


HELIO GARCIA LEITE

ID. 88159

UFV	BIBL. IOTEC. BBT	OPERA RG000642128
	CLASSIFICACAO T 634.98 / L533c / 1994	
TITULO Conversao de troncos em multiprodutos da m		
		
101752		BBT

Tese Apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como Parte das Exigências do Curso de Ciência Florestal, para Obtenção do Título de "Doctor Scientiae".

CONVERSÃO DE TRONCOS EM MULTIPRODUTOS DA MADEIRA,
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

BIBLIOTECA CENTRAL - U F V - <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> 101752 07-03-94 </div>

Tese Apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como Parte das Exigências do Curso de Ciência Florestal, para Obtenção do Título de "Doctor Scientiae".

T
634.98
L533c
1994
ex. 1

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1994

DOAÇÃO

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

L533c
1994

Leite, Helio Garcia, 1960-
Conversão de troncos em multiprodutos de madei-
ra, utilizando programação dinâmica/Helio Garcia
Leite. - Viçosa : UFV, 1994.
230p. : il.

Orientador: João Carlos Chagas Campos.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Vi-
çosa.

1. Madeira - Produtos - Otimização. 2. Árvores -
Conversão em multiprodutos. 3. Madeira serrada.
4. Madeira como energia. 5. Chapa de madeira aglo-
merada. 6. Compensados de madeira. 7. Programação
dinâmica. I. Universidade Federal de Viçosa. II.
Título.

CDO adapt. CDD. 634.98

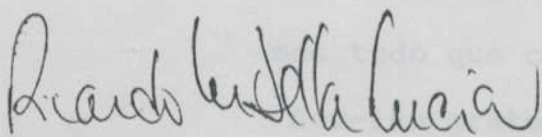
DOAÇÃO

HELIO GARCIA LEITE

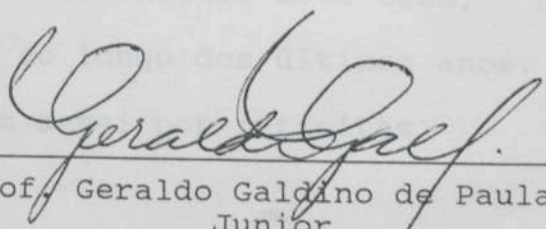
CONVERSÃO DE TRONCOS EM MULTIPRODUTOS DA MADEIRA,
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Ciência
Florestal, para Obtenção do Títu-
lo de "Doctor Scientiae".

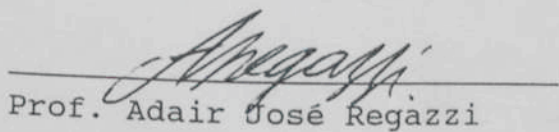
APROVADA: 15 de outubro de 1993



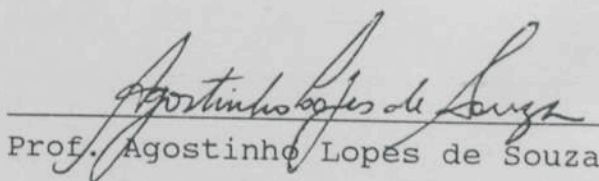
Prof. Ricardo Marius Della
Lucia
(Conselheiro)



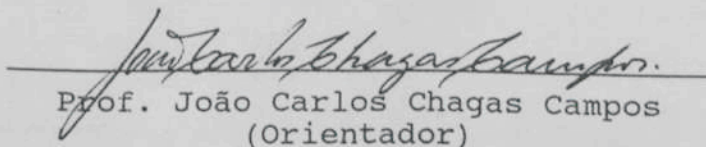
Prof. Geraldo Galvão de Paula
Junior
(Conselheiro)



Prof. Adair José Regazzi



Prof. Agostinho Lopes de Souza



Prof. João Carlos Chagas Campos
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Antônio Elpídio Leite.

Aos meus irmãos e sobrinhos.

A você Silvana Lages Ribeiro Garcia, que sempre combinou instinto e inteligência, em busca de uma vida cada vez melhor, dedico não só esta tese, mas tudo que consegui ao longo dos últimos anos.

Sou-lhe grato e assim serei por infinitas gerações.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela minha formação profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À DURAFLORA S.A., pela cessão dos dados.

Ao professor e amigo João Carlos Chagas Campos, pela excelente amizade e pela experiência e pelos conhecimentos transmitidos ao longo dos anos.

Ao amigo Giorgino L.S. Ferreira, pela inestimável colaboração no desenvolvimento dos códigos computacionais.

Ao meu pai, Antônio Elpídio Leite, aos meus irmãos e aos meus sobrinhos, pelo amor e pelo carinho incondicional.

À Silvana Lages Ribeiro Garcia, pelo apoio e pela compreensão nos momentos difíceis e pela sua luta incansável.

Aos professores Ricardo Marius Della Luccia, Geraldo Galdino de Paula Junior e Agostinho Lopes de Souza, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu amigo professor Adair José Regazzi, pela amizade sincera, pelos ensinamentos e pelas sugestões ao longo dos anos.

Ao senhor Adélcio Vidotti, da DURAFLORA S.A., pelo apoio na seleção dos dados.

Aos amigos Reinaldo B. Cantarutti, Belizane L.R. Cantarutti, aos seus filhos Fabíola, Rafael e Bruno, e à Ana Paula Lages Ribeiro, pelas agradáveis tardes de domingo.

Ao Dr. Daniel Pereira Guimarães, pela amizade e pelas valiosas sugestões.

Aos senhores Franz Lopes e Paulo Afonso, pela editoração de minha tese e pela amizade.

À senhora Eliane Ventura, pela revisão lingüística.

A todos aqueles que, porventura, eu tenha esquecido de mencionar.

BIOGRAFIA

HELIO GARCIA LEITE, filho de Antônio Elpídio Leite e Ana de Souza Garcia, nasceu no dia de 11 outubro de 1960, em Capitólio, Minas Gerais.

Em 1983, iniciou o Curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa (UFV), obtendo o título de Engenheiro Florestal em dezembro de 1986.

Em março de 1987, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência Florestal na UFV, obtendo o título de Mestre em agosto de 1989. Nesse mesmo mês, iniciou o Curso de Doutorado em Ciência Florestal, na mesma Universidade.

Em agosto de 1992, foi contratado pela UFV, como Professor Assistente.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DO ESTUDO	4
2.1. Objetivo Geral	5
2.2. Objetivos Específicos	6
3. REVISÃO DE LITERATURA	7
3.1. Análise Estrutural de Povoamentos Florestais	7
3.1.1. Classificação da Capacidade Produtiva ...	8
3.1.2. Análise da Distribuição dos Diâmetros ...	13
3.2. Análise do Perfil de um Tronco	17
3.3. Recuperação de Produtos	19
3.3.1. Aglomerados	20
3.3.2. Laminação e Produção de Compensados	21
3.3.3. Madeira Serrada e Resíduos da Serraria ..	22
3.3.4. Madeira como Fonte de Energia	25
3.3.5. Análise de Defeitos Externos e Internos .	26
3.3.6. Modelos de Pesquisa Operacional Utiliza-	
dos em Processos de Conversão de Troncos	
e Processamento de Toras	29
3.3.6.1. Programação Linear	31
3.3.6.2. Simulação	35
3.3.6.3. Programação Dinâmica	39
3.3.6.4. Métodos de Separação e Avaliação	
(Branch and Bound)	48

3.3.6.5. Resumo	49
4. MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1. Fonte de Dados	52
4.2. Análise Estrutural dos Povoamentos	53
4.2.1. Classificação da Capacidade Produtiva ...	53
4.2.2. Totalização das Parcelas e Análise da Distribuição dos Diâmetros	55
4.3. Análise da Forma dos Troncos	55
4.4. Modelo de Otimização	56
4.4.1. Critério de Decisão	57
4.4.2. Formulação do Modelo de Programação Dinâ- mica	58
4.4.3. Verificação e Avaliação do Modelo	59
4.4.4. Estudos de Caso e Pós-Otimização	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1. Análise Estrutural	61
5.1.1. Classificação da Capacidade Produtiva ...	62
5.1.2. Análise da Distribuição das Árvores e da Produção por Classe de Diâmetro	67
5.1.3. Análise da Forma dos Troncos	76
5.2. Modelo de Programação Dinâmica	82
5.2.1. Critério de Decisão	84
5.2.2. Recuperação de Produtos	86
5.2.2.1. Recuperação de Chapas de Aglomerado .	88
5.2.2.2. Recuperação de Laminados	88
5.2.2.3. Recuperação de Produtos na Serraria .	90
5.2.3. Desenvolvimento do Modelo Matemático	93
5.2.3.1. Conversão de Troncos em Toras (Nível 1 do Modelo de Programação Dinâmica).	96
5.2.3.2. Conversão de Toras em Produtos Finais (Níveis 2 e 3 do Modelo de Programa- ção Dinâmica)	103
5.2.3.2.1. Conversão de Toras em Madeira Serrada	105
5.2.4. Descrição e Análise do Programa MPDAMA ..	118
5.2.5. Verificação e Avaliação do Modelo	130
5.3. Estudo de Casos e Pós-Otimização	137
5.3.1. Estudo de Caso Número 1: Conversão de Troncos em Toras para Diferentes Usos ...	139
5.3.2. Estudo de Caso Número 2: Conversão de Troncos em Produtos Considerando o Uso de Fatores de Conversão	145
5.3.3. Estudo de Caso Número 3: Estrutura Ótima de Corte na Serraria, Visando o Lucro Má- ximo, Considerando Toras de Diferentes Diâmetros e Comprimentos	147
5.3.4. Estudo de Caso Número 4: Estrutura Ótima de Corte na Serraria, Visando a Maximiza- ção do Volume de Madeira Recuperado	152

5.3.5. Estudo de Caso Número 5: Conversão de Todo o Tronco na Serraria	161
5.3.6. Estudo de Caso Número 6: Conversão de uma Árvore em Compensados, Aglomerados e em Madeira Serrada	165
5.4. Aplicações do Modelo de Programação Dinâmica aos Dados da Análise Estrutural	169
6. RESUMO E CONCLUSÕES	179
BIBLIOGRAFIA	184
APÊNDICES	194
APÊNDICE A - TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE BOM SUCESSO, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO	195
APÊNDICE B - TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE MONTE ALEGRE, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO ...	199
APÊNDICE C - TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE CACHOEIRA DOS MACACOS, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO	203
APÊNDICE D - TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE AREIA BRANCA, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO ...	207
APÊNDICE E - UM EXEMPLO DIDÁTICO SIMPLIFICADO DO PROCESSO DINÂMICO DE CONVERSÃO DE TRONCOS EM TORAS	211

EXTRATO

LEITE, Helio Garcia, D.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1994. **Conversão de Troncos em Multiprodutos da Madeira, Utilizando Programação Dinâmica.** Professor Orientador: João Carlos Chagas Campos. Professores Conselheiros: Ricardo Marius Della Lucia e Geraldo Galdino de Paula Junior.

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo principal de aprimorar os sistemas de utilização de recursos florestais no Brasil. Um modelo de programação dinâmica foi desenvolvido com o propósito de otimizar processos de conversão de troncos e de toras em multiprodutos. Em virtude da importância da integração deste modelo com as usuais análises estruturais de povoamentos, foram utilizados dados provenientes de um inventário florestal, realizado em florestas de **Pinus**, na aplicação do modelo.

Na primeira etapa deste estudo, procedeu-se a uma análise estrutural dos povoamentos inventariados. Nesta análise, um método alternativo foi utilizado para

classificação da capacidade produtiva, tendo sido empregados índices de locais preestabelecidos. Foi analisada, ainda, a forma das árvores, a partir do ajuste de modelos de "taper". Numa segunda etapa, foi desenvolvido o modelo matemático de programação dinâmica e, por último, este modelo, codificado para o uso em computador, foi utilizado em alguns estudos de caso e, também, para analisar o processo de conversão das árvores inventariadas.

Os resultados obtidos evidenciaram a necessidade de aliar às técnicas de análise do crescimento das florestas os processos de otimização que permitam identificar usos alternativos, em nível ótimo, para as árvores. Foi possível concluir que o rendimento de conversão nas serrarias pode ser aumentado de forma considerável (até 80% em alguns casos), pelo emprego do modelo desenvolvido. Nos estudos de caso, foi possível verificar o efeito da espessura de corte sobre o rendimento de conversão de troncos e, ou, de toras em madeira serrada e o efeito da altura de corte das árvores no campo sobre o rendimento ao convertê-las em laminados, aglomerados e madeira serrada, dentre outros. Finalmente, foi possível exemplificar a quantificação de produtos, em nível ótimo, a partir de árvores desbastadas em diferentes ocasiões. O estudo permitiu identificar, ainda, futuras investigações, tais como o uso da computação gráfica, a análise de defeitos nas árvores, a inclusão de restrições de demanda nos processos de otimização e o uso do modelo desenvolvido para análise de desbastes em povoamentos de **Pinus**.

1. INTRODUÇÃO

O manejo florestal moderno requer integração entre floresta, indústria e mercado, para maximizar o retorno financeiro e, ao mesmo tempo, garantir uma base sustentável do estoque de crescimento das florestas. Neste sentido, uma importante função do manejador é desenvolver e utilizar técnicas que visam identificar as oportunidades alternativas e os valores dos diferentes produtos que as árvores podem oferecer. Os conhecimentos específicos de tipos, quantidades e valores dos produtos devem ser incorporados nos processos de modelagem dos povoamentos florestais.

Uma mesma parte de uma árvore pode produzir diferentes produtos, e estes, por sua vez, têm diferentes valores de mercado, apresentando também variações com relação à demanda ao longo dos anos. Deste modo, é importante a identificação das oportunidades alternativas, seguida da otimização em função das condições presentes. Cada parte deve ser utilizada de forma a maximizar o retorno

líquido pelo uso de toda a árvore.

Um sistema de otimização do uso de árvores, além de permitir a obtenção do maior lucro possível, pela utilização da parte mais nobre, o tronco, permite quantificar as perdas que ocorrem pela não-utilização dos resíduos do processamento. Além disto, os usos podem ser identificados para partes da árvore que, porventura, não forem utilizadas. Os valores e os custos de produção dos subprodutos da madeira têm aumentado a cada ano, de onde se depreende ser promissor o uso de sistemas de processamento em que os resíduos tenham formas alternativas de utilização, tais como polpa, diversas chapas, energia, palitos, dentre outros.

De modo geral, os manejadores envolvidos com a utilização da madeira têm se preocupado com a eficiência e a lucratividade dos processos de conversão. As regras de classificação de toras têm sido estabelecidas, contribuindo para a discriminação de partes mais valiosas do tronco; essas regras também têm proporcionado especificações mínimas, para se produzir determinado produto. Contudo, tais regras e especificações não permitem determinar, por si só, qual dos muitos padrões possíveis dará o maior retorno financeiro (BRIGGS, 1977a). Essa limitação evidencia a importância do desenvolvimento e da aplicação de modelos de otimização do uso de árvores. Os modelos de otimização do uso de árvores têm sido desenvolvidos em outros países, principalmente nos Estados Unidos, utilizando técnicas de pesquisa operacional (PO), que são extremamente eficazes nesses casos (BRIGGS, 1989; REINDERS, 1989). Contudo, dependendo do nível de detalhamento, esses modelos têm

aplicação limitada em situações mais comuns, no Brasil.

Em vista do exposto, o desenvolvimento de um modelo que identifique as alternativas de uso, em nível ótimo, tendo por base a realidade brasileira, certamente contribuirá para a modernização e expansão desse setor florestal no País.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DO ESTUDO

O processo de conversão de troncos em toras, e destas em produtos finais (laminados, chapas de fibra, madeira serrada, aglomerados, compensados, celulose, papel e cartão vegetal), envolve diversas etapas inter-relacionadas. Inicialmente as árvores são abatidas e seccionadas, resultando em toras que podem ser alocadas para vários processos de conversão, nos diferentes usos. Numa serraria, por exemplo, diversas estruturas de corte podem ser adotadas implicando um maior ou menor valor do produto. Assim, o valor de uma árvore está ligado à forma do produto. Assim, o valor de uma árvore está ligado ao modo de aproveitamento de todos os itens produzidos. Desta forma, para obter o melhor retorno financeiro pela venda da árvore, em qualquer caso, é necessário considerar todos os aspectos, desde o modo de abate até o aproveitamento final na indústria. Portanto, é necessário avaliar as alternativas de uso das árvores e sua relação com a realidade econômica e social existente.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DO ESTUDO

O processo de conversão de troncos em toras, e destas em produtos finais (laminados, chapas de fibra, madeira serrada, aglomerados, compensados, celulose, papel e carvão vegetal), envolve diversos passos inter-relacionados. Inicialmente as árvores são abatidas e seccionadas, resultando em toras que podem ser alocadas para vários processos de conversão, com diferentes alternativas de uso. Numa serraria, por exemplo, diversas estruturas de corte podem ser adotadas, implicando um maior ou menor valor do produto. Assim, o valor de uma árvore será igual à soma dos valores de todos os itens produzidos. Deste modo, para obter o máximo retorno financeiro pelo uso da árvore, os modelos de otimização devem considerar todos os passos, desde o abate da árvore até o processamento final na indústria. Perdas significativas ocorrem pela má-utilização das árvores, e isto está diretamente relacionado com a consideração ou não das interações existentes.

Por outro lado, a decisão pessoal de um operador de como seccionar um tronco e, ou, como processar uma tora dificilmente será em nível ótimo. Isto ocorre porque ele não consegue visualizar todas as alternativas no pouco tempo que tem para decidir. Assim, é necessário o uso de modelos de PO, em que os algoritmos sejam codificados para uso em computador e, se possível, em sistemas automatizados.

Uma das técnicas de PO mais eficazes para solucionar problemas dessa natureza é a programação dinâmica (PD). Neste sentido, diversos modelos foram desenvolvidos em outros países, notadamente nos Estados Unidos, e uma das principais características dos modelos de PD é a "especificidade", ou seja, para cada problema, devem ser desenvolvidos um algoritmo e um programa de computação específicos.

Considerando a necessidade de aprimoramento dos sistemas de utilização dos recursos florestais no Brasil, aliada à especificidade mencionada e, ainda, ao fato de que a maioria dos modelos desenvolvidos em outros países não reflete a realidade brasileira, propôs-se este estudo, cujos objetivos foram:

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de otimização, com base em PD, para conversão de troncos e recuperação de multiprodutos da madeira e que possa ser implementado conjuntamente com as usuais análises de crescimento e produção florestal.

2.2. Objetivos Específicos

i) desenvolver um algoritmo de PD e codificá-lo para uso em computador, visando otimizar o processo de conversão de troncos e recuperação de laminados, compensados, aglomerados e madeira serrada;

ii) aplicar o modelo aos dados resultantes do processamento de um inventário florestal contínuo, realizado em povoamentos de **Pinus oocarpa**;

iii) desenvolver um sistema classificatório da capacidade produtiva para os povoamentos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Análise Estrutural de Povoamentos Florestais

No manejo florestal moderno, deve haver integração entre as análises de crescimento e produção e os processos de utilização de árvores individuais. O manejador moderno geralmente tem interesse em quantificar multiprodutos na floresta. Assim, dispondo de um modelo de otimização do uso de árvores, ele ainda precisa conhecer a estrutura dos seus povoamentos, ao longo dos anos. Este conhecimento pode envolver diversas análises, como o estabelecimento de um sistema classificatório da produção, a análise da distribuição dos diâmetros nos povoamentos e a análise da forma dos troncos.

3.1.1.1. Classificação da Capacidade Produtiva

Os altos custos de implantação e de condução das florestas implicam a necessidade do conhecimento da capacidade produtiva das terras. Esse conhecimento é importante para: a seleção de espécies, a extrapolação de resultados experimentais, a definição de unidades homogêneas para manejo, a análise do efeito de adubações, a decisão sobre o regime de corte, os estudos que visam melhorias na capacidade produtiva e na modelagem do crescimento e da produção, envolvendo diversas análises.

A capacidade produtiva de um lugar pode ser definida como o "potencial de produção de madeira de um local, para uma espécie particular ou tipo florestal". Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para quantificá-la, envolvendo métodos diretos e métodos indiretos (CLUTTER et al., 1983). A produtividade de um lugar é afetada por diversos fatores, de diferentes naturezas; entretanto, quando se analisa o crescimento em altura dominante das árvores, todos os fatores são combinados e considerados. Além disto, a variável resultante (S = índice de local) pode ser utilizada em modelos de crescimento e produção, por ter expressão numérica e não-qualitativa.

Dentre as alternativas de classificação da capacidade produtiva, podem ser citados os métodos que se baseiam em: dados históricos, volume do povoamento, características da vegetação, fatores topográficos e climáticos, propriedades do solo, parâmetros aleatórios da árvore e do povoamento e altura dominante.

A classificação com base em propriedades do solo pode não ser eficiente, já que é praticamente impossível quantificar o efeito de fatores isolados, como demonstrado por BILLINGS (1952). No modelo 1, por exemplo, o efeito do fósforo e do cálcio sobre o crescimento das árvores depende de diversos fatores, tais como precipitação e microclima, de suas interações e do próprio tipo de solo.

Modelo 1:
$$S = \beta_0 + \beta_1(P_{\text{ppm}}) + \beta_2(\text{Ca}_{\text{ppm}}) + \epsilon$$

em que

S = índice de local;

P = fósforo, ppm;

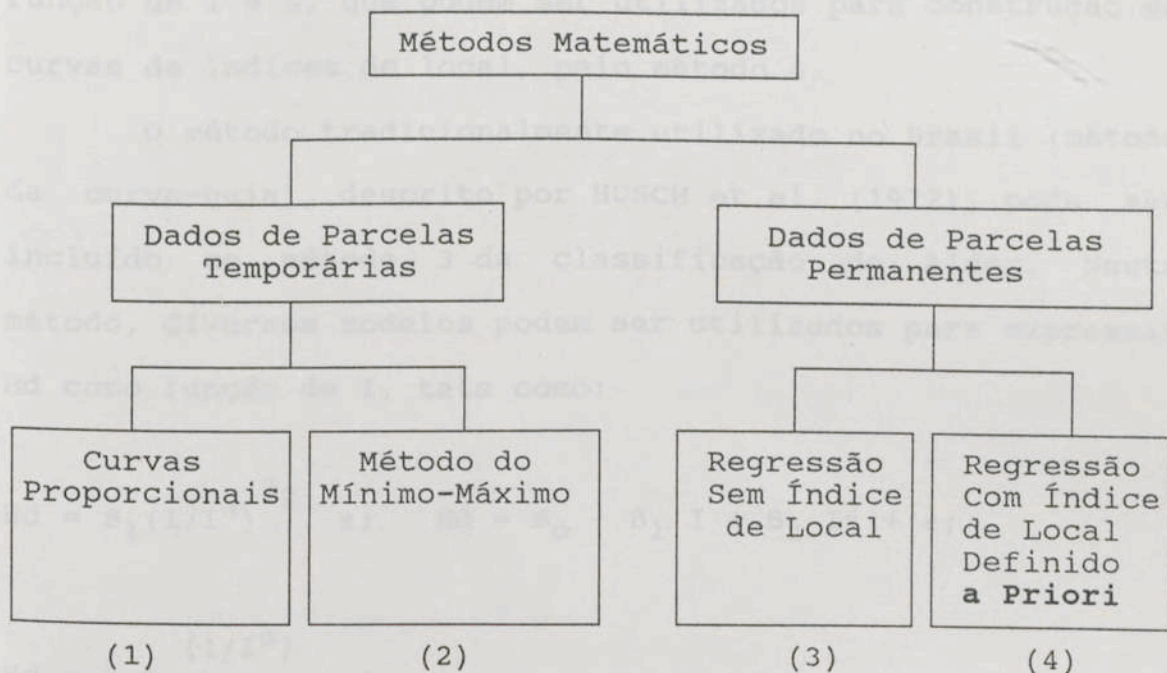
Ca = cálcio, ppm;

ϵ = erro aleatório.

A classificação por meio dos índices de locais (construção de curvas de índices de locais), empregando a variável altura dominante (H_d), tem se mostrado mais eficiente, quando comparada com outras alternativas. Essa eficiência está relacionada com o fato de o método considerar o efeito de todos os fatores ambientais e de suas interações, pelo emprego da variável altura dominante (H_d). Segundo ALDER (1980), essa variável é utilizada por ser um bom indicador da produtividade e por não ser influenciada pela densidade do povoamento.

Na construção de curvas de índices de locais, podem ser empregados métodos gráficos ou métodos matemáticos. Os primeiros são pouco eficientes, dependem de julgamento pessoal, e isto pode levar à baixa precisão. Os métodos

matemáticos apresentam uma série de vantagens e podem ser divididos conforme o esquema da Figura 1 (ALDER, 1980).



FONTE: ALDER (1980)

FIGURA 1 - Métodos Matemáticos de Construção de Curvas de Índices de Locais.

Os métodos 3 e 4, indicados na Figura 1, são estatisticamente apropriados, podendo ser empregados diferentes modelos estatísticos. O método 4 pode constituir uma alternativa para o método 3, quando o índice de local for estabelecido **a priori**, o que pode ser feito de diversas maneiras.

Uma importante vantagem do método 4 refere-se à flexibilidade na escolha do modelo, sendo que este pode ser

restrito ou irrestrito. Um modelo restrito condiciona $H_d = S$ se, e somente se, $I = I$ (LUNDGREEN e DOLID, 1970; ALDER, 1980; HEGYI, 1981). No Quadro 1, são relacionados alguns exemplos de modelos potenciais, para estimar H_d em função de I e S , que podem ser utilizados para construção de curvas de índices de local, pelo método 4.

O método tradicionalmente utilizado no Brasil (método da curva-guia), descrito por HUSCH et al. (1972), pode ser incluído no método 3 da classificação de Alder. Neste método, diversos modelos podem ser utilizados para expressar H_d como função de I , tais como:

$$H_d = \beta_1 (1/I^\alpha)^{\beta_2} \cdot \epsilon; \quad H_d = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 I^2 + \epsilon;$$

$$H_d = \beta_0 \beta_1 (1/I^\alpha) \cdot \epsilon$$

$$e \quad H_d = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 I}) + \epsilon; \quad H_d = k + \beta_1 (1 - e^{-\beta_2 I}) + \epsilon,$$

em que α = parâmetro cuja estimativa está geralmente entre 0,2 e 2,0; k = constante, geralmente 1, 3; H_d , S e β_i = como definido no Quadro 1.

Dois novos métodos foram propostos recentemente por ALEMDAG (1988) e por LAPPI e BAILEY (1988). O primeiro apresenta algumas semelhanças com o tradicional método da curva-guia; basicamente consiste em estabelecer regressões lineares, por classes de idade, relacionando altura com a idade, e analisar o comportamento dos parâmetros β_0 e β_1 dessas regressões com a própria idade. A partir dessas relações, a forma final da equação de índice de local é

QUADRO 1 - Modelos para Classificação da Capacidade Produtiva com o Índice de Local Estabelecido a Priori

	Modelo	Tipo de Modelo
(1)	$(Hd-S) = \beta_1 (I-I_i) + \beta_2 (I-I_i)^2 + \epsilon$	Restrito
(2)	$Hd = S (1 - \beta_1 e^{\beta_2 I_i} + \beta_1 e^{\beta_2 I}) + \epsilon$	Restrito
(3)	$Hd = S (1 - e^{\beta_1 I_i})^{\beta_3} (1 - e^{\beta_2 I})^{\beta_3} + \epsilon$	Restrito
(4)	$Hd = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 S + \beta_3 IS + \beta_4 I^2 + \epsilon$	Restrito
(5)	$\ln (Hd) = \beta_0 + \beta_1 / I + \beta_2 S + \beta_3 (S/I) + \epsilon$	Irrestrito
(6)	$Hd = S(\beta_0 + \beta_1 e^{\beta_2 I}) + \epsilon$	Irrestrito
(7)	$Hd = \beta_1 S(1 - e^{\beta_2 I})^{\beta_3} + \epsilon$	Irrestrito

1/ Hd = altura dominante; S = índice de local definido a priori; β_i , com $i = 0, 1, 2, 3$ = parâmetros; I = idade; I_i = idade índice; ϵ = erro aleatório.

derivada, e seus coeficientes estabelecidos a partir de estimativas de altura calculadas em cada classe de idade. Esse método foi demonstrado, utilizando dados de análises do tronco, sendo que a forma final da equação foi:

$$(S-Hd) = \beta_1 X + b_2 X^2 + c_1 (Hd - 1,3) Z + c_2 (Hd - 1,3) Z^2$$

em que

$$X = I - 50 \text{ ou } \ln(I/50);$$

$$Z = I - 50 \text{ ou } \ln(I/50);$$

$$50 = \text{idade-índice.}$$

O segundo trata-se de um método alternativo, em que a altura dominante no povoamento é expressa em função da idade, sendo o modelo estatístico desenvolvido numa estrutura de variâncias e covariâncias. Segundo LAPPI e BAILEY (1988), o método apresenta algumas vantagens em relação ao tradicional, tais como a possibilidade de predição para árvores individuais e para a média do povoamento. Apesar desta e das outras vantagens mencionadas pelos autores, o uso desse método não tem sido citado na literatura, o que, em parte, pode ser em consequência de a metodologia ter sido proposta recentemente.

3.1.2. Análise da Distribuição dos Diâmetros

Os retornos econômicos pela exploração de multiprodutos são extremamente variáveis e dependem do diâmetro das árvores exploradas (BAUMGRAS e LeDOUX, 1988). Assim, o uso de modelos de otimização nos processos de conversão de árvores em multiprodutos requer o conhecimento

da estrutura dos povoamentos, isto é, da distribuição das árvores por classe de diâmetro. Então, um sistema ideal deve envolver a análise da distribuição dos diâmetros, seguida da recuperação otimizada dos multiprodutos.

As distribuições de árvores por classe de diâmetro podem ser obtidas diretamente a partir de inventários florestais contínuos (IFC), ou por meio de estimação, utilizando modelos de crescimento e produção. No primeiro caso, ela pode ser mais eficiente, já que as informações utilizadas são os valores reais do povoamento, observado um erro de amostragem preestabelecido e assumindo que não existe erro de não-amostragem. A análise a partir de modelos permite, entretanto, simular um maior número de alternativas de manejo.

No primeiro caso, utilizando dados do IFC, uma vez que as medições são feitas antes do corte ou dos desbastes, o processo consiste simplesmente em obter o número médio de árvores por classe de diâmetro, para uma determinada unidade de área (parcela, talhão, quadra ou povoamento). Em um povoamento sujeito a desbastes, onde as árvores a serem desbastadas são identificadas preliminarmente, esse número pode ser obtido para o estoque total a ser desbastado, bem como para o remanescente. Assim, a recuperação dos produtos e a otimização podem ser diagnosticadas, em nível de parcela, talhão e, ou, povoamento, considerando os três estoques citados.

No segundo caso, os modelos de crescimento e produção fundamentados na distribuição dos diâmetros podem também ser utilizados para estimar o número de árvores presente e, ou,

análise de regressão, utilizando, por exemplo, o modelo linear $Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_i + e_i$, $Y_i = \text{Ln}(-\text{Ln}(1-p_i))$ e $X_i = \text{Ln}(D_i)$, em que D_i é o centro da classe de diâmetro i e p é a probabilidade acumulada até a classe de diâmetro i . Neste caso, os parâmetros β e τ da fdp Weibull são obtidos por $\beta = \alpha_1$ e $\tau = \text{Exp}(-\alpha_0/\alpha_1)$.

Após o ajuste da fdp, seus parâmetros devem ser reconstituídos para as situações de interesse, como, por exemplo, para uma idade futura. Isto pode ser feito via regressão, ou com base na teoria dos momentos. No processo via regressão, um sistema de equações pode ser desenvolvido, levando em consideração as principais características do povoamento (CAMPOS e TURNBULL, 1981). Pode-se, ainda, utilizar a técnica de regressão em multiestágio, já que uma variável dependente em uma equação pode ser independente em outra equação.

O uso da técnica de distribuição dos diâmetros em análise de multiprodutos não é tão recente. Em 1968, ela foi utilizada por Bennett e Clutter e, a partir daí, diversos estudos foram feitos. Revendo as mais importantes literaturas entre 1965 e 1991, a função Weibull tem sido sempre destacada pelas suas propriedades.

Os modelos dessa categoria podem ser utilizados em conjunto com equações de razão ("ratio equations"), para estimar a produção de madeira para diferentes itens, segundo suas especificações (AMATEIS et al., 1986). Entretanto, para a estimação de multiprodutos, é melhor substituir as equações de razão por equações de "taper", conforme CLUTTER et al. (1984).

É importante ressaltar que o uso da técnica que considera a distribuição dos diâmetros não se restringe à estimação futura de multiprodutos. Vários estudos relativos aos efeitos de desbastes (intensidade e intervalos) sobre a produção têm sido conduzidos. Dentre eles, destacam-se os de CAMPOS e TURNBULL (1981), MATNEY e SULLIVAN (1982), KNOEBEL et al. (1986), MAGNUSSEN (1986) e ROISE (1986).

3.2. Análise do Perfil de um Tronco

Os estudos relacionados com a avaliação de multiprodutos requerem uma descrição do perfil dos troncos, isto é, o conhecimento do diâmetro ao longo dos mesmos. As estimativas desses diâmetros podem ser obtidas pelo emprego de equações de "taper", o que permite definir a forma dos mesmos (HUSCH et al., 1972).

Os estudos sobre a forma dos troncos foram e têm sido conduzidos por diversos pesquisadores, utilizando diferentes enfoques. Em modelos de otimização de multiprodutos, tem sido freqüente o uso de equações de "taper". O sucesso na aplicação dessas equações é dependente da precisão e da consistência das mesmas. Sempre existem restrições no diâmetro mínimo das toras para os diferentes usos da madeira, daí a necessidade de precisão nas estimativas dos diâmetros ao longo do tronco.

Diversos modelos de "taper" polinomiais têm sido propostos e, ou, utilizados, podendo destacar o de KOZAK et al. (1969), o de DEMAERSCHALK (1976) e, mais recentemente, o modelo proposto por GUIMARÃES e LEITE (1992). Estes modelos

podem ser utilizados para diversos propósitos; CAMPOS et al. (1991), por exemplo, utilizaram o modelo de Demaerschalk em um estudo classificatório de árvores de eucalipto para postes. Em sistemas de conversão de troncos em multiprodutos, os modelos de Kozak e de Demaerschalk têm sido utilizados com maior frequência (BRIGGS, 1977b; SACHET et al., 1989).

A escolha de um modelo de "taper" depende da precisão obtida no ajustamento. Além disto, as equações devem atender a algumas propriedades, isto é:

i) o volume obtido pela integração de partes do tronco deve ser compatível com o volume total obtido a partir da equação de volume que deu origem ao modelo de "taper";

ii) os diâmetros (d_i 's) ao longo do tronco devem ter valores maiores que zero;

iii) a função de d^2 deve ser monotônica não-decrescente, indicando que o volume de uma tora, numa determinada altura, nunca será superior ao volume de outra tora, de igual comprimento, obtida em uma altura inferior a esta;

iv) o diâmetro (d) deve ser igual a zero, para uma altura comercial (h) igual à altura total (H);

v) a equação deve ser facilmente manipulada, para fornecer h em função de qualquer d , bem como o volume de partes especificadas do tronco (GOLDING e MURRAY, 1975).

A compatibilidade de uma equação de "taper" é verificada quando, ao integrar as áreas seccionais ao longo do tronco, obtêm-se estimativas semelhantes às fornecidas

pela equação de volume da qual a equação de "taper" foi derivada (LIMA, 1986). A principal vantagem dessa compatibilidade é a consistência que se verifica entre volume e "taper". Em virtude de suas propriedades, as equações de "taper" compatíveis são mais adequadas para uso em modelos de otimização de multiprodutos (GOLDING e MURRAY 1975).

Uma alternativa para a substituição dos modelos de "taper" consiste em medições diretas do tronco, feitas com sensores eletrônicos ("scanners"). Nesse caso, a excentricidade do tronco pode ser mais bem avaliada, o que não é possível via análise de "taper". Logicamente, a dificuldade aqui está na aquisição e instalação dos sensores.

3.3. Recuperação de Produtos

Os ganhos em receita a partir da exploração de multiprodutos são extremamente variáveis, sendo dependentes do diâmetro médio das árvores exploradas, dos preços dos produtos e da localização do mercado consumidor (BAUMBRAS e LeDOUX, 1988), e para possibilitar a otimização o manejador deve dispor de algum método para quantificar esses multiprodutos.

Definidos a forma do tronco e o tipo de produto a ser recuperado, duas alternativas podem ser utilizadas. A primeira consiste no uso de fatores de conversão, estabelecidos com base na observação dos processos nas fábricas. A segunda consiste no uso de procedimentos

matemáticos, tais como geometria, álgebra, probabilidade e análise de regressão. Obviamente, a análise de regressão pode ser utilizada para estabelecer os fatores de conversão, em função de características das toras.

3.3.1. Aglomerados

No Brasil, os painéis reconstituídos são basicamente representados pelo aglomerado convencional e pela chapa de fibra. Existe, também, um produto intermediário entre os dois, que é o MDF ("Medium Density Fiberboard"), que, por ter um acabamento melhor, é ideal para fabricação de móveis (SUCHEK, 1991). Aqui, a discussão se refere ao termo geral aglomerado.

As chapas de aglomerado podem ser fabricadas a partir da madeira e, também, a partir de resíduos gerados em outros processos de conversão. Numa serraria, por exemplo, determinados resíduos, como os cavacos, podem ser destinados à fabricação de aglomerados. Assim, em um sistema de otimização de multiprodutos, além da conversão da madeira das toras, sempre haverá a necessidade de analisar as contribuições que advêm do uso de resíduos gerados em outros processos.

Mas como analisar a recuperação de aglomerados? Esta recuperação, a partir de toras ou de resíduos, pode ser analisada via fator de conversão. Tal fator é determinado com base na observação dos processos de fabricação dos aglomerados e, segundo SUCHEK (1991), no Brasil, ele está em torno de $1,5 \text{ m}^3$ madeira sem casca para cada m^3 de

aglomerado. Entende-se que tal fator pode ser mais bem determinado via análise de regressão, relacionando-o, por exemplo, com o diâmetro e com o comprimento da tora.

3.3.2. Laminação e Produção de Compensados

O processamento de toras para produção de compensados envolve dois passos fundamentais. O primeiro refere-se à produção das lâminas a partir do desdobramento da tora e o segundo consiste na produção dos compensados a partir das lâminas obtidas. Os compensados podem ser produzidos, utilizando lâminas de diferentes espessuras: assim, uma das primeiras decisões é a definição da espessura de corte a ser utilizada e a segunda decisão é como combinar lâminas de diferentes espessuras para compor o compensado. De fato, existe uma tolerância para essas espessuras, sendo escassos os estudos que visam definir a espessura ótima das lâminas (ATKINS et al., 1984).

A recuperação de compensados também pode ser analisada via regressão (BRIGGS, 1980; FAHEY, 1987; CAHILL et al., 1988), ou a partir de fatores de conversão. Diversos estudos foram conduzidos para estimar a produção de compensados e de resíduos, a partir de árvores de diferentes espécies (BRIGGS, 1977b). Estes estudos foram desenvolvidos nos Estados Unidos, principalmente para Douglas-fir. Estudos mais recentes evidenciaram que o diâmetro da tora é um dos principais fatores que afetam a produção e o custo de processamento de toras (CARINO e FORONDA, 1987).

No Brasil, praticamente não existem estudos consistentes com relação à recuperação de laminados e, ou, compensados, e as principais dificuldades para a condução desses estudos referem-se à indisponibilidade de dados adequados para as análises, somadas às dificuldades computacionais. Segundo SUCHEK (1991), o fator médio de conversão é de $3,5 \text{ m}^3$ de madeira sem casca para cada m^3 de compensado, utilizando toras com diâmetro maior que 30,0 cm.

