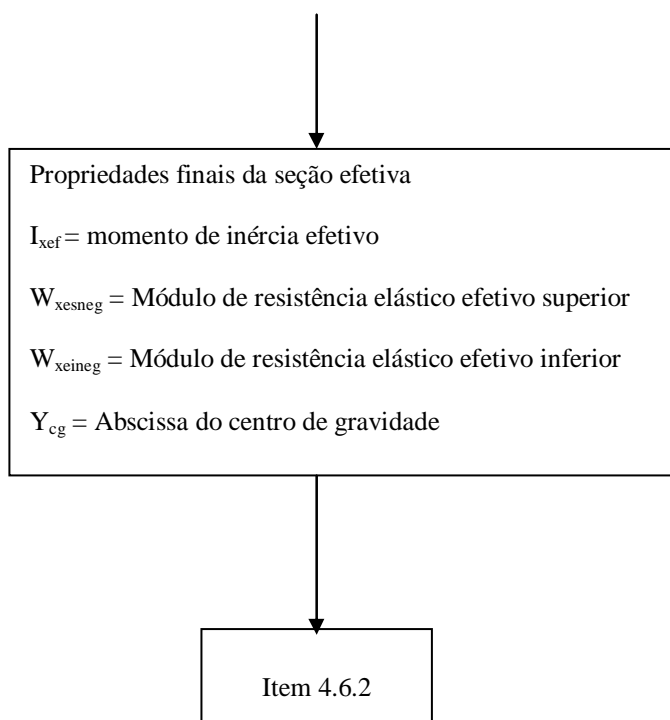


4.6.1.4.3 Sub-rotina para a região sujeita a momento fletor negativo e o início do escoamento ocorrendo na borda inferior comprimida da seção

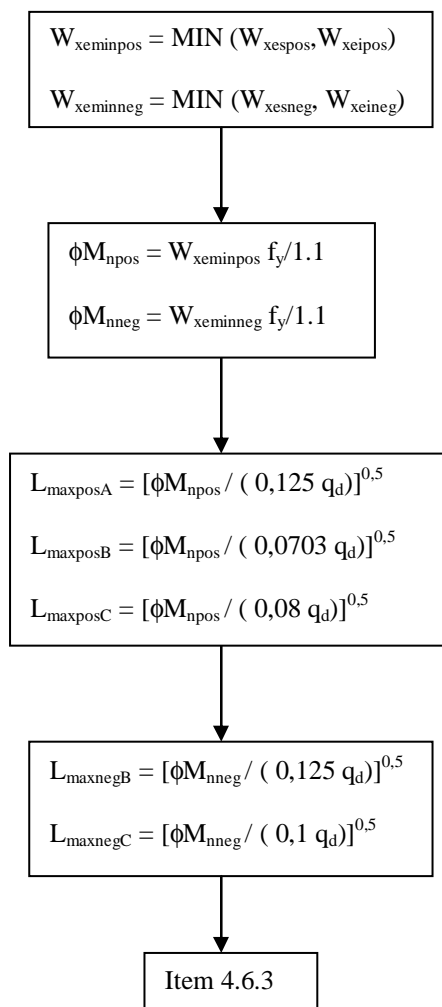




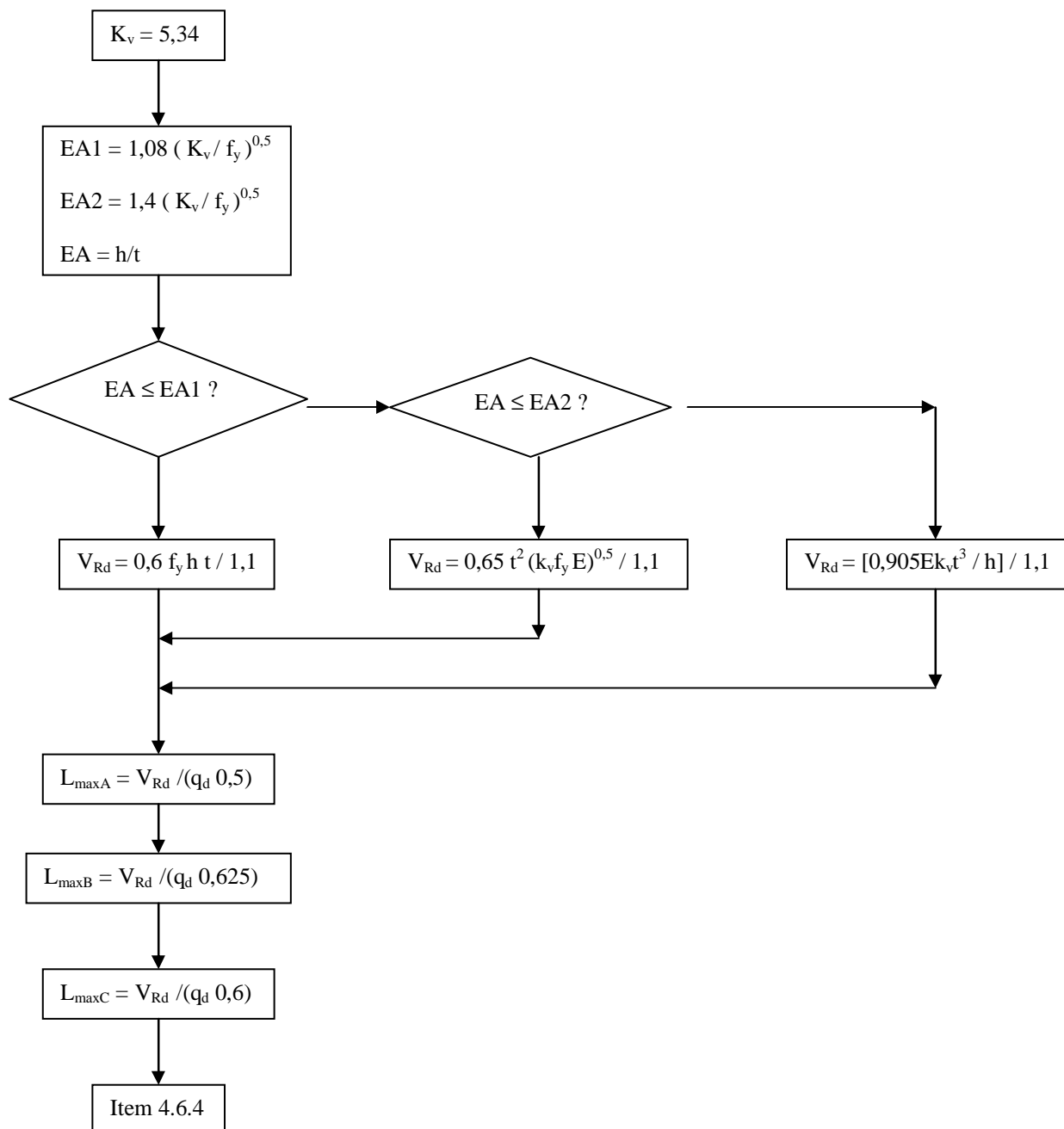




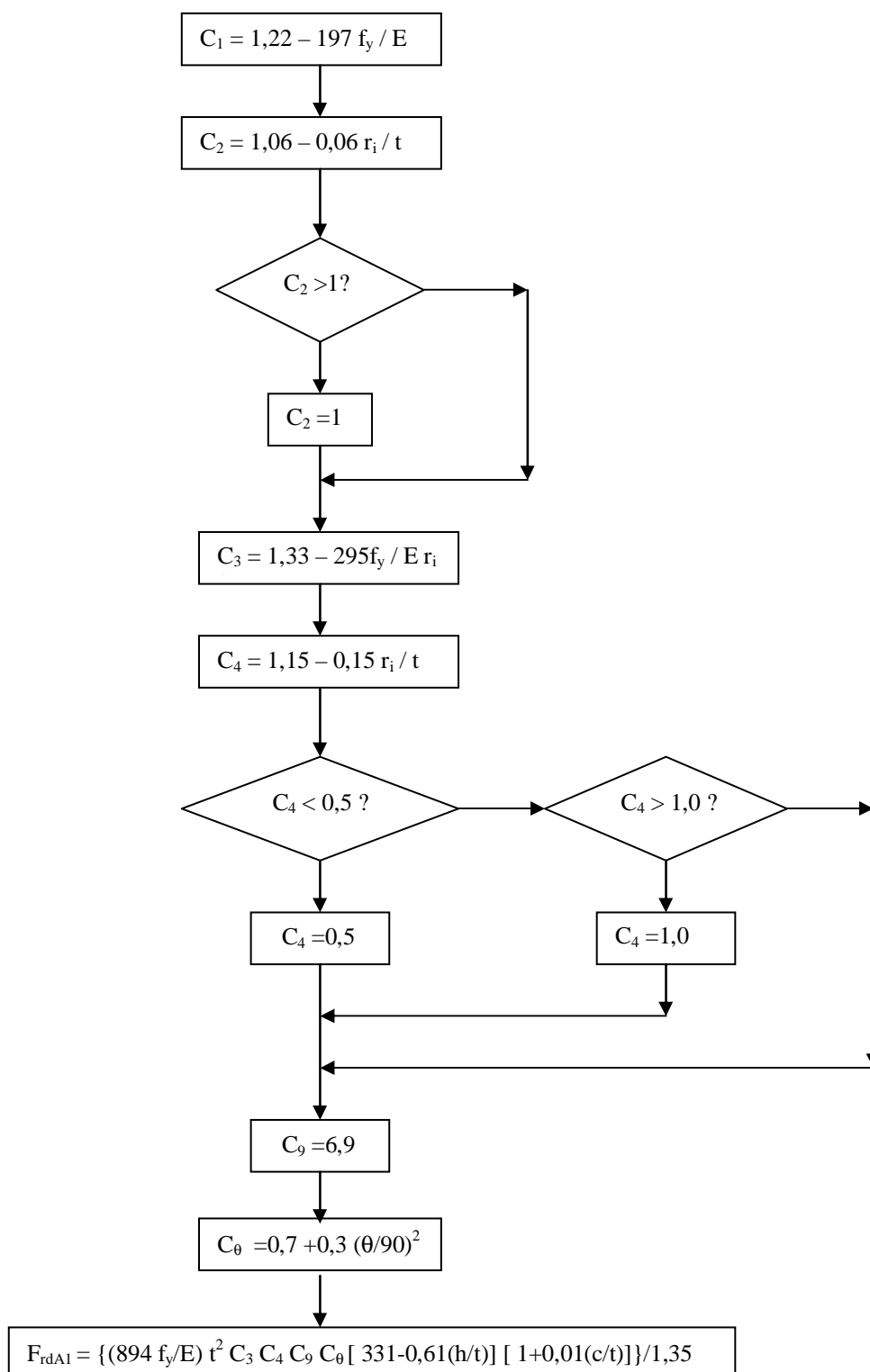
4.6.2 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência ao momento fletor