3.3.3. Madeira Serrada e Resíduos da Serraria

A recuperação de produtos em serrarias é determinada pela interação entre diversos fatores, sendo os mais importantes: o diâmetro, o comprimento, o "taper" e alguma medida de qualidade das toras; a espessura de corte; o número alternativo de produtos; as decisões pessoais; os tipos e as condições de funcionamento e de manutenção dos equipamentos, além dos métodos de processamento. A porcentagem de recuperação tende a ser maior para as toras de maior diâmetro e menor para as de menor diâmetro, principalmente quando a forma é irregular. O comprimento da tora, por sua vez, está relacionado com o comprimento do produto final, devendo ser considerado no processo de modelagem, principalmente quando não houver usos alternativos para os resíduos gerados (STEELE, 1984).

Numa serraria, é importante considerar os diversos produtos sob o princípio do aproveitamento racional da madeira. Assim, qualquer estudo sobre recuperação de produtos deve, sempre que possível, considerar a qualidade

da madeira, os rendimentos operacionais e os usos alternativos para a madeira e para os resíduos gerados. Isto se deve ao fato de que a madeira serrada é a menor parte do volume total gerado numa floresta.

A presença de toras de diversos tipos e dimensões faz com que o operador tenha que tomar decisões pessoais durante o processamento. A fadiga, a desatenção e a falta de conhecimento ou de habilidade levam a piores decisões e, conseqüentemente, a maiores perdas (STEELE, 1984). É importante ressaltar que é difícil para um indivíduo visualizar rapidamente todas as possibilidades de corte. Assim, os sistemas de recuperação e de otimização devem ser desenvolvidos, visando minimizar a necessidade de decisão por parte do operador, além de buscar a melhor solução.

Existem diversas possibilidades para processar uma tora em serraria. As principais foram ilustradas na Figura 2, sendo que a de número 1 é a mais comum no Brasil, onde as toras são inicialmente serradas numa mesma direção, utilizando um conjunto de serras paralelas. Este método é conhecido como "live sawn".

A conversão de toras em serrarias compreende o processamento de sólidos, de seções circulares ou elípticas, em peças de seções retangulares. Historicamente, têm sido utilizadas, nesse processo, regras de classificação de toras e fatores de conversão (BETHEL e BRIGGS, 1977). Embora um dos princípios do rendimento de uma serraria seja a avaliação e o monitoramento contínuo do fator de conversão ou de recuperação (WILLISTON, 1983), o uso desse fator, em estudos de otimização, muitas vezes é limitado, em virtude

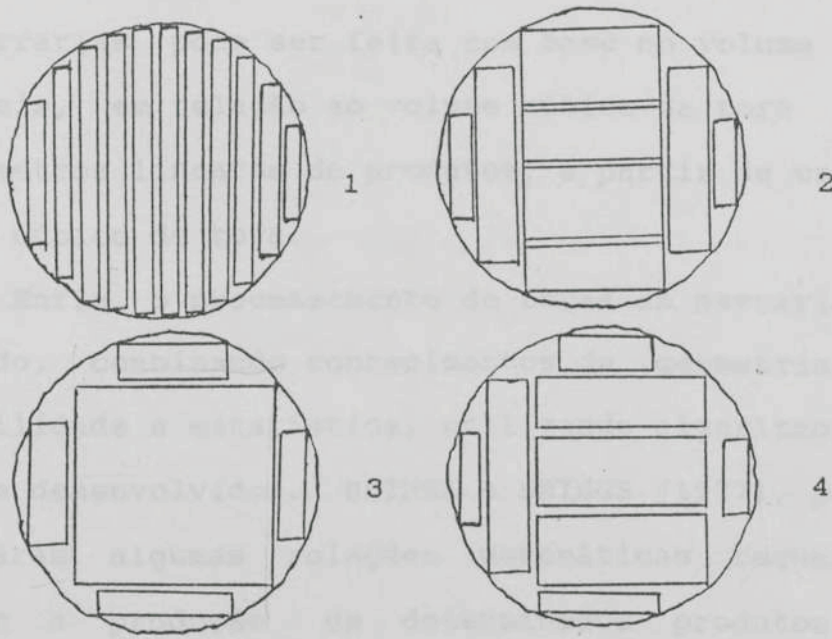


FIGURA 2 - Principais Métodos para Serrar uma Tora.

das variações no sistema de utilização. Exemplos destas variações são: as mudanças nas dimensões das toras, a ocorrência de defeitos internos, a retilinidade do tronco ou das toras e a ineficiência dos equipamentos utilizados. Estas variações implicam a necessidade do emprego de grandes amostras para o estabelecimento dos fatores (PARK e LEMAN, 1983), o que nem sempre é possível.

Outra alternativa para a quantificação de produtos em serraria é o uso da simulação. Neste caso, é possível uma maior flexibilidade na análise e no controle do sistema de utilização. Os sistemas atuais podem ser avaliados, e novos sistemas podem ser projetados. A matemática utilizada nesses modelos é simples e envolve uma combinação de geometria e álgebra (BETHEL e BRIGGS, 1977).

É importante salientar que a avaliação do rendimento em serrarias pode ser feita com base no volume cúbico de materiais, em relação ao volume cúbico da tora processada, ou em metros lineares de produtos, a partir de um conhecido volume cúbico de tora.

Enfim, o processamento de toras em serrarias pode ser modelado, combinando conhecimentos de geometria, álgebra, probabilidade e estatística, utilizando algoritmos especificamente desenvolvidos. BETHEL e BRIGGS (1977), por exemplo, examinaram algumas relações matemáticas requeridas para avaliar a produção de determinados produtos em serraria, sugerindo a programação em computador para obter as respostas; a geometria básica para quantificação dos produtos foi feita, utilizando o teorema de Pitágoras. Outros estudos foram conduzidos, visando quantificar os diferentes produtos de toras, utilizando as análises de regressão, em que as variáveis independentes foram o diâmetro e o comprimento da tora, a espessura de corte e alguma medida da ocorrência de defeitos, sendo que a variável dependente referiu-se ao volume recuperado (BRIGGS, 1980; FAHEY, 1987; CAHILL et al., 1988; HOWARD, 1988).

3.3.4. Madeira como Fonte de Energia

Os submodelos de simulação do potencial energético das florestas são componentes muitas vezes indispensáveis num sistema de utilização, já que a energia é o componente historicamente mais utilizado das florestas. No processo de conversão de florestas em alguma forma de energia, os

aspectos relacionados com as qualidades tecnológicas da madeira, sempre que possível, não devem ser ignorados. Incluem-se aí o peso específico, o poder calorífico e o teor de umidade da madeira. Qualquer sistema que envolva a utilização da madeira para energia deveria considerar essas características (BETHEL, 1977).

A quantificação de alguma forma de energia da madeira também pode ser feita via regressão ou fatores de conversão, considerando as características da madeira mencionadas no item 3.3.3. Nessas formas de energia, incluem-se o carvão vegetal e a energia térmica obtida diretamente da queima da madeira.

3.3.5. Análise de Defeitos Externos e Internos

A qualidade de um subproduto da madeira, principalmente o compensado e a madeira serrada, depende da qualidade das toras processadas. Por sua vez, a qualidade de uma tora está relacionada com a presença de defeitos externos e, ou, internos na mesma. Assim, um aspecto importante na recuperação de produtos é a ocorrência desses defeitos. Daí, advém a pergunta: como amostrar esses defeitos?

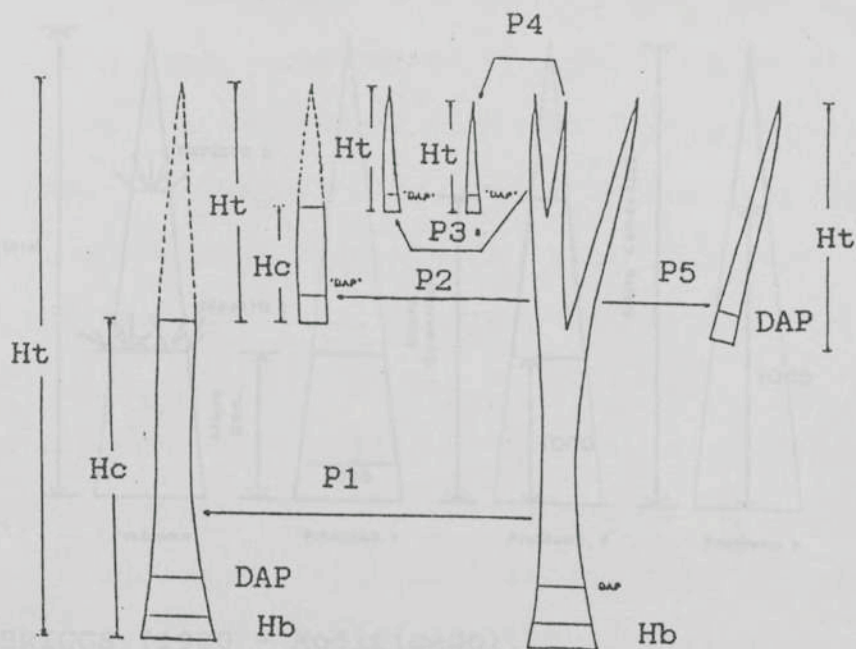
SCHLIETER e HAWKINS (1989) propuseram e utilizaram uma ficha específica para amostragem de defeitos externos em Douglas-fir. Os fatores considerados foram a tortuosidade, a bifurcação, os estragos pelo fogo, as cicatrizes, a concentração de galhos e a inchação anormal, acompanhada da emissão de brotos. A metodologia utilizada consistiu na

identificação do tipo de defeito, da sua dimensão e da sua localização no tronco.

Um outro tipo de ficha foi também proposto por BRIGGS (1980), na coleta e na análise de dados de defeitos. Esta metodologia, embora tenha sido desenvolvida, aproximadamente, dez anos antes do estudo de Schlieter e Hawkins, envolvia um maior número de detalhes.

Conforme demonstrado por BRIGGS (1980), SCHLIETER e por HAWKINS (1989), a redução da produção bruta em virtude da ocorrência de defeitos externos pode ser modelada, utilizando conhecimentos de geometria, uma vez que a produção ou o rendimento está diretamente relacionado com o tipo, a dimensão e a localização do defeito no tronco. Em alguns casos, o problema pode e deve ser decomposto. No caso de uma árvore bifurcada, por exemplo, pode-se visualizá-la como uma série de casos ou problemas separados. A Figura 3 ilustra essa situação, onde o problema de 1 a 5 são analisados separadamente. As árvores com concentração de pequenos galhos ou com outro tipo de defeito localizado podem, também, ser analisadas da mesma forma que as árvores bifurcadas (Figura 4).

Os defeitos externos e, ou, internos podem contribuir significativamente para a redução da produção. Por outro lado, a inclusão da análise de defeitos em modelos de otimização de multiprodutos aumenta um pouco a dimensão do problema e o tempo necessário para o processamento em computador. Assim, considerando que nos casos de plantações artificiais sujeitas a desbastes seletivos, os defeitos externos são minimizados, eles geralmente são



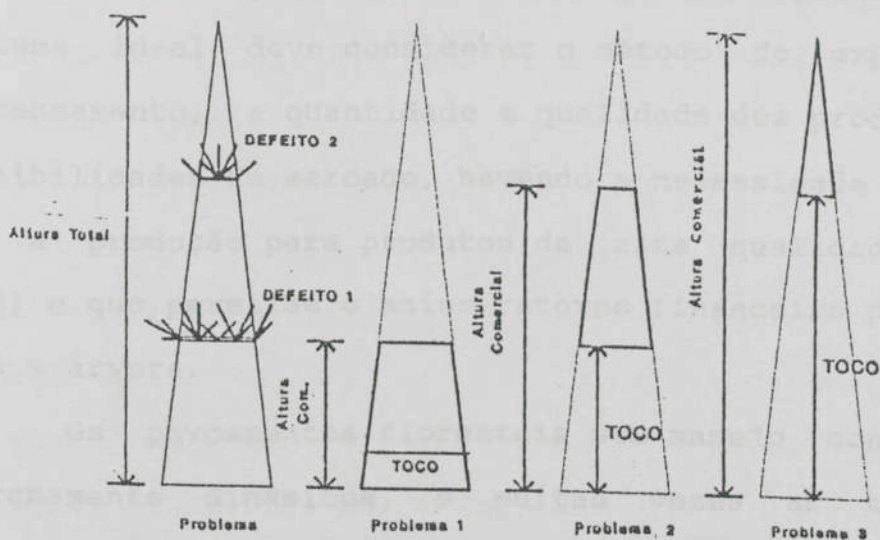
Em que H_t , H_c e H_b são, respectivamente, a altura total, comercial e do toco; P1 = problema 1.

FONTE: BRIGGS (1980 - Modificado).

FIGURA 3 - Decomposição de uma Árvore Trifurcada em Cinco Problemas Separados.

desconsiderados na formulação dos modelos matemáticos. Já os defeitos internos somente poderão ser efetivamente considerados, na prática, se houver disponibilidade de sensores capazes de fornecer, de forma confiável, as informações necessárias.

No Brasil, em povoamentos artificiais, bem-conduzidos e sujeitos a desbastes seletivos, os defeitos externos são reduzidos e, muitas vezes, não há necessidade de considerá-los, enquanto os defeitos internos são pouco comuns.



FONTE: BRIGGS (1980 - Modificado).

FIGURA 4 - Análise de Defeitos Localizados no Tronco

3.3.6. Modelos de Pesquisa Operacional Utilizados em Processos de Conversão de Troncos e Processamento de Toras

Conforme mencionado inicialmente, uma importante função do manejo é identificar as oportunidades comerciais alternativas e os valores de produtos no mercado. As técnicas modernas de manejo indicam a necessidade do conhecimento de tipos, quantidades e valores dos diferentes produtos potenciais.

O manejador necessita de métodos eficientes para predizer o potencial em termos de multiprodutos (SCHLIETER e HAWKINS, 1989). Além disto, as tendências de mercado e as informações sobre a qualidade da madeira não devem ser

ignoradas nos processos de modelagem dos povoamentos. Um sistema ideal deve considerar o método de exploração, o processamento, a quantidade e qualidade dos produtos e as possibilidades de mercado, havendo a necessidade de direcionar a produção para produtos de alta qualidade (PULKKI, 1990) e que permitam o maior retorno financeiro pelo uso de toda a árvore.

Os povoamentos florestais sob manejo constante são extremamente dinâmicos, e muitas vezes as técnicas de pesquisa operacional (PO) utilizadas nos processos de otimização fornecem soluções estáticas. A simples análise do processo de conversão de um tronco em toras evidencia uma situação dinâmica.

Se por um lado, muitos técnicos e pesquisadores que atuam no setor florestal dominam as técnicas de inventário e de modelagem do crescimento e da produção, por outro, o mesmo não ocorre com as técnicas de PO. Entretanto, nos últimos anos, o interesse pelos modelos de programação matemática tem aumentado de forma significativa, em razão da necessidade cada vez maior de utilizar os recursos de forma otimizada.

Foram os militares que deram início à atividade denominada pesquisa operacional, para favorecer seus serviços durante a 2ª Guerra Mundial. Em razão dos sucessos obtidos na definição de estratégias militares, gradualmente, o setor industrial foi se interessando pela mesma.

Em 1947, foi desenvolvido o método simplex, para solução de problemas de programação linear (PL). Outras técnicas foram desenvolvidas e utilizadas a partir do final

próprio nome sugere, a PL envolve relações funcionais lineares, ou seja, o processo consiste em otimizar uma função linear sujeita a um conjunto de equações e, ou, inequações também lineares, chamadas de restrições.

Um problema de PL pode ser representado de forma genérica por:

$$\text{Min ou Max } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$$

$$\text{Sujeito a } a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \geq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \geq b_2$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \geq b_m$$

$$X_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

em que

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i X_i = \text{função-objetivo;}$$

C_i , com $i = 1, 2, \dots, n$ = coeficientes de custo ou de preços;

X_i , com $i = 1, 2, \dots, n$ = variáveis decisórias ou níveis de atividade;

$a_{ij}X_j$ = i -ésima restrição;

a_{ij} , com $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ = coeficientes tecnológicos.

Os problemas de PL devem atender a algumas pressuposições, tais como proporcionalidade, aditividade, divisibilidade e não-negatividade. Atendidas estas condicionantes, a solução dos problemas é usualmente obtida pelo emprego do método Simplex, publicado por George B.

antizig, em 1947 (BAZARAA e JARVIS, 1987), já implementado em diversos Softwares. Quando essas pressuposições não são verificadas, a PL pode proporcionar uma solução imprecisa (RODRIGUEZ, 1987).

O uso dessa técnica em problemas de manejo florestal é razoavelmente antigo. Estudos preliminares, desenvolvidos por BETHEL e HARREL (1957), KOENIGSBERG (1960) e MOODY (1961), direcionaram a atenção para a indústria de compensados. Estes estudos foram introdutórios, uma vez que haviam limitações, principalmente quanto ao emprego de computadores (DONNELLY, 1966).

Com o avanço tecnológico, a PL passou a ser mais utilizada na solução de problemas de recursos escassos; um exemplo foi o trabalho desenvolvido por HUERTA (1971), em que o objetivo principal foi otimizar a combinação dos recursos disponíveis numa determinada empresa produtora de compensados. A hipótese de que a empresa utilizava sua capacidade de maneira deficiente foi comprovada, sendo evidenciado um ganho de até 12,9% nas receitas com o melhor ordenamento das atividades, definido pela solução do modelo de PL desenvolvido.

A primeira técnica de PO utilizada para resolver problemas de conversão de troncos foi a PL (Smith e Harrel, 1961; Forster, 1967; e Forster e Calhahan, 1968, citados por BRIGGS, 1980). A partir de 1972, a programação dinâmica praticamente substituiu a PL. Isto ocorreu, principalmente, em consequência das limitações da PL no processo em discussão. Conforme reportado por BRIGGS (1980), estas limitações são:

i) a PL requer o conhecimento prévio de todos os padrões de processamento de toras possíveis e dos correspondentes valores econômicos. Este conhecimento pode tornar-se difícil, à medida que a multiplicidade de comprimentos de toras e de especificações de produtos aumenta, implicando um número de variáveis decisórias muito grande;

ii) a PL pressupõe perfeita divisibilidade, o que não ocorre no processo de conversão de troncos;

iii) a PL não permite tratar, de forma adequada, o problema do "taper" das árvores;

iv) os defeitos externos e internos não podem ser tratados de maneira adequada;

v) os muitos aspectos do problema são de natureza discreta e não podem ser tratados via PL.

Apesar dessas limitações, a PL tem sido utilizada por alguns pesquisadores, visando analisar o efeito do diâmetro e do comprimento das toras sobre o retorno financeiro, bem como para obter estruturas ótimas de processamento de toras (CARINO e FORONDA, 1987; TAVARES, 1988).

Aplicações da PL na indústria de compensados, segundo ATKINS et al. (1984), foram feitas por diversos autores, iniciando com BETHEL e HARREL (1957), sendo que na maioria dos estudos foram considerados os fatores espécie, qualidade das toras, qualidade dos compensados e equipamentos disponíveis. Outros exemplos são os estudos conduzidos por KOENIGSBERG (1960) e SPELTER (1991). Este último descreve um pacote de programas, denominado VENVAL, que prepara dados de fábricas de compensados para aplicação da PL.

real, a obtenção dos dados, a análise dos dados e a simulação, seguida de conclusão (LEUSCHNER, 1984). Os modelos de simulação, em alguns casos seguidos de otimização, têm sido desenvolvidos com frequência. DEPTA (1984) desenvolveu um sistema flexível de simulação para planejamento florestal, que, embora fosse um modelo de otimização, permitia a introdução de outras técnicas de PO, como a PL. De fato, muitas vezes torna-se necessário combinar duas ou mais técnicas de PO, para atingir os objetivos.

Existem diversas aplicações para a simulação em manejo florestal, tais como a simulação do crescimento, da produção e dos retornos econômicos para um específico regime silvicultural (CAMPBELL et al., 1979; HUGHES e SENDAK, 1985); simulação de alternativas de manejo, envolvendo análise de desbastes, mortalidade e fertilização (HEGYI, 1973; BRUCE e STRUB, 1974); e modelos para análise de diversas alternativas de manejo (BRAND, 1981; MINER e WALTERS, 1984; SHIFLEY, 1987).

No caso da conversão de toras em serrarias, existem diversas aplicações para os modelos de simulação, ou seja, em planejamento, análise, automatização e avaliação da eficiência.

O uso da simulação em manejo, serraria ou indústria de compensados exige o desenvolvimento de programas de computação próprios para cada caso. Exemplos são os programas desenvolvidos por ADKINS et al. (1980), LEWIS (1985) e SPELTER (1990; 1991), cada um com seus objetivos específicos.

A simulação é utilizada para encontrar a melhor, dentre um grupo de alternativas predefinidas. Em alguns casos, esse grupo de alternativas pode ser limitado e, assim, a simulação pode não garantir que a solução encontrada seja realmente a ótima global (BRIGGS, 1980). Apesar desta limitação, muitos pesquisadores a têm utilizado para otimização dos processos de conversão em serrarias, sendo que, quanto maior for o número de padrões alternativos simulados, maior será a chance de encontrar o ótimo global ou a melhor solução.

Um modelo de simulação com o objetivo de maximizar a produção em serrarias, considerando espessuras de corte e dimensões dos produtos finais, foi desenvolvido por CUMMINS e CULBERTSON (1972). Estes autores, analisando as extensões do sistema desenvolvido, consideraram a possibilidade de inclusão de outros comprimentos de toras e de outras estratégias de corte no mesmo. Isso vem reforçar a limitação mencionada anteriormente, de que as soluções via simulação ou via PL podem ser subotimizadas.

Os primeiros estudos relacionados com a recuperação de produtos em serrarias foram feitos pela diagramação de toras e não foram codificados para o uso automatizado. A partir dos anos 70, foram desenvolvidos os primeiros modelos de simulação computadorizados, na maioria dos casos para analisar o efeito de diversos fatores sobre a produção (LEWIS, 1985).

Nos últimos anos, o uso de modelos de simulação em computador tornou-se freqüente, principalmente para comparar os métodos tradicionais de processamento de toras com outras

alternativas. Esses modelos são largamente utilizados para planejamento, manejo, "design", implantação de sistemas automatizados, análise da eficiência das diferentes operações, efeitos de mudanças nos preços dos produtos, demanda e produtividade.

Os modelos de simulação têm sido utilizados, também, na indústria de compensados, onde uma série de decisões inter-relacionadas, envolvendo a produção de toras, o desdobramento e a produção dos compensados, exige um processo de otimização por meio de um computador. Em alguns casos, alguma técnica de programação matemática pode ser utilizada conjuntamente, visando maximizar a receita líquida das fábricas (ATKINS et al., 1984).

Por causa da complexidade do processo de produção de compensados, as mudanças no tipo ou no tamanho das toras, no número de produtos finais e no tipo de equipamento afetam o processo de utilização dos recursos nas fábricas. Assim, programas de computação, com base em simulação, têm sido desenvolvidos para analisar o efeito dessas mudanças, e, neste sentido, um excelente programa foi desenvolvido recentemente por SPELTER (1990).

Os modelos de simulação desenvolvidos nos últimos anos têm evidenciado a necessidade de considerar a conversão do tronco e o processamento das toras num único modelo. Um exemplo é o estudo conduzido por HOWARD (1988), em que, a partir de um modelo que incorpora funções de produção, de preço e de custo, ficou comprovado que existe um efeito significativo do comprimento da tora no custo de processamento e na produtividade em serrarias. Assim, a

decisão de como converter tronco em toras deve estar relacionada com os tipos de produtos finais desejados e vice-versa. A melhor alternativa, em simulação ou em qualquer técnica de programação matemática, parece ser aquela que considera a produção das toras e dos produtos finais num único modelo.

3.3.6.3. Programação Dinâmica

Programação dinâmica (PD) é uma técnica de pesquisa operacional que se aplica particularmente a problemas de decisões inter-relacionadas, isto é, a problemas em que cada decisão transforma a situação atual numa nova situação. Estas decisões podem ser de maximizar ou de minimizar alguma medida, e o valor de uma seqüência de decisões, em geral, é igual à soma dos valores das decisões individuais (DREYFUS e LAN, 1986). É uma técnica de PO, pela qual se procura encontrar a melhor solução entre todas as alternativas possíveis. O termo "melhor solução" é utilizado porque podem existir diversas soluções ótimas, mas apenas uma delas é a melhor (NENHAUSER, 1966). A PD é, então, uma técnica para resolver problemas complexos de decisão, envolvendo múltiplos estágios, podendo envolver variações estocásticas (ROSS, 1983).

Ao contrário da PL, não existe um algoritmo definido para a solução de diferentes problemas de PD; os únicos pontos comuns entre os diversos algoritmos de PD são as relações recursivas ou funções de recorrência e o princípio de otimalidade (BRIGGS, 1980). Esses pontos comuns podem ser

mais bem entendidos a partir de um exemplo descrito a seguir, conforme apresentado por DREYFUS (1986).

Seja a Figura 5, onde se deseja ir do ponto A ao ponto B, com um esforço mínimo. Os números nesta figura indicam os esforços para ir de um para o outro ponto. As setas indicam o caminho ótimo que atende à restrição imposta.

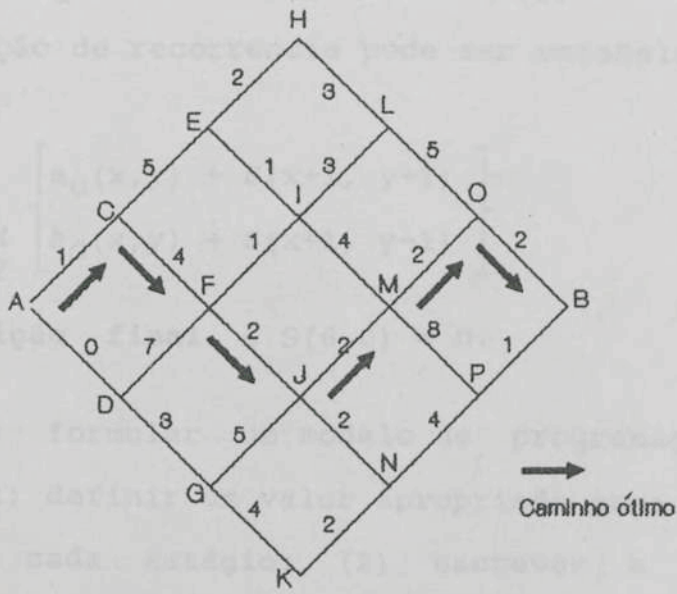


FIGURA 5 - Exemplo de Caminho Ótimo.

O **Princípio de Otimalidade** garante que, qualquer que seja o caminho definido em A (decisão em A), os caminhos remanescentes para B estarão sobre o caminho ótimo para ir de A até B. Em outras palavras, definido um caminho ótimo (A-C-F-J-M-O-B), qualquer subcaminho deste também será ótimo. Por exemplo, para ir de F até B, com um esforço mínimo, o caminho será F-J-M-O-B. Este é o princípio de otimalidade em problemas de PD.

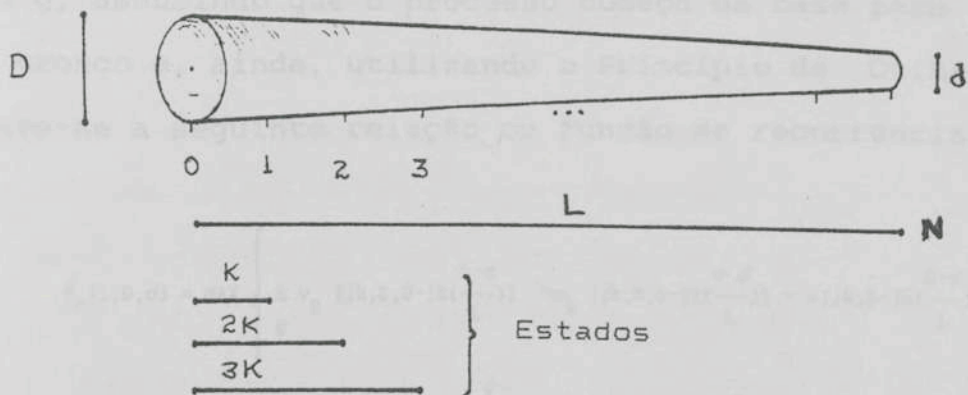
O princípio de otimalidade produz uma fórmula, ou um grupo de fórmulas, relacionando as decisões ótimas em cada ponto, que é denominada de relação ou **função de recorrência**. Por exemplo, considerando novamente a Figura 5 sob o sistema de coordenadas (x,y) , $S(x,y)$ como sendo o valor de um esforço mínimo para ir de um vértice x,y até o vértice final $6,0$ e denotando: $a_u(x,y)$ = esforço entre os vértices (x,y) e $(x+1,y+1)$ e $a_d(x,y)$ = esforço para (x,y) e $(x+1,y-1)$, a seguinte função de recorrência pode ser estabelecida:

$$S(x,y) = \underset{\substack{x \in X \\ y \in Y}}{\text{MIN}} \left[\begin{array}{l} a_u(x,y) + S(x+1, y+1) \\ a_d(x,y) + S(x+1, y-1) \end{array} \right]$$

condição final é $S(6,0) = 0$.

Assim, formular um modelo de programação dinâmica significa: (1) definir um valor apropriado para a tomada de decisão em cada estágio; (2) escrever a relação de recorrência; e (3) definir uma condição de finalização adequada.

Diversos modelos de PD têm sido desenvolvidos, com o propósito de otimização em processos de conversão de troncos e de toras, sendo que o primeiro foi desenvolvido por PNEVMATICOS e MANN (1972). Conforme mencionado por estes autores, a técnica de PD é mais bem entendida a partir de exemplos. Assim, é apresentado, a seguir, um problema teórico definido e modelado por esses autores. Com relação à Figura 6, o problema foi assim definido: "Fornecido um tronco de comprimento L , sendo D o maior diâmetro e d o menor diâmetro, como particionar o tronco em toras, de



FONTE: PNEVMATICOS e MANN (1972).

FIGURA 6 - O Problema Dinâmico da Conversão de Troncos.

maneira que o retorno total, pelo uso do mesmo, seja realmente máximo"?. As demais variáveis dessa figura referem-se a:

$k =$ mínimo comprimento de tora aceitável para manejo, correspondendo ao intervalo de estágio;

$m =$ máximo comprimento de tora aceitável para manejo;

$c(d_1, l) =$ custo para produzir uma tora de diâmetro d_1 , no comprimento l ;

$v_g(d_1, l, d_2) =$ valor de uma tora de comprimento l , maior diâmetro d_1 , menor diâmetro d_2 e graduação g .

Sendo $p_g(l, d_1, d_2)$ a probabilidade de que uma tora de comprimento l , maior diâmetro d_1 e menor diâmetro d_2 seja de

grau g , assumindo que o processo começa da base para o topo do tronco e, ainda, utilizando o Princípio de Otimalidade, obteve-se a seguinte relação ou função de recorrência:

$$f_n(L, D, d) = \text{MAX}_j \left[\sum_g v_g [jk, D, D - jk(\frac{D-d}{L})] * p_g [jk, D, D - jk(\frac{D-d}{L})] - c[jk, D - jk(\frac{D-d}{L})] + f_{n-1}[L - jk(\frac{D-d}{L}), d] \right] \quad (1)$$

em que

$f_i(L, D, d)$ = máximo valor esperado do tronco de comprimento L , maior diâmetro D e menor diâmetro d , com i estágios remanescentes no processo decisório;

j = variável decisória, $1 \leq j \leq \text{MIN}[n, (m/k)]$, sendo que $[m/k]$ estão indicando o maior inteiro contido em m/k .

Pelo emprego da função de recorrência (1), toda decisão tomada no estágio n , $n = 1, \dots, N$, transforma a situação corrente em uma nova situação. Neste exemplo, uma situação refere-se à distribuição das toras a serem produzidas entre o estágio 0 (base do tronco) e o estágio atual (estágio n).

A partir desse estudo, alguns outros modelos foram desenvolvidos e, em cada um, uma inovação foi introduzida (Gluck e Kock, 1973, citados por GEERTS, 1979; 1984; BRIGGS, 1977a; BRIGGS, 1980; FAALAND e BRIGGS, 1984; REINDERS, 1989).

No modelo desenvolvido por Pnevmticos e Mann, conforme reportado por BRIGGS (1980), havia algumas limitações que restringiam o seu uso, isto é: (1) o intervalo de estágio era o menor comprimento de tora aceito para processamento; (2) considerou-se um "taper" constante, assumindo que a árvore tinha a forma de um cone truncado, o que na prática nem sempre ocorre; (3) as características de qualidade foram tratadas probabilisticamente, tendo sido assumido que a probabilidade de uma tora ser de grau g fosse conhecida; (4) a avaliação foi feita apenas com base no comprimento das toras; (5) não foram avaliados os efeitos de variações na altura do toco e no diâmetro da última seção ao longo do tronco. Muitas destas limitações ou restrições foram eliminadas por Briggs (1977a), conforme citado pelo próprio BRIGGS (1980).

O modelo desenvolvido por BRIGGS (1980) já se apresentava bem mais realista. Foram considerados diversos usos subseqüentes para as toras; uma equação de "taper" foi utilizada para descrever o perfil do tronco; a detecção de defeitos foi incluída no modelo; e, ainda, foram consideradas duas situações para determinar o valor das toras: uma com base na relação volume de madeira para determinado produto \times preço do volume de madeira contido na tora e outra em que a receita total era calculada em função dos produtos produzidos a partir da tora, evidenciando o caso de uma empresa verticalizada.

Com relação à conversão de toras em serrarias, alguns modelos foram desenvolvidos, utilizando PD, conforme reportado por FAALAND e BRIGGS (1984). Um exemplo é o modelo

de GEERTS (1984), visando encontrar padrões ótimos de processamento de toras em serrarias.

O modelo desenvolvido por FAALAND e BRIGGS (1984), mencionado anteriormente, considerou a conversão dos troncos em toras e das toras em produtos, sintetizando, de acordo com esses autores, os esforços que haviam sido feitos para tratar os dois problemas de forma singular.

De fato, nota-se um avanço, em termos de sofisticação, nos estudos desenvolvidos a partir de 1972, embora perdure a dificuldade relacionada com a singularidade dos modelos desenvolvidos.

Recentemente, foram desenvolvidos, por REINDERS (1989), um modelo de PD e um sistema denominado IDEAS (Integral Decision Effect Analysis System), para a análise integral do processo de conversão de troncos em toras, e destas em madeira serrada. As principais variáveis componentes do modelo foram definidas por:

Zf_Z = valor da função no estágio Z, se em todos os três níveis (Z, l_Z e $D(Z, \delta_Z)$) prévios estágios relevantes decisões ótimas l_Z foram tomadas. Pode ser considerado como o valor da parte já processada da árvore;

$G_Z(l_Z)$ = máximo valor alcançável após a decisão l_Z . Pode ser interpretado como o valor de um cone de comprimento l_Z e diâmetro no topo $D(Z, \delta_Z)$.

Z = estágio;

$XF(l_Z)_{ZX}$ = valor da função no estágio X, se em todos os prévios estágios relevantes decisões ótimas f_{ZX} foram tomadas. Pode ser considerado como

o valor da parte já processada de uma tora de comprimento l_z ;

$G_{ZX}(l_z, f_{ZX})$ = máximo valor alcançável após a decisão f_{ZX} . Pode ser interpretado como o valor de um "flitch", cortado a uma distância $Z\delta_z$, com comprimento l_z , iniciando na posição X;

$YF(l_z, f_{ZX})_{ZXY}$ = valor da função no estágio Y, se em todos os prévios estágios relevantes decisões ótimas

$(n, r)_{ZXY}$ foram tomadas;

$G_{ZXY}(l_z, f_{ZX}, (n, r)_{ZXY})$ = valor adicionado após a decisão $(n, r)_{ZXY}$ no estágio Y. Pode ser entendido como o valor (V_n) de um produto n;

Y' = estágio Y, que é encontrado após a decisão $(n, r)_{ZXY}$;

$l_x(n)$ e $l_y(n)$ = comprimentos nas direções x e y, respectivamente.

O modelo de programação dinâmica foi desenvolvido em três níveis (Z, X e Y), e, pelo Princípio de Otimalidade, as seguintes relações de recorrência foram estabelecidas:

Nível Z

$$ZF_Z = \max_{l_z \in L_Z} \{G_Z(l_z) + ZF_{Z-1z}\}$$

$$1 \leq Z \leq NZ$$

$$G_Z(l_z) = XF(l_z)_{ZX}^{\theta}$$

Nível X

$$XF(l_z)_{zx} = \text{MAX}_{f_{zx} \in F_{l_x}} \{G_{zx}(l_z, f_{zx}) + (XF(l_z)_{zx-f_{zx}})\}$$

$$X_{zx}^f \leq X \leq X_z^o$$

$$G_{zx}(l_z, f_{zx}) = YF(l_z, f_{zx})_{zxy} u(f_{zx})$$

Nível Y

$$YF(l_z, f_{zx})_{zxy} = \text{MAX}_{(n,r)_{zxy} \in NR} \{G_{zxy}(l_z, f_{zx}, (n,r)_{zxy}) + l_z f_{zx} Y\}$$

$$YF(l_z, f_{zx})_{zxy}'$$

$$Y^d(f_{zx}) \leq Y \leq Y^u(f_{zx})$$

$$Y' = Y - ((1-r) \cdot l_y(n) + r \cdot l_x(n)) / \delta Y$$

$$G_{zxy}(l_z, f_{zx}, (n,r)_{zxy}) = v(n)$$

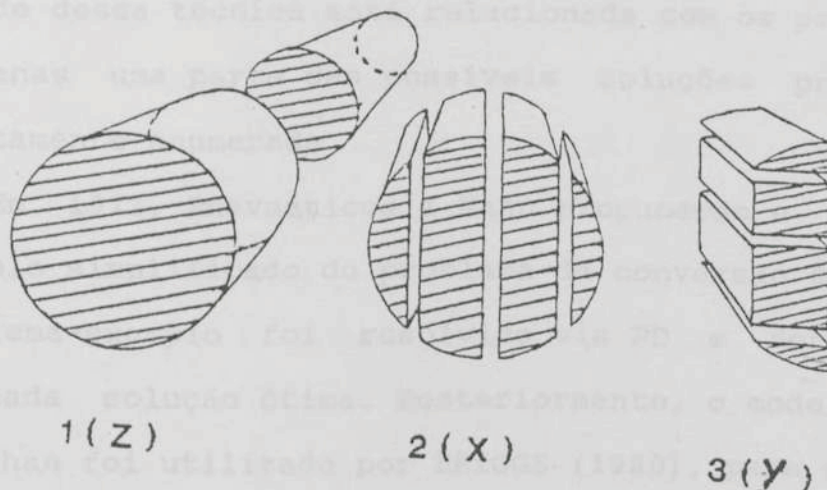
Algumas considerações do próprio Reinders se fazem necessárias, para um melhor entendimento e para a análise do modelo desenvolvido:

"No nível Z, a decisão foi tomada considerando o valor da parte da árvore a ser cortada no estágio Z, somada com o valor da parte já processada";

"No nível X, os estágios são definidos como o número de unidades de intervalo, com numeração iniciando da esquerda para a direita (Figura 7) e a decisão a ser tomada refere-se à largura de corte";

"No nível Y, decide-se por qual item produzir."

Esse sistema desenvolvido por Reinders considera, em um único modelo, a conversão do tronco em toras e o processamento das toras na serraria, constituindo uma das



FONTE: REINDERS (1989).

FIGURA 7 - Conversão do Tronco em Produtos Finais (Lumber products) em Serraria.

melhores contribuições no processo em discussão. Entretanto, para situações específicas do Brasil, fica evidenciado, ainda, a necessidade de um modelo "singular" que considere a produção de outros itens a partir das toras, como, por exemplo, chapas de aglomerados, laminados e compensados, e que este modelo reflita a realidade brasileira e possa ser utilizado em diferentes situações.

3.3.6.4. Métodos de Separação e Avaliação (Branch and Bound)

Pela sigla BBM, é definida uma técnica proposta por Ramalinghan (1976), citado por BRIGGS (1980), considerada como uma alternativa para a PD, que consiste em um sistema enumerativo para solução de problemas de otimização. A

utilidade dessa técnica está relacionada com os problemas em que apenas uma parte das possíveis soluções precisa ser explicitamente enumerada.

Em 1972, Pnevmaticos e Mann propuseram e resolveram um exemplo simplificado do problema da conversão de troncos. O problema-exemplo foi resolvido via PD e forneceu uma determinada solução ótima. Posteriormente, o modelo BBM de Ramalinghan foi utilizado por BRIGGS (1980), para resolver o mesmo problema definido por PNEVMATICOS e MANN (1972), fornecendo resultado idêntico àquele obtido via PD. Apesar desta coincidência, esta idéia não pode ser generalizada, pois, conforme reportado pelo próprio Briggs, podem ocorrer situações em que a solução ótima não é nem mesmo encontrada via BBM. Isto consiste em uma falha desse método para o problema da conversão de troncos.

O uso dessa técnica para análise e solução de problemas de conversão de troncos e de toras não tem sido citado na literatura, o que provavelmente se deve às falhas citadas por BRIGGS (1980).

3.3.6.5. Resumo

A forma de determinar a solução ótima, ou a melhor solução, depende da função objetivo e das restrições existentes, da natureza e dos números de variáveis envolvidas, das facilidades computacionais e da experiência do pesquisador (NENHAUSER, 1966).

Conforme reportado por BRIGGS (1980), a programação dinâmica é a técnica de pesquisa operacional mais indicada

para o problema de conversão de troncos. Segundo o autor, a natureza discreta de muitos aspectos do problema e o uso de funções descontínuas, além da própria conversão do tronco, que pode ser vista como um processo de decisão em múltiplos estágios, é que levam à escolha da PD.

De modo geral, diversos especialistas têm preferido a PD para analisar o processo de conversão de troncos em multiprodutos. Os fatos mencionados por BRIGGS (1980), muitas vezes, inviabilizam o uso de outras técnicas de PO. No caso da PL, por exemplo, além de algumas pressuposições não serem atendidas, há, ainda, a necessidade de diversos cálculos preliminares para utilizá-la.

A PD tem sido utilizada por diversos pesquisadores, visando a solução de problemas com múltiplos estágios, podendo tratar facilmente da não-linearidade de algumas funções e dos aspectos discretos que ocorrem nos problemas de conversão de troncos (BRIGGS, 1980). Segundo o autor, existem duas desvantagens quanto ao uso da PD: (1) a falta de um algoritmo geral para solução dos problemas e (2) as dificuldades computacionais. Estas dificuldades podem ser evidenciadas na literatura consultada, em que cada autor desenvolve seu próprio algoritmo, codificando-o para o uso em computador. Deve ser salientado que elas são relativas e que não existe uma desvantagem real com relação ao uso da técnica nos processos de conversão de troncos e de toras.

Deve ser enfatizado, ainda, que muitos dos modelos desenvolvidos em outros países não retratam totalmente as condições da maioria das empresas brasileiras, geralmente necessitando de adaptações. Muitas vezes, os dados

requeridos não estão disponíveis, inviabilizando ou limitando a alimentação dos modelos para as condições imperantes no Brasil. Além disto, cada problema requer o desenvolvimento de um programa específico, cabendo citar os programas ULTIMODEL (BRIGGS, 1977), TREEVAL (BRIGGS, 1989) e DOSS (GEERTS, 1984), dentre outros.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Fonte de Dados

Visando a análise estrutural dos povoamentos, para posterior aplicação do modelo de programação dinâmica, foram utilizados dados de parcelas permanentes, provenientes de inventário florestal contínuo (IPC) e de cubagem rigorosa, obtidos em plantações artificiais de Pinus oocarpa, sob regime de baixa densidade, estabelecidas em áreas de reserva ambiental, situadas no Município de Jundiaí, em São Paulo, e pertencem à SUDAM S.A.

As informações obtidas foram utilizadas na classificação de classes produtivas dos povoamentos, no ajuste de modelos de crescimento e na análise da distribuição dos diâmetros.

Uma segunda fonte de dados foi também utilizada para a alimentação e teste do modelo de programação dinâmica. Esses dados e informações obtidos no inventário e na cubagem

compreendendo: (1) as tipos e as dimensões dos produtos usuais; (2) os equipamentos disponíveis para os processos de conversão de troncos em múltiplos produtos; (3) as informações sobre os processamentos usuais da madeira, tais como coeficientes de rendimento, produtos e especificações, equipamentos necessários, custos de processamento e de mão-de-obra e sistemas de aplicação; (4) as opções de produtos no mercado;

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.2. Análise estrutural dos povoamentos

4.1. Fonte de Dados

Visando a análise estrutural dos povoamentos, para posterior aplicação do modelo de programação dinâmica, foram utilizados dados de parcelas permanentes, provenientes de inventário florestal contínuo (IFC) e de cubagem rigorosa, obtidos em plantações artificiais de *Pinus oocarpa*, sob regime de um desbaste seletivo bem-definido. Essas plantações estão situadas no Município de Agudos, em São Paulo, e pertencem à DURAFLOSA S.A.

As informações obtidas desses dados foram utilizadas na classificação da capacidade produtiva dos povoamentos, no ajuste de modelos de "taper" e na análise da distribuição dos diâmetros.

Uma segunda fonte de dados foi também utilizada para alimentação e teste do modelo de programação dinâmica. Esses dados e informações, obtidos na indústria e na literatura,

compreenderam: (1) os tipos e as dimensões dos produtos usuais; (2) os equipamentos disponíveis para os processos de conversão de troncos em multiprodutos; (3) as informações sobre os processamentos usuais na empresa, tais como coeficientes de rendimentos, produtos e especificações, equipamentos necessários, custos de processamento e de mão-de-obra e sistema de exploração; (4) os preços dos produtos no mercado;

4.2. Análise Estrutural dos Povoamentos

Conforme mencionado no item 4.1, a análise estrutural dos povoamentos foi baseada em resultados já existentes de inventário florestal contínuo, uma vez que o objetivo principal foi desenvolver um modelo e evidenciar aplicações da PD. Alguns resultados desse inventário encontram-se nos Apêndices A, B, C, D e E. Cabe ressaltar que uma técnica alternativa para estudar a estrutura dos povoamentos seria o emprego de um modelo de crescimento e produção, fundamentado na distribuição dos diâmetros, o qual já alcançou grande aperfeiçoamento (LEITE, 1990).

Neste item, descreve-se a metodologia utilizada para a classificação da capacidade produtiva, a totalização das parcelas e as análise da distribuição dos diâmetros.

4.2.1. Classificação da Capacidade Produtiva

Uma vez que a área de estudo apresentava uma pronunciada variação de solo, principalmente em níveis de

pH, procedeu-se à classificação da capacidade produtiva do local, para garantir consistência na avaliação da produção.

Embora a construção de modelos de crescimento e produção não tenha sido objeto deste estudo, um sistema classificatório da capacidade produtiva foi estabelecido, para permitir comparações de produção no futuro.

Foram comparados dois métodos para classificação da capacidade produtiva, sendo que o primeiro foi o da curva-guia, a partir do ajustamento do modelo de Schumacher, da forma $Hd = \beta_0 \beta_1 (1/I^\alpha) \cdot \epsilon$, em que Hd = altura dominante; I = idade; α e β_i , com $i = 0$ e 1 = parâmetros; ϵ = erro aleatório. Nesse modelo, usualmente, é atribuído o valor 1 para o parâmetro α , sendo o modelo resultante linearizado, por transformação logarítmica, e ajustado pelo método de mínimos quadrados ordinários. Para este estudo, diferentes valores foram atribuídos para α , sendo selecionada a equação com a menor soma de quadrados de resíduos.

No segundo método, os índices de locais de cada parcela foram estabelecidos preliminarmente. Para isto, modelos polinomiais e modelos não-lineares, relacionando Hd com I, foram ajustados por parcela individual. A seguir, pela substituição da idade-índice em cada equação resultante, obteve-se a variável S (índice de local observado) de cada parcela. Conhecido o índice de local preliminar, foi então ajustado o modelo de Richards, na sua forma monomolecular-exponencial, isto é:

$$Hd = \beta_1 S [1 - \exp(-\beta_2 I)]^{\beta_3} + \epsilon \quad (1)$$

A escolha do melhor método para classificação foi baseada na precisão obtida no ajustamento dos modelos, na distribuição dos resíduos percentuais e na consistência entre os feixes de curva construídos e a dispersão das alturas dominantes por idade.

4.2.2. Totalização das Parcelas e Análise da Distribuição dos Diâmetros

Uma vez caracterizados os povoamentos quanto à capacidade produtiva, procedeu-se à totalização das parcelas do inventário contínuo.

Os dados da cubagem rigorosa de 1100 árvores de *Pinus oocarpa* serviram para ajustar os modelos volumétricos. Definidas as equações de volume e os índices de locais, desenvolveu-se um programa de computação para totalizar o volume das parcelas e listar a distribuição das árvores por classe de diâmetro. Nessa listagem, foram identificados a parcela, a idade do povoamento e o número do desbaste realizado. Quanto ao volume, foram listados o volume total (produção bruta), o volume removido e o volume remanescente.

4.3. Análise da Forma dos Troncos

Uma das exigências do modelo de PD desenvolvido neste estudo refere-se ao "taper" dos troncos. Para isto, foi empregado o modelo de Kozak, o qual tem se mostrado eficiente, ao mesmo tempo que atende às propriedades descritas no item 3.1.2. No modelo de programação dinâmica,

que será abordado posteriormente, foi implementado, também, o modelo de Demaerschalk, como opção para analisar o "taper" dos troncos. Os modelos de Kozak e de Demaerschalk são descritos a seguir:

$$Y = 10^{-2\beta_0} \frac{2\beta_1}{D} (H-h)^{2\beta_2} \frac{2\beta_3}{H} + \epsilon \quad (\text{DEMAERSCHALK, 1976})$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (h/H) + \beta_2 (h/H)^2 + \epsilon \quad (\text{KOZAK et al., 1969})$$

em que

$$Y = (d/D)^2;$$

d = diâmetro na altura h, em cm;

D = diâmetro na altura 1,30 m, em cm;

H = altura total, em m;

h = distância do solo até o ponto onde o diâmetro d é medido;

β_i , i = 0, 1, 2 e 3 = parâmetros a serem estimados;

ϵ = erro aleatório, $\hat{U} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

Após o ajuste do modelo de Kozak, a equação resultante foi manipulada algebricamente, visando obter expressões de d, em função de D, H e h, sendo que estas expressões foram utilizadas para estimar os diâmetros em cada seção ao longo do tronco.

4.4. Modelo de Otimização

O modelo de otimização foi desenvolvido, utilizando programação dinâmica. O problema teórico inicial foi assim

formulado: dado um tronco de comprimento L , com diâmetro na base D e no topo d , como convertê-lo em toras e como processá-las, segundo usos potenciais, como em laminação, em aglomerados e em madeira para serraria, de modo que o retorno, econômico ou volumétrico, pela conversão de todo o tronco, seja o máximo possível?

Os seguintes fatores estão relacionados com o modelo desenvolvido: a descrição do tronco, quanto aos diâmetros mínimos e máximos; as especificações de toras, quanto ao uso nas indústrias; a recuperação de produtos; e os custos e as receitas envolvidos no processo.

Neste estudo, a descrição dos perfis dos troncos foi feita pelo emprego da equação de "taper", sendo que as especificações de toras foram aquelas usuais na indústria, embora o modelo tenha sido desenvolvido, prevendo qualquer especificação desejada. Considerações sobre recuperação de produtos e estrutura econômica foram incluídas nos próximos itens.

4.4.1. Critério de Decisão

A melhor solução está sempre condicionada ao critério de decisão adotado. Uma alternativa para o processo em foco seria maximizar o volume recuperado ou minimizar os resíduos gerados. Contudo, considerando que a decisão nas empresas, na maioria das vezes, baseia-se em alguma medida de valor econômico, esta, por sua vez, nem sempre é a melhor alternativa.

Neste estudo, os dois critérios foram utilizados, isto é, com base nas relações entre preço e custo e no volume recuperado. No primeiro caso, foram consideradas, ainda, duas possibilidades: (1) comercialização de toras e (2) comercialização de produtos num sistema integrado de produção.

Importante, também, é a definição de custos variáveis, já que apenas estes influenciam ao processo decisório em foco. Essa definição está relacionada com o local onde as toras são produzidas e com o tipo de transporte utilizado, de forma a condicionar o corte de toras curtas ou longas. No caso do transporte de toras longas, os custos de descascamento e de seccionamento do tronco foram fixos, portanto, não influenciaram ao processo de decisão. O sistema de transporte adotado foi o de toras curtas, admitindo que estas serão produzidas na própria área de corte. Assim, os custos de transporte e de descascamento foram considerados como variáveis.

4.4.2. Formulação do Modelo de Programação Dinâmica

O desenvolvimento de um modelo matemático de PD e de um código computacional, para resolver o problema definido no item 4.4, foi o objetivo principal. Sendo assim, optou-se por descrevê-los no capítulo 5. Vale ressaltar que o modelo matemático de PD foi desenvolvido, considerando o uso da madeira em serraria, laminação e aglomerados, porém, de forma a permitir a introdução de outros itens desejados pelo usuário. Além disto, vale destacar que a análise de

defeitos não foi considerada, tendo sido assumida a hipótese de que os defeitos externos são praticamente eliminados e os internos são incomuns. Além disto, não estava disponível um método eficiente para quantificá-los, nem tampouco sensores que permitissem identificá-los. No entanto, a introdução dessa análise, caso seja desejada, exigirá pequenas adaptações no modelo e no programa desenvolvido.

especificações dos produtos.

4.4.3. Verificação e Avaliação do Modelo

O objetivo do processo de avaliação de um modelo não é o de aceitar ou o de rejeitar o modelo como verdadeiro ou falso, mas de determinar a qualidade das predições (Goodall, 1972, citado por HOLDAWAY e BRAND, 1983). A qualidade das predições de um modelo podem ser analisadas em termos de exatidão e de precisão, sendo que pequenos erros sistemáticos podem levar à alta precisão.

Neste estudo, a estrutura do modelo foi verificada passo a passo. Inicialmente, foi analisada uma única árvore, em cada fase do modelo. A seguir, um grupo de árvores foi avaliado, para verificar a aplicabilidade, a consistência e os possíveis erros de programação, de computação e de lógica.

4.4.4. Estudos de Caso e Pós-Otimização

Alguns estudos de casos foram realizados, utilizando árvores individuais, e um estudo de caso completo foi

conduzido para um dos cinco estratos (distritos) inventariados.

Na análise sensitiva, foram consideradas as variações nas condições econômicas, ou seja, nos preços dos produtos e nos custos de processamento; presença ou ausência de determinado item (produto); mudanças nos fatores de conversão; alterações nas espessuras de corte; e variações nas especificações dos produtos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram apresentados de duas partes. Na primeira parte, são apresentados os resultados relativos à análise estrutural das florestas. Na segunda parte, foram descritos o modelo de alterações estruturais desenvolvido e a sua aplicação aos resultados da análise estrutural. Além disto, foram apresentados os resultados relacionados com outras aplicações do modelo.

5.1. Análise Estrutural

Conforme mencionado anteriormente, a análise estrutural foi realizada com base nos dados da inventariação florestal contida no inventário de classificação de capacidade produtiva das florestas. Nos casos de utilização da distribuição das florestas...

Os dois principais métodos de construção de curvas de densidade de locais, isto é, com base em uma curva-guia e em locais de locais provisórios, proporcionaram resultados satisfatórios, principalmente quanto à precisão das equações obtidas. Entretanto, a segunda alternativa foi escolhida por proporcionar curvas mais consistentes com a distribuição das alturas dominantes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os modelos ajustados por parcela individual, os modelos de Schumacher e Quadrático foram os mais adequados, com coeficientes de determinação corrigidos superiores a 0,9.

Os resultados obtidos foram compostos de duas partes. Na primeira parte, são apresentados os resultados referentes à análise estrutural dos povoamentos. Numa segunda parte, foram descritos o modelo de programação dinâmica desenvolvido e a sua aplicação aos resultados da análise estrutural. Além disto, foram discutidos os aspectos relacionados com outras aplicações em manejo florestal.

5.1. Análise Estrutural

Conforme mencionado no item 4.1, a análise estrutural foi realizada com base em dados oriundos de um inventário florestal contínuo, possibilitando a classificação da capacidade produtiva dos povoamentos, bem como a análise da distribuição dos diâmetros.

5.1.1. Classificação da Capacidade Produtiva

Os dois principais métodos de construção de curvas de índices de locais, isto é, com base em uma curva-guia e em índices de locais provisórios, proporcionaram resultados satisfatórios, principalmente quanto à precisão das equações obtidas. Entretanto, a segunda alternativa foi escolhida, por proporcionar curvas mais consistentes com a distribuição das alturas dominantes, em relação à idade.

Dentre os modelos ajustados por parcela individual, os modelos de Schumacher e quadrático foram sempre os mais precisos, com coeficientes de determinação corrigidos superiores a 92% em todos os casos.

Apenas seis parcelas continham medição na idade-índice escolhida (I_i) igual a 15 anos. Nestes casos, a variável S foi obtida, ao tomar a altura dominante (H_d) nessa idade. Para as demais parcelas, a variável índice de local foi obtida, ao substituir a idade-índice nas equações escolhidas para estimar H_d por parcela individual.

De posse das variáveis H_d , S e idade (I), o modelo de Richards, na sua forma monomolecular-exponencial, foi ajustado a todo o conjunto de dados, resultando na seguinte equação e estatísticas:

$$\widehat{H_d} = 1,6487494(S) [1 - e^{-0,0640764(I)}]^{1,0447483} \quad (1)$$

com $R_{yy}^{\widehat{}} = 0,976$ e $S_{y.x} = 1,239$ m. Estes resultados indicam alta precisão, o que pode ser comprovado nas Figuras 8 e 9. Enquanto a Figura 8 sugere existir uma linha reta em 45°

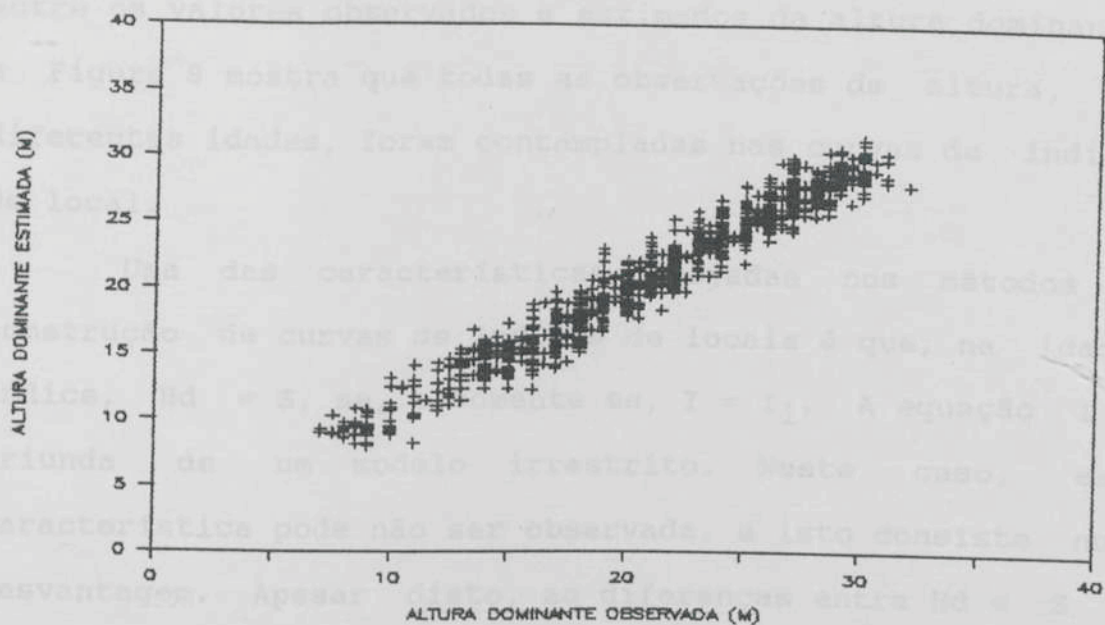


FIGURA 8 - Dispersão das Alturas Dominantes Estimadas em Relação às Alturas Dominantes Observadas.

índice de locais, e, portanto, sem nenhuma significação prática, não influenciando as futuras aplicações das curvas obtidas. As curvas estabelecidas a partir da equação 1 foram representadas na Figura 10.

A partir de transmissões na equação 1, foi possível obter as seguintes curvas de índices de locais em função da

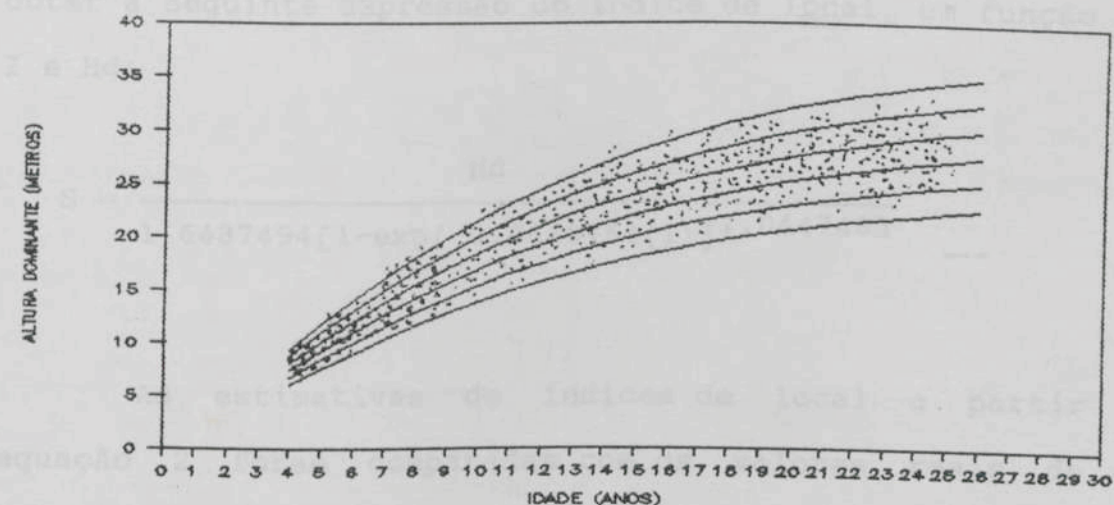


FIGURA 9 - Dispersão das Alturas Dominantes Observadas e das Curvas de Índices de Locais em Relação à Idade.

entre os valores observados e estimados da altura dominante, a Figura 8 mostra que todas as observações de altura, nas diferentes idades, foram contempladas nas curvas de índices de local.

Uma das características desejadas nos métodos de construção de curvas de índices de locais é que, na idade-índice, $H_d = S$, se, e somente se, $I = I_i$. A equação 1 é oriunda de um modelo irrestrito. Neste caso, essa característica pode não ser observada, e isto consiste numa desvantagem. Apesar disto, as diferenças entre H_d e S na idade-índice, geralmente, não excederam 0,3 m, quando se adotou essa segunda metodologia. Neste estudo, as diferenças entre H_d e S foram menores ou iguais a 0,1 m, para todos os índices de locais, e, portanto, sem nenhum significado prático, não influenciando em futuras aplicações das curvas obtidas. As curvas estabelecidas a partir da equação 1 foram representadas na Figura 10.

A partir de transformações na equação 1, foi possível obter a seguinte expressão do índice de local, em função de I e H_d :

$$S = \frac{H_d}{1,6487494[1-\exp(-0,0640764(I))]^{1,0447483}} \quad (2)$$

As estimativas de índices de local a partir da equação 2 foram comparadas com os valores reais de S , definidos *a priori*. Esta comparação também evidenciou não haver tendenciosidade nas estimativas dos índices de locais (Figura 11).

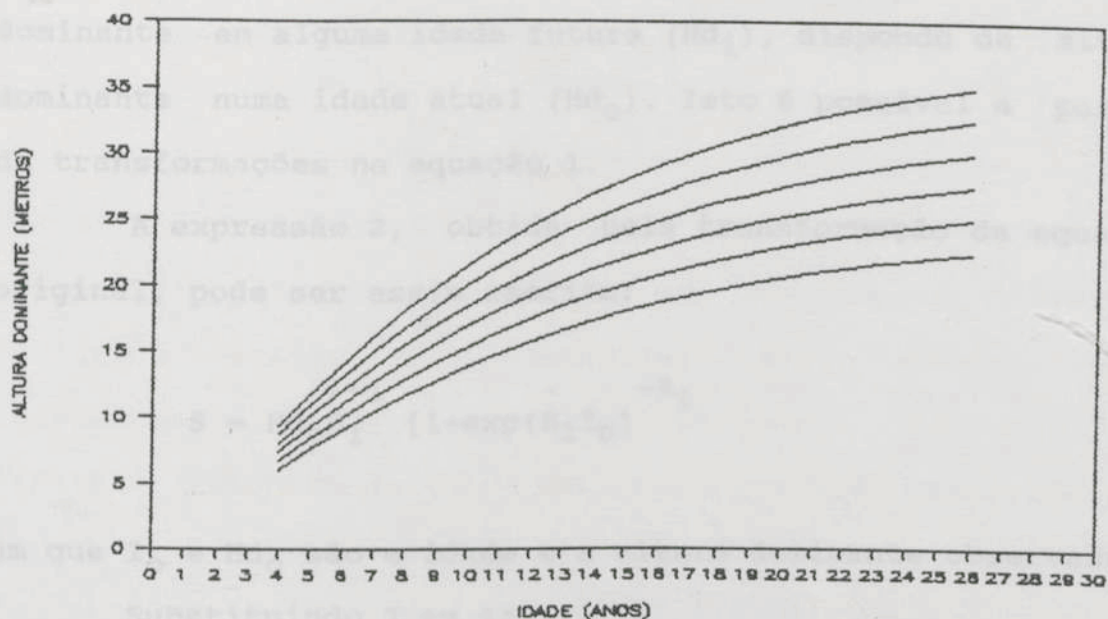


FIGURA 10 - Curvas de Índices de Locais para *Pinus oocarpa* com Idade-Índice de 15 Anos.

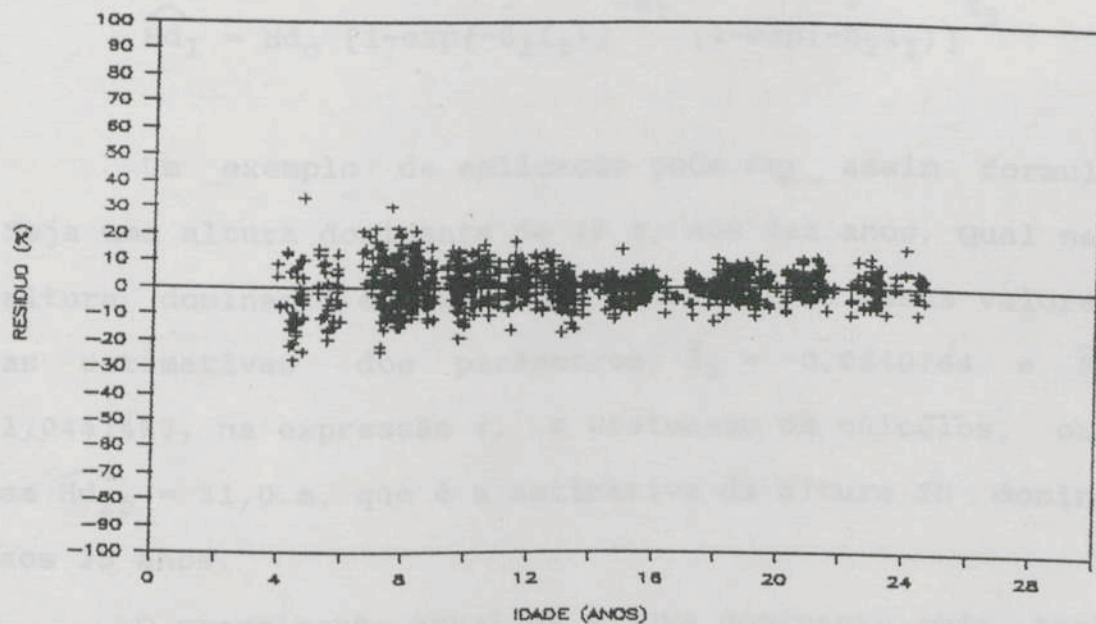


FIGURA 11 - Resíduos Porcentuais Observados para as Estimativas dos Índices de Locais, Obtidos a Partir da Expressão 2.

Em alguns casos, é desejável estimar a altura dominante em alguma idade futura (Hd_i), dispondo da altura dominante numa idade atual (Hd_o). Isto é possível a partir de transformações na equação 1.

A expressão 2, obtida pela transformação da equação original, pode ser assim escrita:

$$S = Hd_o \hat{\beta}_1^{-1} [1 - \exp(\hat{\beta}_2 I_o)]^{-\hat{\beta}_3} \quad (3)$$

em que I_o e Hd_o são a idade e a altura dominante observadas.

Substituindo 3 em 1:

$$\widehat{Hd}_I = \hat{\beta}_1 \frac{Hd_{obs}}{\hat{\beta}_1 [1 - \exp(\hat{\beta}_2 I_o)]^{-\hat{\beta}_3}} [1 - \exp(-\hat{\beta}_2 I_I)]^{\hat{\beta}_3}$$

ou

$$\widehat{Hd}_I = Hd_o [1 - \exp(-\hat{\beta}_2 I_o)]^{-\hat{\beta}_3} [1 - \exp(-\hat{\beta}_2 I_I)]^{\hat{\beta}_3} \quad (4)$$

Um exemplo de aplicação pode ser assim formulado: Seja uma altura dominante de 18 m, aos dez anos. Qual será a altura dominante aos 25 anos? Substituindo esses valores e as estimativas dos parâmetros, $\hat{\beta}_2 = -0,0640764$ e $\hat{\beta}_3 = 1,0447483$, na expressão 4, e efetuando os cálculos, obtém-se $\widehat{Hd}_{25} = 31,0$ m, que é a estimativa da altura 25 dominante aos 25 anos.

O crescimento anual em altura dominante pode, também, ser obtido a partir de transformações na equação 1. Neste caso, a taxa de crescimento anual em Hd será obtida, ao derivar a equação original em relação à idade.

5.1.2. Análise da Distribuição das Árvores e da Produção por Classe de Diâmetro

A análise da distribuição dos diâmetros e da produção por classe de diâmetro, conforme já definido, foi feita para posterior aplicação do modelo de programação dinâmica. Portanto, apenas as distribuições dos diâmetros nos diferentes locais e idades seriam necessárias. Contudo, para permitir futuros estudos de crescimento e produção nos povoamentos utilizados, julgou-se oportuno analisar as tendências de produção em volume, a partir do inventário existente. Então, as parcelas foram totalizadas com relação à freqüência e aos volumes, com e sem casca.

Dentre as 1100 árvores cubadas rigorosamente, 660 foram utilizadas para ajuste dos modelos, enquanto as 440 restantes foram empregadas para teste dos resultados.

Em virtude da grande amplitude de idades disponíveis e do possível efeito da idade na forma das árvores, julgou-se necessária uma criteriosa análise dos resultados obtidos. Assim, inicialmente, o modelo de volume de Schumacher e Hall foi ajustado ao conjunto de 1100 árvores; a seguir, o mesmo modelo foi ajustado às seguintes classes de idade: ≤ 10 ; 10-15; 15-20; e > 20 anos. Embora o modelo tenha sido ajustado na sua forma logarítmica, não foram feitas correções para possíveis discrepâncias logarítmicas. A decisão de não efetuar tais correções foi tomada com base no estudo conduzido por LEITE e REGAZZI(1992), em que ficou evidenciado ser insignificante o efeito dessa correção para casos semelhantes.

Nas equações obtidas para idades superiores a 20 anos, a variável altura total (Ht) foi não-significativa ($\alpha > 0,01$), pelo teste t. Assim, decidiu-se analisar apenas as equações obtidas para idades inferiores ou iguais a 20 anos. O teste de identidade de modelos (GRAYBILL, 1976; REGAZZI, 1993) foi utilizado para verificar a possibilidade de usar uma equação comum para essas idades (Quadros 2 e 3).

QUADRO 2 - Equações Obtidas a Partir do Ajuste do Modelo de Schumacher e Hall, para Idades Menores ou Iguais a 20 Anos

Idade (Anos)	Nº	Equação	\bar{R}^2	$S_{y.x}^*$
≤ 10	1	Y = -9,7900 + 1,8075Ln(D) + 1,0509 Ln(Ht)	0,982	0,104
10,1 - 15	2	Y = -9,7180 + 1,9203Ln(D) + 0,9241 Ln(Ht)	0,989	0,077
15,1 - 20	3	Y = -8,7731 + 2,1651Ln(D) + 0,3902 Ln(Ht)	0,953	0,089
≤ 20	4	Y = -9,9068 + 1,8841Ln(D) + 1,0229 Ln(Ht)	0,992	0,097

* Erro padrão residual; ** Estimador do logaritmo do volume total com casca, em metros cúbicos.

Conclui-se (Quadro 3) que a equação obtida com as estimativas comuns ($I \leq 20$ anos) não deveria ser utilizada em substituição às outras três equações individuais. Assim, um novo teste foi construído para a hipótese $H_0 = \beta_1 = \beta_2$, isto é, as equações 1 e 2 (Quadro 1) são idênticas, e a equação seguinte foi obtida para idades inferiores ou iguais a 15 anos:

QUADRO 3 - Análise de Variância com o Teste da Hipótese de Igualdade das Equações 1, 2 e 3, do Quadro 2 ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$)

C.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Parâmetros (β)	(9)	(2222,0348)		
Parâmetros (θ)	3	2221,7044		
Redução (H_0)	6	0,3304	0,0551	6,10**
Resíduo	510	4,6046	0,0090	

$\frac{1}{\beta_i}$ refere-se ao vetor de parâmetros do modelo i.

** Significativo, a 1 % de probabilidade.

$$\widehat{\text{LnVC}} = -9,8680 + 1,8324 \text{Ln}(D) + 1,0589 \text{Ln}(\text{Ht}) \quad (5)$$

O resultado do teste é apresentado no Quadro 4.

QUADRO 4 - Análise de Variância com o Teste da Hipótese de Igualdade das Equações 1 e 2, do Quadro 2 ($H_0: \beta_1 = \beta_2$)

C.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Parâmetros (β)	(9)	(2208,4764)		
Parâmetros (θ)	3	2208,4188		
Redução (H_0)	6	0,0575	0,0191	2,08 ^{ns}
Resíduo	510	4,0254	0,0092	

$\frac{1}{\beta_i}$ refere-se ao vetor de parâmetros do modelo i.

ns = Não-significativo, a 1% de probabilidade.

Dessa nova análise, verifica-se que a equação obtida com as estimativas comuns ($I \leq 15$ anos) pode ser utilizada como uma estimativa comum das duas equações envolvidas.

A equação de volume para idades entre 15 e 20 anos (equação 3) apresentou alguma tendenciosidade em determinados dados. Portanto, outros modelos foram experimentados, sendo selecionado o modelo $VC = \beta_0 D^{\beta_1} Ht + \epsilon$.

Para idades superiores a 20 anos, apenas o diâmetro foi utilizado como variável independente, tendo sido empregado o modelo $VC = \beta_0 D^{\beta_1} + \epsilon$, uma vez que não houve correlação significativa entre o volume e a altura para as referidas idades. A baixa correlação entre volume e altura pode ser visualizada na Figura 12, onde as maiores alturas referem-se às idades maiores do que 20 anos. Assim, duas novas equações foram obtidas:

$$\widehat{VC} = 0,000315D^{2,04758}Ht; R_{\hat{Y}Y} = 0,966, \\ \text{para } 15,1 < I \leq 20 \quad (6)$$

$$\widehat{VC} = 0,000999D^{2,00811}; r_{\hat{Y}Y} = 0,956, \\ \text{para } I > 20 \text{ anos} \quad (7)$$

Desse modo, as equações 5, 6 e 7 serviram para estimar o volume comercial com casca. Além disto, três equações foram obtidas, também, para estimar o volume sem casca (VS), conforme apresentado a seguir:

$$\widehat{\text{LnVS}} = -11,1579 + 1,95395\text{Ln}(D) + 1,29006\text{Ln}(Ht), I \leq 15 \quad (8)$$

$$\bar{R}^2 = 0,986,$$

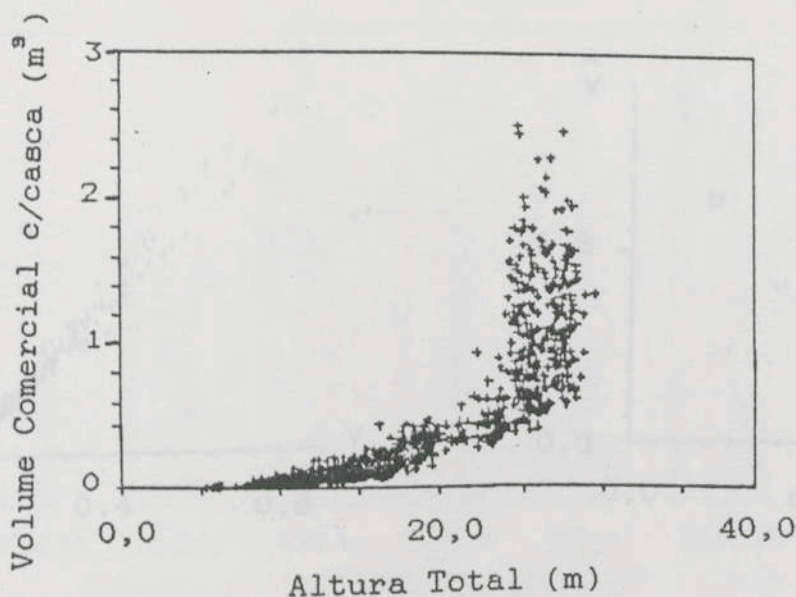


FIGURA 12 - Relação Observada entre o Volume Comercial com Casca e a Altura Total, Considerando Todas as Classes de Idade.

$$\widehat{VS} = 0,0000249D^{2,078767}Ht; R_{\hat{y}y} = 0,955, 15,1 \leq I \leq 20 \quad (9)$$

$$\widehat{VS} = 0,0009128D^{1,99966}; r_{\hat{y}y} = 0,949; I > 20 \text{ anos} \quad (10)$$

As dispersões entre volumes estimados e observados, com e sem casca, em todas as classes de idade, são apresentadas na Figura 13 (a-f).

Estabelecidas as equações de volume, com e sem casca, por classe de idade, um código computacional foi escrito e utilizado para totalizar o volume das parcelas do inventário.