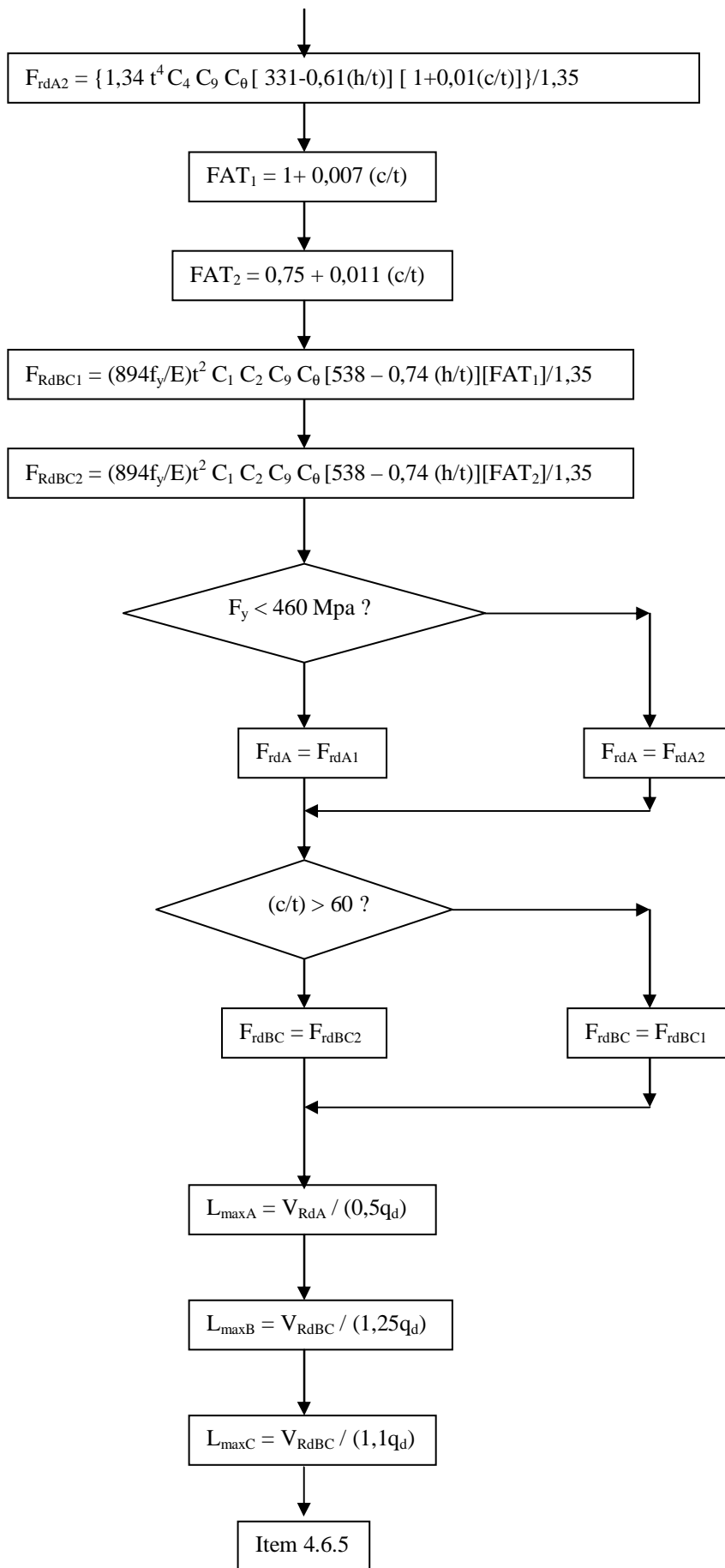


4.6.3 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência à força cortante

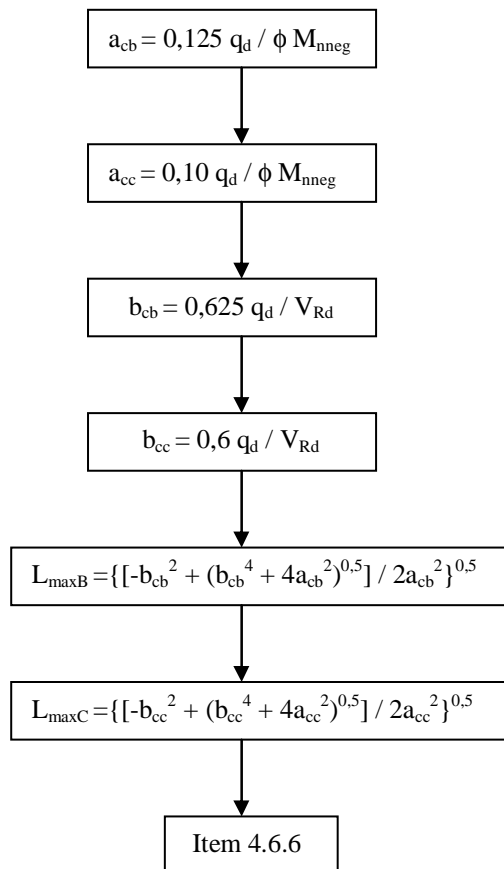


4.6.4 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando as resistências às forças concentradas nos apoios

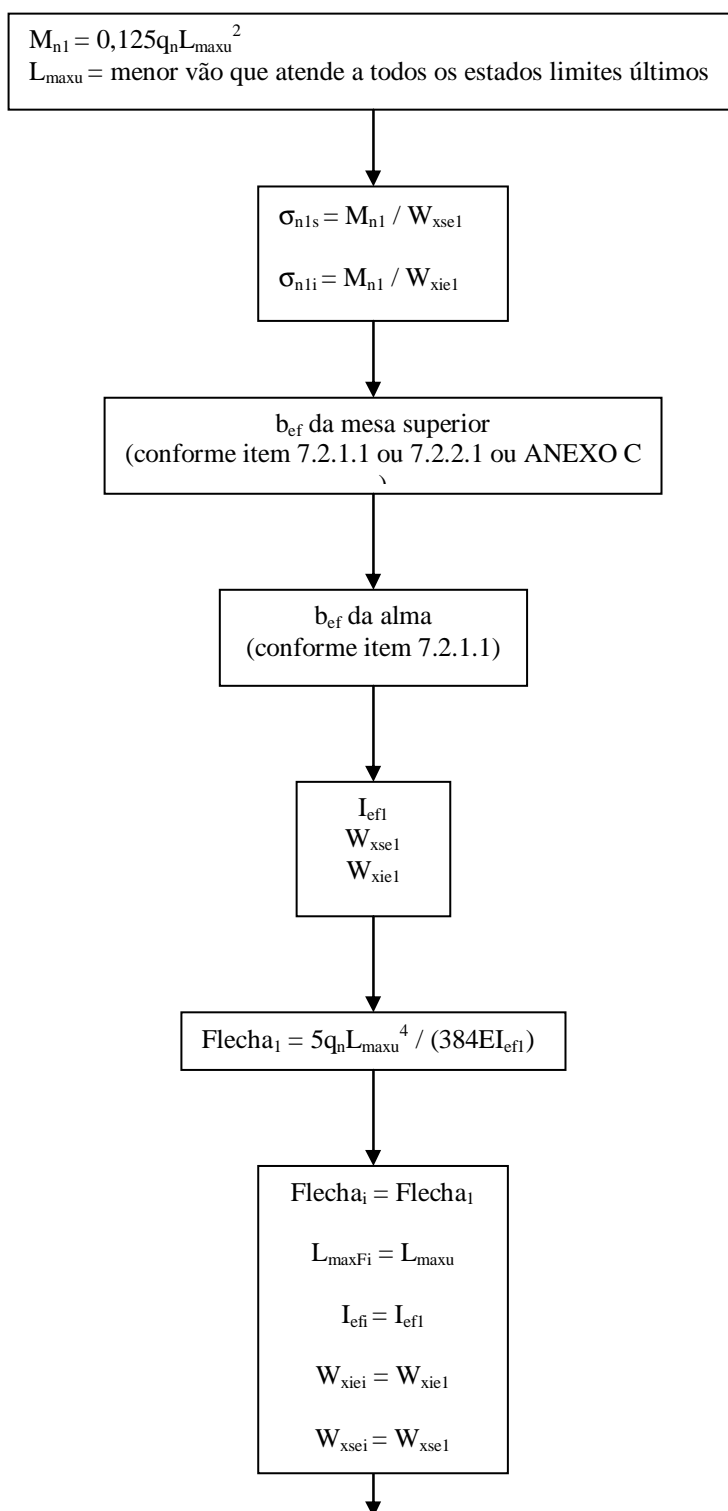


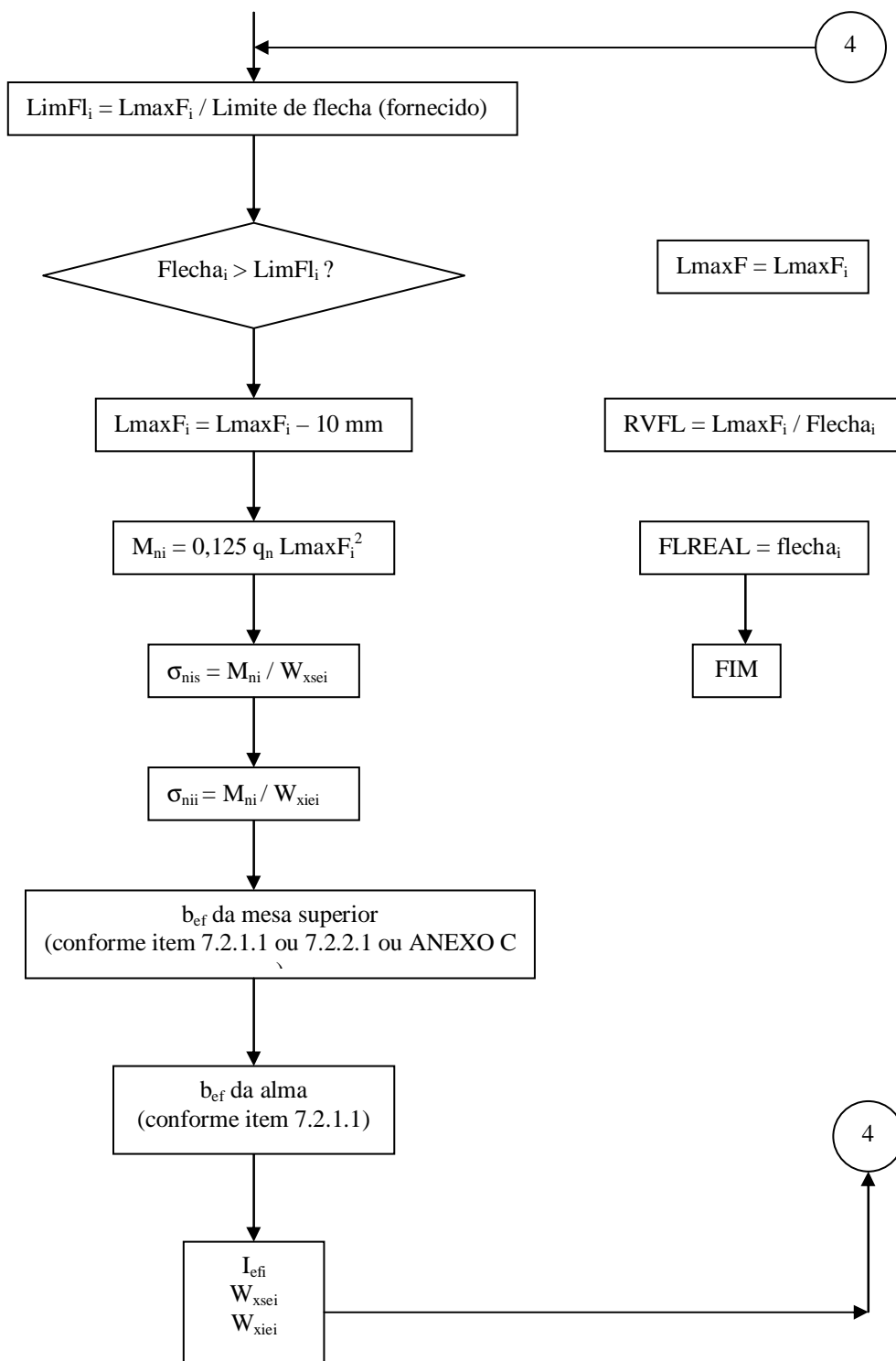


4.6.5 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a resistência à combinação do momento fletor com a força cortante



4.6.6 Sub-rotinas para a determinação do vão máximo admissível considerando a limitação para a flecha máxima





4.7 Resultado final

O resultado final é o vão máximo (em mm) que a fôrma pode ter antes da cura do concreto, atendendo-se aos estados limites últimos indicados e aos estados limites de utilização estabelecidos, considerando os dados fornecidos: espessura e geometria da fôrma, aço e carregamentos.

5

ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA INFLUÊNCIA DAS MOSSAS

Neste capítulo é apresentado o resultado de uma análise pelo Método dos Elementos Finitos do efeito das mossas na resposta estrutural da fôrma de aço.

Esta análise é composta de dois estudos: o primeiro aborda a influência das mossas em um elemento de fôrma submetido à força normal de tração (importante para a fase da laje mista); o segundo, a influência das mossas em um elemento de fôrma submetido a um momento fletor puro (importante para a fase antes da cura).

5.1 Caracterização do modelo

O modelo constitui-se de um módulo de fôrma no qual a seção transversal representa a seção completa da fôrma, e o seu comprimento é equivalente a dez vezes a largura do módulo.

Os elementos do ANSYS 5.7, utilizados para a discretização deste modelo, foram do tipo SHELL 63, elemento de casca para análise elástica linear, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações) para a chapa de aço da fôrma modelada em seu plano médio.

A FIG. 5.3 mostra a malha de elementos finitos utilizados, que contem 16.065 elementos e 16.031 nós. Na região das mossas, a espessura foi reduzida em 38% para

retratar a variação da espessura após a conformação das mossas. Foi utilizada uma discretização com elementos quadriláteros, evitando-se elementos muito irregulares.