As tendências da produção bruta, bem como dos volumes retirados e remanescentes, com e sem casca, para cada um dos cinco distritos, estão na Figura 14 a 18. De modo geral, houve um aumento na produção até o quinto desbaste,

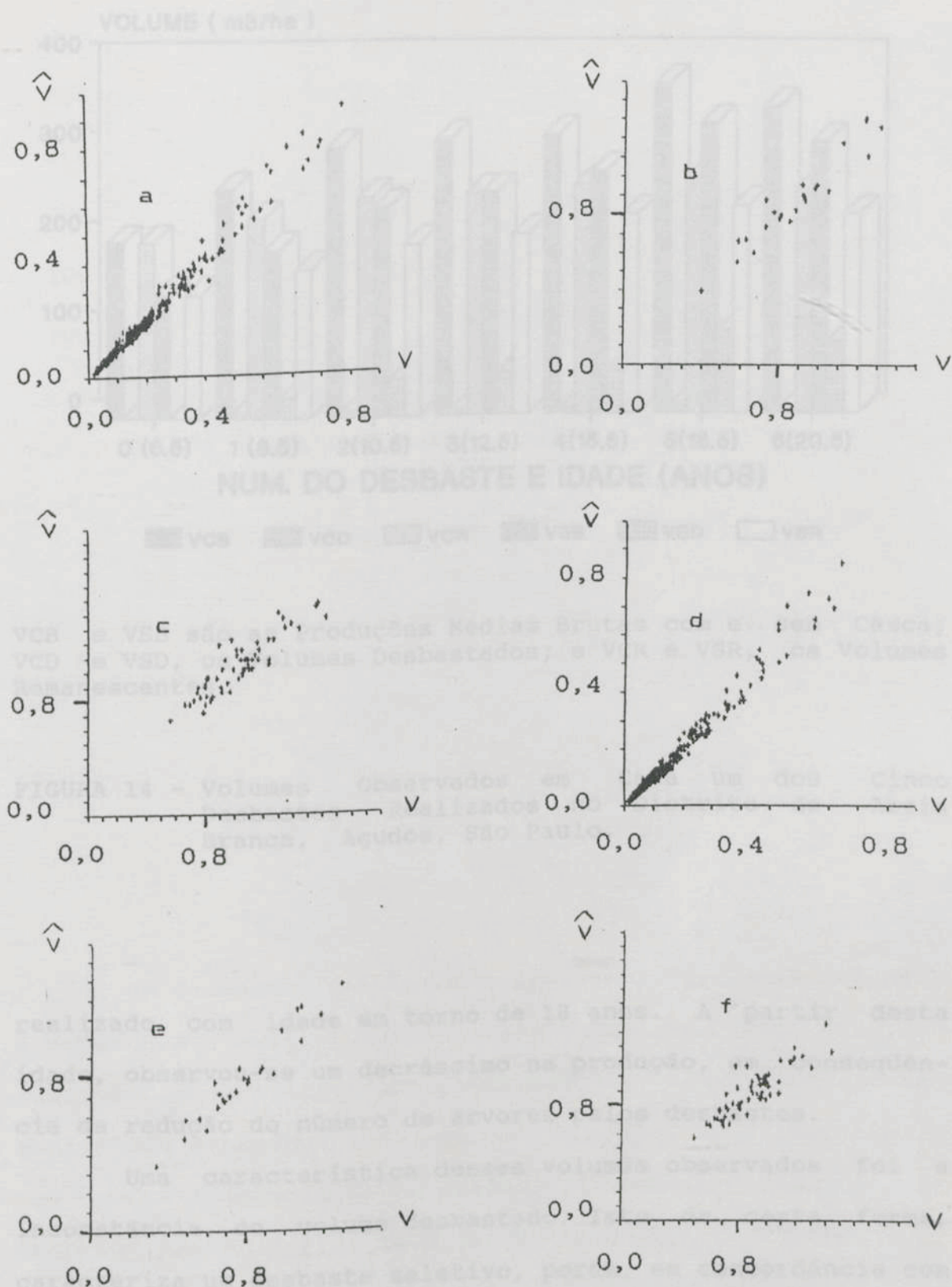
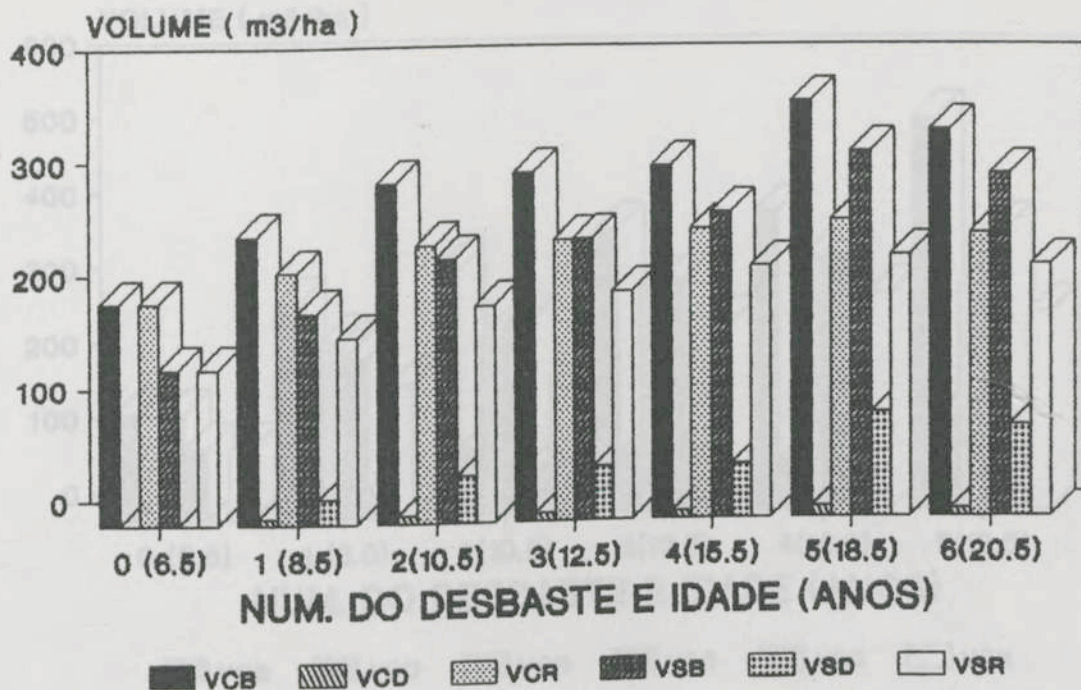


FIGURA 13 - Dispersões entre os Volumes Observados e Estimados pela Equação 5 a 10, em que a, b e c Referem-se aos Volumes com Casca e d, e e f, aos Volumes sem Casca (v).

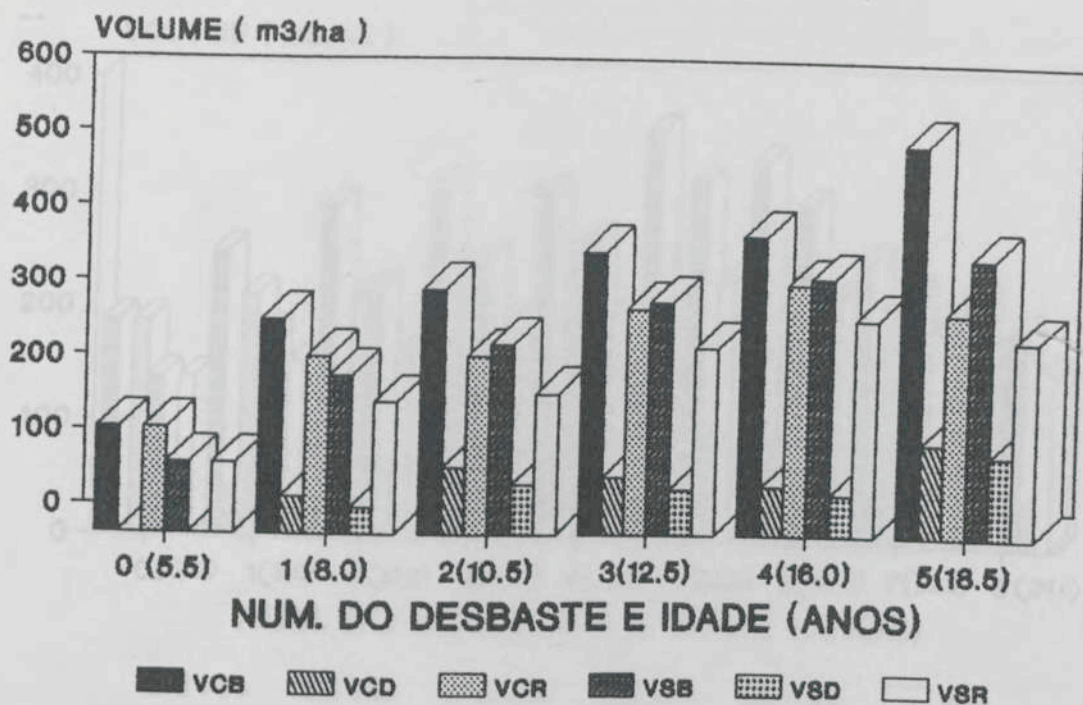


VCB e VSB são as Produções Médias Brutas com e sem Casca; VCD e VSD, os Volumes Desbastados; e VCR e VSR, os Volumes Remanescentes.

FIGURA 14 - Volumes Observados em Cada um dos Cinco Desbastes Realizados no Distrito de Areia Branca, Agudos, São Paulo.

Os desbastes realizados foram realizados para atender a demanda de madeira em torno de 18 anos. A partir desta idade, observou-se um decréscimo na produção, em consequência da redução do número de árvores pelos desbastes.

Uma característica desses volumes observados foi a inconstância do volume desbastado. Isto, de certa forma, caracteriza um desbaste seletivo, porém, em concordância com a demanda de madeira em cada ocasião. Deve ser reportado que a madeira proveniente dos povoamentos existentes nos cinco distritos é utilizada para laminação, serraria e aglomerado.

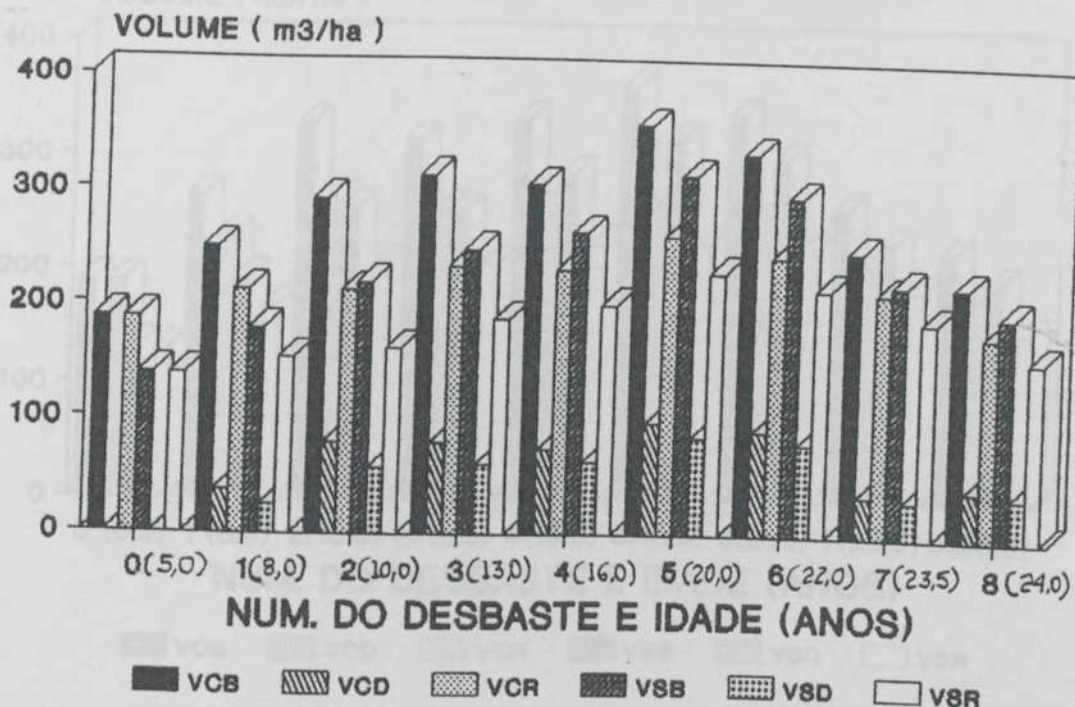


VCB e VSB são as Produções Médias Brutas com e sem Casca; VCD e VSD, os Volumes Desbastados; e VCR e VSR, os Volumes Remanescentes.

FIGURA 15 - Volumes Observados em Cada um dos Cinco Desbastes Realizados no Distrito de Sertãozinho, Agudos, São Paulo.

Os desbastes seletivos foram realizados para atender à demanda por multiprodutos, em cada ocasião. Neste caso, é importante verificar as distribuições diamétrica bruta, desbastada e remanescente, em cada ocasião. Esta importância se deve à exigência de um diâmetro mínimo para cada uso da madeira. As tendências da produção em número de árvores por hectare, por classe de diâmetro, verificadas no Distrito de Sertãozinho, encontram-se nas Figuras 19 (a-c) e 20 (a-c).

O efeito dos desbastes na estrutura dos povoamentos é observado pelo aumento do porte das árvores. Em todos os



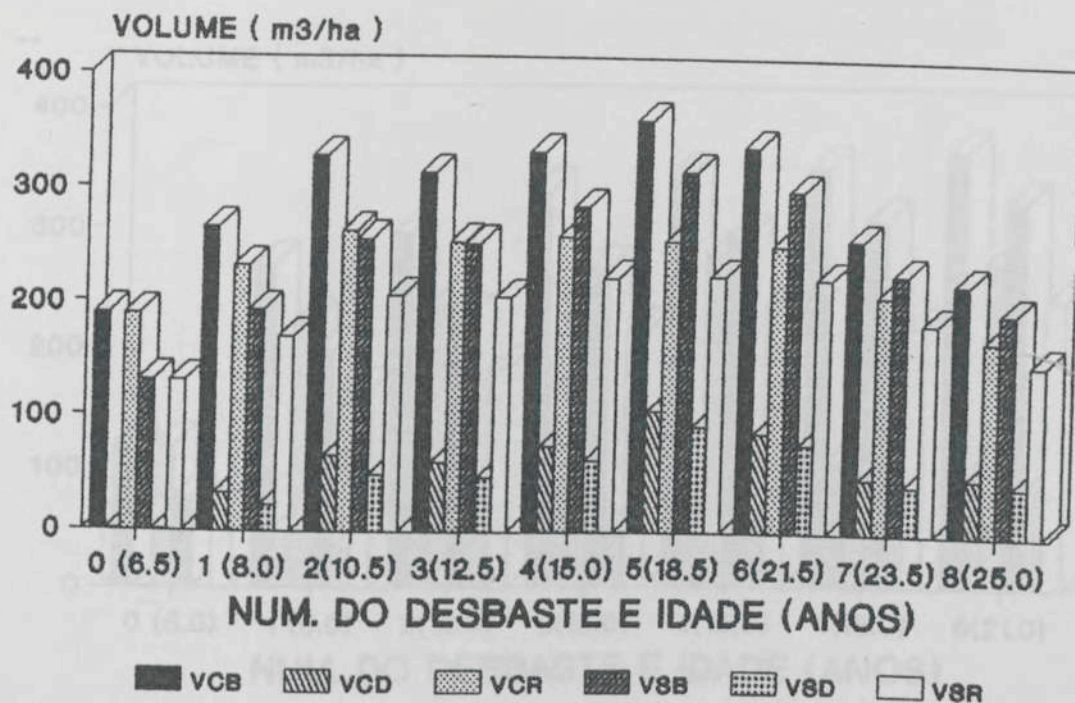
VCB e VSB são as Produções Médias Brutas com e sem Casca; VCD e VSD, os Volumes Desbastados; e VCR e VSR, os Volumes Remanescentes.

FIGURA 16 - Volumes Observados em Cada um dos Cinco Desbastes Realizados no Distrito de Bom Sucesso, Agudos, São Paulo.

distritos, foram desbastadas árvores com diâmetros que variavam entre um valor mínimo e médio, observados em cada ocasião, caracterizando um sistema de desbastes seletivo.

Figuras semelhantes a 19 e 20, elaboradas para o Distrito de Sertãozinho, foram também organizadas para os outros quatro distritos, sendo incluídas nos Apêndices A, B, C e D.

Nas próximas seções, os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20 serão utilizados para aplicação do modelo de PD.

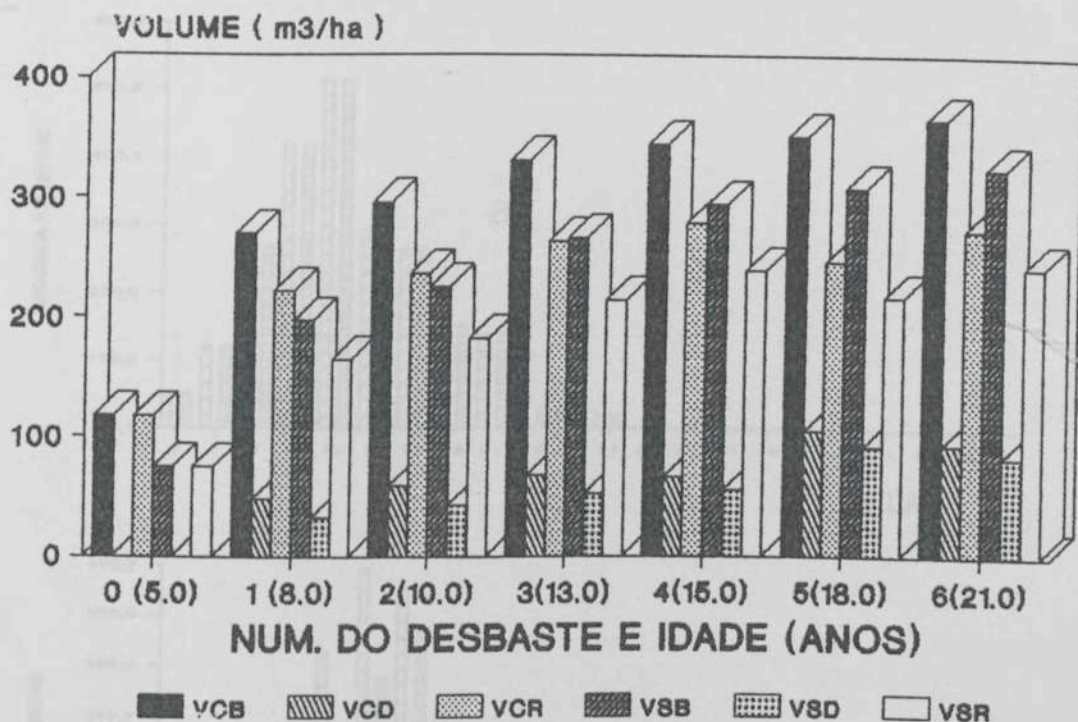


VCB e VSB são Produções Médias Brutas com e sem Casca; VCD e VSD, os Volumes Desbastados; e VCR e VSR, os Volumes Remanescentes.

FIGURA 17 - Volumes Observados em Cada um dos Cinco Desbastes Realizados no Distrito de Monte Alegre, Agudos, São Paulo.

5.1.3. Análise da Forma dos Troncos

Variações na forma dos troncos implicam variações nas relações entre diâmetros e alturas, isto é, duas ou mais árvores com mesmos DAP's e alturas totais podem resultar em diferentes volumes. Assim, quando foram comparadas as equações de volume por classe de idade, indiretamente, comparou-se a forma das árvores. Deste modo, para melhor interpretar a forma dos troncos, por idade, o modelo de "taper" de Kozak foi ajustado aos dados das três classes de idade definidas para as equações volumétricas (Quadro 5).



VCB e VSB são Produções Médias Brutas com e sem Casca; VCD e VSD, os Volumes Desbastados; e VCR e VSR, os Volumes Remanescentes.

FIGURA 18 - Volumes Observados em Cada um dos Cinco Desbastes Realizados no Distrito de Cachoeira dos Macacos, Agudos, São Paulo.

A decisão de adotar as mesmas classes de idade definidas para as equações volumétricas se deve ao fato de o volume de uma árvore individual estar diretamente relacionado com a forma do tronco. Esta decisão foi baseada, também, nas análises gráficas dos resíduos. Maiores dispersões foram observadas quando os dados de todas as idades foram agrupados, o contrário ocorrendo ao separar as observações por classes de idade.

Maiores dispersões entre os diâmetros observados e estimados, com e sem casca, foram verificadas para diâmetros

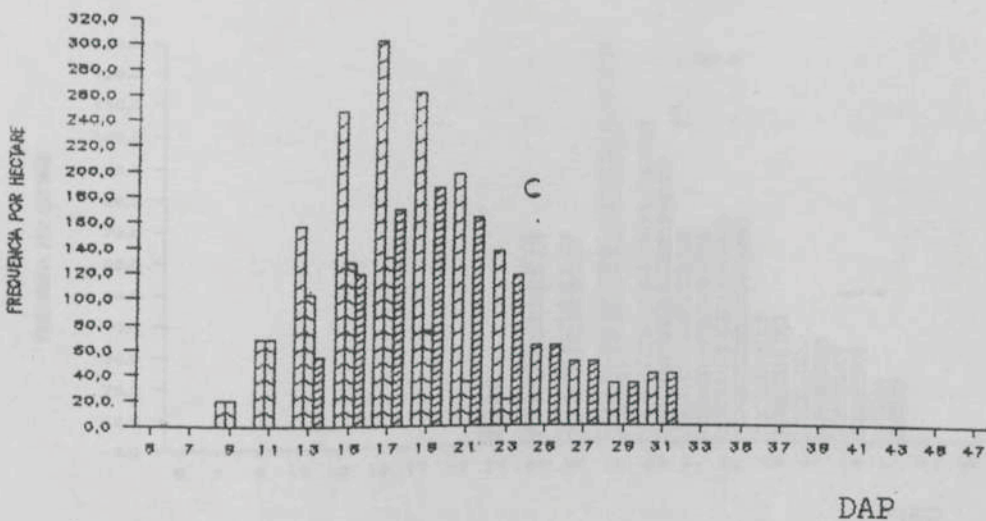
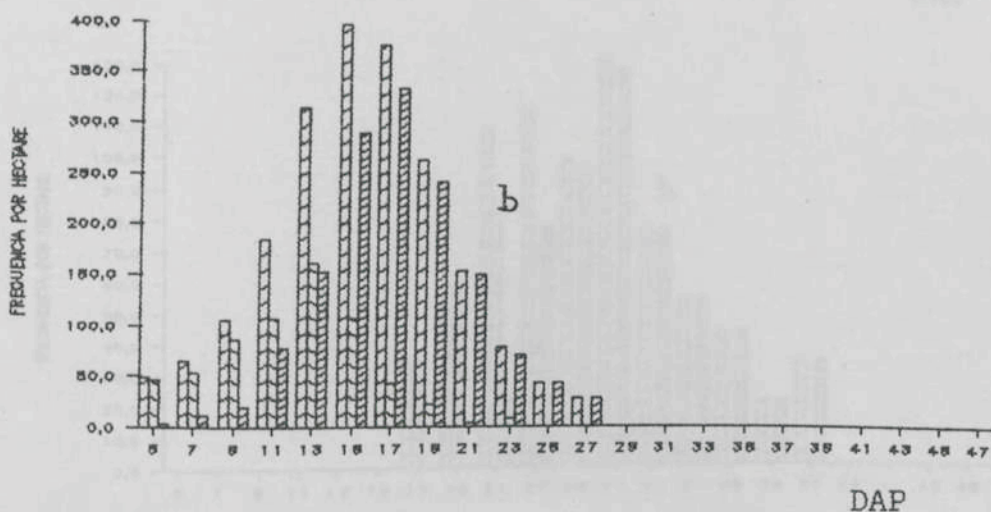
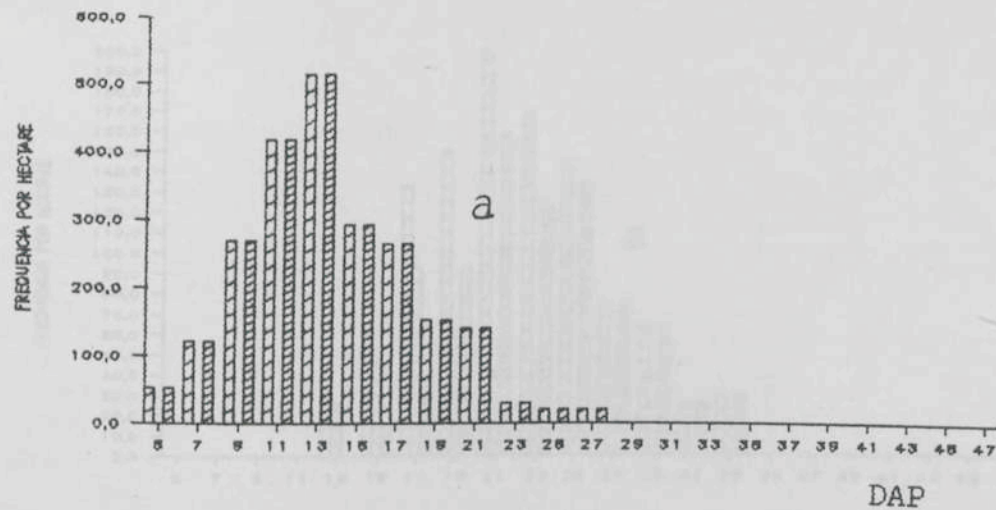


FIGURA 19 - Produção em Número de Árvores por Hectare, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Classe de Diâmetro, Observada na Primeira Ocasão (a), no Primeiro (b) e no Segundo (c) Desbastes, Realizados no Distrito de Sertãozinho, Agudos, São Paulo.

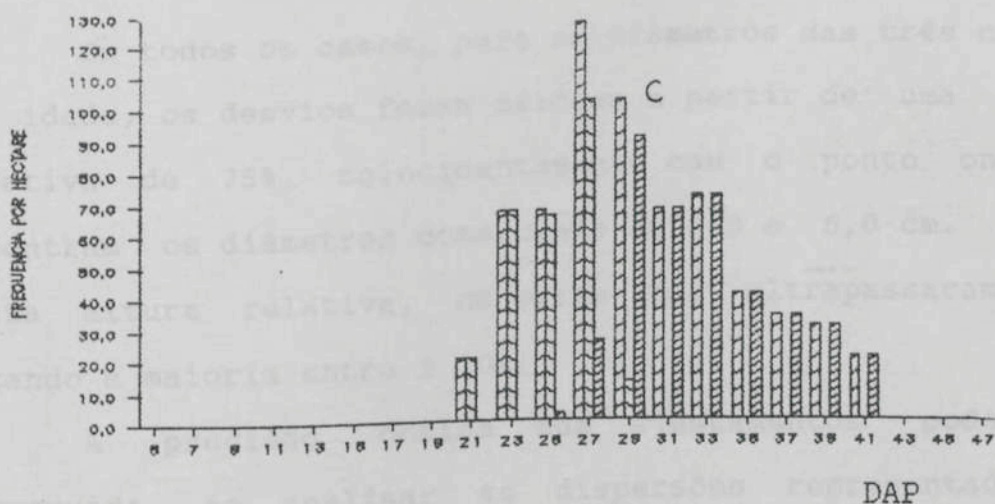
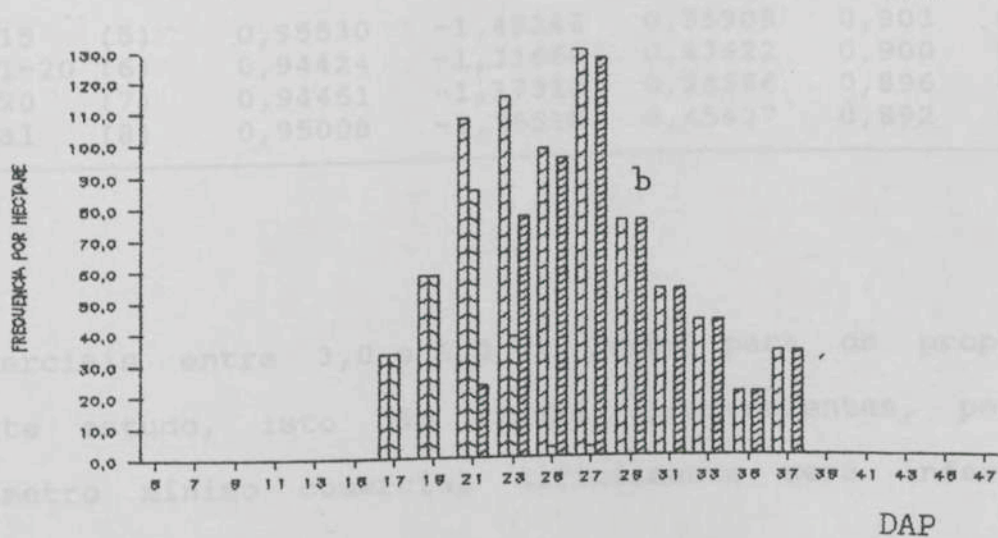
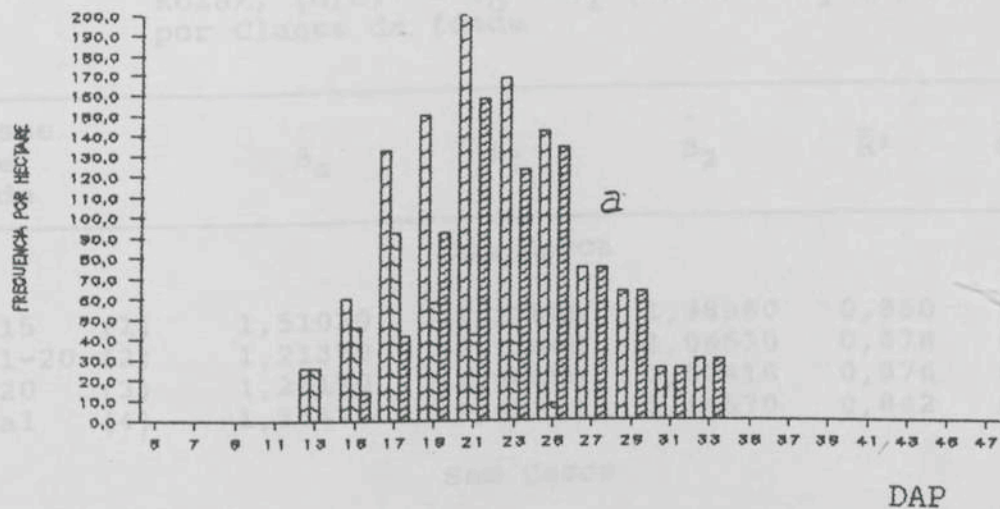


FIGURA 20 - Produção em Número de Árvores por Hectare, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Classe de Diâmetro, Observada no Terceiro (a), Quarto (b) e no Quinto (c) Debates, Realizado no Distrito de Sertãozinho, Agudos, São Paulo.

QUADRO 5 - Equações de "Taper" Obtidas do Modelo de Kozak, $(d/D)^2 = \beta_0 + \beta_1 (h/Ht) + \beta_2 (h/Ht)^2 + \epsilon$, por Classe de Idade

Classe de Idade		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	\bar{R}^2	$S_{y.x}$
Com Casca						
≤ 15	(1)	1,51020	-3,27800	1,98960	0,860	0,1824
15,1-20	(2)	1,21370	-2,13600	1,06530	0,878	0,1242
> 20	(3)	1,20170	-1,94850	0,87416	0,876	0,1237
Geral	(4)	1,35470	-2,62730	1,44670	0,842	0,1648
Sem Casca						
≤ 15	(5)	0,95530	-1,48240	0,55905	0,903	0,0896
15,1-20	(6)	0,94424	-1,31660	0,43622	0,900	0,0865
> 20	(7)	0,94461	-1,17310	0,28566	0,896	0,0880
Geral	(8)	0,95008	-1,35510	0,45627	0,892	0,0922

comerciais entre 3,0 e 6,0 cm. Porém, para os propósitos deste estudo, isto não trouxe inconvenientes, pois o diâmetro mínimo comercial dificilmente será inferior a 6,0 cm.

Em todos os casos, para os diâmetros das três classes de idade, os desvios foram maiores a partir de uma altura relativa de 75%, coincidentemente com o ponto onde se encontram os diâmetros comerciais de 3,0 e 6,0 cm. Abaixo desta altura relativa, os erros não ultrapassaram 15%, ficando a maioria entre $\pm 10\%$.

A precisão obtida nos ajustamentos pode ser comprovada, ao analisar as dispersões representadas na Figura 21 (a-f).

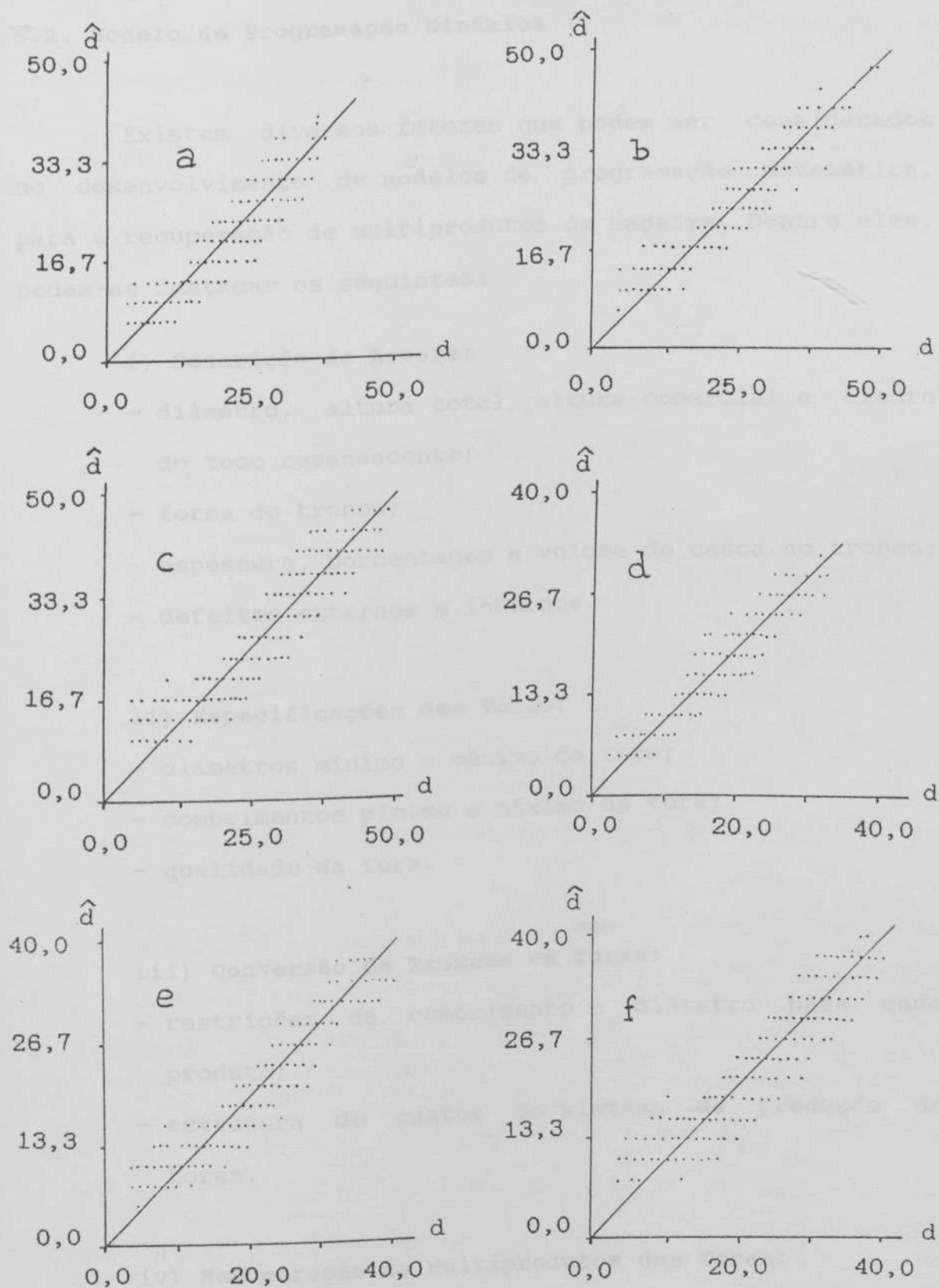


FIGURA 21 - Diâmetros Comerciais Estimados e Observados, com Casca (a, b e c) e sem Casca (d, e e f), para Idades ≤ 15 anos, entre 15 e 20 Anos e Maiores que 20 anos, em cm.

5.2. Modelo de Programação Dinâmica

Existem diversos fatores que podem ser considerados no desenvolvimento de modelos de programação matemática, para a recuperação de multiprodutos da madeira. Dentre eles, podem-se destacar os seguintes:

i) Descrição da Árvore:

- diâmetro, altura total, altura comercial e altura do toco remanescente;
- forma do tronco;
- espessura, porcentagem e volume de casca no tronco;
- defeitos externos e internos.

ii) Especificações das Toras:

- diâmetros mínimo e máximo da tora;
- comprimentos mínimo e máximo da tora;
- qualidade da tora.

iii) Conversão de Troncos em Toras:

- restrições de comprimento e diâmetro para cada produto;
- estrutura de custos do sistema de produção de toras.

iv) Recuperação de Multiprodutos das Toras:

- tipos e especificações dos produtos comercializáveis;
- métodos para quantificação dos produtos;

- estrutura de custos do sistema de processamento de toras;
- preços de mercado para os produtos;
- demanda pelos produtos.

v) **Resíduos do Processamento:**

- tipos de resíduos gerados;
- usos alternativos para os resíduos gerados;
- estrutura de custos e preços dos sistemas de processamento dos resíduos.

vi) **Critérios de Decisão:**

- maximização do volume recuperado;
- minimização dos resíduos gerados;
- maximização do valor dos produtos recuperados;
- minimização dos custos no sistema de conversão.

Alguns dos fatores mencionados no item i a vi, em determinados casos, podem ser desconsiderados; por exemplo, a ocorrência de defeitos e a demanda pelos produtos.

Dentre todos os fatores, os defeitos externos e internos, a qualidade das toras e a demanda pelos produtos não foram considerados neste estudo. É assumido que o número de árvores defeituosas é minimizado com as práticas silviculturais adotadas, principalmente com o sistema de desbastes seletivo. Estudos futuros que envolvam a implementação de modernos sensores eletrônicos poderão viabilizar a inclusão da análise de defeitos internos no

modelo aqui desenvolvido. Neste caso, poucas e simplificadas adaptações serão necessárias no modelo matemático de PD. Algumas explicações para o fato da exclusão da demanda foram incluídas nos próximos itens.

Conforme mencionado no item 5.1, a descrição das árvores foi feita por meio da análise de "taper". Especificações de toras e de produtos foram obtidas via literatura e empresas, da mesma forma que as informações de custos e de preços envolvidas no sistema. Estas informações, bem como os métodos desenvolvidos para quantificar os diferentes produtos das toras, são descritas e analisadas nos próximos itens.

5.2.1. Critério de Decisão

A maioria das empresas sempre se interessa pela otimização de alguma medida de valor econômico, podendo ser a maximização dos lucros ou a minimização dos custos. Entretanto, outros critérios podem ser utilizados, como maximizar a parte recuperada ou minimizar a parte não-utilizada da árvore.

Nos estudos relacionados com a recuperação de multiprodutos das árvores, o critério do máximo retorno econômico (CMRE) é usual. Neste caso, o retorno econômico é dado pela diferença entre a soma das receitas obtidas pela comercialização dos produtos e os custos variáveis de produção, isto é, de conversão de árvores em toras e, ou, de toras em produtos.

O CMRE pode ser utilizado de duas formas distintas. Uma primeira, em que as toras são vendidas numa base sólida, ou seja, diretamente no mercado. Neste caso, o valor final dos produtos é simplesmente o volume de toras multiplicado pelos respectivos preços de venda das mesmas. Então, os custos variáveis envolverão a produção e o transporte das toras até o local onde elas serão comercializadas, e o retorno econômico (RE) é dado pela diferença entre o valor de venda e os custos variáveis.

O segundo caso refere-se às empresas verticalizadas, onde as toras são processadas em sistemas integrados. Neste caso, o valor final dos produtos é dado pela soma dos seus valores individuais, menos a soma dos custos variáveis de produção das toras e dos produtos. Os custos variáveis serão os de produção e transporte das toras e dos produtos.

É importante fazer uma distinção entre custos fixos e custos variáveis. Os fixos geralmente não influem no processo de decisão, porém, considerar um custo que é variável como sendo fixo pode levar a decisões equivocadas e subotimização. Quando ou não um custo é fixo? Irá depender do local onde as toras são produzidas. Os que não mudam com o tipo de tora produzida podem ser considerados como fixos. Por exemplo, se as toras são produzidas na área de corte e, posteriormente, transportadas para a fábrica, o custo de transporte será variável.