Para a região de transição nas extremidades das mossas, procurou-se proporcionar uma continuidade da chapa, acompanhando a curva de conformação real da mossa. A mossa considerada possui uma região cilíndrica com comprimento de 48 mm e raio médio de 3,6 mm. A região da transição nas extremidades tem um raio também de 3,6 mm.

Em cada extremidade, existe uma chapa grossa, rígida, no caso considerada com espessura de 25 mm, onde é aplicado o momento fletor ou a força de tração. Essa chapa tem a função de evitar o empenamento da seção. Se isso ocorre, perde-se a hipótese da seção plana.

5.2 Análise da influência das mossas na resposta estrutural de um módulo de fôrma semelhante aos estudados no capítulo 7, submetido a uma força de tração

5.2.1 Força de tração

Como na modelagem a seção transversal do modelo apresenta uma área de 1,479 cm², a força de tração aplicada é de :

$N_T = 1,479 \text{ cm}^2 \times 100 \times 280 \text{ MPa} = 41412 \text{ N}$ (sendo $f_y = 280 \text{ Mpa}$ o limite de escoamento).

Essa força, distribuída na superfície da chapa de extremidade, tem o valor de $q_T = 41412 / (137,5 \times 95,8) = 3,1438 \text{ N/mm}^2$.

5.2.2. Resultados da análise da fôrma sujeita à força de tração

Nas páginas seguintes, estão algumas figuras com a saída de dados do programa ANSYS, utilizado na análise (FIG. 5.1. a 5.5).

1 NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

UZ (AVG)

RSYS=0

DMX =.7593

SMN =-.759264

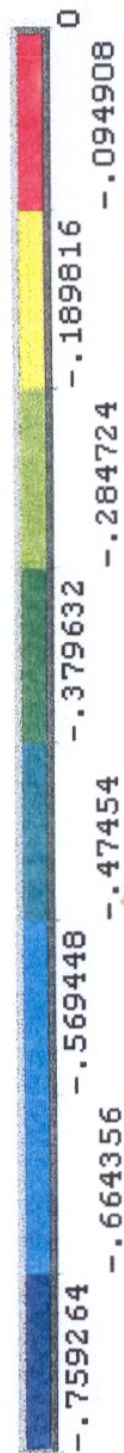
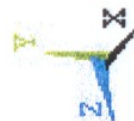
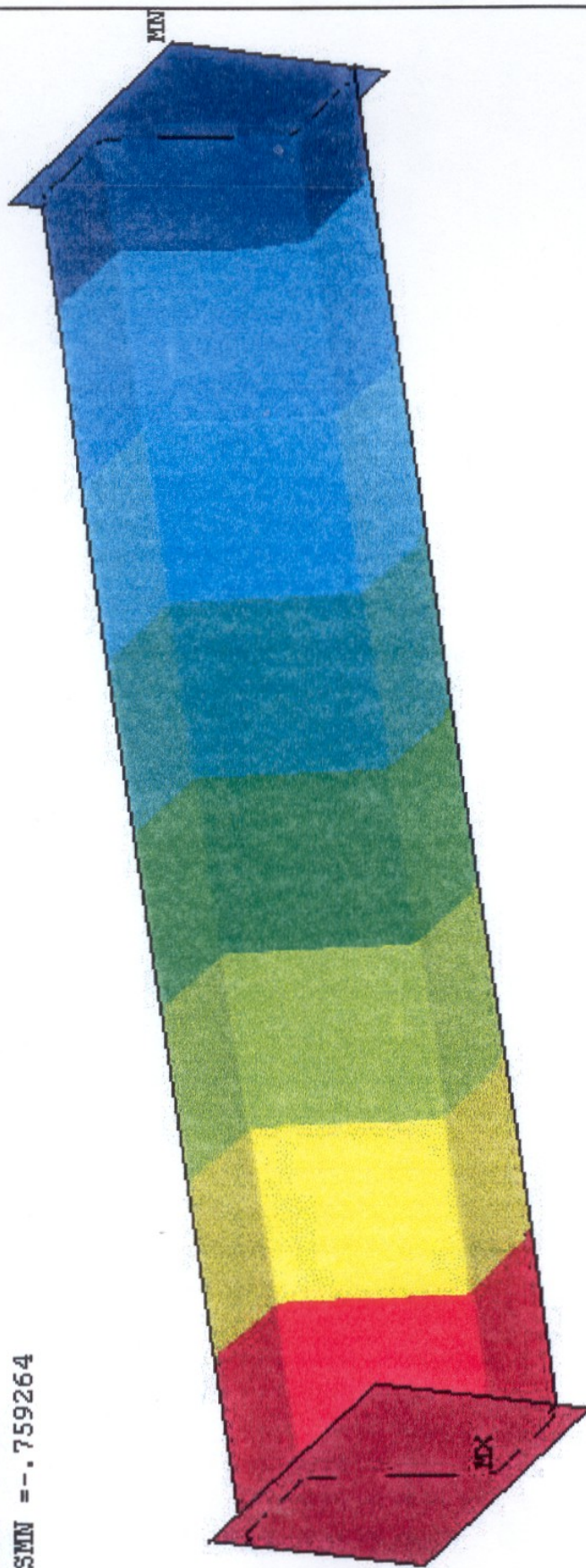


FIGURA 5.1. – Modelo de fôrma lisa sujeito à força de tração – deslocamentos UZ

1 NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =.7593
SMX =410.561

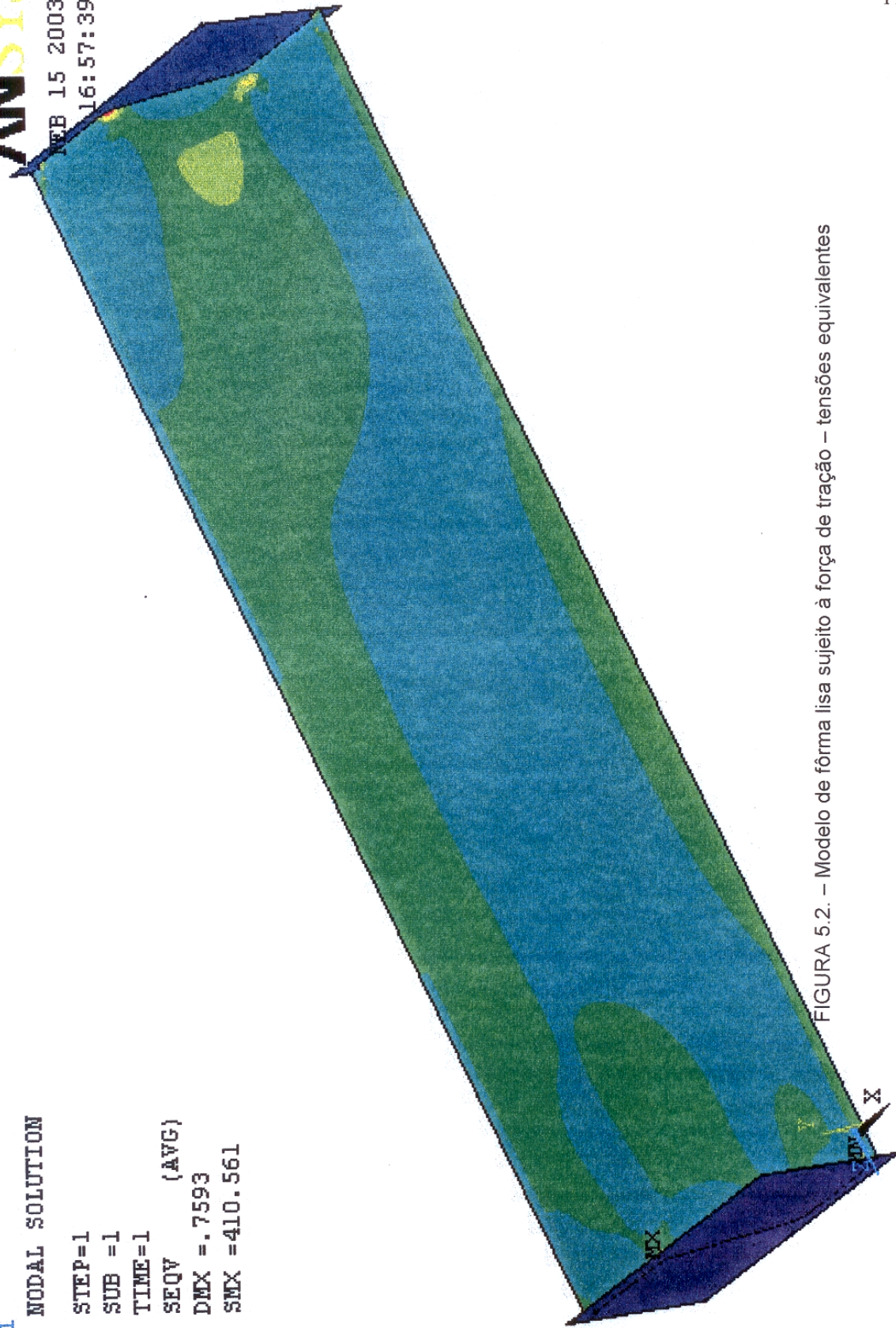


FIGURA 5.2. – Modelo de fôrma lisa sujeito à força de tração – tensões equivalentes

FEB 15 2003
 13:24:18
 ELEMENTS
 PowerGraphics
 EFACET=1
 REAL NUM

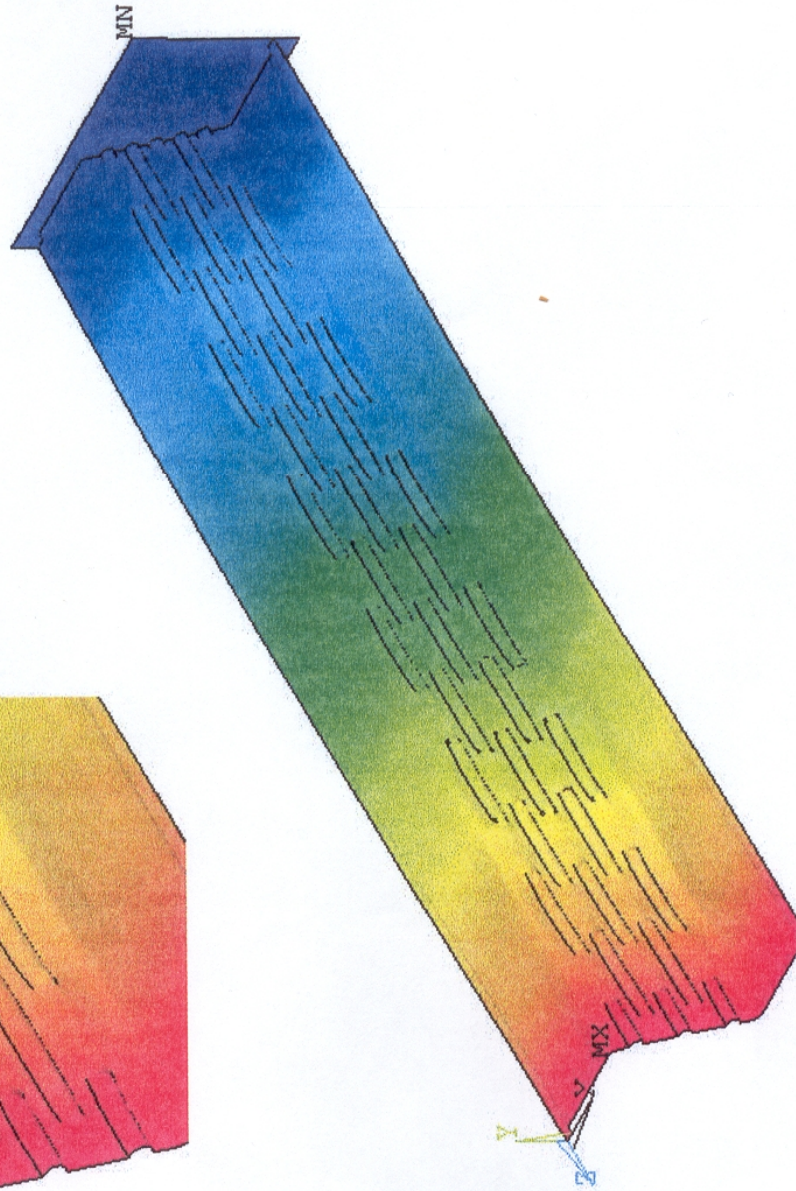
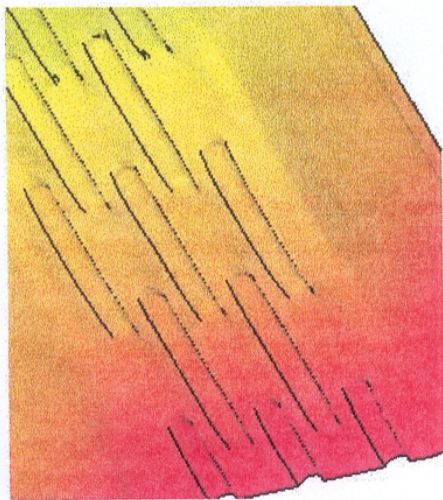
XV =1
 YV =1
 ZV =1
 *DIST=294.373
 *XF =54.012
 *YF =-10.08
 *ZF =-309.791
 Z-BUFFER

WIND=2
 XV =.624358
 YV =.478188
 ZV =.617667
 *DIST=26.56
 *XF =88.189
 *YF =8.029
 *ZF =-296.85
 A-ZS=.761079
 Z-BUFFER



FIGURA 5.3. – Modelo das mósas

FEB 11 2003
19:43:20
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.771402
SMN =-.771356



XV =1
YV =1
ZV =1
*DIST=294.373
*XF =54.012
*YF =-10.08
*ZF =-309.791
Z-BUFFER
-.771356
-.68565
-.599944
-.514237
-.428531
-.342825
-.257119
-.171412
-.085706
0

FIGURA 5.4. – Modelo de fôrma com massas sujeito à força de tração – deslocamentos UZ

```

FEB 11 2003
19:46:10
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV      (AVG)
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.771402
SMN =.577998
SMX =887.486
    
```

```

XV =1
YV =1
ZV =1
*DIST=294.373
*XF =54.012
*YF =-10.08
*ZF =-309.791
Z-BUFFER
    
```

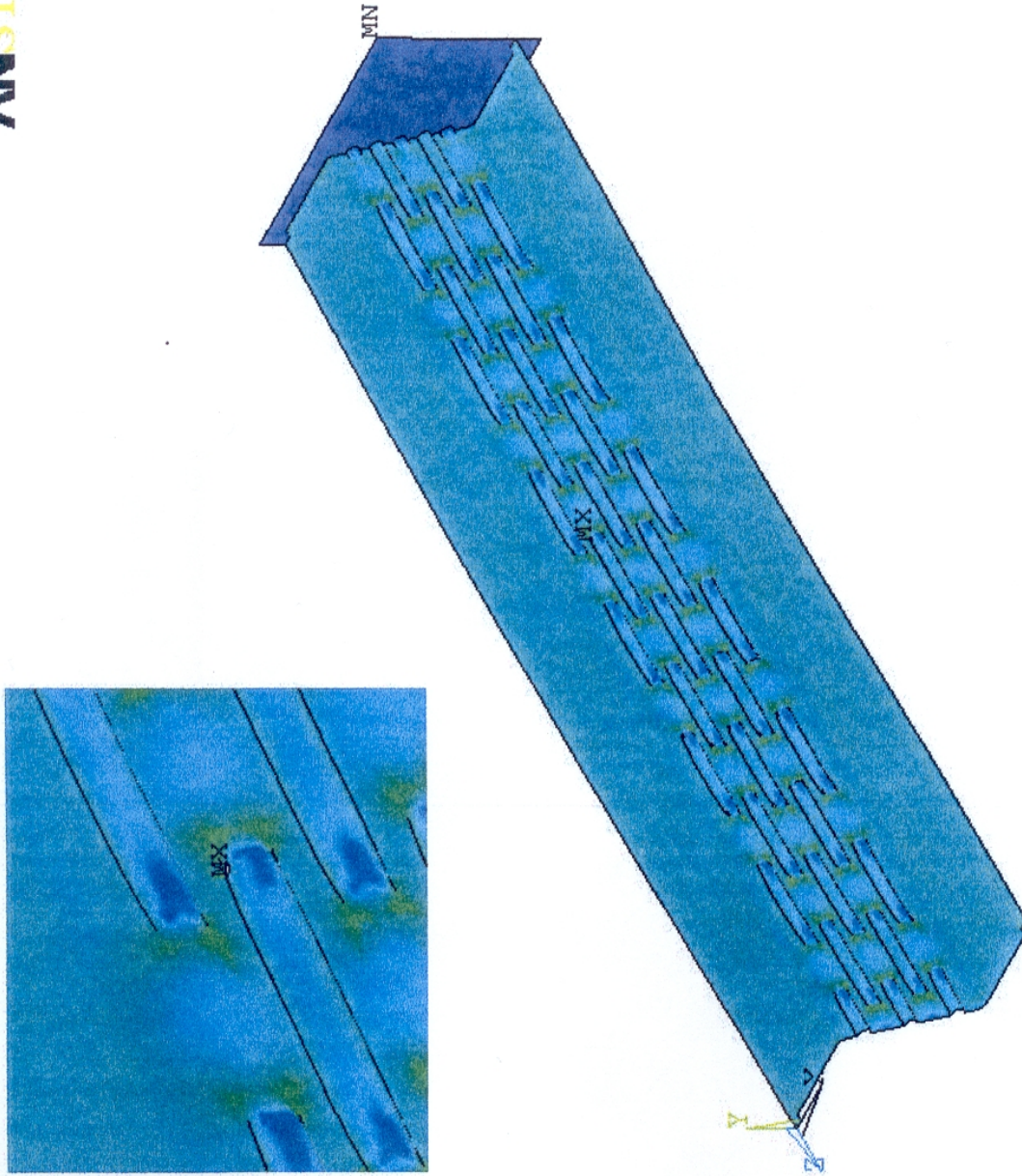
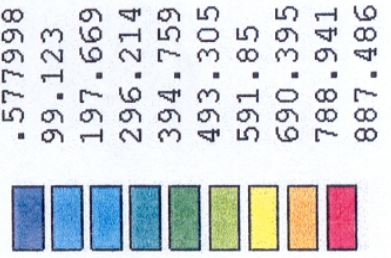


FIGURA 5.5. – Modelo de fôrma com mossas sujeito à força de tração – tensões equivalentes

5.2.3 Análise dos resultados para a fôrma tracionada

Observa-se que na fôrma lisa o deslocamento axial é de 0,7593 mm e na fôrma com mossas o deslocamento axial é de 0,7714 mm.

Esses deslocamentos correspondem ao início do escoamento das chapas ($\sigma_y = 280$ MPa) em ambos os casos.

Nota-se que a diferença entre os dois resultados, que é de 1,6%, é muito pequena, o que nos permite concluir que a presença das mossas praticamente não influenciou no comportamento estrutural do modelo.

5.3 Análise da influência das mossas na resposta estrutural de um módulo de fôrma semelhante aos analisados no capítulo 7, submetido a um momento fletor

5.3.1 Momento fletor

Como na modelagem a seção transversal do modelo apresenta um módulo de resistência elástico de $3,87 \text{ cm}^2$, é aplicado um momento fletor nos apoios igual a:

$$M_T \quad 3,87 \text{ cm}^2 \times 280 \text{ MPa} = 108,36 \text{ kNcm}$$

$$M_T = 1.083.600 \text{ Nmm}$$

5.3.2 Resultados da análise da fôrma submetida ao momento fletor

Nas páginas seguintes, estão algumas figuras geradas pelo programa ANSYS, utilizado na análise (FIG. 5.6. a 5.11).

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =5.488
SMN =-.005872
SMX =5.37

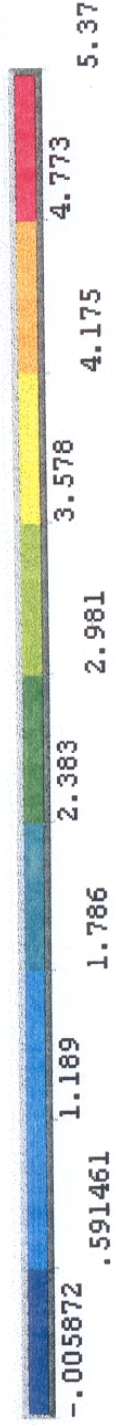
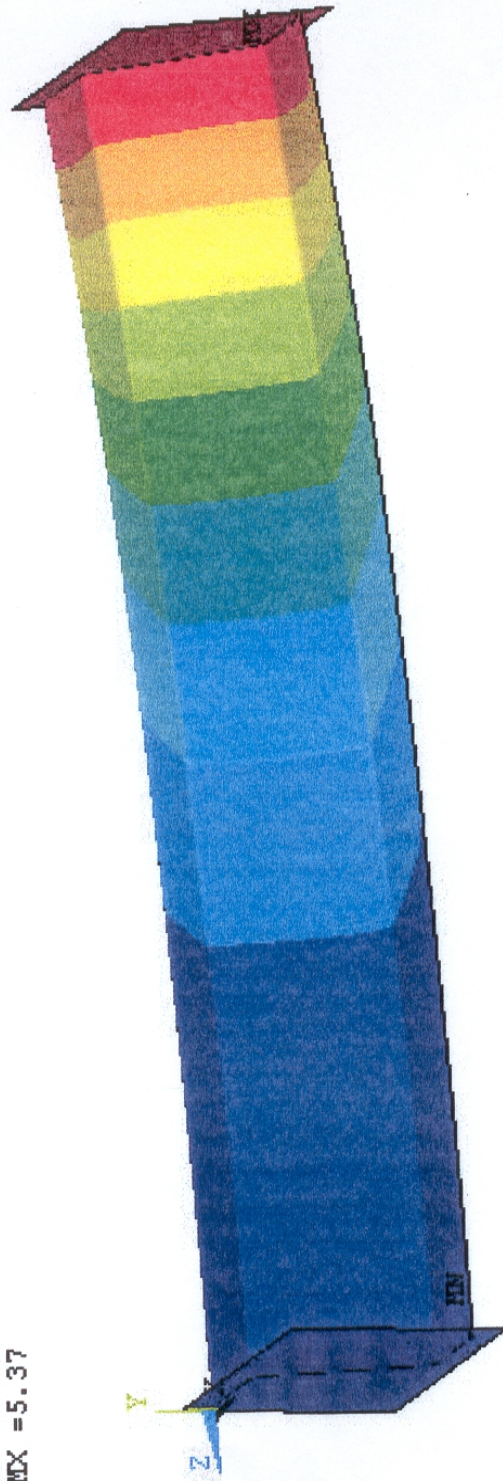


FIGURA 5.6. – Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – deslocamentos UY

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
DMX =5.488
SMN =-1.133
SMX =1.132

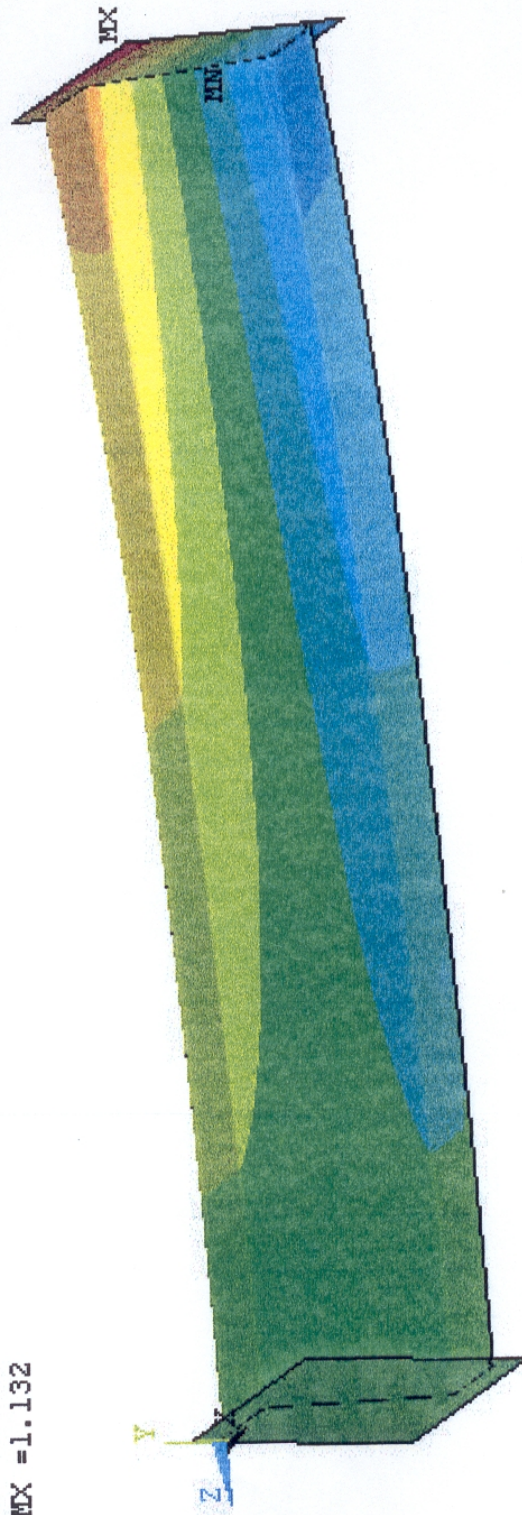


FIGURA 5.7. – Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – deslocamentos UZ



NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

SEQV (AVG)

DMX =5.488

SMX =555.723

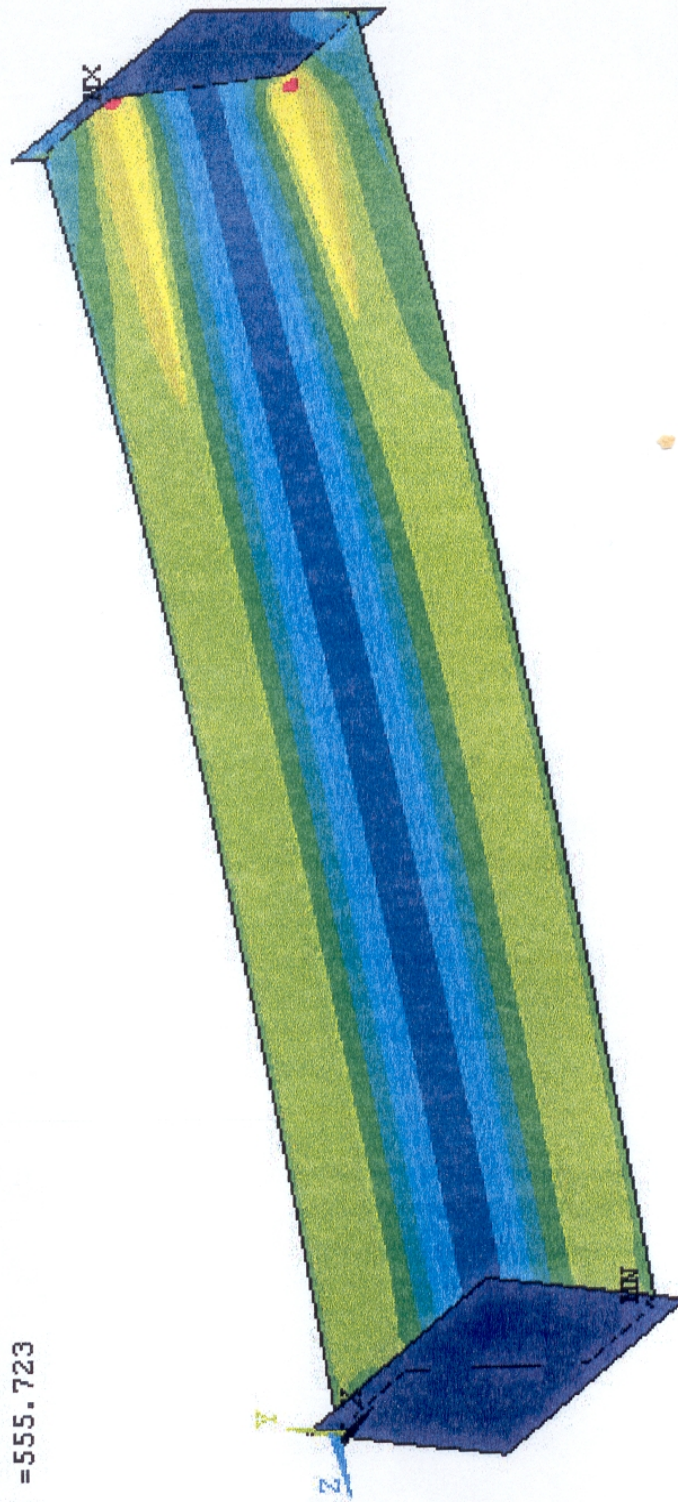


FIGURA 5.8. – Modelo de fôrma lisa sujeito a momento fletor – tensões equivalentes

```

ANSYS 5.7
FEB 10 2003
21:58:21
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY
      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =5.674
SMN =-.006026
SMX =5.56
      -.006026
      .612472
      1.231
      1.849
      2.468
      3.086
      3.705
      4.323
      4.942
      5.56
      -.006026
      .612472
      1.231
      1.849
      4.323
      4.942
      5.56
  
```

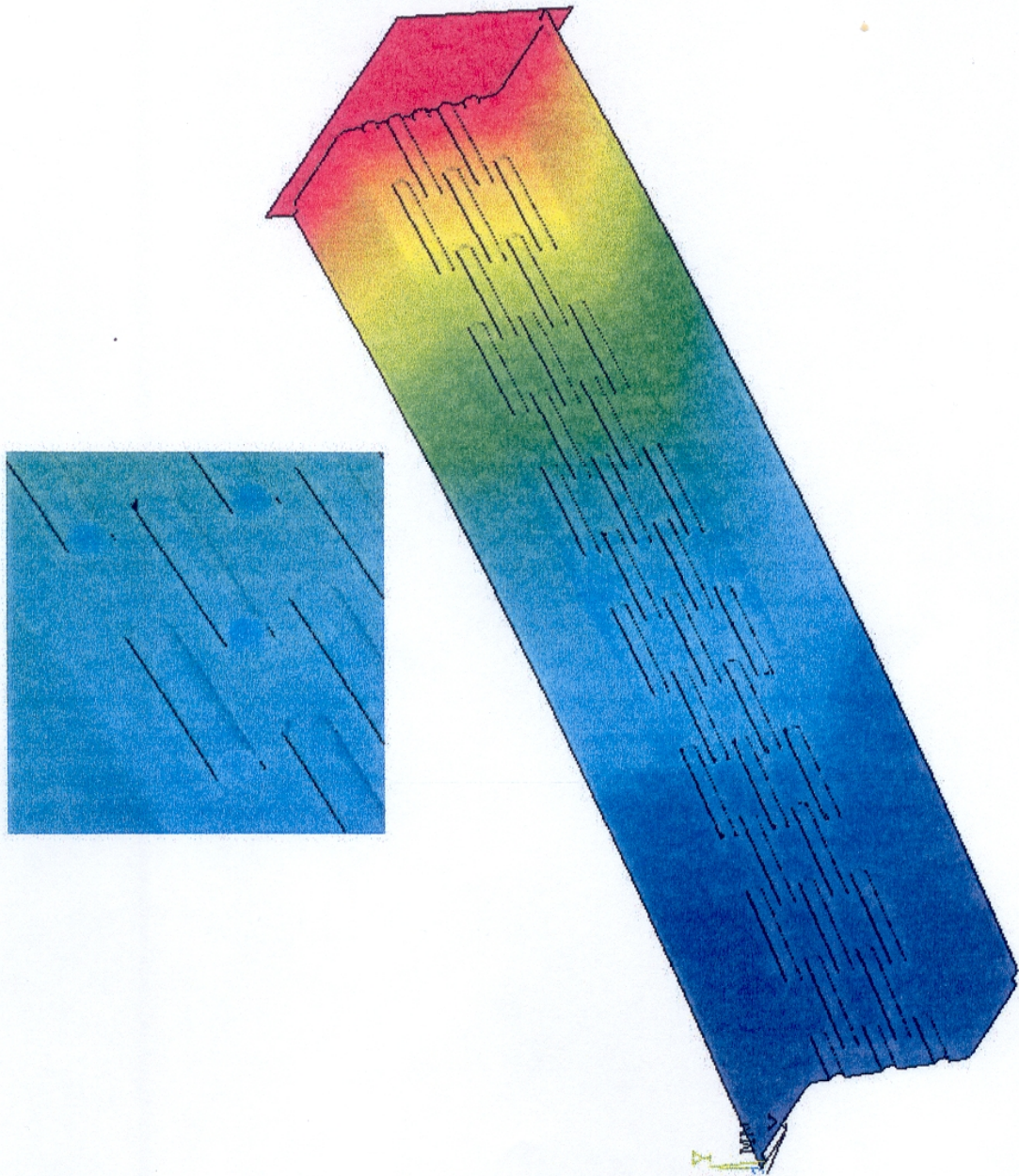


FIGURA 5.9. Modelo de fôrma com mossas sujeito a momento fletor – deslocamentos UY

ANSYS 5.7
FEB 10 2003
21:58:52
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UZ (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =5.674
SMN =-1.129
SMX =1.131

	-1.129
	-.878185
	-.627057
	-.375929
	-.124802
	.126326
	.377453
	.628581
	.879708
	1.131
	-1.129
	-.878185
	-.627057
	-.375929
	.628581
	.879708
	1.131

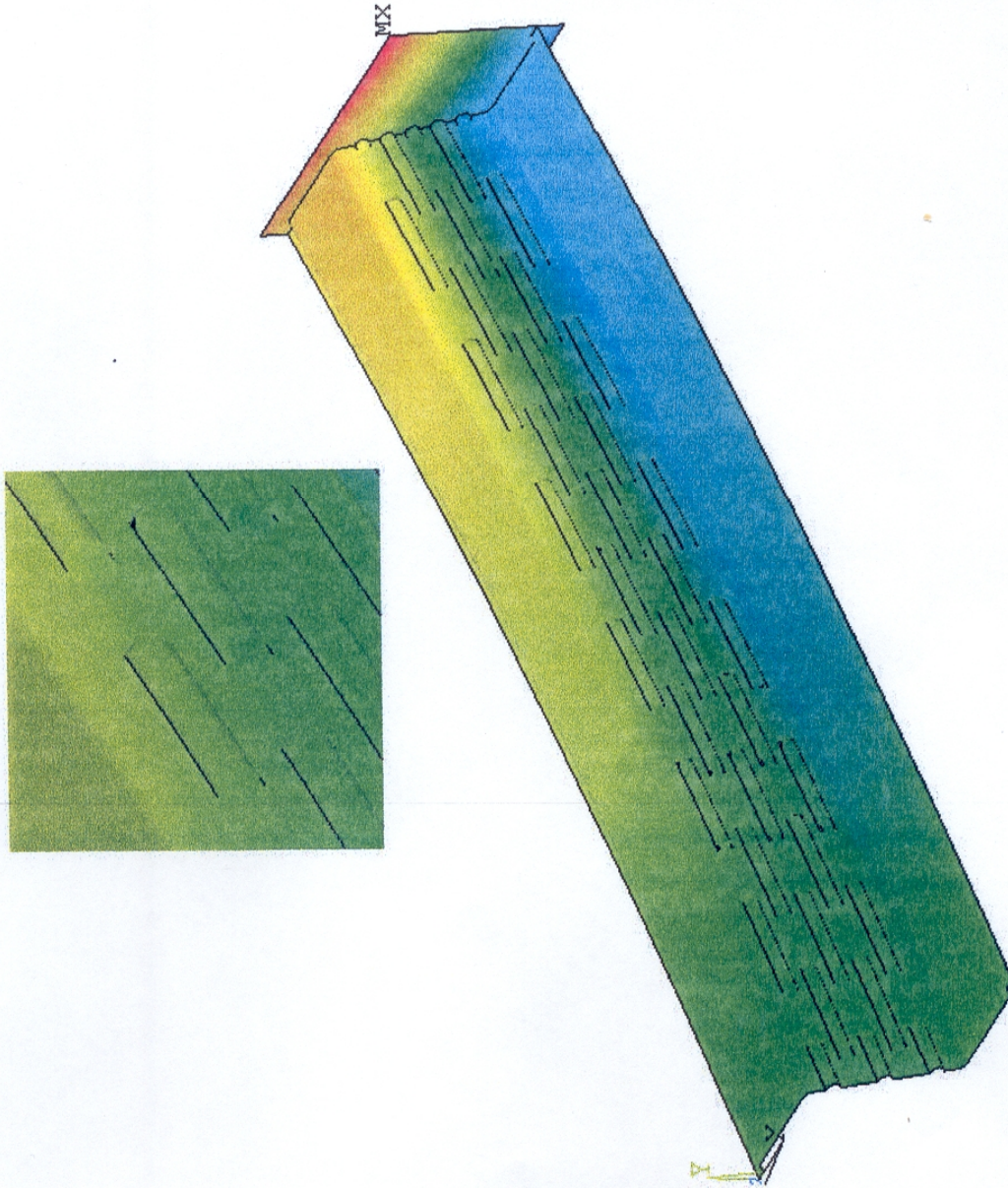


FIGURA 5.10. Modelo de fôrma com mossas sujeito a momento fletor – deslocamentos UZ

5.3.3 Análise dos resultados para a fôrma sujeita a momento fletor

Observa-se que, na fôrma lisa, o deslocamento máximo na direção normal ao eixo do modelo foi de 5,488 mm e, na fôrma com mossas, o deslocamento correspondente foi de 5,674 mm.