Neste estudo, as duas formas, isto é, a comercialização de toras e a empresa verticalizada, foram consideradas. Admitiu-se que as toras são produzidas na área de corte e, neste caso, o custo de transporte deveria ser

considerado como variável. Entretanto, uma vez que as fábricas de aglomerado e de compensado, bem como a serraria, se encontravam em um mesmo módulo industrial, esse custo foi desconsiderado. Outros custos variáveis foram o de descascamento e os de processamento das toras na fábrica. O valor final dos produtos foi obtido pela soma de todos os itens produzidos, multiplicado pelos seus respectivos preços de venda, e o RE pela diferença entre o valor e os custos variáveis de produção.

Embora o modelo tenha sido desenvolvido para maximizar o retorno econômico, ele permite, também, maximizar a parte recuperada do tronco. Esta possibilidade foi exemplificada nos estudos de caso, que constam no item 5.3.

5.2.2. Recuperação de Produtos

Por ser um dos objetivos principais deste estudo o desenvolvimento de um modelo de programação dinâmica que permitisse quantificar, numa base ótima, diversos produtos das árvores, foi necessário estabelecer métodos para recuperação de cada produto.

Foram considerados três tipos de usos para as toras : produtos para serraria, produção de aglomerados e laminação. Como produtos finais, foram considerados chapas de aglomerados, laminados, compensados e madeira serrada, incluindo diversos produtos. Além disto, os resíduos gerados na serraria foram destinados à produção de aglomerados e energia. Estas alternativas constituem exemplos; contudo,

outros usos, como madeira para celulose, para polpa celulósica, para energia e para postes, dentre outros, poderão ser analisados, desde que as informações de custos e de preços estejam disponíveis.

Conforme mencionado, diversos estudos foram e vêm sendo desenvolvidos em outros países, notadamente nos Estados Unidos, sobre a recuperação de multiprodutos a partir de toras de seções circulares ou elípticas. Em muitos casos, tem sido utilizada a análise de regressão, estabelecendo equações que relacionam a porcentagem ou o volume de produtos recuperados com o comprimento e com o diâmetro das toras. O emprego da análise de regressão depende da existência de dados adequados para o ajuste dos modelos, o que não foi verificado neste estudo. Um enfoque alternativo consiste em utilizar conhecimentos de geometria e álgebra, conforme desenvolvido por BRIGGS (1977a). Tais relações podem ser estabelecidas para os processos de laminação, serraria e produção de chapas de aglomerados.

O desenvolvimento de relações muito elaboradas para os processos de laminação e produção de aglomerados não foi objeto deste estudo. Assim, apenas para o caso da conversão de toras em madeira serrada, elas foram estabelecidas. Nos dois primeiros casos, isto é, conversão das toras em laminados e em aglomerados, foram utilizados fatores médios de conversão. Entretanto, no caso de laminação, algumas relações geométricas simples foram exemplificadas, tendo sido incluídas no item 5.2.2.2.

À medida que novas relações matemáticas forem desenvolvidas, ou que novos métodos de recuperação forem

propostos, poucas adaptações serão necessárias para incluí-las no modelo de PD, aqui desenvolvido.

É importante ressaltar que o uso dos fatores de conversão não traz limitação ou inflexibilidade ao modelo. Isto será comprovado nos estudos de caso e na pós-otimização.

5.2.2.1. Recuperação de Chapas de Aglomerados

Conforme mencionado no item 5.2.2, os modelos de regressão poderiam ser utilizados para quantificar chapas de aglomerados a partir de toras. Não havendo disponibilidade de dados para esse propósito, foi utilizado um fator médio de conversão igual a $1,5 \text{ m}^3 \text{ s/c}$ por 1 m^3 de aglomerado.

O uso desse fator também parece implicar inflexibilidade no modelo, contudo, isto não ocorre, pois, qualquer inovação tecnológica que venha alterar o fator será automaticamente incorporada pelo modelo. Além disto, análises sensitivas poderão ser efetuadas, para verificar o efeito de quaisquer alterações do fator sobre o processo de otimização. Assim, mesmo antes de qualquer inovação, como a substituição de equipamentos antigos e deficientes, o manejador saberá quais os possíveis efeitos sobre o sistema atual de utilização da madeira.

5.2.2.2. Recuperação de Laminados

Duas alternativas foram implementadas, no modelo em foco, para quantificar laminados e compensados em cada tora.

A primeira consistiu no uso do fator médio de conversão igual a 3,5 m³, para cada 1 m³ de compensado. A segunda foi com base no emprego de algumas relações geométricas. Neste caso o manejador deverá dispor de informações da espessura da lâmina e do diâmetro (d') da parte cilíndrica (resíduo 2) que fica como resíduo após a tora ser laminada (Figura 22).

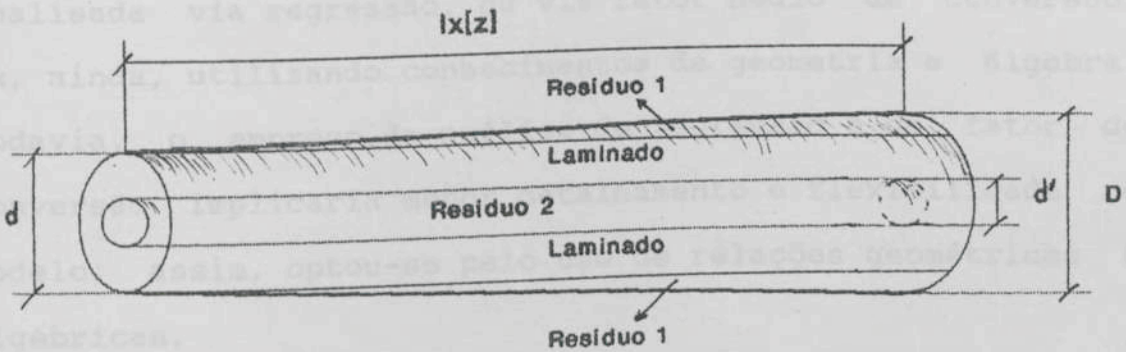


FIGURA 22 - Componentes de uma Tora Laminada.

Com base na Figura 22, tem-se que:

$$V_{TORA} = \pi \cdot lx[z] \cdot (D^2 + d^2) / 40000.0$$

$$V_{RESÍDUO} = V_{CILINDRO \ DE \ DIÂMETRO \ d'}$$

$$RESÍDUO_1 = V_{TORA} - V_{RESÍDUO_2} - V_{LAMINADO}$$

$$RESÍDUO_1 = V_{TORA} - V_{RESÍDUO_2} - V_{LAMINADO}$$

$$V_{LAMINADO} = V_{TORA \ DE \ DIÂMETRO \ d} - V_{RESÍDUO_2}$$

$$V_{TORA \ DE \ DIÂMETRO \ d} = \pi \cdot Lx[Z] \cdot (d^2 + d^2) / 40000$$

Essas duas alternativas foram implementadas no modelo em foco. Entretanto, para os estudos de caso, que serão descritos no item 5.3, adotou-se apenas a primeira alternativa. Esta decisão foi tomada com base na

indisponibilidade de informações precisas sobre espessura das lâminas e sobre o diâmetro d' , indicado na Figura 22.

5.2.2.3. Recuperação de Produtos na Serraria

A recuperação de madeira serrada a partir de toras com seções circulares ou elípticas poderia ter sido analisada via regressão, ou via fator médio de conversão, ou, ainda, utilizando conhecimentos de geometria e álgebra. Todavia, o emprego da análise de regressão e do fator de conversão implicaria menor detalhamento e flexibilidade no modelo; assim, optou-se pelo uso de relações geométricas e algébricas.

Para possibilitar a implementação de um submodelo de programação dinâmica que permitisse otimizar a estrutura de corte em serraria, a geometria básica das toras foi analisada, tendo sido utilizado o teorema de Pitágoras. Admitiu-se apenas a presença de toras com seção circular, embora poucas análises para seção elíptica. Esta decisão foi baseada nas características dos troncos de *Pinus*, que, na maioria dos casos, apresentam seção circular ou aproximadamente circular.

As relações são estabelecidas para a quantificação dos diferentes produtos (Figura 23), em que a expressão $a_i = 2\sqrt{R^2 - (R - stx.kx)^2}$ é utilizada para calcular a face (altura) disponível em qualquer ponto da seção da tora. De posse dessa altura e da espessura do produto, pode-se dimensionar qualquer produto (madeira serrada).

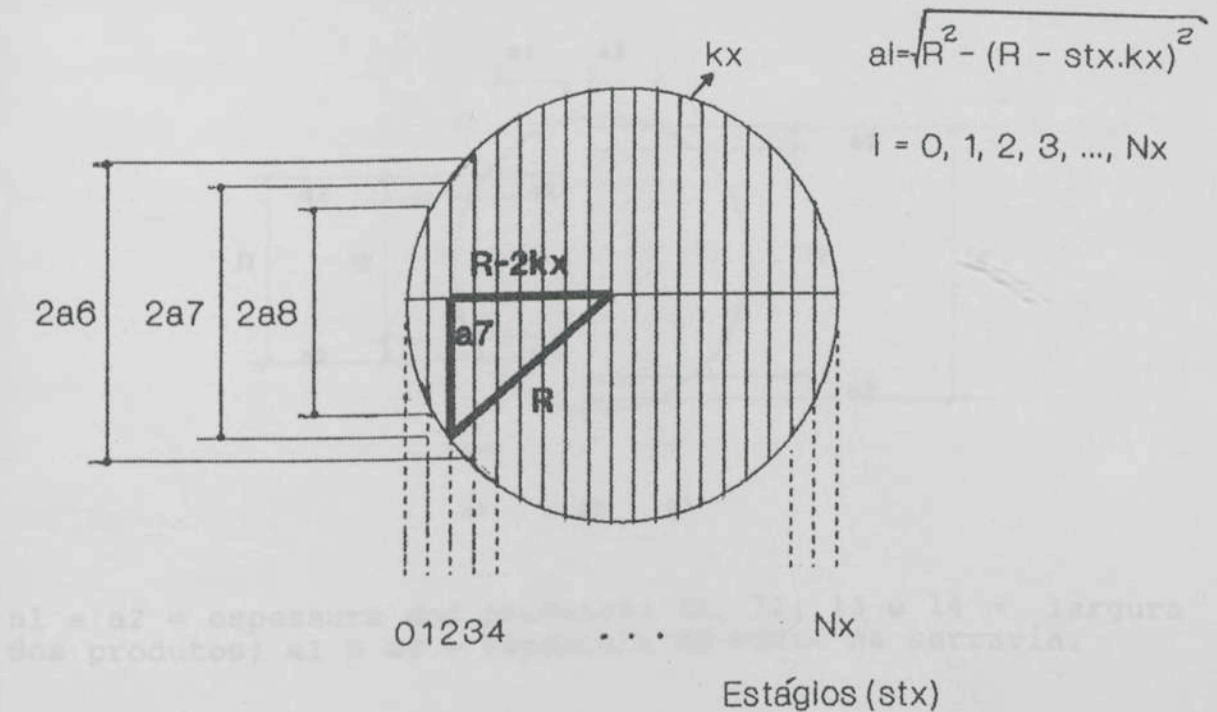


FIGURA 23 - Geometria Básica Utilizada para a Quantificação de Produtos na Serraria.
 $2a_i$ = Face Disponível; R = Raio; stx = Estágios da PD;
 kx = Intervalo de Estágio da PD; N_x = Número Total de Estágios da PD.

FIGURA 23 - Geometria Básica Utilizada para a Quantificação de Produtos na Serraria.

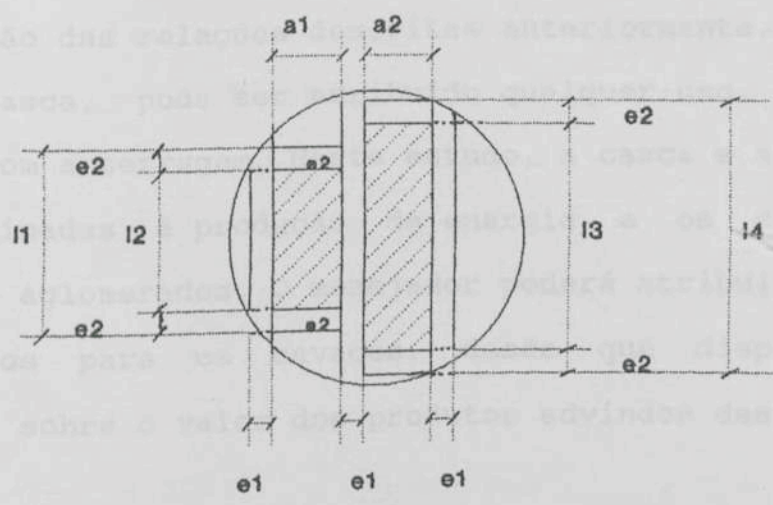
relações:

Volume com Casca = ...

Volume sem Casca = ...

Essas relações, assim estabelecidas, foram utilizadas no modelo de PD, de forma parametrizada, e os detalhes sobre o seu uso serão incluídos no modelo matemático, descrito nos itens subseqüentes.

Os resíduos da serraria foram divididos em três partes: casca, serragem e cavacos. O volume de casca foi obtido pela diferença entre os volumes com e sem casca de cada tora; uma aproximação do volume de serragem poderia ser obtida pela diferença entre a espessura de corte e o volume de cavacos produzidos (Figura 24).



a_1 e a_2 = espessura dos produtos; l_1, l_2, l_3 e l_4 = largura dos produtos; e_1 e e_2 = espessura de corte na serraria.

FIGURA 24 - Quantificação dos Volumes de Casca, Serragem e Sobras em Toras de Seções Circulares.

Na Figura 24, os volumes são obtidos pelas seguintes relações:

$$\text{Volume com Casca} = \pi(dcc_1^2 + dcc_2^2) Lx[z]/40000,0$$

$$\text{Volume sem Casca} = Vcc - \pi(dsc_1^2 + dsc_2^2) Lx[z]/40000,0$$

(VTS)

$$\text{Volume de Serragem} = e_1 Lx[z]\{l_{11} + l_{21}\}/2 +$$

$$e_1 Lx[z]\{l_{12} + l_{22}\}/2 +$$

$$e_1 Lx[z]\{l_{13} + l_{23}\}/2 +$$

$$2a_1e_2 Lx[z]/2$$

$$2a_2e_2 Lx[z]/2.$$

$$\text{Volume de Cavacos} = VTS - VSE - \text{Volume de Produtos.}$$

Entretanto, na versão atual do programa de computação desenvolvido, o usuário precisa estabelecer o porcentual médio dos resíduos não-transformados em produtos e que é

transformado em serragem. Isso se deve a dificuldades de implementação das relações descritas anteriormente.

À casca, pode ser atribuído qualquer uso, o mesmo ocorrendo com a serragem. Neste estudo, a casca e a serragem foram destinadas à produção de energia, e os cavacos à produção de aglomerados. O manejador poderá atribuir, ainda, outros usos para os cavacos, desde que disponha de informações sobre o valor dos produtos advindos desse aproveitamento.

5.2.3. Desenvolvimento do Modelo Matemático

Os modelos matemáticos de PD, divulgados para problemas semelhantes ao focado neste estudo, apresentam uma mesma estrutura geral. As funções de recorrência desenvolvidas por PNEVMATICOS e MANN (1972), FAALAND e BRIGGS (1984), GEERTS (1984) e REINDERS (1989) foram tomadas como base para desenvolver o modelo de PD do presente estudo.

É importante ressaltar que o modelo de PNEVMATICOS e MANN (1972) destinava-se à conversão de troncos em toras; o de GEERTS (1984), desenvolvido em dois níveis, destinava-se à conversão de troncos em madeira serrada; o de FAALAND e BRIGGS (1984) tinha o mesmo objetivo que o de Geerts, porém, foi desenvolvido em um único nível; por último, o modelo de REINDERS (1989), também com o objetivo de converter troncos em madeira serrada, foi desenvolvido em três níveis.

Neste estudo, os modelos citados anteriormente foram utilizados como base para desenvolver um modelo singular,

que permitisse, além da otimização da estrutura de corte em serrarias, analisar conjuntamente a conversão do tronco em toras, e destas em madeira serrada, e, também, em aglomerados e em laminados.

O modelo de programação dinâmica foi desenvolvido em três níveis, de maneira que as saídas do nível 3 compõem as entradas para o nível 2, e as saídas deste são as entradas para o nível 1. No nível 1, é analisada a conversão do tronco em toras, e a variável a ser maximizada é o valor das toras. O valor de uma tora é igual à soma dos valores de todos os produtos obtidos, pelo processamento da mesma, definidos nos níveis 2 e 3. Os níveis 2 e 3 referem-se à conversão de toras na serraria, onde os produtos finais são produzidos na seqüência ilustrada na Figura 25. Assim, no caso de transformação em laminados e em aglomerados, o modelo é composto de um único nível, e no caso da transformação em madeira serrada, o modelo é composto de três níveis.

Esses três níveis serão detalhados, separadamente, a seguir. Apesar dessa análise ou descrição separada, o modelo final é singular. Isto quer dizer que o problema de conversão de troncos em toras, e destas em produtos finais, é tratado com base no aninhamento dos três níveis de PD.

Em síntese, o modelo de PD foi desenvolvido de maneira a permitir a análise das seguintes alternativas: (1) conversão de troncos em toras, para diferentes usos; (2) conversão de troncos em toras e, no caso de transformação em madeira serrada, otimização da estrutura de corte, com base no volume recuperado e no retorno econômico; (3) conversão

de um tronco em toras, e destas em madeira serrada, considerando o retorno econômico; (4) conversão de um tronco em toras, e destas em madeira serrada, considerando a maximização do volume de madeira recuperado; (5) conversão de toras em madeira serrada, considerando o retorno econômico; e (6) conversão de toras em madeira serrada, considerando a maximização do volume de madeira recuperado.

5.2.3.1. Conversão de Troncos em Toras (Nível 1 do Modelo de Programação Dinâmica)

O tronco de uma árvore pode ser dividido em intervalos de comprimentos fixos. Sendo a árvore caracterizada pelo seu diâmetro, na base, e pela sua altura, o diâmetro em qualquer altura comercial pode ser estimado via equação de "taper". Cada unidade de comprimento pode ser um estágio, em que uma decisão deve ser tomada. A decisão refere-se à conversão da parte do tronco entre sua base e o último estágio em análise, segundo uma lista de produtos e especificações. O valor total do tronco será dado pela soma dos valores de cada parte processada do mesmo; assim, o retorno total é obtido ao alcançar uma das extremidades do tronco, iniciando pela outra, avaliando estágio por estágio. Do ponto de vista matemático, isto consiste num problema de decisão em múltiplos estágios.

Então, uma árvore de comprimento total (Ht) pode ser dividida em intervalos regulares de comprimento (kz), ao longo do seu eixo (z). O número total de intervalos (Nt) será dado por: $Nt = Ht/kz$.

Do mesmo modo, o número total de intervalos contidos na parte comercializável do tronco pode ser definido por: $Nz = (Hc-Hb)/kz$, em que Hc é a altura comercial e Hb , a altura do toco remanescente. O número de intervalos contidos na parte comercializável do tronco será Nz , tal que: $Nz = 0, 1, \dots, (Hc-Hb)/kz$.

Os diâmetros ao longo do tronco podem ser considerados como função da distância a partir da base. Sendo estes diâmetros denotados por: $dsc[stz]$, em que stz refere-se a um estágio qualquer no tronco, então: $dsc[stz] = f(stz*kz)$.

Os pontos onde as decisões devem ser tomadas são simbolizados por stz , sendo denominados de estágios do sistema.

As decisões em cada estágio referem-se à tora a ser cortada e ao uso da madeira desta tora. Os retornos econômicos dessas decisões são determinados a partir de uma lista que contém as dimensões dos produtos, seus preços e seus custos de processamento.

Introduzindo esses conceitos mais formalmente, considere as seguintes variáveis e descrições (Figura 26):

D = diâmetro com casca a 1,30 m, em cm;

Ht = altura total da árvore, em m;

Hc = altura comercial da árvore, em m;

Hb = altura da base ou do toco remanescente, em m;

$lz[u,i]$ = comprimento da i -ésima tora, no u -ésimo uso especificado pelo manejo, em m;

ds_u = menor diâmetro aceitável para o uso u , em cm;

dl_u = maior diâmetro aceitável para o uso u , em cm;

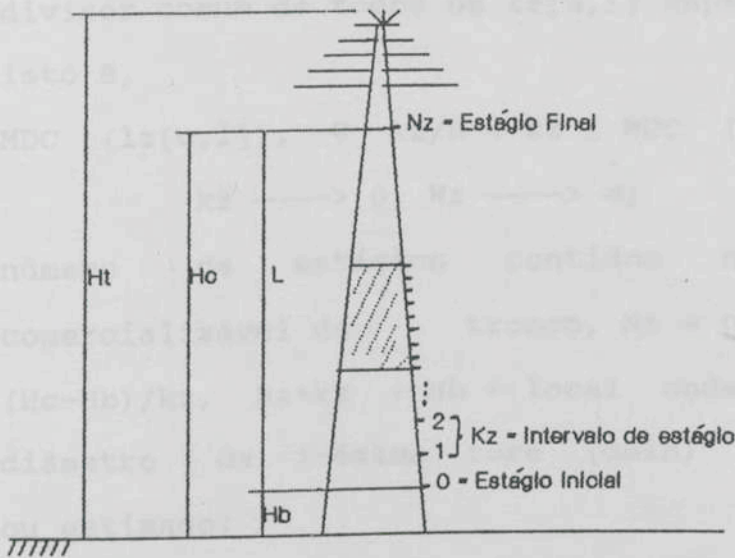


FIGURA 26 - Estrutura Geral do Processo Dinâmico de Conversão do Tronco em Toras, em que: H_t = Altura Total da Árvore, H_c = Altura Comercial; H_b = Altura do Toco Remanescente e L = Comprimento Utilizável.

d_{min_i} = menor diâmetro da i -ésima tora analisada, em cm;

d_{max_i} = maior diâmetro da i -ésima tora analisada, em cm;

$l_{z_l_u}$ = menor comprimento aceitável para o uso u , em m;

$l_{z_s_u}$ = maior comprimento aceitável para o uso u , em m;

l_{zmin} = $\text{MIN} (l_{z[u,i]})$ = comprimento da menor tora $\langle u, i \rangle$ especificada, considerando todos os usos, em m;

l_{zmax} = $\text{MAX} (l_{z[u,i]})$ = comprimento da maior tora $\langle u, i \rangle$ especificada, considerando todos os usos, em m;

k_z = intervalo de comprimento no eixo z , ao longo do tronco, que é o tamanho ou o intervalo de estágio no nível 1, correspondendo ao máximo

divisor comum de todos os $lz[u,i]$ especificados, isto é,

$$kz = \text{MDC} \{lz[u,i]\}, \quad \forall \quad kz/0 < kz \leq \text{MDC} \{lz[u,i]\}, \\ kz \longrightarrow 0, \quad Nz \longrightarrow \infty;$$

Nz = número de estágios contidos na parte comercializável do tronco, $Nz = 0, 1, \dots, (Hc-Hb)/kz$, $Nz*kz + Hb = \text{local onde o menor diâmetro da } i\text{-ésima tora (dmin) é medido ou estimado};$

$jz.kz$ = estado do sistema; variável que descreve uma situação corrente. Corresponde ao número de intervalos (kz), combinados para formar uma tora, sendo que :

$$lzmin \leq jz.kz \leq \text{MIN} \{Nz.kz, lzmax\},$$

$$jz.kz \in X,$$

$$X = \{lz[u,i], \forall u, \forall i\};$$

Q_{iuv} = quantidade do w -ésimo produto final, obtido da i -ésima i -é-tora convertida no uso u ;

P_{iuv} = preço de mercado para o w -ésimo produto final, obtido da i -ésima tora convertida no uso u ;

$C_{yiuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i)$ = custo do w -ésimo produto final, obtido da i -ésima tora, de comprimento $jz.kz$, com menor diâmetro $dmin_i$ e maior diâmetro $dmax$, convertida no uso u , em que

$y = 1; 2; 3; 4$, sendo: 1 = custo de descascamento; 2 = custo de transporte; 3 = custo de seccionamento; 4 = custo de processamento;

$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i)$ = retorno econômico pela conversão de uma tora de comprimento $jz.kz$,

menor diâmetro $dmin_i$ e maior diâmetro $dmax_i$,
no uso u ;

$$\sum_{w=1}^n Q_{iuw} (jz.kz, dmin_i, dmax_i) \cdot P_{iuw} = \text{total de}$$
 receitas obtidas a partir dos produtos finais (w), produzidos a partir da tora de dimensões $jz.kz$, $dmin_i$ e $dmax_i$, no uso u ;

$$\sum_{w=1}^w \sum_{y=1}^Y C_{yiuw} (jz.kz, dmin_i, dmax_i) = \text{total de custos}$$
 de conversão da tora de dimensões $jz.kz$, $dmin_i$ e $dmax_i$, no uso u , considerando todos os produtos finais w ;

$$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) = \sum_{w=1}^w Q_{iuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i) \cdot P_{iuw} - \sum_{w=1}^w \sum_{y=1}^Y C_{yiuw}(jz.dz, dmin_i, dmax_i)$$

De posse dessas variáveis, a função de recorrência pode ser estabelecida para o nível 1 do modelo. Este nível refere-se à conversão do tronco em toras, e a relação de recorrência obtida é:

$$F_{nz} (Ht, D, Hb) = \text{MAX}_{jz, u} \{ R_u (jz.kz, dmin_i, dmax_i) + f_{nz-jz.kz} (nz.kz-jz.kz, D, Hb) \},$$

sendo

$$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) = \sum_{w=1}^w Q_{iuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i) \cdot P_{iuw} - \sum_{w=1}^w \sum_{y=1}^Y C_{yiuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i)$$

No caso de serraria, a variável $R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i)$ é obtida pela união dos outros dois níveis do modelo, ou seja, dos submodelos de programação dinâmica, que serão descritos no item 5.2.3.2.1.

Outros detalhes sobre o nível 1 do modelo de programação dinâmica, que contribuem para a compreensão do processo, são os seguintes:

a) As toras produzidas no nível 1, a partir daqui, serão denominadas de subprodutos. Um subproduto é caracterizado pelas suas dimensões e pelo seu valor. Sendo z_{ui} a i -ésima tora no uso u , então $z_{ui} = f(lz_{ui}, dmin_i, dmax_i, R_u)$.

b) O diâmetro no topo do produto u , para a i -ésima tora de comprimento lz_{ui} , é denominado $dmin_i$. Sempre existe uma tolerância para esse diâmetro, sendo que ele deve estar contido no intervalo $dl_u \leq dmin_i \leq ds_u$.

c) As toras z_{ui} devem ser fornecidas em ordem crescente de comprimento. Sendo Z o conjunto formado por todas as toras especificadas, então, a primeira tora (z_{11}) sempre será menor ou igual à segunda tora (z_{12}), e assim sucessivamente, até z_{UI} . Esta ordenação é importante para garantir uma maior eficiência do algoritmo que será descrito posteriormente.

d) Os diâmetros em cada estágio são estimados a partir de equações de "taper", previamente ajustadas. Um enfoque alternativo para este caso consistiria no uso de sensores eletrônicos, e, neste caso, a excentricidade do tronco poderia ser tratada. Entretanto, tais sensores não estavam disponíveis e, portanto, não foram

considerados no desenvolvimento do modelo.

e) O volume de uma tora é calculado, utilizando a fórmula de Smalian, isto é:

$$V_{ui} = \frac{\text{PI} (d_{\min}_i^2 + d_{\max}_i^2) jz.kz}{80000}$$

em que V_{ui} é o volume da i -ésima tora convertida no uso u , e as demais variáveis são aquelas definidas anteriormente.

f) A parte comercializável da árvore ($H_c - H_b$) (Figura 26), é determinada a partir de transformações na equação de "taper", pela expressão de H_c , em função de D , H_t e de algum diâmetro mínimo comercial (d_{com}) no topo da árvore. Assim, foi possível estabelecer as seguintes relações, a partir da equação de "taper":

$$(\widehat{d/DAP})^2 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 (H_c/H_t) + \hat{\beta}_2 (H_c/H_t)^2 \quad (\text{equação de "taper"})$$

$$H_c = \{-\hat{\beta}_1 H_t - \sqrt{(\hat{\beta}_1 H_t)^2 - 4\hat{\beta}_2 [\hat{\beta}_0 H_t^2 - (d_{com}^2 H_t^2)/D^2]}\} / 2\hat{\beta}_2$$

$$d_{com} = D \sqrt{\beta_0 + \beta_1 (H_c/H_t) + \beta_2 (H_c/H_t)^2} \quad (\text{diâmetro comercial } d_{com}).$$

A parte comercializável foi, então, obtida por: ($H_c - H_b$) = ($N_z \times K_z + H_b$) - H_b = $N_z \times K_z$, sendo o valor de N_z dado por $N_z = (H_c - H_b)/K_z$.

Assim, uma vez estabelecido o diâmetro comercial (d_{com}), estima-se a altura até este ponto (H_c), obtendo o comprimento comercializável do tronco, de $DAP = D$ e altura total = H_t , dado por $H_c - H_b$. Conhecido o comprimento utilizável e definido o intervalo de estágio (K_z),

determina-se o número de estágios (Nz). Em cada um dos estágios, os diâmetros, com e sem casca, são estimados pela expressão do diâmetro comercial, descrita anteriormente.

5.2.3.2. Conversão de Toras em Produtos Finais (Níveis 2 e 3 do Modelo de Programação Dinâmica)

Conforme descrito nos itens anteriores, a recuperação de produtos a partir de uma tora pode ser feita via fatores de conversão, via análise de regressão, ou, ainda, utilizando conhecimentos básicos de geometria, probabilidade e álgebra.

Neste estudo, para o caso da produção de aglomerados, utilizou-se o fator médio de conversão de 1,5, isto é, 1,5 m³ de madeira, com casca, para 1,0 m³ de aglomerados. No caso de laminados, além do fator médio igual a 3,5, foram implementadas, alternativamente, algumas relações geométricas para a quantificação desse produto. Por último, no caso da serraria, foram estabelecidas relações geométricas mais elaboradas, de forma a permitir uma análise mais precisa e consistente.

O modelo desenvolvido neste estudo prevê quaisquer produtos finais, desde que as informações pertinentes quanto às especificações e aos preços dos diferentes produtos estejam disponíveis.

Dada à natureza do modelo desenvolvido, a variável R_u , definida no item 5.2.3.1, é obtida de forma diferente para cada produto final. Assim, na conversão em chapas de aglomerados, o valor de R_u é obtido diretamente no nível 1,

pela aplicação do fator de conversão. No caso da conversão em compensados, o manejador deverá utilizar o fator de conversão e obter R_u diretamente no nível 1. Por último, no caso de serraria, o retorno é obtido unindo os três níveis de programação dinâmica.

A obtenção de R_u por fator de conversão é feita por:

$$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) = \frac{PI(dmin_i^2 + dmax_i^2)jz.kz}{80000.0} \cdot ft_{uw} \cdot P_{iuw}^{-C_{yiuw}}$$

em que

ft_{uw} = fator de conversão no uso u (u = laminação ou aglomerado), para o produto final w (w = compensado ou chapa de aglomerado).

Os fatores de conversão utilizados neste estudo foram obtidos na indústria e na literatura e podem ser manipulados pelo manejador. Deste modo, uma vez que o modelo foi implementado para uso em computador, qualquer inovação na indústria, como, por exemplo, a substituição de equipamentos antigos, poderá ser analisada via modelo. Isto, de certa forma, permite ao manejador tomar a decisão de substituir ou não um equipamento antigo, mesmo antes de se adquirir o novo. Exemplos do efeito de mudanças nesses fatores foram incluídos e analisados em estudos de casos.

Para aquelas toras destinadas à serraria, havia, ainda, interesse em definir a sua estrutura ótima de corte. Então, as entradas para o nível 1 foram obtidas, unindo outros dois níveis de programação dinâmica, que serão ainda descritos.

5.2.3.2.1. Conversão de Toras em Madeira Serrada

O processo de conversão de toras em madeira serrada, embora seja constituído de duas fases, foi tratado como um problema singular, implicando uma maior eficiência do algoritmo. Estas duas fases referem-se à produção das "tábuas-mãe" e ao processamento das mesmas.

Sendo possível desenvolver um modelo de PD para conversão de uma árvore em madeira serrada, a conversão de uma tora em madeira serrada é, matematicamente, um problema simples. O problema de encontrar um padrão ótimo para processar uma tora na serraria pode ser colocado da seguinte forma: como ajustar retângulos de várias dimensões e valores dentro de um cilindro, de forma que o valor total deste cilindro seja maximizado, sendo este valor dado pela soma dos valores de todos esses retângulos.

Um produto, madeira serrada, é caracterizado pelas suas dimensões e pelo seu valor (Figura 27). A qualidade da madeira, por sua vez, também influencia o valor do produto; entretanto, neste estudo, a qualidade não foi considerada, pelo fato de, praticamente, não haver defeitos internos nas árvores analisadas.

Os níveis 2 e 3, para o caso de serraria, foram esquematizados na Figura 28. No nível 2, as toras são cortadas por um conjunto de serras paralelas, formando as tábuas-mãe. O valor destas tábuas é dado pela soma dos valores dos produtos que elas venham a produzir. Então, o problema no nível 3 resume-se em como serrar as tábuas-mãe e produzir diferentes produtos (madeira serrada).

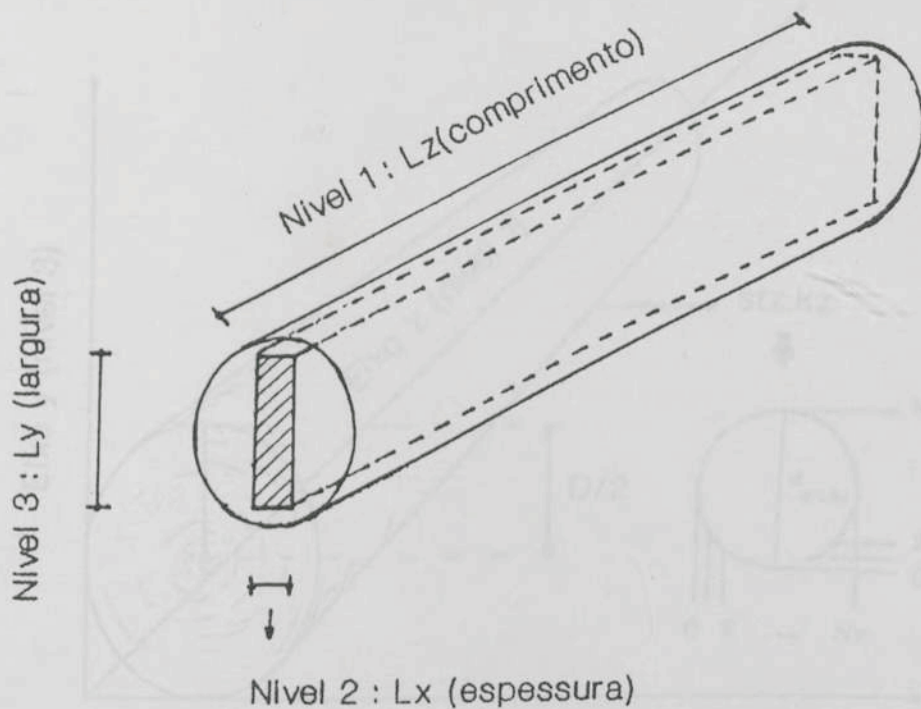


FIGURA 27 - Caracterização de um Produto w da Serraria (Níveis 1, 2 e 3).

No nível 1 do modelo, o eixo ao longo do tronco foi definido como eixo z . Nos níveis 2 e 3, a direção horizontal é denominada de eixo x , e a direção perpendicular a esta, de eixo y (Figura 28).

Uma limitação do modelo refere-se aos cortes permitidos no nível 2, pois, neste nível, os mesmos só podem ser paralelos (Figura 29). Optou-se por esse tipo de corte, por ser o mais usual no Brasil.

No nível 2, os estágios são definidos como o número de unidades de intervalo, iniciando do lado esquerdo da seção circular da tora. De forma análoga ao nível 1, os estados do sistema são as distâncias a partir do lado esquerdo da seção, ou seja, a largura acumulada de um número de tábuas-mãe (Figura 30).

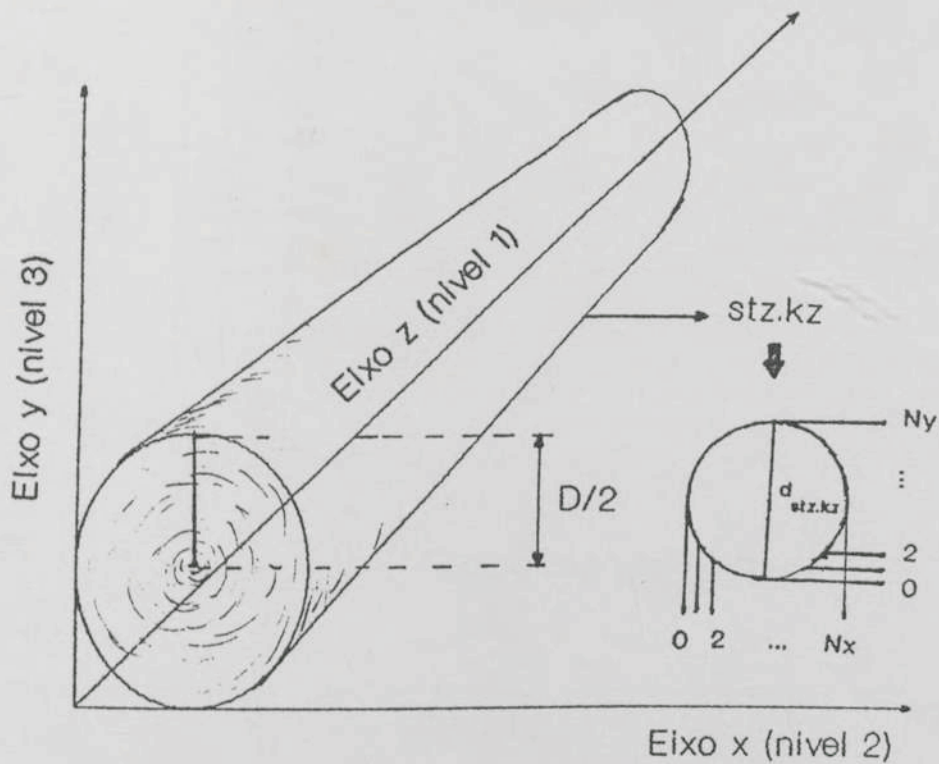


FIGURA 28 - Representação dos Eixos z (nível 1), x (nível 2) e y (nível 3), Utilizados no Desenvolvimento do Modelo de Programação Dinâmica.

Para o nível 3, os estágios são definidos de forma semelhante, bastando dar um giro de 90° na tora e trocar stx , kx e Nx por sty , ky e Ny , conforme sugerido nas Figuras 28 e 30.

No desenvolvimento do modelo, os produtos são ordenados em ordem crescente de espessura ($lx[z]$) e de largura ($ly[z]$), para garantir maior eficiência do algoritmo. Assim, se uma avaliação não é possível para uma menor espessura $lx[z]$ especificada pelo manejo, então nenhuma outra avaliação é necessária para maiores espessuras. Seja, por exemplo, $lx[1] < lx[2] < lx[3] < \dots < lx[z]$. Então, se em determinado estágio no nível 2 (eixo



FIGURA 30 - Relação entre as variáveis de corte no Nível 2 do Modelo de Programação Dinâmica.