Constata-se que a diferença entre os dois resultados, de apenas 3,4%, é muito pequena, permitindo-se concluir que, também para a análise do modelo sujeito ao momento fletor, a influência das mossas é praticamente insignificante.

Como esperado, nesse caso a presença das mossas causou apenas um pequeno decréscimo de rigidez.

6

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo o programa é aplicado a um modelo de fôrma semelhante aos existentes no mercado, sujeito a um carregamento usual.

6.1 MODELO DE FÔRMA

- Espessura nominal da chapa: 0,95 mm
- Altura da fôrma : 75 mm
- Ângulo de dobra da alma: 74,9°
- Largura da mesa inferior: 119 mm
- Número de enrijecedores na mesa inferior: 1
- Largura do enrijecedor da mesa inferior: 12 mm
- Altura do enrijecedor da mesa inferior: 5 mm
- Ângulo de dobra: 75°
- Largura da mesa superior : 119 mm
- Número de enrijecedores na mesa superior: 1
- Largura do enrijecedor da mesa superior: 12 mm
- Altura do enrijecedor da mesa superior: 5 mm

PROGRAMA DE ANÁLISE DE FÔRMAS METÁLICAS

FIGURA 6.1 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO

I Entrada de dados:												Sobrecarga considerada para Flecha ?						
Geometria						Dados dos enrijecedores longitudinais												
t	h	bfs	bfi	θ_1	r1	N _{inf}	N _{sup}	a _i	a _s	b _i	b _s	c _i	c _s	θ_2	r2	Cext	Cint	
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	0/1/2	0/1/2	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,91	75,00	119	119	74,92	5,00	1	1	12	12	0	0	5,0	5,0	75,0	5,0	75,00	150,00	N

Propriedades Físicas

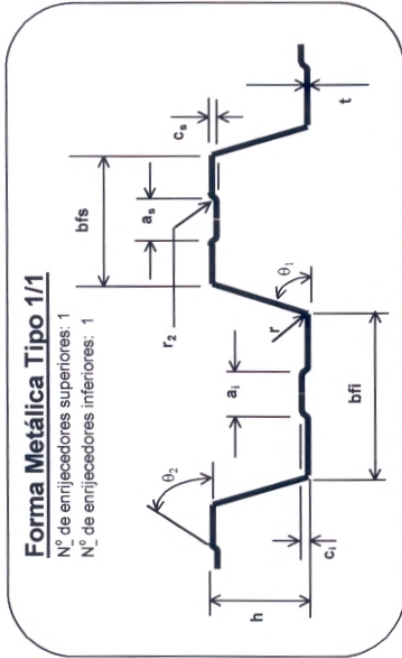
Ea	fy	fu
KN/cm ²	KN/cm ²	KN/cm ²
20500	28	40

Carga Distribuida [KN/m²] Fator

Cp	Sc
2,52	1,00
1,3	1,2

Selecionar o Tipo de forma metálica:

5



Caso A) Lmax = 3617,754 mm

Flecha admissível
L 180

Caso B) Lmax = 3423,726 mm

Caso C) Lmax = 3824,016 mm

VÃO MÁXIMO ADMISSÍVEL:

Lmax	=	3423,726	mm	Caso mais Crítico:	B
Peso da Forma	=	10,139	Kg/m ²		

FIGURA 6.1 — Exemplo de utilização

RESULTADOS		qd = 4,476 KN/m²
L1max =	3730,351 mm	Resistência ao Momento Fletor para 1 vão LP 3730,4 mm
L2max =	26550,9667 mm	Resistência a Força Cortante para 1 vão
L3max =	3617,75382 mm	Resistência à Força Concentrada no apoio para 1 vão
L4max =	4974,244 mm	Resistência ao Momento Fletor Positivo para 2 vãos LP 3730,7 mm
L5max =	3446,333 mm	Resistência ao Momento Fletor Negativo para 2 vãos LN 1723,2 mm
L6max =	21240,7734 mm	Resistência a Força Cortante para 2 vãos
L7max =	3423,72636 mm	Resistência a Interação M(negativo) & Q para 2 vãos
L8max =	5159,05618 mm	Resistência à Força Concentrada no apoio central para 2 vãos
L9max =	4662,939 mm	Resistência ao Momento Fletor Positivo para 3 vãos LP 3730,4 mm
L10max =	3853,117 mm	Resistência ao Momento Fletor Negativo para 3 vãos LN 1835,6 mm
L11max =	22125,8056 mm	Resistência à Força Cortante para 3 vãos
L12max =	3824,01551 mm	Resistência à Interação M(negativo) & Q para 3 vãos
L13max =	6448,82022 mm	Resistência à Força Concentrada no apoio central para 3 vãos
LmaxA =	3617,754 mm	Menor valor para o caso A - 1 vão
LmaxB =	3423,726 mm	Menor valor para o caso B - 2 vãos
LmaxC =	3824,016 mm	Menor valor para o caso C - 3 vãos
Lmax =	3423,726 mm	Menor de todos os valores p/ estados limites últimos
Lmax =	3423,726 mm	Com limite de flecha = L/180 (caso A) Flecha = 18,16 mm (= L / 189)

FIGURA 6.2 - Resultados complementares do exemplo de utilização

6.2 Interpretação do resultado da planilha

O vão admissível de 3423,7 mm, mostrado na primeira página da planilha, foi governado pelo estado limite último no vão biapoiado, correspondendo ao caso B (situação com três apoios).

O estado limite último em questão foi a interação da força cortante com o momento fletor sobre o apoio intermediário, como esperado, e que aparece na segunda página da planilha.

7

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS FÔRMAS

Neste capítulo é apresentado um estudo comparativo de respostas estruturais antes da cura do concreto de três tipos de fôrma semelhantes a fôrmas existentes nos mercados nacional e internacional. Para este estudo, será utilizada uma planilha de cálculo cujo fluxograma se encontra no capítulo 4.

Em função da geometria da seção transversal da fôrma, das propriedades de seu material e dos carregamentos atuantes, determina-se o vão máximo admissível que a fôrma vence para cada um dos estados limites últimos aplicáveis e para o estado limite da utilização (flecha máxima recomendada).

O resultado deste estudo, baseado em parâmetros e critérios de dimensionamento comuns para todos os modelos, permite comparar a eficiência dos três modelos analisados, levando-se em conta o vão que a fôrma vence e o seu peso.

7.1 Tipos de fôrma de aço estudados

Os fabricantes de fôrmas, consultados a respeito de dados de geometria e de ensaios elaborados, em geral apresentaram grande restrição ao fornecimento desses dados alegando como maior empecilho para a sua disponibilização a sua confidencialidade.

Dentre os diversos fabricantes consultados, apenas três disponibilizaram dados relativos às suas fôrmas de aço e somente um forneceu todos os dados solicitados e a maneira como foram obtidos. Por esse motivo, os dados que não foram fornecidos pelos outros fabricantes foram obtidos com valores aproximados, tomando-se medidas em amostras de fôrmas ou em catálogos. Por questões éticas, não serão indicados os nomes das fôrmas de aço e de seus respectivos fabricantes.

7.2 Modelos considerados para comparação das eficiência das fôrmas

MODELO 1(FIG. 7.1)

- Espessuras nominais disponíveis: 0,80 mm, 0,88 mm, 0,95 mm, 1,10 mm, 1,25 mm, 1,40 mm, 1,56 mm
- Espessuras para cálculo: 0,76 mm, 0,84 mm, 0,91 mm, 1,06 mm, 1,21 mm, 1,36 mm, 1,52 mm.
- Altura da fôrma: 76 mm
- Ângulo de dobra da alma: $67,5^\circ$
- Largura da mesa inferior: 121 mm
- Número de enrijecedores na mesa inferior: 1
- Largura do enrijecedor da mesa inferior: 3 mm
- Altura do enrijecedor da mesa inferior: 10 mm
- Ângulo de dobra: 42°
- Largura da mesa superior: 121 mm
- Número de enrijecedores na mesa superior: 1
- Largura do enrijecedor da mesa superior: 3 mm
- Altura do enrijecedor da mesa superior: 10 mm
- Ângulo da dobra do enrijecedor da mesa inferior: 42°
- Raios de dobramento: 5 mm

Obs.: Considera-se nesta análise apenas as espessuras de 0,80 mm, 0,95 mm e 1,26 mm, que são as disponíveis para os modelos 2 e 3.

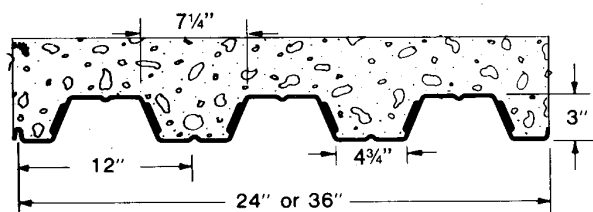


FIGURA 7.1 - Fôrma do modelo 1

MODELO 2 (FIG. 7.2)

Espessuras nominais disponíveis: 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm

Espessuras para cálculo: 0,76 mm, 0,91 mm, 1,21 mm

Altura da fôrma: 75 mm

Ângulo de dobra da alma: 76,5°

Largura da mesa inferior: 119 mm

Número de enrijecedores na mesa inferior: 1

Largura do enrijecedor da mesa inferior: 12 mm

Altura do enrijecedor da mesa inferior: 5 mm

Ângulo de dobra: 55°

Largura da mesa superior: 119 mm

Número de enrijecedores na mesa superior: 1

Largura do enrijecedor da mesa superior: 12 mm

Altura do enrijecedor da mesa superior: 5 mm

Ângulo da dobra do enrijecedor da mesa inferior: 55°

Raios de dobramento: 5 mm

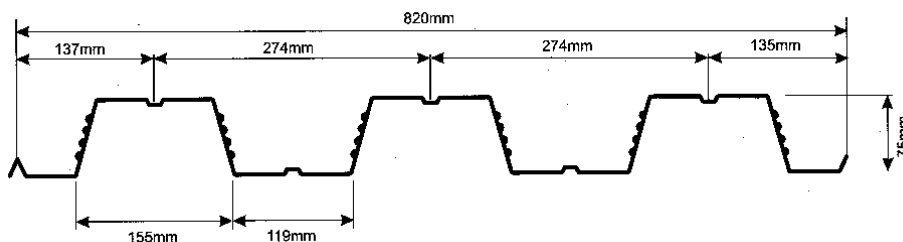


FIGURA 7.2 – Fôrma do modelo 2

MODELO 3 (FIG. 7.3)

Espessuras nominais disponíveis: 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm

Espessuras para cálculo: 0,76 mm, 0,91 mm, 1,21 mm

Altura da fôrma: 59 mm

Ângulo de dobra da alma: 67,5°

Largura da mesa inferior: 58 mm

Número de enrijecedores na mesa inferior: 0

Largura do enrijecedor da mesa inferior: não aplicável

Altura do enrijecedor da mesa inferior: não aplicável

*Ângulo de dobra: não aplicável

Largura da mesa superior: 84 mm

Número de enrijecedores na mesa superior: 1

Largura do enrijecedor da mesa superior: 5 mm

Altura do enrijecedor da mesa superior: 8 mm

Ângulo de dobra do enrijecedor da mesa inferior: 42°

Raios de dobramento: 5 mm

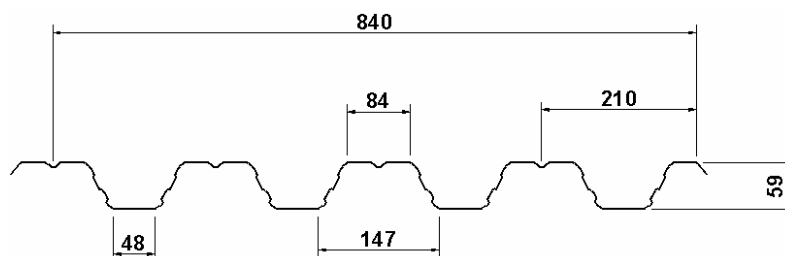


FIGURA 7.3 - Fôrma do Modelo 3

7.3 Resultados para o MODELO 1

TABELA 7.1 — Resultados para o modelo 1

t (mm)	h _c (mm)	Massa da fôrma (kg/m ²)	Volume de concreto (m ³)	Massa do concreto (Kg/m ²)	Carga permanente total antes da cura (kN/m ²)	Sobrecarga antes da cura (kN/m ²)	Vão máximo que a fôrma resiste (mm)		
							2 apoios	3 apoios	4 apoios
0,80	50	10,31	0,0875	210	2,20	1,0	3105	3435	3836
	75	10,31	0,1125	270	2,80	1,0	2755	3091	3506
	100	10,31	0,1375	330	3,40	1,0	2373	2864	3197
	125	10,31	0,1625	390	4,00	1,0	2084	2619	2990
0,95	50	12,47	0,0875	210	2,22	1,0	3189	3510	3920
	75	12,47	0,1125	270	2,82	1,0	2869	3073	3512
	100	12,47	0,1375	330	3,42	1,0	2473	2849	3257
	125	12,47	0,1625	390	4,02	1,0	2173	2668	3049
1,25	50	16,5	0,0875	210	2,27	1,0	3453	4113	4653
	75	16,5	0,1125	270	2,87	1,0	3267	3707	4214
	100	16,5	0,1375	330	3,47	1,0	3113	3442	3846
	125	16,5	0,1625	390	4,07	1,0	2990	3170	3630

t = espessura nominal da chapa

h_c = altura do concreto acima da fôrma

7.4 Resultados para o MODELO 2

TABELA 7.2 —. Resultados para o modelo 2

t (mm)	h _c (mm)	Massa da fôrma (kg/m ²)	Volume de concreto (m ³)	Massa do concreto (Kg/m ²)	Carga permanente total antes da cura (kN/m ²)	Sobrecarga antes da cura (kN/m ²)	Vão máximo que a fôrma resiste (mm)		
							2 apoios	3 apoios	4 apoios
0,80	50	9,37	0,0875	210	2,19	1,0	3078	3218	3664
	75	9,37	0,1125	270	2,79	1,0	2767	2942	3285
	100	9,37	0,1375	330	3,34	1,0	2410	2673	3062
	125	9,37	0,1625	390	3,99	1,0	2091	2486	2775
0,95	50	11,12	0,0875	210	2,21	1,0	3228	3508	3919
	75	11,12	0,1125	270	2,81	1,0	3058	3148	3586
	100	11,12	0,1375	330	3,41	1,0	2909	2920	3261
	125	11,12	0,1625	390	4,01	1,0	2595	2665	3053
1,25	50	14,62	0,0875	210	2,25	1,0	3511	4131	4679
	75	14,62	0,1125	270	2,85	1,0	3316	3786	4230
	100	14,62	0,1375	330	3,47	1,0	3161	3441	3845
	125	14,62	0,1625	390	4,05	1,0	3041	3171	3612

t = espessura nominal da chapa

h_c = altura do concreto acima da fôrma

7.5 Resultados para o MODELO 3

TABELA 7.3 — Resultados para o modelo 3

t (mm)	h _c (mm)	Massa da fôrma (kg/m ²)	Volume de concreto (m ³)	Massa do concreto (Kg/m ²)	Carga permanente total antes da cura (kN/m ²)	Sobrecarga antes da cura (kN/m ²)	Vão máximo que a fôrma resiste (mm)		
							2 apoios	3 apoios	4 apoios
0,80	50	9,13	0,0760	182	1,91	1,0	2343	2893	3243
	75	9,13	0,1010	242	2,51	1,0	2207	2617	2935
	100	9,13	0,1260	302	3,11	1,0	2093	2413	2697
	125	9,13	0,1510	362	3,71	1,0	2039	2239	2515
0,95	50	10,84	0,0760	182	1,92	1,0	2440	3156	3524
	75	10,84	0,1010	242	2,53	1,0	2298	2855	3198
	100	10,84	0,1260	302	3,13	1,0	2172	2623	2943
	125	10,84	0,1510	362	3,73	1,0	2084	2447	2735
1,25	50	14,26	0,0760	182	1,46	1,0	2846	4188	4432
	75	14,26	0,1010	242	2,56	1,0	2513	3445	3666
	100	14,26	0,1260	302	3,16	1,0	2389	3175	3386
	125	14,26	0,1510	362	3,76	1,0	2279	2956	3162

t = espessura da chapa

h_c = altura do concreto acima da fôrma

7.6 Comparação dos resultados obtidos para o modelo 2

O modelo 2, submetido a carregamentos adequados, produz resultados que podem ser comparados com os valores da TAB. 2.4, apresentada em SOUZA NETO (2001), e da tabela de METFORM (2001).

7.6.1 Comparação com os valores apresentados em SOUZA NETO (2001)

Para o modelo 2, é feita a comparação para a resistência do momento fletor do vão simples (FIG. 7.1.) e do vão duplo (FIG. 7.2).

São considerados os coeficientes de ponderação das cargas no valor de 1.3 tanto para carga permanente quanto para sobrecarga, conforme SOUZA NETO (2001).

É considerada uma carga permanente fictícia adequada e a mesma sobrecarga constante em SOUZA NETO (2001), de maneira a produzir-se um mesmo momento fletor de cálculo.

Observa-se que é mostrado na FIG. 7.1 o valor de vão simples máximo igual a 2.856 mm, muito próximo do valor 2.850 mm, e na FIG. 7.2, o valor de vão duplo máximo igual a 3.581 mm, muito próximo do valor 3.580 mm, fornecidos na TAB. 2.4.

7.6.2 Comparação com os valores apresentados em METFORM (2001)

Para o modelo 2, é feita a comparação para a resistência do momento fletor do vão simples (FIG. 7.3.) e do vão duplo (FIG. 7.4).

São considerados os coeficientes de ponderação das cargas no valor de 1.3 para carga permanente e de 1.4 para sobrecarga, conforme METFORM (2001).

É considerada uma carga permanente fictícia adequada e a mesma sobrecarga constante em METFORM (2001), de maneira a produzir um mesmo momento fletor de cálculo.

Observa-se que é mostrado na FIG. 7.3 o valor de vão simples máximo igual a 2.929 mm, muito próximo do valor 2.900 mm, e na FIG. 7.4, o valor de vão duplo máximo igual a 3.508 mm, muito próximo do valor 3.500 mm, fornecidos na tabela da METFORM.

Observação: as pequenas diferenças encontradas nas comparações acima devem-se aos dados dimensionais, uma vez que para, este trabalho, não se dispunha de todos os detalhes da geometria da fôrma.

PROGRAMA DE ANÁLISE DE FÔRMAS METÁLICAS

FÔRMA SUJEITA A CARREGAMENTO EQUIVALENTE AO DO SDI PARA ANÁLISE DE VÃO SIMPLES

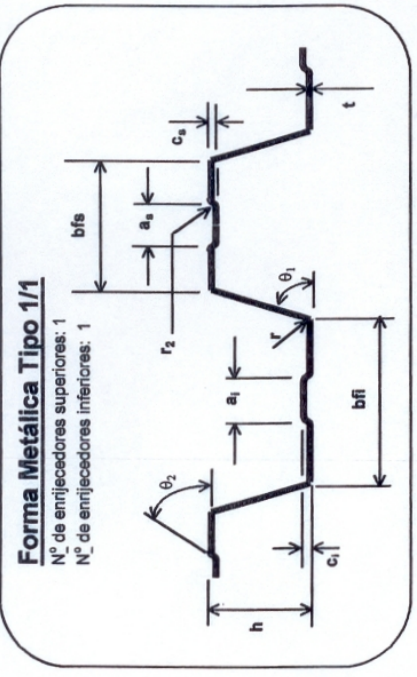
Estudo:		Entrada de dados:										Sobrecarga considerada para Flecha ?								
		Dados dos enrijecedores longitudinais																		
Geometria		t	h	bfs	bfi	θ_1	r_1	N_{inf}	N_{sup}	a_1	a_s	b_1	b_s	c_1	c_s	θ_2	r_2	$Cext$	$Cint$	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	0/1/2	0/1/2	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	[mm]	[mm]	N
		1,21	75,00	119	119	74,92	5,00	1	1	12	12	0	0	5,0	5,0	75,0	5,0	100,00	150,00	N

Propriedades Físicas		
Ea	fy	fu
KN/cm^2	KN/cm^2	KN/cm^2
20500	28	40

Carga Distribuida $[KN/m^2]$		Fator
Cp	Sc	
7,5	1,00	1,3
		1,3

Selecionar o Tipo de forma metálica:

5



Caso A) $L_{max} = 2856,036$ mm

Caso B) $L_{max} = 2602,992$ mm

Caso C) $L_{max} = 2698,449$ mm

Flecha admissível: L/180

VÃO MÁXIMO ADMISSÍVEL:

$L_{max} = 2602,992$ mm Caso mais Crítico: B

Peso da Forma = 13,483 Kg/m²

FIGURA 7.4. – Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2001) – vão simples

PROGRAMA DE ANÁLISE DE FÔRMAS METÁLICAS

Estudo: FÔRMA SUJEITA A CARREGAMENTO EQUIVALENTE AO DO SDI PARA ANÁLISE DE VÃO DUPLO

Entrada de dados:										Sobrecarga considerada para Flecha ?										
Geometria																				
t	h	bfs	bfi	θ_1	r ₁	N _{inf}	N _{sup}	a ₁	a _s	b ₁	b _s	c ₁	c _s	θ_2	r ₂	Cext	Cint			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	0/1/2	0/1/2	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	N	N
1,21	75,00	119	119	74,92	5,00	1	1	12	12	0	0	5,0	5,0	75,0	5,0	100,00	150,00			

Propriedades Físicas

Ea	fy	fu
KN/cm ²	KN/cm ²	KN/cm ²
20500	28	40

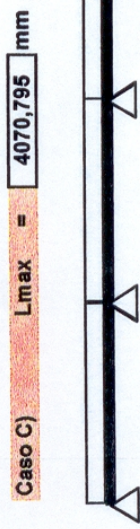
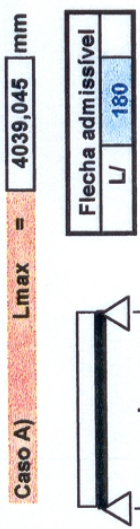
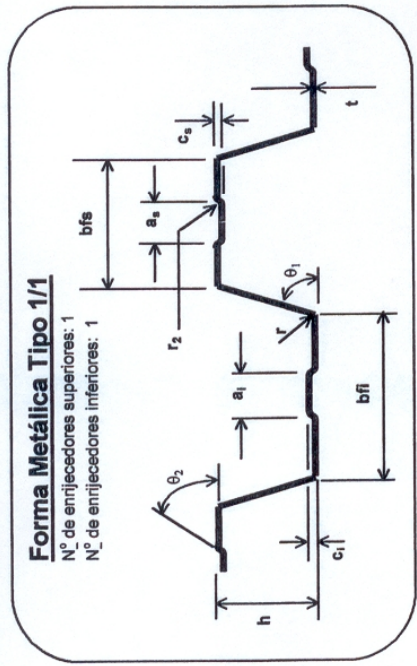
Carga Distribuída [KN/m²]

Cp	Sc	Fator
3,25	1,00	1,3
		1,3

Selecionar o Tipo de forma metálica:

5

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



VÃO MÁXIMO ADMISSÍVEL:

Lmax =	3100,808 mm	Caso mais Crítico:	Flecha
Peso da Forma =	13,483 Kg/m ²		

FIGURA 7.5. – Exemplo para comparação com SOUZA NETO (2001) – vão duplo

PROGRAMA DE ANÁLISE DE FÔRMAS METÁLICAS

FÔRMA SUJEITA A CARREGAMENTO EQUIVALENTE AO DO SDI PARA ANÁLISE DE VÃO DUPLO

Estudo:

I Entrada de dados:

Geometria		Dados dos enrijecedores longitudinais										Sobrecarga considerada para Flecha ?						
t	h	bfs	bff	θ_1	r1	N _{inf}	N _{sup}	a ₁	a _s	b ₁	b _s	c ₁	c _s	θ_2	r ₂	Cext	Cint	N
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	0/1/2	0/1/2	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[graus]	[mm]	[mm]	[mm]	
1,21	75,00	119	119	74,92	5,00	1	1	12	12	0	0	5,0	5,0	75,0	5,0	100,00	150,00	

Propriedades Físicas

Ea	fy	fu
KN/cm ²	KN/cm ²	KN/cm ²
20500	28	40

Carga Distribuida [KN/m²]

Cp	Sc	Fator
3,35	1,00	1,3
		1,4

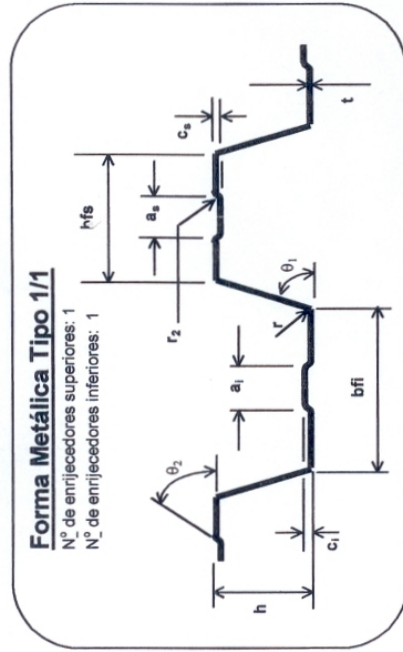
Selecionar o Tipo de forma metálica:

5

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Forma Metálica Tipo 1/1

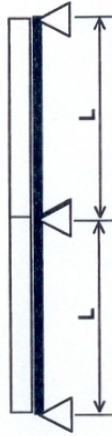
Nº de enrijecedores superiores: 1
Nº de enrijecedores inferiores: 1



Caso A) Lmax = 3957,511 mm



Caso B) Lmax = 3507,824 mm



Caso C) Lmax = 3987,671 mm



VÃO MÁXIMO ADMISSÍVEL:

Lmax = 3507,824 mm Caso mais Crítico: B

Peso da Forma = 13,483 Kg/m²

FIGURA 7.7. – Exemplo para comparação com METFORM (2001) – vão duplo

7.7 Síntese dos resultados das comparações

Pode-se observar que as fôrmas dos modelos 1 e 2 apresentam resistências próximas, vencendo vãos aproximadamente iguais para as mesmas condições de carregamento. Já a fôrma do modelo 3, que tem altura menor que as duas outras e diferenças na geometria, vence vãos menores.