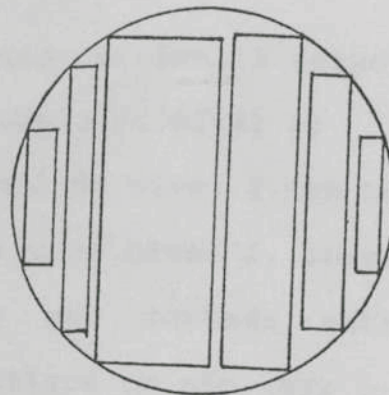
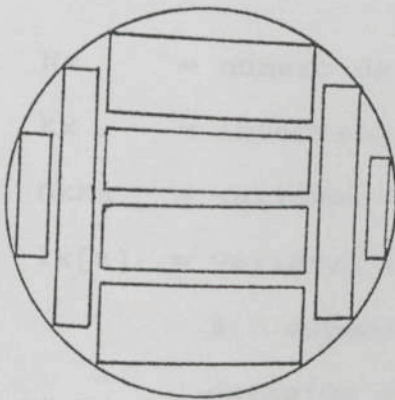
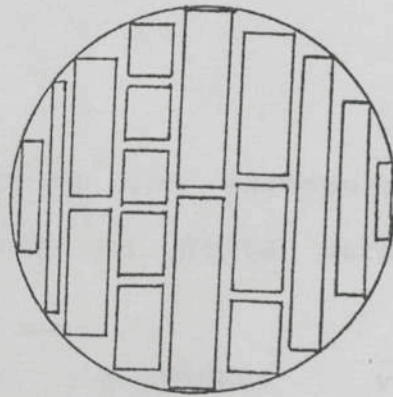
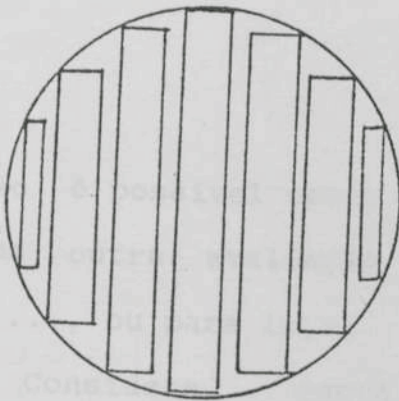


FIGURA 29 - Exemplos de Estruturas de Corte Permitidas nos Níveis 2 e 3 do Modelo Matemático de Programação Dinâmica.

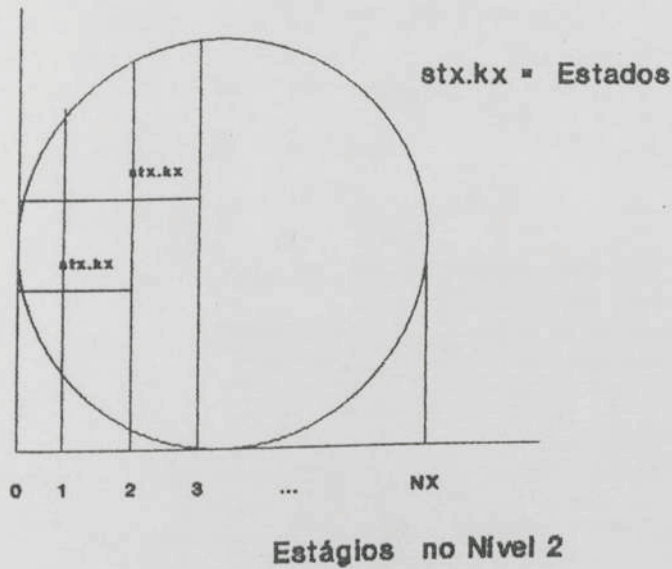


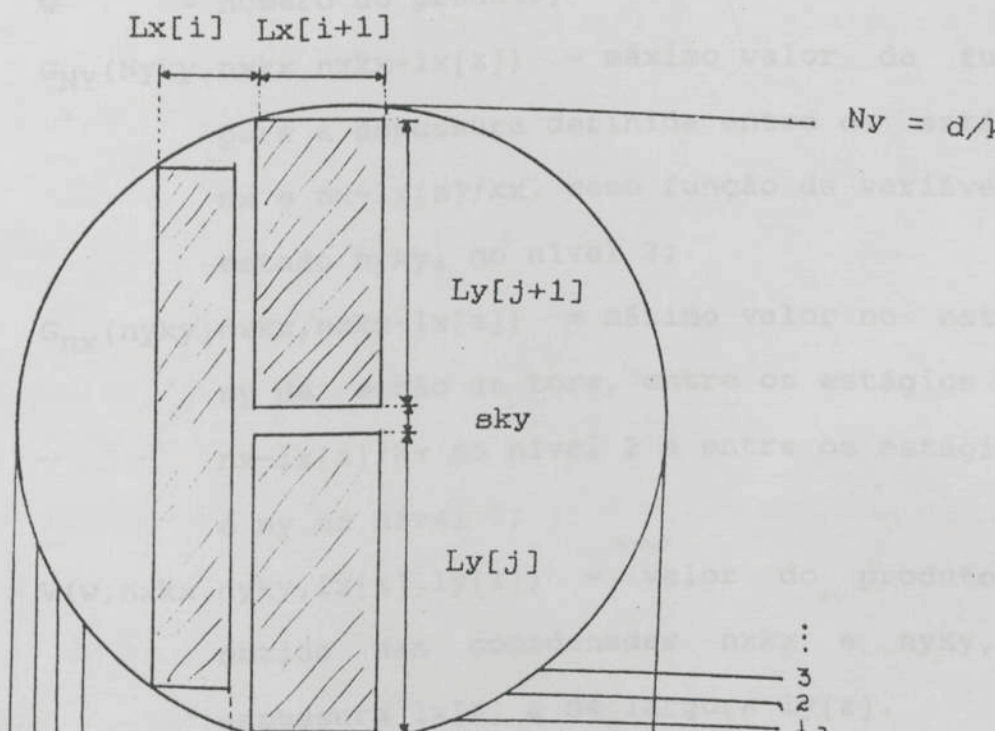
FIGURA 30 - Relação entre Estágios e Estados no Nível 2 do Modelo de Programação Dinâmica.

x) não é possível obter um produto com espessura $lx[1]$, nenhuma outra avaliação precisa ser feita para $lx[2]$, $lx[3]$, ..., ou para $lx[z]$.

Considere, agora, as seguintes variáveis representadas na Figura 31:

- Nx = número de estágios no nível 2 (eixo x);
- kx = intervalo de estágio no nível 2;
- nxx = variável de estado no nível 2, em mm;
- $lx[z]$ = variável decisória no nível 2, correspondente à espessura a ser cortada entre dois estágios consecutivos ou não, mm;
- Z = número total de produtos;
- z = subgrupo de Z , com largura $\geq nxx$ e, ou, largura $\geq nyky$;

$F_{max}(nxk)$ = valor máximo da função de fato entre
 estágios. $0 \leq k \leq N$, com intervalos k no n.
 2:



...
 3
 2
 1

N_y = número de estágios no nível 3 (eixo y);
 k_y = intervalo de estágio no nível 3, em mm;
 $nyky$ = variável de estado no nível 3, em mm;
 $ly[z]$ = variável decisória no nível 3,
 $lx[z]$ correspondente à largura a ser cortada entre
dois estágios, consecutivos ou não, no nível
3, mm;

$F_{nx}(nxkx) =$ valor máximo da seção da tora entre os
estágios 0 e nx , com intervalos kx no nível
2;

w = número do produto;

$G_{NY}(Nyky, nxkx, nxkx - lx[z]) =$ máximo valor da função
para a espessura definida entre os estágios
 nx e $nx - lx[z]/kx$, como função da variável de
estado $nyky$, no nível 3;

$G_{nx}(nyky, nxkx, nxkx - lx[z]) =$ máximo valor no estágio
 ny da seção da tora, entre os estágios nx e
 $nx - lx[z]/kx$ no nível 2 e entre os estágios 0
e ny no nível 3;

$V(w, nxkx, nyky, lx[z], ly[z]) =$ valor do produto w ,
obtido nas coordenadas $nxxkx$ e $nyky$, de
espessura $lx[z]$ e de largura $ly[z]$.

De posse dessas variáveis, puderam ser estabelecidas
as funções de recorrência determinísticas para os níveis 2 e
3, isto é:

Nível 2

$$F_{nx}(nxx) = \text{MAX}_{z \in Z} \{G_{NY}(Nyky, nxx, nxx - lx[z]) +$$

$$+ F_{nx-lx/kx}(nxx-lx[z]-kx)\}$$

$$lx[z] \in S, S_1 = lx[z]: z \in Z$$

$$0 \leq nx \leq Nx; F_0 = 0;$$

Nível 3

$$G_{nx}(nyky, nxx, nxx-lx[z]) = \text{MAX}_{z \in Z} \{V\{w, nxx, nyky, lx[z], ly[z]\} +$$

$$G_{ny-ly[z]/ky-sky}(nyky-ly[z]-sky)\}$$

$$ly[z] \in S_2, S_2 = ly[z]: z \in Z$$

$$0 \leq ny \leq Ny, G_0 = 0.$$

Algumas observações importantes sobre os níveis 2 e 3 são:

a) a otimização é feita, unindo esses dois níveis, de forma que as "saídas" do nível 3 sejam as "entradas" para o nível 2;

b) as variáveis kx e ky , intervalos de estágio nos níveis 2 e 3, respectivamente, devem ser denominadores comuns da espessura $lx[z]$ e da largura $ly[z]$, de todos os produtos z , tal que $z \in Z$, bem como das espessuras de corte nos dois níveis (skx e sky);

c) a espessura de corte pode ser diferente nos níveis 2 e 3, isto é, $skx \leq sky$, contudo, em um mesmo nível, a espessura deve ser constante. Estas espessuras irão variar de acordo com o equipamento utilizado;

d) o custo de conversão de uma tora na serraria é diferente para cada estrutura de corte definida;

esse custo pode ser considerado no modelo matemático, subtraindo-o, na função-objetivo, como uma penalidade. Neste caso, o valor de uma tora será igual à soma dos preços de todos os itens, e o retorno pela conversão será dado pela diferença entre esta e os custos variáveis de processamento. Entretanto, neste estudo, isto não foi considerado, ou seja, o custo de processamento é independente da estrutura de corte definida pelo modelo de programação dinâmica. Desde que as informações diferenciadas sejam disponíveis, elas poderão ser incorporadas no modelo;

e) assumiu-se que os preços dos produtos não são afetados pela quantidade total produzida;

f) o número de estágios no nível 3 é variável para cada $lx[z]$ avaliado, implicando uma redução significativa de cálculos;

g) efeitos de simetria são utilizados. Assim, estabelecido um $ly[z]$ para o estágio nx , automaticamente se tem o $ly[z]$ para o estágio $NX-nx$. Deste modo, uma vez tomada uma decisão ótima para a tábua-mãe 1, a mesma decisão é atribuída para a tábua-mãe 2 (Figura 32).

No cálculo da largura máxima em cada estágio no nível 2, que é utilizada para definir o número de estágios no nível 3, também são utilizados os efeitos de simetria. Então, sendo D o diâmetro da menor seção da tora, a largura disponível em cada estágio é tal, que $ly[z] = ly[D/kx-nx]$.

sendo $\lfloor lx[z] \rfloor$ a menor espessura permitida no conjunto de todos os produtos Z , sendo $n_k x$ um estado e skx , a espessura de corte no nível 2, então, têm-se as seguintes condições:

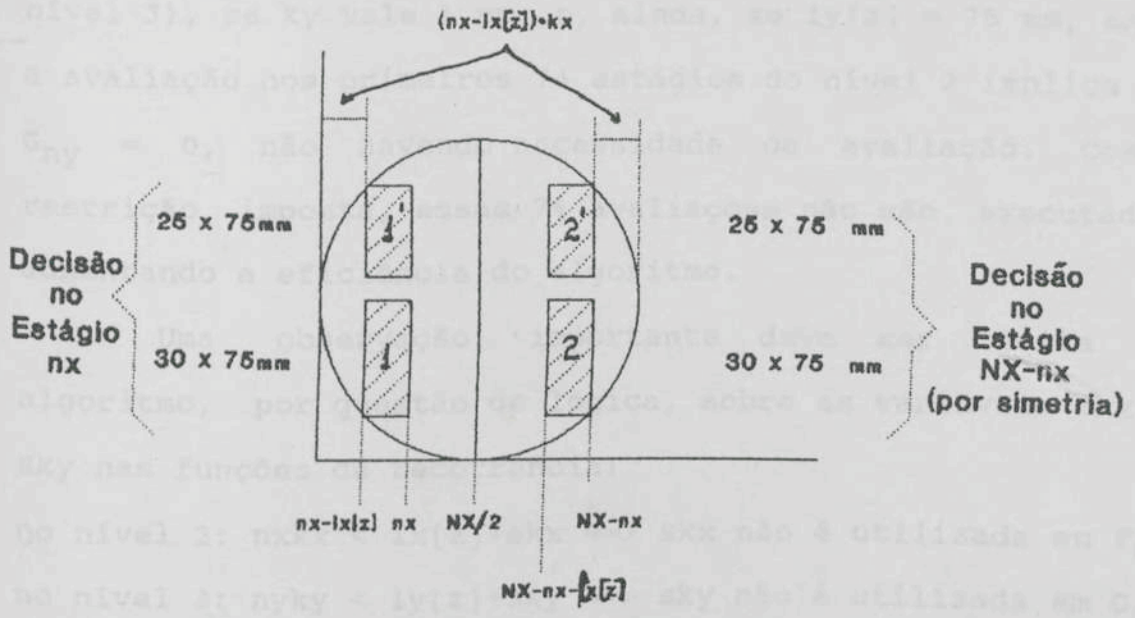


FIGURA 32 - Efeitos de Simetria, Utilizados no Algoritmo.

- (1) se $nxx > skx$ e se $nxx < \lfloor lx[x] \rfloor + nxx \implies F_{nx} = 0$;
- (2) se $nxx < skx$ e se $nxx < \lfloor lx[z] \rfloor + skx \implies F_{nx} = 0$.

As restrições 1 e 2 são importantes para garantir a eficiência do algoritmo. As avaliações são feitas a partir do estágio nx , que permite obter ao menos o menor $lx[z]$ especificado, sendo que nos estágios anteriores é atribuído 0 (zero) à função F_{nx} .

No nível 3, sendo $\lfloor ly[z] \rfloor$ a menor largura de todos os produtos contidos em Z e ny , num estágio qualquer, então:

(3) $G_{ny} = 0$, para $ny < \lfloor ly[z] \rfloor$. Esta terceira restrição é de máxima importância na eficiência do algoritmo. Se, por exemplo, em um determinado estágio nx , uma espessura $nx-lx[z]$ é definida com $NY = 78$ (número total de estágios no

nível 3), se k_y vale 1 mm, e, ainda, se $l_y[z] = 75$ mm, então a avaliação nos primeiros 74 estágios do nível 2 implica que $G_{ny} = 0$, não havendo necessidade de avaliação. Com a restrição imposta, essas 74 avaliações não são executadas, aumentando a eficiência do algoritmo.

Uma observação importante deve ser feita no algoritmo, por questão de lógica, sobre as variáveis sk_x e sk_y nas funções de recorrência:

no nível 2: $n_x k_x < l_x[z] + sk_x \implies sk_x$ não é utilizada em F_{n_x} ;

no nível 3: $n_y k_y < l_y[z] + sk_y \implies sk_y$ não é utilizada em G_{n_y} .

Essas restrições impõem uma lógica ao algoritmo, pois, se para um dado n_x e $l_x[z]$, $n_x = l_x[z]/k_x$, $F_{n_x - l_x[z]/k_x - sk_x} = F_{-sk_x}$, o que não teria sentido, pois F_{n_x} é tal, que $n_x = 0, 1, \dots, N_x$.

Nos casos em que as espessuras de corte sk_x e sk_y não são consideradas, apenas os estágios entre 0 e $N_x/2$, no nível 2, precisam ser avaliados. Isto porque o efeito de simetria garante que a solução será idêntica para a outra metade da seção da tora, isto é, $N_x/2 \leq n_x \leq N_x$. Entretanto, se a espessura de corte não for considerada na função de recorrência, podem acontecer casos em que a solução ótima definida pelo modelo não seja possível, ao serrar a tora. Isto ocorre porque, para cada peça obtida, há uma perda pela espessura do corte.

É importante observar que na definição de N_y , para determinado n_x , N_y será tal que:

$$N_y = y[n_x]/k_y \text{ se } y[n_x] \leq y[n_x - l_x[z]]$$

$$N_y = y[n_x - l_x[z]]/k_y \text{ se } y[n_x] > y[n_x - l_x[z]].$$

A Figura 33 ilustra estes casos.

$$N_y = \frac{Y[nx - Lx[z]]}{k_y}$$

$$N_y = \frac{Y[nx]}{k_y}$$

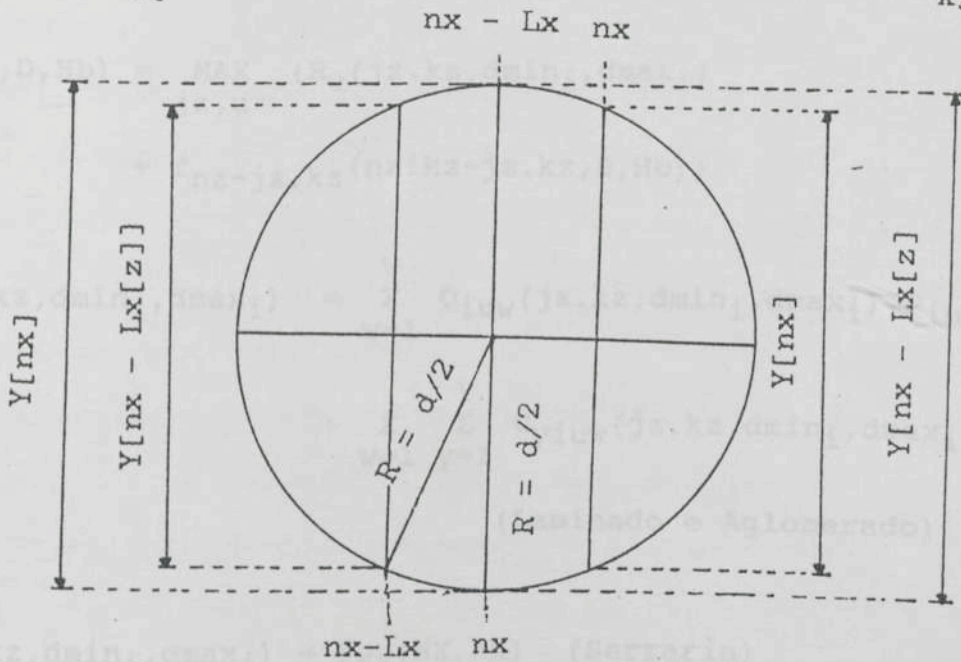


FIGURA 33 - Relações entre o Número Total de Estágios no Nível 3 e os Estágios no Nível 2.

Considerando os efeitos de simetria descritos anteriormente, têm-se, ainda, que:

$$nx - lx[z] < NX - nx \implies N_y := y[nx - lx[z]]$$

$$nx - lx[z] \geq NX - nx \implies N_y := y[NX - nx] = y[nx]$$

$$nx < lx[z] \implies F_{nx} := 0 \wedge F_{NX - nx} := 0$$

Utilizando as definições descritas para os níveis 1, 2 e 3, em combinação com as restrições estabelecidas, o modelo geral de programação dinâmica pode ser finalmente sumarizado, conforme a relação de recorrência apresentada na Figura 34. Esta relação foi implementada em um código computacional denominado MPDAMA (Modelo de Programação

Nível 1

$$F_{nz}(Ht, D, Hb) = \text{MAX}_{jz, u} \{R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) + f_{nz-jz.kz}(nz.kz-jz.kz, D, Hb)\}$$

$$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) = \sum_{w=1}^W Q_{iuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i) \cdot P_{iuw} + \sum_{w=1}^Y \sum_{y=1}^Y C_{yiuw}(jz.kz, dmin_i, dmax_i)$$

(Laminado e Aglomerado)

ou

$$R_u(jz.kz, dmin_i, dmax_i) = F_{NX}(NX.kx) \quad (\text{Serraria})$$

Nível 2

$$F_{nx}(nxkx) = \text{MAX}_{z \in Z} \{G_{NY}(NYky, nxkx, nxkx-lx[z]) +$$

$$+ F_{nx-lx[z]/kx}(nxkx-lx[z]-skx)\}$$

$$lx[z] \in S, S_1 = lx[z]/z \in Z$$

$$0 \leq nx \leq NX; F_0 = 0.$$

Nível 3

$$G_{ny}(nyky, nxkx, nxkx-lx[z]) = \text{MAX}_{z \in Z} \{V(w, nxkx, nyky, lx[z], ly[z]) +$$

$$+ G_{ny-ly[z]/ky-sky}(nyky-ly[z]-sky)\}$$

$$ly[z] \in S_2, S_2 = ly[z]/z \in Z$$

$$0 \leq ny \leq NY, G_0 = 0.$$

FIGURA 34 - Estrutura Geral do Modelo de Programação Dinâmica.

Dinâmica para Avaliação de Multiprodutos em Árvores Individuais). O MPDAMA pode ser processado em qualquer microcomputador, desde que ele possua, pelo menos, 640 k de memória. É necessária, ainda, uma versão igual ou superior à 4.0 do MS-DOS para utilizá-lo, e recomenda-se o uso de um disco rígido para armazenar os resultados temporários gerados pelo programa.

A velocidade de processamento do programa depende, principalmente, do número de alternativas a serem avaliadas, sendo mais lento sempre que toda uma árvore é destinada à serraria. Como em qualquer problema de PD, as dificuldades computacionais aumentam à medida que o número de estados e de estágios do sistema também aumenta.

5.2.4. Descrição e Análise do Programa MPDAMA

O fluxograma geral do MPDAMA (Modelo de Programação Dinâmica para Avaliação de Multiprodutos em Árvores Individuais) foi ilustrado na Figura 39, sendo que os detalhes de suas principais rotinas foram, ainda, ilustrados nas Figuras 35 a 38.

Inicialmente, a rotina OPROG analisa uma série de opções do usuário, tais como: nomes de arquivos de dados e de saídas, direcionamento dos resultados, critérios de conversão e tipo de problema a ser analisado. Esta rotina testa a existência dos arquivos, gerenciando-os e informando sobre possíveis erros nos mesmos.

Uma consideração importante refere-se à rotina SAWMODEL. O objetivo desta é analisar os níveis 2 e 3 do

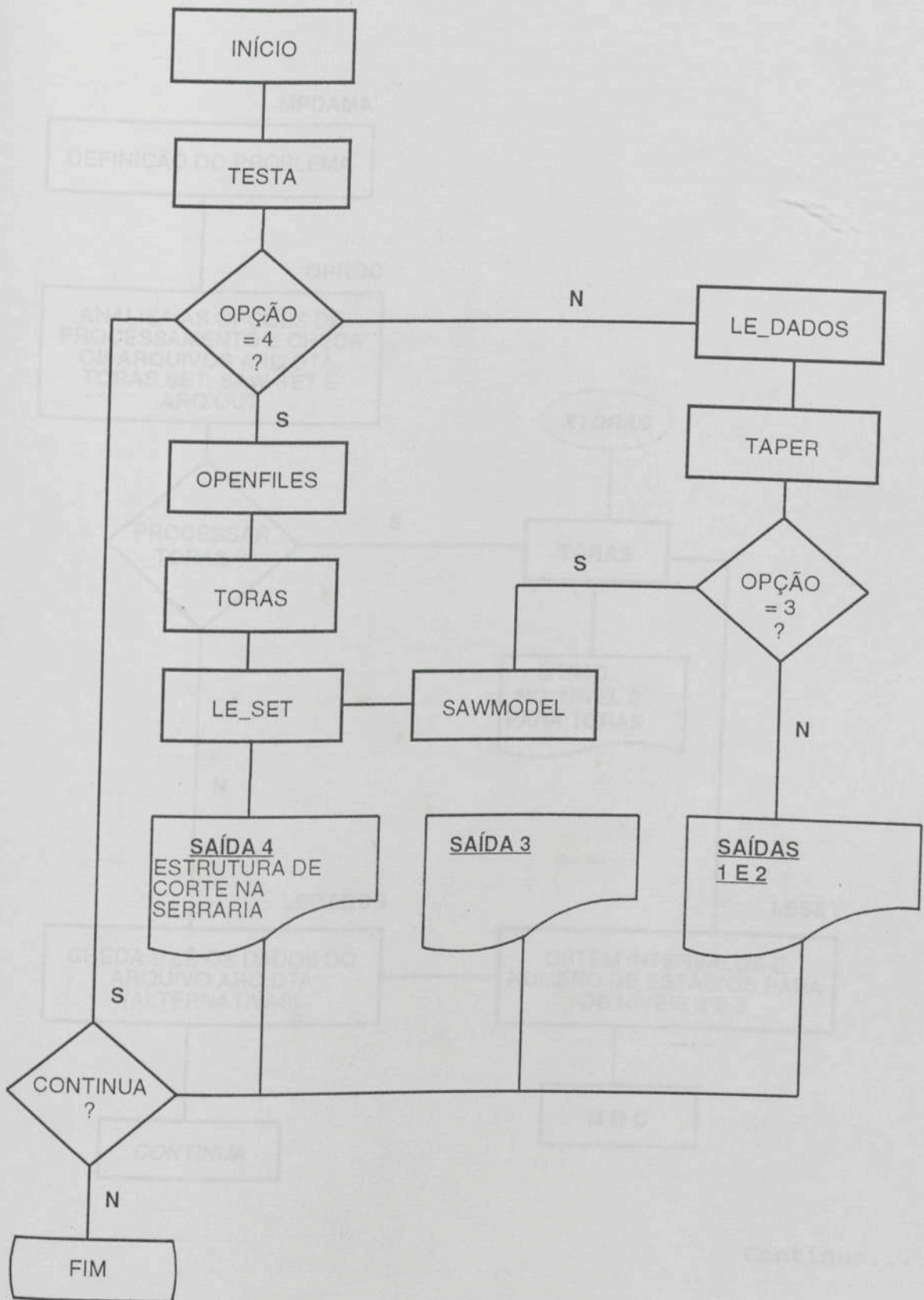
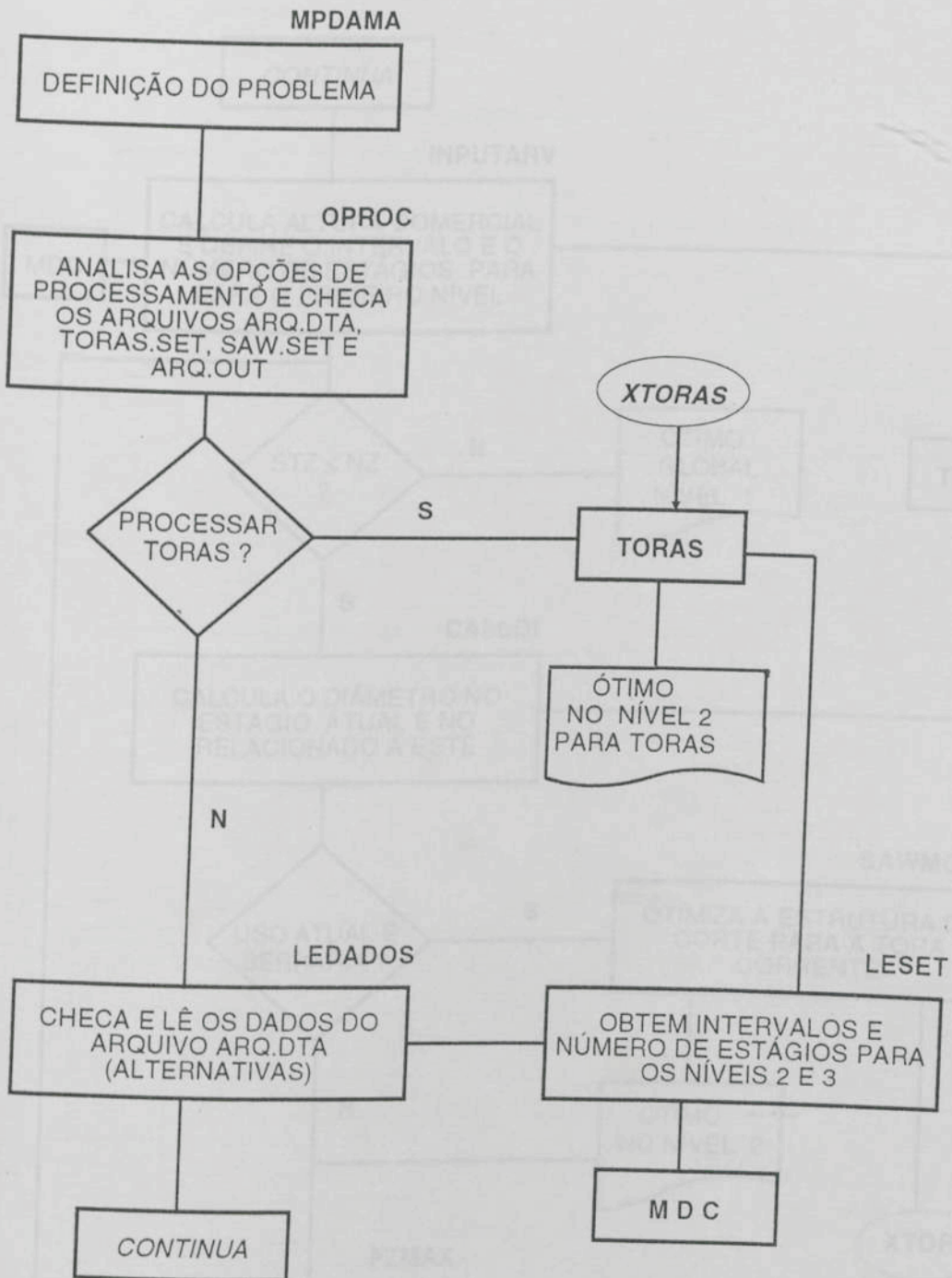


FIGURA 35 - Fluxograma Geral do Programa de Computação.



Continua...

FIGURA 36 - Procedimentos para Resolver os Problemas de Programação Dinâmica Analisados.

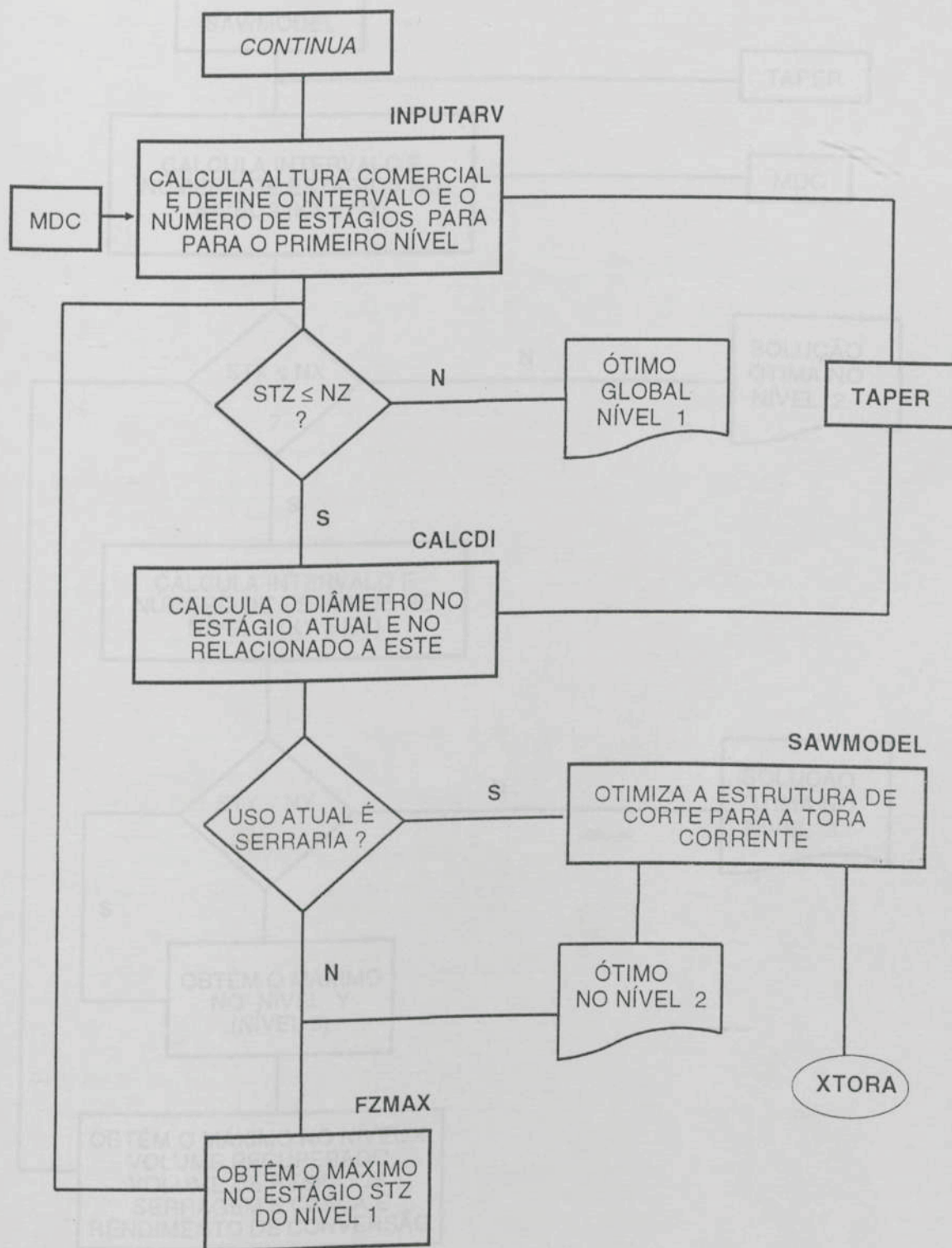


FIGURA 36, Cont.

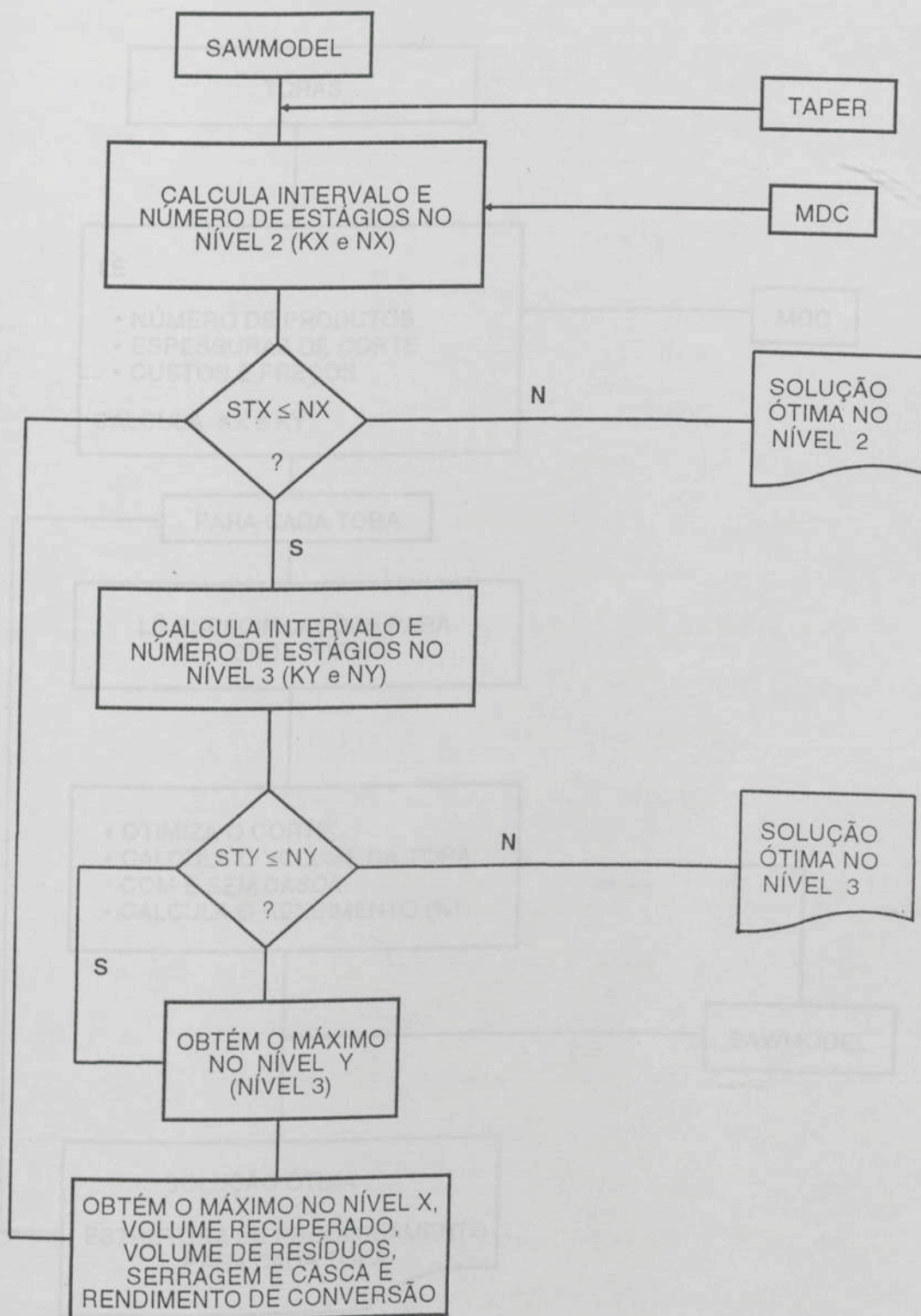


FIGURA 37 - Fluxograma da Procedure Sawmodel.

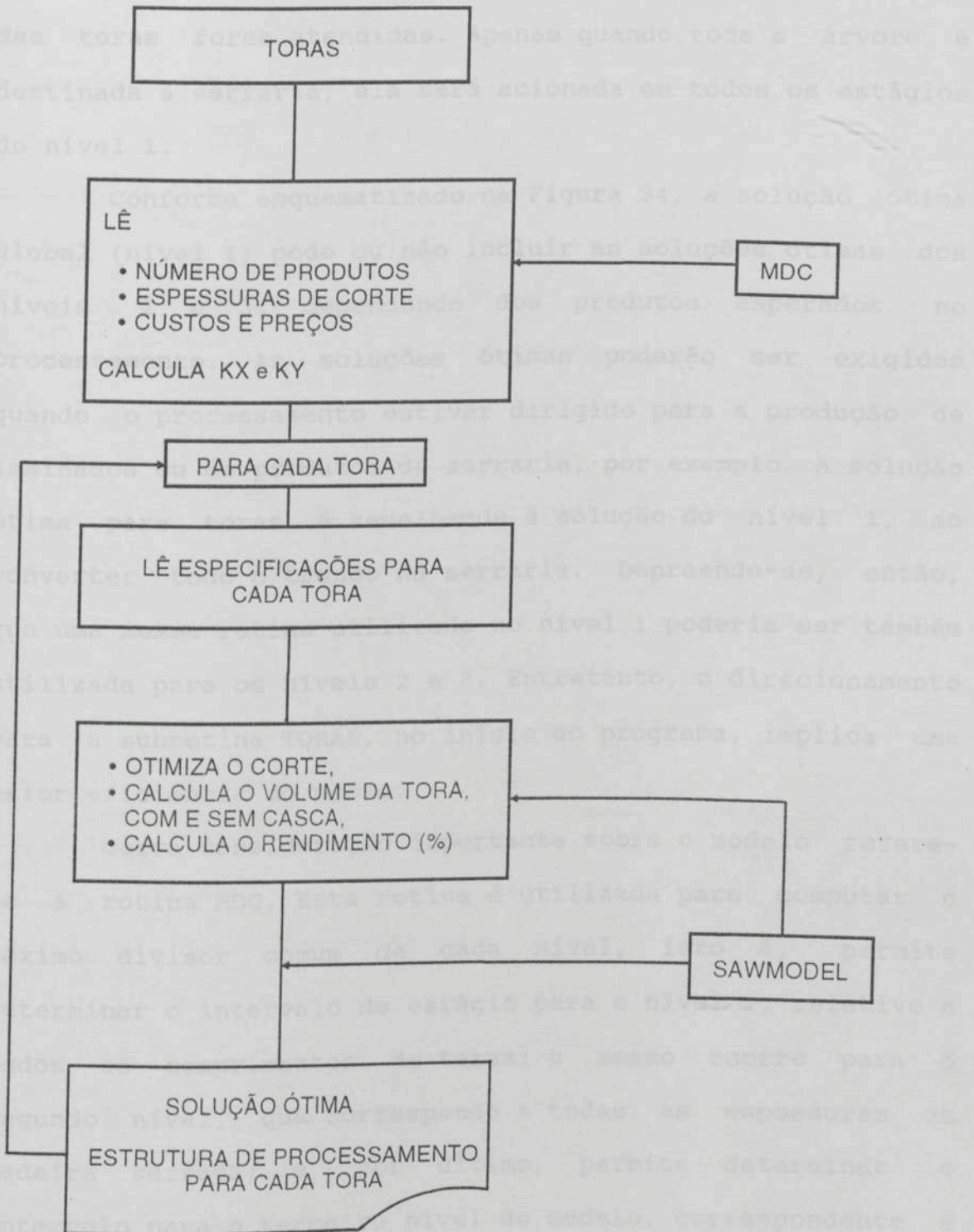


FIGURA 38 - Fluxograma da Procedure TORAS.

modelo; assim, ela só é acionada quando houver a opção de serrar as toras. Mesmo que haja tal opção no conjunto de dados do problema, estando no nível 1, ela somente será acionada quando as restrições de diâmetro e de comprimento das toras forem atendidas. Apenas quando toda a árvore é destinada à serraria, ela será acionada em todos os estágios do nível 1.

Conforme esquematizado na Figura 34, a solução ótima global (nível 1) pode ou não incluir as soluções ótimas dos níveis 2 e 3; dependendo dos produtos esperados no processamento. As soluções ótimas poderão ser exigidas quando o processamento estiver dirigido para a produção de laminados ou de produtos de serraria, por exemplo. A solução ótima para toras é semelhante à solução do nível 1, ao converter todo o tronco na serraria. Depreende-se, então, que uma mesma rotina utilizada no nível 1 poderia ser também utilizada para os níveis 2 e 3. Entretanto, o direcionamento para a subrotina TORAS, no início do programa, implica uma maior eficiência do mesmo.

Outra consideração importante sobre o modelo refere-se à rotina MDC. Esta rotina é utilizada para computar o máximo divisor comum de cada nível, isto é, permite determinar o intervalo de estágio para o nível 1, relativo a todos os comprimentos de toras; o mesmo ocorre para o segundo nível, que corresponde a todas as espessuras de madeira serrada; e, por último, permite determinar o intervalo para o terceiro nível do modelo, correspondente a todas as larguras de peças serradas. Então, em função dos usos e das especificações, o programa MPDAMA define os

estágios da programação dinâmica, para os três níveis do modelo, e, conseqüentemente, o número de estágios em cada nível. Isto dá uma certa flexibilidade para o usuário, que pode variar e analisar o efeito de alterações nas espessuras de corte em ambos os níveis, sem se preocupar com as alterações no intervalo e no número de estágios.

A rotina TAPER foi implementada com os modelos de Kozak e de Demaerschalk, bastando que o usuário substitua os parâmetros estimados de qualquer um deles.

Para compreensão do funcionamento do programa MPDAMA, será dada, a seguir, uma descrição dos arquivos. O MPDAMA inclui dez arquivos: MPDAMA.COM, TORAS.SET, SAW.SET, ARQ.DTA, ARQ.OUT, EDIT.COM, LIST.COM, FILEZ, FILEX e FILEY. Os arquivos de extensão .SET têm nomes já predefinidos; ao arquivo ARQ.DTA, o usuário poderá atribuir qualquer nome, mantendo somente a extensão DTA; ARQ.OUT é um arquivo livre, destinado às saídas do programa (o programa sempre solicitará um nome para este arquivo); EDIT é utilizado para montagem dos arquivos de dados (Toras.set, Saw.set e Arq.dta); LIST é utilizado para listar gravar e, ou, imprimir resultados gravados inicialmente em disco. A seguir, são descritos os arquivos .set e .dta.

SAW.SET: Neste arquivo, encontra-se a estrutura dos dados referente à serraria, incluindo as dimensões e os preços dos produtos e as espessuras de corte nos níveis 2 e 3. Os dados são dispostos em ordem crescente de espessura e largura, o que confere maior eficiência ao algoritmo. Um exemplo é:

4	4	4	0
25	75		0,221
25	100		0,295
40	75		0,354
40	100		0,472

Na primeira linha do arquivo anterior, os valores referem-se a: número de produtos, espessura de corte no nível 2; espessura de corte no nível 3; e custo médio de processamento na serraria. A partir da segunda linha, são relacionados, para cada um dos produtos definidos na linha 1, a espessura, a largura e o preço do produto; assim, por exemplo, uma peça de 25 X 75 mm, com comprimento definido no arquivo Arq.dta, valeria 0,221. Todas as unidades de medida são em milímetros, sendo que, para o preço, pode ser utilizado Cr\$, U\$, ou qualquer outra unidade monetária.

Toda vez que um novo problema for analisado, esse arquivo deve ser atualizado, mantendo, sempre, o mesmo nome. No caso do procesamento de toras, apenas os arquivos Arq.dta e Saw.set são utilizados, não sendo necessário fornecer o nome dos mesmos, já que ambos são predefinidos.

TORAS.SET: Este arquivo é específico para o caso da conversão de toras na serraria, sendo também predefinido, e, portanto, deve ser atualizado para cada novo grupo de toras a ser analisado. Trata-se de um arquivo simples, que inclui: o número de toras e o maior e o menor diâmetro da tora, além do seu comprimento. Os diâmetros devem ser em centímetro e o comprimento, em decímetro. O seguinte exemplo serve para interpretar o caso:

4		
30	28	25
20	17	25
40	33	24
50	41	35

Esses valores representam um arquivo com dados de quatro tipos de toras para serem analisadas, em que a primeira tem 30,0 e 28 cm, para o maior e o menor diâmetro, respectivamente, e com um comprimento de 2,5 m.

Cabe salientar que, no caso da conversão de troncos em serraria, o MPDAMA utiliza todos os arquivos de dados (.Set e .Dta).

ARQ.DTA: Este arquivo não tem um nome predefinido; o usuário poderá nomeá-lo como quiser, desde que mantenha a extensão .Dta. As seguintes informações devem compor esse arquivo, assim interpretado:

- número de usos alternativos (ex.: 4);
- comprimento da tora para cada uso alternativo (ex.: 20; 20; 25; e 25 dm);
- limite inferior de diâmetro, para conversão em cada uso alternativo (ex.: 35; 4; 15; e 10 cm);
- limite superior de diâmetro, para cada uso alternativo (ex.: 100; 100; 100; e 100 cm);
- número para identificar o uso alternativo, sendo reservados o número 1 a 5 para o caso de serraria, isto é, se o uso alternativo for serraria (ex.: 6; 7; 8; 10). - se a identificação anterior for diferente de 1, 2, 3, 4, 5, então:
 - . fator de conversão para cada uso (ex.: 0,625; 0,500; 0,400 m³ do produto final, para cada m³ de madeira sem casca);

- . preço de venda para cada produto final (ex.: 200; 300; e 180 Cr\$/m³, para os produtos gerados nos usos 6, 7 e 8);
- . custo médio de conversão no uso (ex.: 90; 110; e 78 Cr\$ por m³ dos produtos gerados nos usos 6, 7 e 8);
- se a identificação anterior for 1,
 - . as especificações dos produtos são lidas no arquivo Toras.Set, conforme descrito anteriormente;
- número da equação de "taper" (1 = Demaerschalk);
- coeficientes da equação de "taper", com casca, e respectivas medidas de precisão, coeficiente de correlação e erro padrão residual (ex.: 0,0096601; 1,0538736; 0,601678; -0,6639265; 0,968; 0,161);
- coeficientes da equação de "taper", sem casca, e respectivas medidas de precisão, coeficiente de correlação e erro padrão residual (ex.: 0,0086601; 1,0338736; 0,501678; -0,5639265; 0,968; 0,161);
- preço e uso para a casca (ex.: Cr\$10,00/m³, 'biomassa');
- preço e uso para a serragem (ex.: Cr\$10,00/m³, 'biomassa');
- preço e uso para demais resíduos (ex.: Cr\$300,00/m³, 'aglomerado');
- número de árvores para serem analisadas (ex.: 1);
- para cada árvore:
 - número da árvore, DAP, altura total e altura do toco (ex.: 1, 40 cm, 26,3 e 0,30 m para a primeira árvore).

Esses valores incluídos entre parênteses correspondem ao seguinte arquivo:

ARQ.DTA

4							
20	35	100	6	0,625	200,000	90,00	
20	4	100	7	0,500	300,000	110,00	
20	15	100	8	0,400	180,000	78,00	
25	10	100	1				
1							
0,0096601		1,0538736		0,601678	-0,6639265	0,968	0,161
0,0086601		1,0338736		0,501678	-0,5639265	0,968	0,161
10,00		biomassa					
10,00		biomassa					
300,00		aglomerado					
1							
1	40	26,3	0,30				

Além dos arquivos descritos, três arquivos temporários são gerados pelo MPDAMA. O FILEY, que armazena as estruturas avaliadas no nível 3; o FILEX, que armazena as estruturas avaliadas no nível 2; e o FILEZ, que armazena os índices dos estágios avaliados no primeiro nível do modelo. Estes três arquivos são indexados, isto é, no FILEY são armazenados os índices correspondentes ao estágio atual no nível 2 e no FILEX, os índices relacionados com o estágio atual do nível 1.

Quando uma avaliação é feita no último estágio do nível 1, esses índices são utilizados para que a solução final seja obtida. Uma vez definida e armazenada em ARQ.OUT, todas as informações contidas nos arquivos FILEZ, FILEX e FILEY são eliminadas, ficando os mesmos com uma estrutura vazia, até que seja analisado outro problema. O usuário poderá optar por apagar ou não tais arquivos, após ter sido obtida a solução do problema; contudo, suas estruturas praticamente não ocupam espaço no disco.

5.2.5. Verificação e Avaliação do Modelo

A estrutura e a lógica do modelo de PD foram avaliadas passo a passo. Inicialmente, uma árvore com 38,0 cm de diâmetro (DAP) e 25,5 m de altura total foi utilizada, com o objetivo de verificar a lógica e a consistência do modelo. Para tanto, foi considerado o caso mais simples, que compreende a produção de toras para diferentes finalidades, sem, contudo, analisar a conversão das toras em produtos. As especificações de cada tipo de tora foram relacionadas no Quadro 6.

QUADRO 6 - Diâmetro Mínimo, Diâmetro Máximo, Comprimento e Valor das Toras para Laminação, Serraria e Aglomerado

Uso Atribuído à Madeira (U)	Diâmetro (cm)		Comprimento da Tora (m) (Lz[u])	Preço da Madeira (Pr[u])
	Mínimo (Dl[u])	Máximo (Du[u])		
Laminado	30,0	livre	2,5	39,0
Serraria	15,0	30,0	2,5	25,0
Aglomerado	4,0	15,0	2,0	18,0

Além desses dados, foram utilizadas as seguintes equações de "taper", referentes a idades entre 15,1 e 20 anos:

$$\widehat{dcc} = D \sqrt{1,21370 - 2,13600(Hc/Ht) + 1,06530(Hc/Ht)^2}$$

$$\widehat{dsc} = D \sqrt{0,94424 - 1,31660(Hc/Ht) + 0,43622(Hc/Ht)^2}$$

De posse desses dados, o MPDAMA foi utilizado, fornecendo os resultados apresentados nos Quadros 7 e 8,

QUADRO 7 - Resultados Obtidos em Cada Estágio, Utilizando os Dados do Quadro 6

Estágio		Produção	Valor da Tora Avaliada entre (US\$)	Valor Máximo Acumulado	Diâmetro	
Atual (1)	Relacionado (2)				Atual	Relacionado
5	0	7	9,591	9,591	34,1	36,6 (05)
6	1	7	9,319	9,319	33,6	36,1***
7	2	7	9,051	9,051	33,1	35,6
8	3	7	8,786	8,786	32,6	35,1
9	4	7	8,525	8,525	32,1	34,6
10	5	7	8,268	17,859	31,6	34,1 (10)
11	6	7	8,014	17,333	31,1	33,6
12	7	7	7,764	16,815	30,5	33,1
13	8	7	7,518	16,304	30,0	32,6
14	9	12	4,664	13,189	29,5	31,2
15	10	12	4,511	22,370	29,0	31,6 (15)
16	11	12	4,360	21,693	28,5	31,3
17	12	12	4,212	21,027	28,0	30,5
18	13	12	4,066	20,370	27,5	30,0
19	14	12	3,922	17,111	27,0	29,5
20	15	12	3,781	26,151	26,4	29,0 (20)
21	16	12	3,643	25,338	25,9	28,5
22	17	12	3,506	24,533	25,4	28,0
23	18	12	3,372	23,742	24,9	24,9
24	19	12	3,241	20,352	24,4	27,0
25	20	12	3,111	29,262	23,8	26,4 (25)
26	21	12	2,984	28,320	23,3	25,9
27	22	12	2,860	27,393	22,8	25,4
28	23	12	2,738	26,480	22,3	24,9
29	24	12	2,618	22,970	21,7	24,4
30	25	12	2,501	31,763	21,2	23,8 (30)
31	26	12	2,386	30,706	20,7	23,3
31	27	12	2,273	29,666	20,2	22,8
33	28	12	2,163	28,643	19,6	22,3
34	29	12	2,055	25,025	19,1	21,7
35	30	12	1,950	33,712	18,5	21,2 (35)
36	31	12	1,846	32,552	18,0	20,7
37	31	12	1,746	31,412	17,5	20,2
38	33	12	1,647	30,290	16,9	19,6
39	34	12	1,551	26,576	16,4	19,1
40	35	12	1,458	35,170	15,8	18,5 (40)
41	36	12	1,367	33,919	15,2	18,0
42	37	6	0,709	30,999	14,7	16,9
43	38	6	0,660	27,236	14,1	16,4
44	39	6	0,613	35,783	13,5	15,8 (44)
45	40	6	0,566	34,485	13,0	15,2
46	41	6	0,521	31,521	12,4	14,7
47	42	6	0,477	27,714	11,8	14,1
48	43	6	0,435	36,218**	11,2	13,5 (48)
40	44	6	0,394	34,879	10,5	13,0
50	45	6	0,355	31,875	9,9	12,4

*** Indicam os estágios em que o tronco foi seccionado.

** Maior valor obtido.

QUADRO 8 - Solução Ótima Global Obtida a Partir dos Dados do Quadro

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 38,0 cm		Altura Total = 25,5 m		Comprimento Utilizável = 24,1 m										
Posição no Tronco (M-M)	Volume (m ³)				Retorno (US\$)											
	Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado	Resíduo	Serragem	Madeira	Serragem	Total p/Res.							
22,0-24,0	0,0347	0,0105	0,0242	0,0242	0,0000	0,0000	0,435	0,105	0,000	0,105	36,218	100,0	6	9	12	9
20,0-22,0	0,0396	0,0055	0,0340	0,0340	0,0000	0,0000	0,613	0,055	0,000	0,055	35,783	100,0	6	9	12	9
17,5-20,0	0,0610	0,0027	0,0583	0,0583	0,0000	0,0000	1,458	0,027	0,000	0,027	35,170	100,0	12	9	12	9
15,0-17,5	0,0790	0,0010	0,0780	0,0780	0,0000	0,0000	1,950	0,010	0,000	0,010	33,712	100,0	12	9	12	9
12,5-15,0	0,1029	0,0028	0,1000	0,1000	0,0000	0,0000	2,501	0,028	0,000	0,028	31,763	100,0	12	9	12	9
10,0-12,5	0,1325	0,0080	0,1245	0,1245	0,0000	0,0000	3,111	0,080	0,000	0,080	29,262	100,0	12	9	12	9
7,5-10,0	0,1680	0,0167	0,1513	0,1513	0,0000	0,0000	3,781	0,167	0,000	0,167	26,151	100,0	12	9	12	9
5,0-7,5	0,2092	0,0288	0,1804	0,1804	0,0000	0,0000	4,511	0,288	0,000	0,288	22,370	100,0	12	9	12	9
2,5-5,0	0,2563	0,0443	0,2120	0,2120	0,0000	0,0000	8,268	0,443	0,008	0,443	17,859	100,0	7	9	12	9
0,0-2,5	0,3091	0,0632	0,2459	0,2459	0,0000	0,0000	9,591	0,632	0,000	0,632	9,591	100,0	7	9	12	9

1 = Serraria; 6 = aglomerado; 7 = laminado; 8 = compensado; 9 = biomassa;
 10 = energia; 11 = postes; 12 = serraria.

correspondentes a cada estágio e à solução ótima global.

Conforme o Quadro 7, o maior valor máximo acumulado foi obtido no estágio 48 (U\$36,218), que corresponde a 24,0 m de altura no tronco, tendo sido avaliados 50 estágios. O comprimento útil do tronco foi de 24,0 m, isto é, $L = kz*n = 0,5*48 = 24$ m. O valor 0,5 foi obtido pela rotina MDC, correspondendo ao máximo divisor comum dos comprimentos de toras, especificados no Quadro 6.

De maneira lógica, foi perdido 0,5 m no topo do tronco. Se uma tora de 2,0 m, para aglomerado, fosse obtida exatamente no topo da árvore, o retorno total acumulado seria de U\$31,875, e 0,5 m seria perdido na base do tronco. Então, haveria uma perda de U\$4,343(36,218 - 31,875) se a última tora fosse tomada entre os estágios 46 e 50.

É fácil perceber que qualquer outra combinação de toras implicaria um retorno menor do que U\$36,218.

O retorno correspondente à casca foi obtido admitindo um preço de U\$10,0/m³ de casca. Contudo, neste exemplo (produção de toras), o único resíduo é a casca.

Cabe ressaltar, ainda, que não há sobreposição de limites de diâmetro, ou seja, de 4,0 a 15,0 cm para aglomerado, de 15,0 a 30,0 cm para serraria e > 30 cm para laminado. Caso estes limites sejam alterados, a conversão do tronco em toras poderia ser diferente; isto será analisado nos estudos de caso, nos itens subseqüentes.

Deve também ser observado que não foram consideradas as alternativas de: conversão das toras e o correspondente valor dos produtos finais; otimização do corte na serraria; e quantificação dos resíduos e de serragem, com retorno pelo

uso dos resíduos. Essas alternativas também serão analisadas nos estudos de caso, pois, aqui, o objetivo foi apenas verificar a lógica e a consistência do modelo desenvolvido, considerando, inicialmente, o seu primeiro nível.

Uma verificação também foi feita para processamento de toras em serraria (níveis 2 e 3 do modelo). Para isto, foram considerados oito produtos diferentes, conforme relacionados no Quadro 9, assumindo o processamento de uma tora de 2,4 m de comprimento, com 50,0 cm de diâmetro na menor seção, e assumindo, ainda, uma espessura inicial de corte de 4,0 mm, nos níveis 2 e 3 do modelo.

QUADRO 9 - Espessura, Largura e Comprimento dos Produtos Alternativos da Serraria

Produto	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (m)
01	25	75	2,40
02	25	100	2,40
03	25	125	2,40
04	25	150	2,40
05	40	75	2,40
06	40	100	2,40
07	40	125	2,40
08	40	150	2,40

Como o objetivo, aqui, foi avaliar os níveis 2 e 3 do modelo, o "taper" da tora não foi considerado, tendo sido analisado, portanto, o rendimento na seção correspondente ao menor diâmetro da tora (50,0 cm). A otimização foi feita com base no volume de madeira recuperada e, portanto, poderia ter sido feita com base no valor dos produtos, relacionados no Quadro 9.

Os resultados ótimos obtidos em cada estágio nos níveis 2 e 3 do modelo são apresentados no Quadro 10, sendo que a estrutura ótima obtida foi ilustrada pela Figura 11. Conforme o Quadro 10, foram avaliados 440 estágios no nível 2. Deve ser observado que este número de estágios foi obtido pelo MPDAMA, dividindo o diâmetro da tora pelo intervalo de estágio (kx), calculado pela rotina MDC, ou seja, $Nx = D/kx = 500/1 = 500$ estágios. O valor de $kx = 1,0$ mm, corresponde ao máximo divisor comum entre as espessuras dos produtos e a espessura de corte no nível 2, tendo sido determinado pela rotina MDC. Os 440 estágios avaliados se devem ao fato de, nos 47 primeiros estágios, não ter surgido face disponível suficiente para obter a menor largura especificada, o mesmo ocorrendo com os últimos 13 estágios.

No nível 3, o máximo divisor comum entre as larguras dos produtos foi calculado da mesma forma, resultando em $ky = 1,0$ mm. Entretanto, nesse nível, o número de estágios (Ny) é variável, isto é, para cada estágio no nível 2, existe um número diferente de estágios no nível 3; exatamente no centro da tora, este número de estágios seria $Ny = 500/1 = 500$ estágios. Portanto, o número máximo de estágios no nível 3 foi igual a 500.

O valor máximo obtido no nível 2 foi $0,3753 \text{ m}^3$ (Quadro 10). Este valor foi obtido no estágio 487, tendo sido definido um produto com espessura igual a 25 mm. Assim, descontando esta espessura mais a espessura de corte no nível 2, chega-se ao estágio relacionado 458. Neste estágio, foi definido um produto com espessura igual a 25 mm. Descontando, novamente, esta espessura mais a espessura de

QUADRO 10 - Resultados Ótimos em Cada Estágio, nos Níveis 2 e 3 do Modelo de Programação Dinâmica

Estágio no Nível 2	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área Recuperada (m ²)
STX:487	JX:25	JY:150	0,003750
STX:458	JX:25	JY:100	0,006250
STX:458	JX:25	JY:150	0,010000
STX:429	JX:40	JY: 75	0,013000
STX:429	JX:40	JY:125	0,018000
STX:429	JX:40	JY:125	0,023000
STX:385	JX:40	JY:150	0,029000
STX:385	JX:40	JY:125	0,034000
STX:385	JX:40	JY:125	0,039000
STX:341	JX:40	JY:150	0,045000
STX:341	JX:40	JY:150	0,051000
STX:341	JX:40	JY:150	0,057000
STX:297	JX:40	JY: 75	0,060000
STX:297	JX:40	JY:150	0,066000
STX:297	JX:40	JY:125	0,071000
STX:297	JX:40	JY:125	0,076000
STX:253	JX:40	JY: 75	0,079000
STX:253	JX:40	JY:150	0,085000
STX:253	JX:40	JY:125	0,090000
STX:253	JX:40	JY:150	0,095000
STX:209	JX:40	JY:150	0,101000
STX:209	JX:40	JY:150	0,107000
STX:209	JX:40	JY:150	0,113000
STX:165	JX:40	JY:125	0,118000
STX:165	JX:40	JY:150	0,124000
STX:165	JX:40	JY:150	0,130000
STX:121	JX:25	JY: 75	0,131875
STX:121	JX:25	JY:150	0,135625
STX:121	JX:25	JY:150	0,139375
STX: 92	JX:40	JY:150	0,145375
STX: 92	JX:40	JY:150	0,151375
STX: 48	JX:40	JY:125	0,156375

$$\begin{aligned} \text{Volume Máximo Recuperado} &= 0,156375 \times 2,4 \\ &= 0,3753 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Número de Estágios Ótimos} &= 487 - 48 + 1 \\ &= 440 \end{aligned}$$

corde, chega-se ao estágio 429. Este processo continua até o estágio 48, acumulando um retorno total de $0,3753 \text{ m}^3$ e obtendo a estrutura ilustrada no Quadro 11 e na Figura 39, com um rendimento de conversão igual a 79,6%.

É importante observar que qualquer outra combinação de produtos resultaria em um menor rendimento, o que pode ser comprovado ao interpretar os resultados do Quadro 10.

O rendimento de 79,6%, obtido nesse exemplo, foi calculado apenas com base na área da menor seção. Na prática, esse rendimento varia de acordo com o comprimento e com o "taper" da tora. As variações no comprimento e na forma da tora são, automaticamente, incorporadas pelo modelo de PD, e isto será demonstrado nos próximos itens.

5.3. Estudo de Casos e Pós-Otimização

Para alcançar uma melhor interpretação dos resultados, os estudos de caso e as análises sensitivas efetuados foram incluídos conjuntamente neste item.

Diversos estudos de caso e análises sensitivas poderiam ser propostos, porém, procurou-se exemplificar as situações mais frequentes em conversão de árvores em toras e, ou, em produtos. Ao todo, foram analisados seis estudos de caso, com objetivos definidos *a priori*, para exemplificar as aplicações do modelo desenvolvido. Assim, não houve a preocupação em utilizar dados reais de custo e de preço; procurou-se, entretanto, utilizar valores compatíveis entre si.

QUADRO 11 - Produtos Obtidos do Processamento de uma Tora de 50,0 cm de Diâmetro na sua Menor Seção, Considerando os Produtos Alternativos Apresentados no Quadro 9 e uma Espessura de Corte de 4,0 mm nos Níveis 2 e 3 do Modelo de PD

Volume s/Casca	Volume Recuperado	Rendimento	Estrutura
0,3786 m ³	0,2210 m ³	58,4%	25 x 150
			25 x 100 25 x 150
			40 x 75 40 x 125 40 x 125
			40 x 150 40 x 125 40 x 125
			40 x 150 40 x 150 40 x 150
			40 x 75 40 x 150 40 x 125 40 x 125
			40 x 75 40 x 150 40 x 125 40 x 125
			40 x 150 40 x 150 40 x 150
			40 x 125 40 x 150 40 x 150
			40 x 75 25 x 150 25 x 150
			40 x 150 40 x 150
			40 x 125

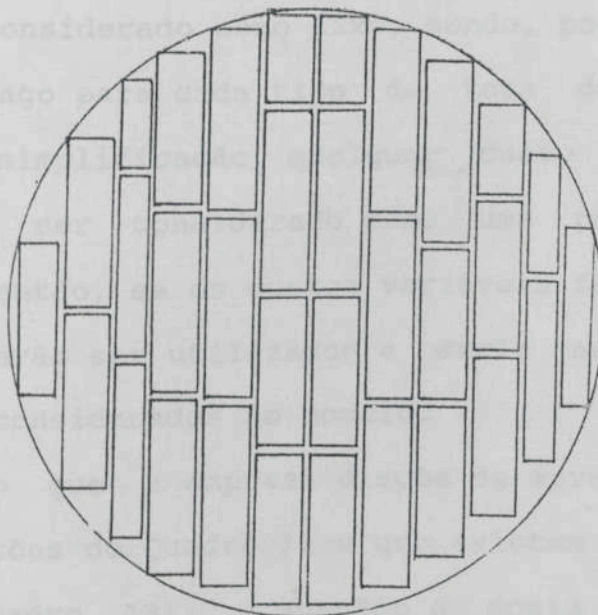


FIGURA 39 - Estrutura Ótima para Processamento de uma Tora com 50,0 cm na sua Menor Seção, Considerando os Produtos Alternativos Apresentados no Quadro 9 e uma Espessura de Corte de 4,0 mm nos Níveis 2 e 3 do Modelo de Programação Dinâmica.

5.3.1. Estudo de Caso Número 1: Conversão de Troncos em Toras para Diferentes Usos

Aqui, considerou-se o caso mais simples, em que uma empresa produz e vende toras para diferentes finalidades. Entende-se que a venda será feita de acordo com a demanda e com os preços pagos pelas toras. Admite-se, ainda, que qualquer quantidade e tipo de tora produzida será comercializada, isto é, que existe demanda e não há restrição de quantidade. Admite-se, ainda, que o transporte das toras é de responsabilidade do comprador.

Nesse exemplo, os custos variáveis são aqueles relacionados com o corte e o transporte das toras até o pátio da empresa vendedora. Entretanto, é razoável assumir, como custo, o custo médio de exploração e de transporte, que, neste caso, é considerado como fixo; sendo, portanto, somente o preço pago para cada tipo de tora comercializada. Apesar desta simplificação, qualquer custo variável que existir poderá ser considerado como uma penalidade, no modelo de PD; então, se os custos variáveis forem conhecidos, eles poderão ser utilizados e serão automaticamente incorporados e considerados no modelo.

Assumindo que a empresa dispõe de árvores com as duas especificações do Quadro 12 e que existem três tipos de compradores (Quadro 13), a questão é posta da seguinte maneira: como converter e comercializar as toras dessas árvores, para atingir um lucro máximo?

Como não existe sobreposição de diâmetros mínimos (Quadro 13), entende-se que a parte superior dos troncos

QUADRO 12 - Tipos de Árvores Disponíveis

Árvore	DAP (cm)	Altura Total (m)
1	33,5	28,0
2	42,2	28,3

QUADRO 13 - Especificações e Preços Pagos pelos Compradores de Madeira para Aglomerado, Serraria e Laminação

Especificações ou Características das Toras	Tipo de Comprador		
	Madeira para Aglomerado	Madeira para Serraria	Madeira para Laminação
Diâmetro Mínimo (cm)	4,0	15,0	30,0
Diâmetro Máximo (cm)	15,0	30,0	sem limite
Comprimento (m)	2,0	2,5	2,5
Preço Pago (U\$/m ³ s/c)	18,0	25,0	39,0

* Retorno adicional pelo uso da casca = U\$10,0/m³.

será convertida em aglomerado e, quando possível, as toras para laminação serão obtidas na parte inferior (base) das árvores. Porém, havendo sobreposição de diâmetros, essa lógica pode não ocorrer; tudo dependerá dos preços e das especificações. Os resultados obtidos com o emprego do MPDAMA foram apresentados no Quadro 14. Neste e nas demais saídas do programa, "Posição o tronco" refere-se à posição em que as toras foram obtidas; assim, por exemplo, o resultado 0,0 - 2,5 significa que uma tora foi obtida entre as

QUADRO 14 - Resultados Obtidos ao Utilizar os Dados dos Quadros 12 e 13

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 38,0 cm										Altura Total = 25,5 m		Comprimento Utilizável = 24,1 m			
Posição no Tronco (M-M)	Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado	Resíduo	Serragem	Madeira	Retorno (US\$)			Retorno no Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos				
								Casca	Resíduo	Serragem			Mad. Cas. Res. Ser.	Mad. Cas. Res. Ser.			
24,0-26,0	0,0273	0,0077	0,0196	0,0196	0,0000	0,0000	0,353	0,077	0,000	0,000	0,077	27,862	100,0	6	12	6	12
22,0-24,0	0,0309	0,0042	0,0267	0,0267	0,0000	0,0000	0,480	0,042	0,000	0,000	0,042	27,509	100,0	6	12	6	12
20,0-22,0	0,0364	0,0019	0,0345	0,0345	0,0000	0,0000	0,621	0,019	0,000	0,000	0,019	27,029	100,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0554	0,0000	0,0000	1,384	0,010	0,000	0,000	0,010	26,408	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0704	0,0000	0,0000	1,759	0,014	0,000	0,000	0,014	25,024	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0869	0,0000	0,0000	2,172	0,040	0,000	0,000	0,040	23,265	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,1049	0,0000	0,0000	2,624	0,088	0,000	0,000	0,088	21,093	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,1245	0,0000	0,0000	3,113	0,158	0,000	0,000	0,158	18,469	100,0	8	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,1457	0,0000	0,0000	3,641	0,250	0,000	0,000	0,250	15,356	100,0	8	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,1683	0,0000	0,0000	4,208	0,364	0,000	0,000	0,364	11,715	100,0	8	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1925	0,0000	0,0000	7,507	0,501	0,000	0,000	0,501	7,507	100,0	7	12	6	12
Número da Árvore = 2		Diâmetro a 1,30 m = 42,2 cm										Altura Total = 28,3 m		Comprimento Utilizável = 26,5 m			
24,5-26,5	0,0428	0,0129	0,0299	0,0299	0,0000	0,0000	0,539	0,129	0,000	0,000	0,129	54,917	100,0	6	12	6	12
22,5-24,5	0,0481	0,0073	0,0409	0,0409	0,0000	0,0000	0,735	0,073	0,000	0,000	0,073	54,378	100,0	6	12	6	12
20,0-22,5	0,0724	0,0040	0,0683	0,0683	0,0000	0,0000	1,709	0,040	0,000	0,000	0,040	53,643	100,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0911	0,0015	0,0897	0,0897	0,0000	0,0000	2,242	0,015	0,000	0,000	0,015	51,934	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,1157	0,0023	0,1134	0,1134	0,0000	0,0000	2,835	0,023	0,000	0,000	0,023	49,692	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,1461	0,0066	0,1395	0,1395	0,0000	0,0000	3,488	0,066	0,000	0,000	0,066	46,857	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1823	0,0144	0,1680	0,1680	0,0000	0,0000	4,200	0,144	0,000	0,000	0,144	43,369	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,2244	0,0255	0,1988	0,1988	0,0000	0,0000	7,755	0,255	0,000	0,000	0,255	39,170	100,0	7	12	6	12
5,0-7,5	0,2722	0,0401	0,2321	0,2321	0,0000	0,0000	9,051	0,401	0,000	0,000	0,401	31,415	100,0	7	12	6	12
2,5-5,0	0,3259	0,0582	0,2677	0,2677	0,0000	0,0000	10,441	0,582	0,000	0,000	0,582	22,363	100,0	7	12	6	12
0,0-2,5	0,3853	0,0796	0,3057	0,3057	0,0000	0,0000	11,923	0,796	0,000	0,000	0,796	11,923	100,0	7	12	6	12

6 = Aglomerado; 7 = laminado; 8 = serraria; 12 = outros.

alturas 0,0 e 2,5 m do tronco, a partir de sua base.

Os custos de implantação, manutenção, arraste, carregamento, descarregamento, recebimento e conferição foram considerados como fixos para qualquer tipo de tora produzida.

A título de exemplo, se o preço de $1,0 \text{ m}^3$ de madeira para aglomerado for alterado de U\$18,0 para U\$25,0, verifica-se haver apenas um aumento no retorno total acumulado, com uma mesma estrutura de processamento, ou de conversão, conforme resultados do Quadro 15.

Supondo, ainda, que o comprador resolvesse pagar U\$22,0 por $1,0 \text{ m}^3$ de madeira para aglomerado, U\$28,0 por $1,0 \text{ m}^3$ de madeira para serraria e apenas U\$27,0 por $1,0 \text{ m}^3$ de madeira para laminação, a nova estrutura de processamento seria conforme apresentado no Quadro 16. Verifica-se que, neste caso, a quantidade de madeira da árvore vendida para serraria passaria de $0,7906 \text{ m}^3$ (Quadro 15) para $0,9486 \text{ m}^3$ (Quadro 16).

Outras simulações poderiam ser propostas, alterando os diâmetros mínimos e máximos para cada uso, alterando os comprimentos das toras ou, ainda, excluindo ou incluindo novos usos para a madeira, tais como: madeira para postes, para energia, estacas para construção civil, dentre outros.

QUADRO 15 - Estrutura de Processamento, ao Aumentar o Preço da Madeira para Serraria de U\$18,00 para U\$24,00/m³

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 38,0 cm				Altura Total = 26,0 m				Comprimento Utilizável = 26,0 m							
Posição no Tronco (M-M)	Tora C/C	Volume (m ³)			Retorno (U\$)				Retorno Acumulado (U\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos						
		Tora S/C	Recuperado	Resíduo	Serragem	Ma-deira	Casca	Resíduo			Serragem	Mad.	Cas.	Res.	Ser.		
24,0-26,0	0,0273	0,0077	0,0196	0,0196	0,0000	0,0000	0,491	0,077	0,000	0,000	0,077	28,428	100,0	6	12	6	12
22,0-24,0	0,0309	0,0042	0,0267	0,0267	0,0000	0,0000	0,667	0,042	0,000	0,000	0,042	27,973	100,0	6	12	6	12
20,0-22,0	0,0364	0,0019	0,0345	0,0345	0,0000	0,0000	0,862	0,019	0,000	0,000	0,019	27,271	100,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0554	0,0000	0,0000	1,384	0,010	0,000	0,000	0,010	26,408	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0704	0,0000	0,0000	1,759	0,014	0,000	0,000	0,014	25,024	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0869	0,0000	0,0000	2,172	0,040	0,000	0,000	0,040	23,265	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,1049	0,0000	0,0000	2,624	0,088	0,000	0,000	0,088	21,093	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,1245	0,0000	0,0000	3,113	0,158	0,000	0,000	0,158	18,469	100,0	8	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,1457	0,0000	0,0000	3,641	0,250	0,000	0,000	0,250	15,356	100,0	8	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,1683	0,0000	0,0000	4,208	0,364	0,000	0,000	0,364	11,715	100,0	8	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1925	0,0000	0,0000	7,507	0,501	0,000	0,000	0,501	7,507	100,0	7	12	6	12
Número da Árvore = 2		Diâmetro a 1,30 m = 42,2 cm				Altura Total = 28,3 m				Comprimento Utilizável = 26,5 m							
24,5-26,5	0,0428	0,0129	0,0299	0,0299	0,0000	0,0000	0,749	0,129	0,000	0,000	0,129	55,413	100,0	6	12	6	12
22,5-24,5	0,0481	0,0073	0,0409	0,0409	0,0000	0,0000	1,021	0,073	0,000	0,000	0,073	54,664	100,0	6	12	6	12
20,0-22,5	0,0724	0,0040	0,0683	0,0683	0,0000	0,0000	1,709	0,040	0,000	0,000	0,040	53,643	100,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0911	0,0015	0,0897	0,0897	0,0000	0,0000	2,242	0,015	0,000	0,000	0,015	51,934	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,1157	0,0023	0,1134	0,1134	0,0000	0,0000	2,835	0,023	0,000	0,000	0,023	49,692	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,1461	0,0066	0,1395	0,1395	0,0000	0,0000	3,488	0,066	0,000	0,000	0,066	46,857	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1823	0,0144	0,1680	0,1680	0,0000	0,0000	4,200	0,144	0,000	0,000	0,144	43,369	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,2244	0,0255	0,1988	0,1988	0,0000	0,0000	7,755	0,255	0,000	0,000	0,255	39,170	100,0	7	12	6	12
5,0-7,5	0,2722	0,0401	0,2321	0,2321	0,0000	0,0000	9,051	0,401	0,000	0,000	0,401	31,415	100,0	7	12	6	12
2,5-5,0	0,3259	0,0582	0,2677	0,2677	0,0000	0,0000	10,441	0,582	0,000	0,000	0,582	22,363	100,0	7	12	6	12
0,0-2,5	0,3853	0,0796	0,3057	0,3057	0,0000	0,0000	11,923	0,796	0,000	0,000	0,796	11,923	100,0	7	12	6	12

6 = Aglomerado; 7 = laminado; 8 = serraria; 12 = outros.