Em contrapartida, apesar de a fôrma do modelo 3 vencer vãos de aproximadamente 80% dos vãos que as outras vencem, ela tem peso aproximadamente igual a 87% do peso das outras duas e consome em torno de 90% do concreto consumido pelas outras, para alturas iguais de concreto sobre as fôrmas.

De maneira geral, pode-se dizer que os modelos 1 e 2 estão bastante otimizados e apresentam alta eficiência, pois sempre que se tenta fazer pequenas modificações em sua geometria, obtém-se redução de sua resistência.

O modelo 3, por ter altura menor que a dos dois outros, é mais adequado ao uso em vãos menores, principalmente na condição de vãos só com dois apoios.

É importante ressaltar que os resultados das TAB. 7.1, 7.2 e 7.3 correspondem somente à fase inicial antes da cura do concreto, e que para que se analise o comportamento global dos modelos, incluindo a fase após a cura do concreto, devem ser consultados os gráficos correspondentes desenvolvidos por MARTINS (2001).

O modelo 2, ao ser submetido a carregamentos compostos de cargas uniformemente distribuídas e a coeficientes de ponderação adequados, que geram esforços solicitantes, aproximadamente equivalentes aos produzidos pelos carregamentos prescritos no SDI, apresentou resultados muito próximos dos obtidos por SOUZA NETO (2001) e METFORM (2001).

8

CONCLUSÕES

A laje de concreto com fôrma de aço incorporada é um sistema construtivo muito eficaz na construção civil, e bastante utilizado na América do Norte e na Europa. No Brasil, pode-se considerar que o uso desse sistema construtivo se iniciou em 1996 e só não tem sido mais utilizado por falta de fornecedores nacionais, que ainda são em número muito reduzido. A importação da fôrma aumenta o seu custo de tal maneira que torna a sua utilização pouco competitiva.

Esse fato está despertando em diversas empresas o interesse no desenvolvimento e na produção de novos modelos de fôrmas, visando atender ao crescente mercado consumidor.

A escassez de trabalhos sobre este assunto, bem como a grande dificuldade de se obter informações de resultados de pesquisas realizadas pelas empresas, dificulta o desenvolvimento de novos produtos nacionais.

Este trabalho, cujo objetivo é o estudo teórico dos parâmetros que influenciam o comportamento estrutural das lajes com fôrmas de aço incorporadas, na fase antes da cura do concreto, juntamente com o trabalho elaborado por MARTINS (2001), que abordou o estudo dos parâmetros que influenciam o comportamento estrutural dessas lajes após a cura do concreto, poderá auxiliar no desenvolvimento de novos tipos de fôrma de aço a serem fabricados no Brasil.

Ao se estudar os parâmetros que influem no comportamento das fôrmas antes da cura do concreto, procurou-se entender a influência de cada um na eficiência da fôrma. Esta eficiência da fôrma antes da cura do concreto pode ser entendida como a capacidade de a fôrma vencer um vão máximo (sem ocorrência de qualquer colapso ou de deformação excessiva) associada a um baixo custo, que, em geral, é reflexo de um baixo peso de aço, menor número de dobras e menor consumo de concreto por área de laje.

A seguir estão relacionadas algumas conclusões, obtidas a partir deste trabalho:

- A presença de enrijecedores nas mesas inferiores pode parecer não tão significativa pelo fato de a mesa inferior em um grande número de casos ficar tracionada, não justificando o enrijecimento; mas, na realidade, o que ocorre é o contrário, pois a sua presença aumenta muito a resistência da fôrma a momentos negativos que acontecem quando são utilizados vãos contínuos.
- O aumento da altura da fôrma, apesar de contribuir para o aumento de sua rigidez e resistência ao momento fletor, reduz muito a resistência à força cortante, implicando a necessidade de utilizar chapa mais grossa, o que acarreta aumento de custo.
- A presença das mossas não reduziu significativamente a rigidez à tração e à flexão do modelo.
- Ao se desenvolver um novo modelo de fôrma para incorporação a lajes, é necessário que se faça o estudo do modelo para a situação antes da cura do concreto, concomitantemente ao estudo para a situação após a sua cura, visando obter uma eficiência máxima considerando as duas situações.

9

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo do comportamento das lajes mistas leva em consideração um grande número de parâmetros de diversas naturezas, sendo, portanto, bastante complexo.

Recomenda-se que sejam elaborados trabalhos futuros sobre os seguintes temas:

1. Integração do *software* de dimensionamento da fôrma para a fase antes da cura com o *software* de dimensionamento para a fase após a cura do concreto.
2. Integração dos *softwares* de dimensionamento com um *software* de orçamento em que automaticamente já se possa computar os custos de fabricação e de transporte da fôrma, do concreto e da concretagem, bem como o custo de escoramento de laje para que se obtenha uma comparação de custos e eficiência com o sistema construtivo da laje moldada no próprio local.
3. Proposição de um modelo ideal de fôrma, incluindo especificação do aço, para um carregamento usual especificado e para elaboração de testes em modelos reais em laboratórios.

10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC – AISC. *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*. Chicago, 1999.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. *Load and resistance factor design specification for cold - formed steel structural members*. LRFD Cold – formed steel design manual – part I. Washington, aug., 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - NBR 6118 – *Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT – NBR 8800 – *Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 14323 – *Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – procedimento*. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 14762 – *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - procedimento*. Rio de Janeiro, 2001.

ANSI/ASCE 3 – 91. *Standard for the structural design of composite slabs*. Nova York, dec. 1992.

ANSI/ASCE 9-91. *Standard practice for construction and inspection for composite slabs*. Nova York, dec. 1992.

BARROS JUNIOR, Paulo Pimentel de. *Verificação e dimensionamento de perfis formados a frio segundo a ABNT e o AISI/96*. 2001. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BODE, H. *Euro – Verbundbau konstruktion und berechnung*. 2. ed. Dusseldorf; Werner, 1998.

Canadian Institute of Steel Construction - CISC. *Handbook of steel construction*. Alliston, Ontario, 1997.

CANAM STEEL WORKS. *Solutions + service*. Steel Deck, 1998.

CHIEN, E. Y. L.; RITCHIE, J. K. *Design and construction of COMPOSITE FLOOR SYSTEMS* – CISC. Canadian Institut of Steel Construction, 1984.

CODEME PRODUTOS DE AÇO S^a Steel Deck CE-75. *Noções de utilização e dimensionamento*. Betim, jun. 1997.

DANIELS, B. J. *Comportement et capacité portante des dalles mixtes: modélisation mathématique et étude expérimentale*. 1990. Thèse (PhD) - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

DANIELS, B. J; CRISINEL, M.. *Composite slab behavior and strength analysis – part I: calculation procedure*. J. Struct. Engrg., ASCE, 119 (1), paper n. 2293, 1993.

EUROPEN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Eurocode 2: *Design of concrete structures* - part 1: general rules and rules for buildings – preliminary. oct. 1991.

EUROPEN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Eurocode 3: *Design of steel structures* - part 1: general rules and rules for buildings. European Prestandard, 1993.

EUROPEN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Eurocode 4: *Design of composite steel and concrete structures* - part 1-1: general rules and rules for buildings. European Prestandar, apr. 1992.

FISHER, J.; WEST, M.; VAN DE PAS, J. *Designing with steel joists* - Joist Girders Steel Deck. Nucor Corporation, 1991.

HAIRONVILLE DO BRASIL PolyDeck 59s - *Manual geral para dimensionamento*. São Paulo, maio, 2000.

Instituto Técnico de la Estructura en Acero - ITEA. *Guia de diseño para edificios com estructura de acero*. Ordízia, Espanha, mar. 1997.

JOHNSON, R. P. Composite structures of steel and concrete, *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, v..1, 2. ed., 1994.

JOHNSON, R. P.; ANDERSON, D. *Designers' handbook to Eurocode 4 part 1.1: design of composite steel and concrete structures*. Thomas Telford, London, 1993.

KULAK, G. L.; Gilmor, M. I. *Limit states design in structural steel*. Canadian Institute of Steel Construction, Alliston, Ontario, 1998.

MAASS, G.; HUENERSEN, G.; FRITZSCHE, E. *Stahltrapezprofile – Berechnung und konstruktion nach DIN 18800 und DIN 18807*. 2. ed. Dusseldorf; Werner, 2000.

MARTINS, Alexandre Galvão. *Estudo comparativo de respostas, estruturais, após a cura do concreto, de algumas fôrmas metálicas incorporadas às lajes, disponíveis nos mercados nacional e internacional*. 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MELO, Cristina Belchior. *Análise do comportamento e da resistência do sistema de lajes mistas* 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

METFORM. *Steel Deck. CE-75: noções de utilização e dimensionamento*. Betim, jun. 2001.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. *Elementos das estruturas mistas aço – concreto*. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2001.

RAMSEY/SLEEPER. *Architectural Graphic Standards - AIA. The American Institute of Architects*, 9th ed, John Wiley and sons, INC, New York, 1994.

RODRIGUES, F. C. *Perfis estruturais formados a frio: comportamento e dimensionamento*. UFMG/Departamento de Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 1997.

SOUZA NETO, Anselmo Silvino de. *Análise do comportamento e da resistência de um sistema de lajes mistas com ancoragem de extremidade com considerações sobre a fôrma de aço isolada e o atrito nos apoios*. 2001. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Specifications and commentary for composite steel floor deck*. Canton, Ohio. 1987.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Design manual for composite decks, form decks, roof decks and cellular metal floor deck with electrical distribution*. Canton, Ohio.. 1987.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Diaphragm design manual*. Canton, Ohio. 1987.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Manual of construction with steel deck*. Canton, Ohio.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *LRFD Design manual for composite beams and girders with steel deck*. Canton, Ohio.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Composite deck design handbook*. Canton, Ohio.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Standard practice details*. Canton, Ohio.

STEEL DECK INSTITUTE – SDI. *Metal deck & concrete quantities*. Canton, Ohio.

STEEL DECK INSTITUTE - SDI. *A rational approach to steel deck corrosion protection*. Canton, Ohio.

TARANATH, Bungale S. *Structural analysis and design of tall buildings*. McGraw – Hill, Inc, New York, 1998.

United Steel Deck - USD. *Steel decks for floors and roofs – design manual and catalog of products*. 1999.

VELJKOVIC, M. *Behaviour and resistance of composite slabs – experiments and finite element analysis*. 1996. Thesis (Doctoral) - Lulea University of Technology, Sweden, 1996.

VULCRAFT. *Steel roof and floor deck*. 1998.

WIDJAJA, B. R.; Easterling, W. S. *Developments in long span composite slabs*. *Engineering Journal*, Blacksburg, n. 2, v. 37, p. 73-80, apr./june. 2000.