QUADRO 16 - Nova Estrutura de Processamento, ao Considerar os Preços de U\$22,0, U\$25,00 e U\$27,0/m³ de Madeira para Aglomerado, Serraria e Laminado, Respectivamente

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 33,5 cm				Altura Total = 28,0 m				Comprimento Utilizável = 26,0 m					
Posição no Tronco (M-M)	Tora C/C	Volume (m ³)		Retorno (US\$)		Retorno (US\$)	Total p/Res.	Retorno Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos					
		Tora S/C	Recuperado	Casca	Resíduo					Mad. Cas.	Rqs. Ser.				
24,0-26,0	0,0273	0,0077	0,0196	0,0000	0,0000	0,432	0,077	0,000	0,077	28,336	100,0	6	12	6	12
22,0-24,0	0,0309	0,0042	0,0267	0,0000	0,0000	0,587	0,042	0,000	0,042	27,904	100,0	6	12	6	12
20,0-22,0	0,0364	0,0019	0,0345	0,0000	0,0000	0,759	0,019	0,000	0,019	27,318	100,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0000	0,0000	1,550	0,010	0,000	0,010	26,559	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0000	0,0000	1,970	0,014	0,000	0,014	25,009	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0000	0,0000	2,433	0,040	0,000	0,040	23,038	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,0000	0,0000	2,928	0,088	0,000	0,088	20,606	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,0000	0,0000	3,487	0,158	0,000	0,158	17,667	100,0	8	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,0000	0,0000	4,078	0,250	0,000	0,250	14,181	100,0	8	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,0000	0,0000	4,713	0,364	0,000	0,364	10,102	100,0	8	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,0000	0,0000	5,390	0,501	0,000	0,501	5,390	100,0	8	12	6	12
Número da Árvore = 2		Diâmetro a 1,30 m = 42,2 cm				Altura Total = 28,3 m				Comprimento Utilizável = 26,5 m					
24,5-26,5	0,0428	0,0129	0,0299	0,0000	0,0000	0,659	0,129	0,000	0,129	45,889	100,0	6	12	6	12
22,5-24,5	0,0481	0,0073	0,0409	0,0000	0,0000	0,899	0,073	0,000	0,073	45,231	100,0	6	12	6	12
20,0-22,5	0,0724	0,0040	0,0683	0,0000	0,0000	1,914	0,040	0,000	0,040	44,332	100,0	8	12	6	12
17,5-20,0	0,0911	0,0015	0,0897	0,0000	0,0000	2,511	0,015	0,000	0,015	42,418	100,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,1157	0,0023	0,1134	0,0000	0,0000	3,175	0,023	0,000	0,023	39,907	100,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,1461	0,0066	0,1395	0,0000	0,0000	3,906	0,066	0,000	0,066	36,731	100,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1823	0,0144	0,1680	0,0000	0,0000	4,704	0,144	0,000	0,144	32,825	100,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,2244	0,0255	0,1988	0,0000	0,0000	5,568	0,255	0,000	0,255	28,122	100,0	8	12	6	12
5,0-7,5	0,2722	0,0401	0,2321	0,0000	0,0000	6,498	0,401	0,000	0,401	22,554	100,0	8	12	6	12
2,5-5,0	0,3259	0,0582	0,2677	0,0000	0,0000	7,496	0,582	0,000	0,582	16,056	100,0	8	12	6	12
0,0-2,5	0,3853	0,0796	0,3057	0,0000	0,0000	8,560	0,796	0,000	0,796	8,560	100,0	8	12	6	12

6 = Aglomerado; 7 = laminado; 8 = serraria; 12 = outros.

5.3.2. Estudo de Caso Número 2: Conversão de Troncos em Produtos, Considerando o Uso de Fatores de Conversão

Considerou-se como exemplo, neste segundo estudo de caso, uma empresa verticalizada, constituída de uma serraria, uma fábrica de aglomerados e uma de laminados. Para efeito de simulação, foram consideradas duas árvores, com as mesmas dimensões do exemplo anterior (estudo de caso número 1), em que os fatores de conversão utilizados foram 0,38; 0,65; e 0,60, para serraria, aglomerado e laminação, respectivamente. Ao contrário do exemplo anterior, aqui não foi considerado o valor dos produtos, e sim o valor do metro cúbico de madeira convertida. Assim, por exemplo, um produto com dimensões de 25 x 100 x 2500 mm terá o mesmo valor de um produto com as dimensões de 20 x 125 x 2500 mm, o que pode não ser real, em termos práticos. Será considerado, então, o preço médio do m³ de madeira serrada, de madeira convertida em aglomerado e de madeira convertida em laminado.

Embora os custos de processamento de toras em laminados, aglomerados e em madeira serrada devam ser diferentes, estes custos diferenciados não foram considerados neste exemplo, pela falta de dados adequados. Porém, o modelo e o programa MPDAMA admitem custos diferenciados.

Os resultados dessa simulação de alternativas são apresentados no Quadro 17. As estruturas de processamento coincidiram com as mesmas dos dois casos anteriores (Quadros 14 e 15). Isto ocorreu em virtude dos limites de diâmetros mínimos; contudo, o retorno, possivelmente mais real, foi

QUADRO 17 - Estrutura de Processamento, ao Considerar o Uso dos Fatores de Conversão Iguais a 0,38; 0,65; e 0,60, para Aglomerado, Serraria e Laminado, Respectivamente

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 33,5 cm				Altura Total = 28,0 m				Comprimento Utilizável = 26,0 m							
Posição no Tronco (M-M)	Volume (m ³)	Retorno (US\$)				Resíduo	Serragem	Total p/Res.	Retorno Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos						
		Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado						Resíduo	Casca	Res. Ser.				
24,0-26,0	0,0273	0,0077	0,0196	0,0128	0,0069	0,0000	0,230	0,077	0,000	0,000	0,077	12,632	65,0	6	12	6	12
22,0-24,0	0,0309	0,0042	0,0267	0,0173	0,0093	0,0000	0,312	0,042	0,000	0,000	0,042	12,402	65,0	6	12	6	12
20,0-22,0	0,0364	0,0019	0,0345	0,0224	0,0121	0,0000	0,404	0,019	0,000	0,000	0,019	12,090	65,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0210	0,0000	0,0000	0,526	0,010	0,000	0,000	0,010	11,687	38,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0267	0,0436	0,0000	0,668	0,014	0,000	0,000	0,014	11,161	38,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0330	0,0539	0,0000	0,825	0,040	0,000	0,000	0,040	10,492	38,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,0399	0,0651	0,0000	0,977	0,088	0,000	0,000	0,088	9,667	38,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,0473	0,0772	0,0000	1,183	0,158	0,000	0,000	0,158	8,670	38,0	8	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,0553	0,0903	0,0000	1,384	0,250	0,000	0,000	0,250	7,487	38,0	8	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,0640	0,1043	0,0000	1,599	0,364	0,000	0,000	0,364	6,103	38,0	8	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1155	0,0770	0,0000	4,504	0,501	0,000	0,000	0,501	4,504	60,0	7	12	6	12
Número da Árvore = 2		Diâmetro a 1,30 m = 42,2 cm				Altura Total = 28,3 m				Comprimento Utilizável = 26,5 m							
24,5-26,5	0,0428	0,0129	0,0299	0,0195	0,0105	0,0000	0,350	0,129	0,000	0,000	0,129	29,830	65,0	6	12	6	12
22,5-24,5	0,0481	0,0073	0,0409	0,0266	0,0143	0,0000	0,478	0,073	0,000	0,000	0,073	29,480	65,0	6	12	6	12
20,0-22,5	0,0724	0,0040	0,0683	0,0260	0,0424	0,0000	0,649	0,040	0,000	0,000	0,040	29,002	38,0	8	12	6	12
17,5-20,0	0,0911	0,0015	0,0897	0,0341	0,0556	0,0000	0,852	0,015	0,000	0,000	0,015	28,352	38,0	8	12	6	12
15,0-17,5	0,1157	0,0023	0,1134	0,0431	0,0703	0,0000	1,077	0,023	0,000	0,000	0,023	27,500	38,0	8	12	6	12
12,5-15,0	0,1461	0,0066	0,1395	0,0530	0,0865	0,0000	1,325	0,066	0,000	0,000	0,066	26,423	38,0	8	12	6	12
10,0-12,5	0,1823	0,0144	0,1680	0,0638	0,1042	0,0000	1,596	0,144	0,000	0,000	0,144	25,098	38,0	8	12	6	12
7,5-10,0	0,2244	0,0255	0,1988	0,1193	0,0795	0,0000	4,653	0,255	0,000	0,000	0,255	23,502	60,0	7	12	6	12
5,0-7,5	0,2722	0,0401	0,2321	0,1393	0,0928	0,0000	5,431	0,401	0,000	0,000	0,401	18,849	60,0	7	12	6	12
2,5-5,0	0,3259	0,0582	0,2677	0,1606	0,1071	0,0000	6,264	0,582	0,000	0,000	0,582	13,418	60,0	7	12	6	12
0,0-2,5	0,3853	0,0796	0,3057	0,1834	0,1223	0,0000	7,154	0,796	0,000	0,000	0,796	7,154	60,0	7	12	6	12

6 = Aglomerado; 7 = laminado; 8 = serraria; 12 = outros.

diferente, em virtude do uso de fatores de conversão. Neste exemplo, nenhum valor foi atribuído aos resíduos, sendo, por isto, o retorno pelo uso dos mesmos igual a zero.

Uma variação neste exemplo foi feita com a mudança do fator de conversão em serraria, de 0,38 para 0,55, a título de especulação, por mudança de tecnologia. Qual será o ganho com esta mudança, e qual será a nova estrutura de processamento? Para responder sobre esta mudança, serão necessárias análises operacionais e econômicas. Uma análise que pode ajudar consiste em definir a nova estrutura para conversão e comparar os ganhos obtidos. Para isto, bastaria processar novamente o MPDAMA, o que, para o exemplo em foco, forneceria os resultados contidos no Quadro 18.

Verifica-se que, com a alteração do fator para serraria, o retorno acumulado passou de 12,632 e 29,830 (árvores 1 e 2, do Quadro 17) para 15,845 e 32,290 (árvores 1 e 2, do Quadro 18), com uma mesma estrutura de processamento. Novamente, nenhum valor foi atribuído para os resíduos.

5.3.3. Estudo de Caso Número 3: Estrutura Ótima de Corte na Serraria, Visando o Lucro Máximo, Considerando Toras de Diferentes Diâmetros e Comprimentos

Neste tipo de análise, é exigido uma lista de produtos comercializáveis, com suas respectivas dimensões, além do preço e do custo de processamento.

Os custos diferenciados para cada estrutura de corte na serraria constituem uma informação muito difícil de ser

QUADRO 18 - Nova Estrutura de Processamento, após as Alterações do Fator de Conversão da Serraria de 0,38 para 0,55

Posição no Tronco (M-M)	Diâmetro a 1,30 m = 33,5 cm				Diâmetro a 1,30 m = 42,2 cm				Diâmetro a 1,30 m = 51,5 cm				Comprimento Utilizável = 26,0 m			
	Volume (m ³)				Volume (m ³)				Volume (m ³)				Retorno (US\$)			
	Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado	Resíduo	Serragem	Madeira	Casca	Resíduo	Serragem	Total	Retorno	Acumulado	Rendimento (%)	Usos Atribuídos	
24,0-26,0	0,0273	0,0077	0,0196	0,0128	0,0069	0,0000	0,230	0,077	0,000	0,000	0,077	15,845	65,0	6 12 6 12		
22,0-24,0	0,0309	0,0042	0,0267	0,0173	0,0093	0,0000	0,312	0,042	0,000	0,000	0,042	15,615	65,0	6 12 6 12		
20,0-22,0	0,0364	0,0019	0,0345	0,0224	0,0121	0,0000	0,404	0,019	0,000	0,000	0,019	15,303	65,0	6 12 6 12		
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0305	0,0249	0,0000	0,761	0,010	0,000	0,000	0,010	14,900	55,0	8 12 6 12		
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0387	0,0317	0,0000	0,967	0,014	0,000	0,000	0,014	14,139	55,0	8 12 6 12		
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0479	0,0391	0,0000	1,195	0,040	0,000	0,000	0,040	13,171	55,0	8 12 6 12		
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,0577	0,0472	0,0000	1,443	0,088	0,000	0,000	0,088	11,976	55,0	8 12 6 12		
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,0865	0,0560	0,0000	1,712	0,158	0,000	0,000	0,158	10,534	55,0	8 12 6 12		
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,0801	0,0655	0,0000	2,003	0,250	0,000	0,000	0,250	8,821	55,0	8 12 6 12		
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,0926	0,0757	0,0000	2,314	0,364	0,000	0,000	0,364	6,819	55,0	8 12 6 12		
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1155	0,0770	0,0000	4,504	0,501	0,000	0,000	0,501	4,504	60,0	7 12 6 12		
Número da Árvore = 1																
Número da Árvore = 2																
24,5-26,5	0,0428	0,0129	0,0299	0,0195	0,0105	0,0000	0,350	0,129	0,000	0,000	0,129	32,290	65,0	6 12 6 12		
22,5-24,5	0,0481	0,0073	0,0409	0,0266	0,0143	0,0000	0,478	0,073	0,000	0,000	0,073	31,940	65,0	6 12 6 12		
20,0-22,5	0,0724	0,0040	0,0683	0,0376	0,0308	0,0000	0,940	0,040	0,000	0,000	0,040	31,462	55,0	8 12 6 12		
17,5-20,0	0,0911	0,0015	0,0897	0,0493	0,0404	0,0000	1,233	0,015	0,000	0,000	0,015	30,522	55,0	8 12 6 12		
15,0-17,5	0,1157	0,0023	0,1134	0,0624	0,0510	0,0000	1,559	0,023	0,000	0,000	0,023	29,289	55,0	8 12 6 12		
12,5-15,0	0,1461	0,0066	0,1395	0,0767	0,0628	0,0000	1,918	0,066	0,000	0,000	0,066	27,730	55,0	8 12 6 12		
10,0-12,5	0,1823	0,0144	0,1680	0,0924	0,0756	0,0000	2,310	0,144	0,000	0,000	0,144	25,812	55,0	8 12 6 12		
7,5-10,0	0,2244	0,0255	0,1988	0,1193	0,0795	0,0000	4,653	0,255	0,000	0,000	0,255	23,502	60,0	7 12 6 12		
5,0-7,5	0,2722	0,0401	0,2321	0,1393	0,0928	0,0000	5,431	0,401	0,000	0,000	0,401	18,849	60,0	7 12 6 12		
2,5-5,0	0,3259	0,0582	0,2677	0,1606	0,1071	0,0000	6,264	0,582	0,000	0,000	0,582	13,418	60,0	7 12 6 12		
0,0-2,5	0,3853	0,0796	0,3057	0,1834	0,1223	0,0000	7,154	0,796	0,000	0,000	0,796	7,154	60,0	7 12 6 12		

6 = Aglomerado; 7 = laminado; 8 = serraria; 12 = outros.

precisada. É possível controlar essa falta de informação, considerando, como custo de processamento, o custo médio na serraria. Este custo está relacionado com o porte da tora e com o equipamento utilizado. Esta relação pode ser avaliada via análise de regressão, conforme discutido no item 4.

Deve ser enfatizado que, uma vez que as informações de custo médio ou custos diferenciados estejam disponíveis, elas sempre devem ser implementadas junto ao modelo, entrando como uma penalidade nas relações de recorrência.

Considerando que esses custos mencionados não foram obtidos de forma satisfatória, neste estudo de caso, eles não foram considerados, e sim apenas os preços dos produtos da serraria.

Os preços para os diferentes produtos poderiam ser obtidos no mercado madeireiro nacional. Neste e nos demais estudos de caso, não houve intenção de utilizar estimativas precisas de preços e de custos, mas, sim, de analisar a eficiência e a flexibilidade do modelo desenvolvido, se aplicado a diferentes situações. Assim, para este estudo de caso, optou-se por utilizar parte de uma lista de produtos e os respectivos preços, citada por GEERTS (1984), sem a preocupação de sua compatibilidade com os valores atuais de mercado no Brasil. Para este estudo de caso, foram considerados apenas os 15 primeiros produtos da referida lista, contida no Quadro 19.

No processamento de uma tora em serraria, geralmente a estrutura é definida pelo valor do menor diâmetro da mesma, sendo o rendimento de conversão calculado com base na área seccional deste menor diâmetro. Verifica-se, porém,

QUADRO 19 - Lista de Produtos Utilizados no Estudo de Caso Número 3

Produto	Espessura	Largura	Preço (U\$)
01	25	75	0,221
02	25	100	0,295
03	40	125	0,369
04	40	75	0,354
05	40	100	0,472
06	40	125	0,590
07	40	140	0,745
08	40	150	0,798
09	40	160	0,947
10	40	170	1,006
11	40	180	1,066
12	40	190	1,125
13	40	200	1,184
14	40	225	1,386
15	40	250	1,600
16	40	300	1,956
17	50	75	0,443
18	50	100	0,590
19	50	125	0,738
20	50	140	0,931
21	50	150	0,998
22	50	160	1,184
23	50	170	1,258
24	50	180	1,332
25	50	190	1,406
26	50	200	1,480
27	50	225	1,733
28	50	250	2,000
29	50	300	2,445
30	75	75	0,664
31	75	100	0,885
32	75	125	1,106
33	75	140	1,397
34	75	150	1,496
35	75	160	1,776
36	75	170	1,887
37	75	180	1,998
38	75	190	2,109
39	75	200	2,220
40	75	225	2,599
41	75	250	3,000
42	75	300	3,668

FONTE: GEERTS (1984).

que o rendimento numa serraria é também muito relacionado com o comprimento da tora. Isto implica, então, que o "taper" da tora deve ser considerado, ao analisar a sua conversão em serraria. Para exemplificar este estudo de caso, foram utilizadas toras provenientes de uma árvore cubada rigorosamente, da qual uma parte foi esquematizada na Figura 40.

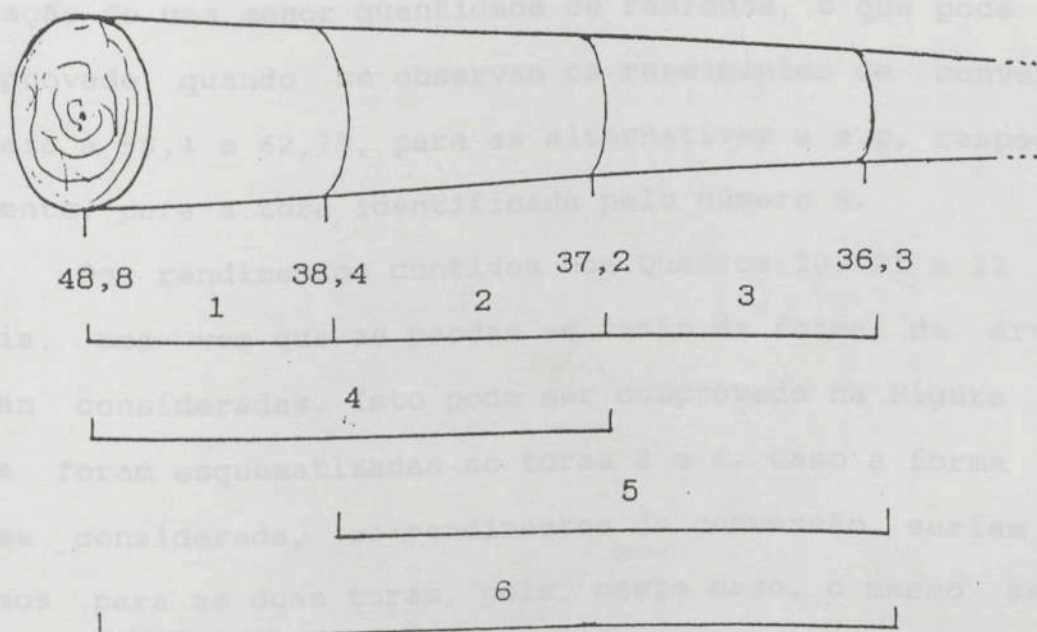


FIGURA 40 - Parte Inferior de uma Árvore Cubada Rigorosamente em Seções de 2,5 m.

Além das dimensões de toras indicadas na Figura 40, foi utilizado o conjunto dos 15 primeiros produtos da lista do Quadro 19, no modelo de programação dinâmica, com o propósito de definir uma política ótima de conversão. Foram analisadas, ainda, as seguintes alternativas:

- a) espessura de corte de 4,0 mm para os níveis 2 e 3;
- b) espessura de corte de 4,0 mm no nível 2 e de 2,0 mm no nível 3;
- c) espessura de corte de 2,0 mm nos níveis 2 e 3.

Os resultados obtidos, utilizando apenas os 15 primeiros itens da lista, foram relacionados nos Quadros 20, 21 e 22, respectivamente, para as alternativas a, b e c.

Conforme esperado, à medida que a espessura de corte diminui, o rendimento de conversão aumenta. Isto implica a geração de uma menor quantidade de resíduos, o que pode ser comprovado quando se observam os rendimentos de conversão iguais a 58,4 e 62,7%, para as alternativas a e c, respectivamente, para a tora identificada pelo número 6.

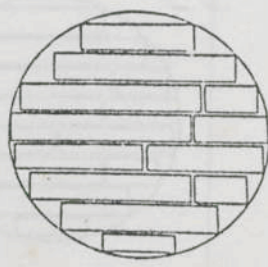
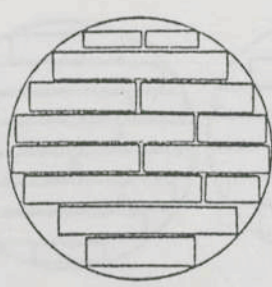
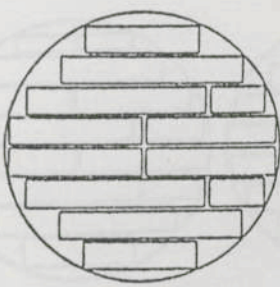
Os rendimentos contidos nos Quadros 20, 21 e 22 são reais, uma vez que as perdas em razão da forma da árvore foram consideradas. Isto pode ser comprovado na Figura 41, onde foram esquematizadas as toras 2 e 4. Caso a forma não fosse considerada, os rendimentos de conversão seriam os mesmos para as duas toras, pois, neste caso, o mesmo seria computado a partir da ponta com menor área seccional, que seria a mesma para as duas toras.

5.3.4. Estudo de Caso Número 4: Estrutura Ótima de Corte na Serraria, Visando a Maximização do Volume de Madeira Recuperado

Neste caso, o objetivo é recuperar o máximo de madeira, a partir de uma lista de produtos, das dimensões das toras e das espessuras de corte nos níveis 2 e 3.

QUADRO 20 - Resultados Obtidos ao Considerar os 15 Primeiros Produtos da Lista do Quadro 19 e as Especificações deste Estudo de Caso Número 3, para uma Espessura de Corte de 4,0 mm, nos Níveis 2 e 3 do Modelo de Pro-gramação Dinâmica

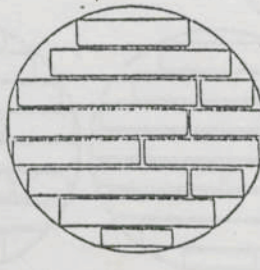
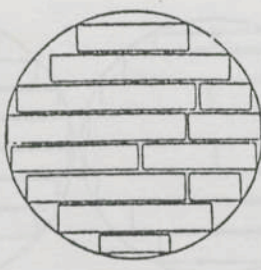
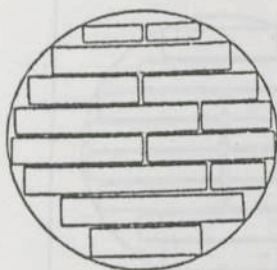
Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUP	Rend.	Estrutura
1	2,5	48,8	38,4	0,3738	0,2210	58,4	40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 190 x 2500
2	2,5	38,4	37,2	0,2806	0,2114	75,3	40 x 150 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							25 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
3	2,5	37,2	36,3	0,2652	0,2012	75,9	25 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 180 x 2500



Continua ...

QUADRO 20, Cont.

Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUP	Rend.	Estrutura
4	2,5	48,8	37,2	0,3697	0,2114	57,2	40 x 150 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
25 x 75 x 2500							
5	2,5	38,4	36,3	0,2741	0,2012	73,4	40 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 160 x 2500							
6	2,5	48,8	36,3	0,3632	0,2012	55,4	25 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 160 x 2500							



40 x 250 x 2500
40 x 75 x 2500
40 x 180 x 2500
40 x 100 x 2500
40 x 160 x 2500
40 x 250 x 2500
25 x 75 x 2500

40 x 225 x 2500
40 x 180 x 2500
40 x 250 x 2500
40 x 250 x 2500

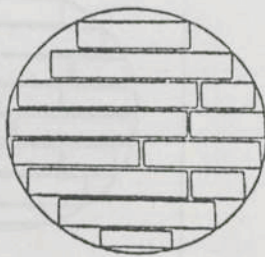
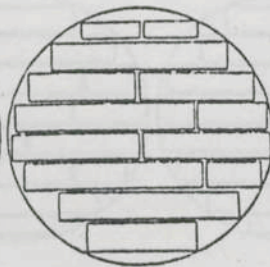
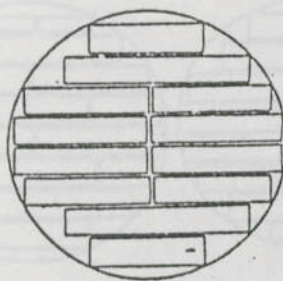
40 x 225 x 2500
40 x 180 x 2500
40 x 250 x 2500
40 x 250 x 2500

25 x 100 x 2500
40 x 225 x 2500
40 x 75 x 2500
40 x 160 x 2500
40 x 100 x 2500
40 x 75 x 2500
40 x 250 x 2500
40 x 160 x 2500

Continuar...

QUADRO 21 - Resultados Obtidos ao Considerar os 15 Primeiros Produtos da Lista do Quadro 19 e as Especificações deste Estudo de Caso Número 3, para Espessuras de Corte de 4,0 e 2,0 mm, nos Níveis 2 e 3 do Modelo de Programação Dinâmica

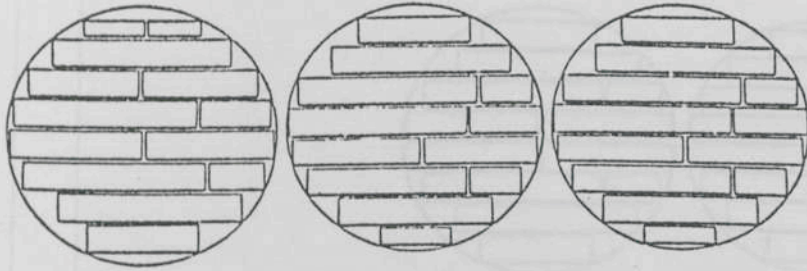
Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUP	Rend.	Estrutura
1	2,5	48,8	38,4	0,3786	0,2240	59,2	40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
2	2,5	38,4	37,2	0,2806	0,2109	75,1	40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
3	2,5	37,2	36,3	0,2652	0,2012	75,9	25 x 75 x 2500
							25 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500



Continua ...

QUADRO 21, Cont.

Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUPI	Rend.	Estrutura
4	2,5	48,8	37,2	0,3697	0,2109	57,0	40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
25 x 75 x 2500							
5	2,5	38,4	36,3	0,2741	0,2012	73,4	40 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 160 x 2500							
6	2,5	48,8	36,3	0,3632	0,2012	55,4	25 x 100 x 2500
							40 x 225 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 160 x 2500							



40 x 250 x 2500
 40 x 180 x 2500
 40 x 250 x 2500
 40 x 160 x 2500
 40 x 250 x 2500
 25 x 75 x 2500

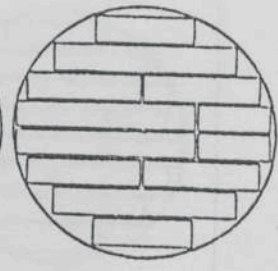
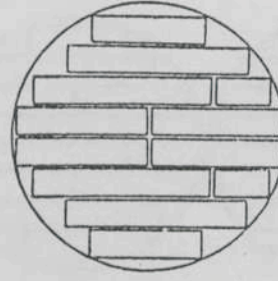
40 x 225 x 2500
 40 x 180 x 2500
 40 x 250 x 2500
 40 x 250 x 2500

40 x 225 x 2500
 40 x 180 x 2500
 40 x 250 x 2500
 40 x 250 x 2500

25 x 100 x 2500
 40 x 225 x 2500
 40 x 75 x 2500
 40 x 160 x 2500
 40 x 100 x 2500
 40 x 75 x 2500
 40 x 250 x 2500
 40 x 160 x 2500

QUADRO 22 - Resultados Obtidos ao Considerar os 15 Primeiros Produtos da Lista do Quadro 19 e as Especificações deste Estudo de Caso Número 3, para Espessura de Corte de 2,0 mm, nos Níveis 2 e 3 do Modelo de Programação Dinâmica

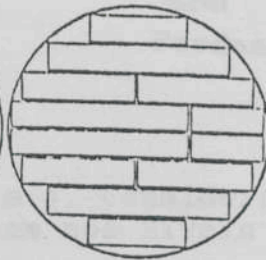
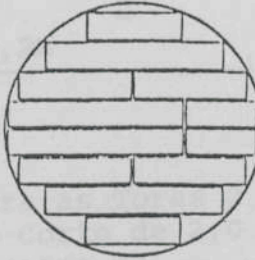
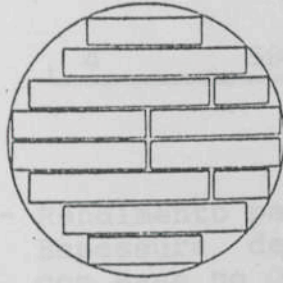
Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUPI	Rend.	Estrutura
1	2,5	48,8	38,4	0,3786	0,2372	62,7	25 x 75 x 2500
							40 x 200 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 190 x 2500
2	2,5	38,4	37,2	0,2806	0,2190	78,0	40 x 225 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 190 x 2500
							40 x 190 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
3	2,5	37,2	36,3	0,2652	0,2120	79,9	40 x 250 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 140 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 140 x 2500
							40 x 140 x 2500



Continua ...

QUADRO 22, Cont.

Tora	LZ	DSC2	DSC1	VTSC	VRECUP	Rend.	Estrutura
4	2,5	48,8	37,2	0,3697	0,2190	59,2	40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 75 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 180 x 2500
							40 x 75 x 2500
40 x 250 x 2500							
25 x 160 x 2500							
5	2,5	38,4	36,3	0,2741	0,2120	77,3	40 x 140 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 140 x 2500							
6	2,5	48,8	36,3	0,3632	0,2120	58,4	40 x 140 x 2500
							40 x 250 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 100 x 2500
							40 x 160 x 2500
							40 x 250 x 2500
40 x 140 x 2500							



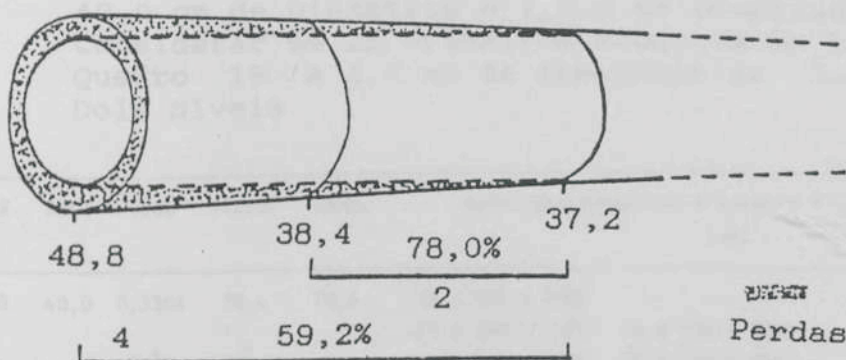


FIGURA 41 - Rendimento para as Toras 2 e 4, Considerando uma Espessura de Corte de 2,0 mm nos Níveis 2 e 3, com Base no Quadro 27.

Considere as seguintes especificações:

a) uma tora, sem defeitos internos, de 2,5 m de comprimento, com diâmetros nas extremidades de 40,0 e 43,0 cm;

b) os 15 primeiros produtos especificados no Quadro 19;

c) uma espessura de corte de 2,0 mm nos níveis 2 e 3.

Com essas especificações, o volume total recuperado seria de $0,2655 \text{ m}^3$, distribuído entre os produtos relacionados no Quadro 23.

Ainda nesse caso, é importante analisar o efeito de uma alteração na lista de produtos da serraria. Considere, para isto, os oito produtos seguintes:

Espessura (mm)	25	25	25	25	40	40	40	40
Largura (mm)	75	100	125	150	75	100	125	150

QUADRO 23 - Estrutura Ótima de Corte para uma Tora de 43,0 e 40,0 cm de Diâmetros e 2,5 m de Comprimento, ao Considerar os 15 Primeiros Produtos da Lista do Quadro 19 e 2,0 mm de Espessura de Corte nos Dois Níveis

Tora	LZ	DSC2	DSC1	VIS	VRECUP	Rend.	Estrutura=Espessura X Largura X Comprimento (mm)		
1	2,5	43,0	40,0	0,3386	78,4	78,4	25 X 125 X 2500		
							25 X 100 X 2500	25 X 125 X 2500	
	(m)	(cm)	(cm)	(m ³)	(m ³)	(%)	40 X 140 X 2500	40 X 150 X 2500	
							25 X 100 X 2500	25 X 125 X 2500	25 X 125 X 2500
							40 X 125 X 2500	40 X 250 X 2500	
							40 X 170 X 2500	40 X 225 X 2500	
							40 X 180 X 2500	40 X 200 X 2500	
							25 X 75 X 2500	25 X 100 X 2500	25 X 125 X 2500
							25 X 125 X 2500	25 X 125 X 2500	
							25 X 75 X 2500	25 X 75 X 2500	

Verifica-se, como resultado para esses oito produtos alternativos e adotando as mesmas espessuras de corte nos níveis 2 e 3, que a quantidade e o tipo de produtos especificados antecipadamente influem na estrutura ótima de processamento, no volume recuperado e no rendimento de conversão. A nova estrutura de processamento obtida é apresentada no Quadro 24.

É fácil perceber que qualquer análise para verificar o efeito de alterações nos valores dos produtos sobre a estrutura de corte e sobre o retorno econômico pode ser idealizada para este e para os demais estudos de caso.

QUADRO 24 - Resultados Obtidos para uma Tora de 43,0 e 40,0 cm de Diâmetro e 2,5 m de Comprimento, ao Considerar os Oito Protudos Relacionados Anteriormente

Tora	LZ	DSC2	DSC1	VISC	VRECUP	Rend.	Estrutura=Espessura X Largura X Comprimento (mm)
1	2,5	43,0	40,0	0,3386	0,2606	77,0	25 X 150 X 2500
	(m)	(cm)	(cm)	(m ³)	(m ³)	(%)	25 X 75 X 2500 25 X 150 X 2500
							40 X 150 X 2500 40 X 150 X 2500
							25 X 75 X 2500 25 X 125 X 2500 25 X 150 X 2500
							40 X 75 X 2500 40 X 150 X 2500 40 X 150 X 2500
							40 X 75 X 2500 40 X 150 X 2500 40 X 150 X 2500
							40 X 75 X 2500 40 X 150 X 2500 40 X 150 X 2500
							25 X 75 X 2500 25 X 125 X 2500 25 X 150 X 2500
							25 X 150 X 2500 25 X 150 X 2500
							25 X 125 X 2500 25 X 150 X 2500
							40 X 150 X 2500

5.3.5. Estudo de Caso Número 5: Conversão de Todo o Tronco na Serraria

O objetivo, neste caso, é maximizar o volume recuperado, ou então o retorno econômico, a partir da conversão de um tronco em toras, e destas em madeira serrada. Como exemplo, considere aqui o primeiro caso, de maximizar o volume recuperado, lembrando que, em ambos os casos, o modelo e o programa são os mesmos, alterando apenas a variável a ser maximizada.

Sejam as seguintes especificações:

- árvore com 33,5 cm de DAP, 28,0 m de altura total e 0,30 m para o toco remanescente;
- os dez primeiros produtos listados no Quadro 19, considerando, entretanto, o preço médio de U\$25,0/m³ de madeira serrada;

c) espessura de corte de 4,0 mm nos níveis 2 e 3;

d) diâmetro mínimo para processamento igual a 15,0 cm.

Observe que o comprimento útil do tronco não é conhecido; ele será obtido em função do "taper", e o próprio MPDAMA estima o comprimento comercial para $d = 15,0$ cm, que será convertido na serraria. Também os diâmetros ao longo do tronco serão estimados por meio da equação de taper, pelo MPDAMA, de acordo com a idade da árvore.

Os resultados, neste caso, foram apresentados nos Quadros 25 e 26. É fácil perceber que existe uma correlação positiva entre o diâmetro da tora e o volume de madeira recuperado. Com relação ao comprimento da tora, uma conclusão semelhante não é totalmente válida.

O rendimento acumulado em toda a árvore pode ser computado, ao somar os volumes recuperados e dividindo o resultado pelo somatório dos volumes sem casca de todas as toras. Ao efetuar estes cálculos, tem-se:

$$\text{Rendimento Acumulado} = 100(0,6376/0,9486) = 67,2\%$$

Isto significa que 67,2% do volume utilizável foi transformado em madeira serrada e que 32,8% foi transformado em resíduos. Além disto, $0,4725 \text{ m}^3$ de casca seria gerado no pátio da serraria, ficando no campo apenas o volume de galhos e folhas e a parte não comercializável do tronco ($d < 15$ cm). Os retornos por tora individual e acumulados para a árvore foram obtidos, considerando o preço de U\$25,0 por m^3 de madeira serrada.

Para efeito de cálculos, no Brasil, é comum adotar 0,30 m de altura para o toco remanescente, após o abate da

QUADRO 25 - Resultados Obtidos ao Considerar as Especificações deste Estudo de Caso Número 5

Número da Árvore = 1		Diâmetro a 1,30 m = 38,0 cm				Altura Total = 25,5 m				Comprimento Utilizável = 24,1 m							
Posição no Tronco (M-M)	Tora C/C	Volume (m ³)			Retorno (US\$)				Retorno no Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos						
		Tora S/C	Casca	Recuperado	Resíduo	Casca	Resíduo	Serragem			Total p/Res.	Mad.	Cas. Res. Ser.				
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0319	0,0157	0,0000	0,798	0,010	0,157	0,078	0,088	15,941	57,6	1	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0432	0,0181	0,0000	1,080	0,014	0,181	0,090	0,104	15,143	61,4	1	12	6	12
12,5-15,0	0,1908	0,0040	0,0869	0,0550	0,0213	0,0106	1,375	0,040	0,213	0,106	0,146	14,063	63,3	1	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,0682	0,0245	0,0122	1,705	0,088	0,245	0,122	0,210	12,688	65,0	1	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,0825	0,0280	0,0140	2,062	0,158	0,280	0,140	0,298	10,983	66,2	1	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,1002	0,0303	0,0151	2,505	0,250	0,303	0,151	0,401	8,921	68,8	1	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,1183	0,0333	0,0166	2,958	0,364	0,333	0,166	0,531	6,416	70,3	1	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1383	0,0361	0,0180	3,458	0,501	0,361	0,180	0,681	3,458	71,9	1	12	6	12
											0,9486		0,6375				

1 = Serraria; 6 = aglomerado; 7 = laminado; 8 = compensado; 9 = biomassa; 10 = energia; 11 = postes; 12 = serraria.

QUADRO 26 - Estruturas Ótimas de Corte para as Toras Identificadas no Quadro 25, para Uso em Serraria

Posição no Tronco	Produtos: Estrutura Ótima de Corte		
	(Espessura mm X Largura mm X Comprimento mm)		
17,50 - 20,00	25 X 75 X 2500		
	25 X 125 X 2500		
	25 X 75 X 2500	25 x	75 x 2500
	40 X 100 X 2500		
15,00 - 17,50	25 X 75 X 2500		
	40 X 150 X 2500		
	40 X 160 X 2500		
	40 X 75 X 2500		
12,50 - 15,00	40 X 100 X 2500		
	40 X 75 X 2500	40 X	100 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	100 X 2500
	40 X 100 X 2500		
10,00 - 12,50	25 X 75 X 2500		
	40 X 160 X 2500		
	40 X 75 X 2500	40 X	125 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	100 X 2500
	40 X 100 X 2500		
7,50 - 10,00	40 X 100 X 2500		
	40 X 75 X 2500	40 X	125 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	150 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	125 X 2500
	40 X 100 X 2500		
5,00 - 7,50	25 X 75 X 2500		
	40 X 75 X 2500	40 X	100 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	160 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	170 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	125 X 2500
	40 X 100 X 2500		
2,50 - 5,00	25 X 125 X 2500		
	40 X 75 X 2500	40 X	125 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X	150 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X	170 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	160 X 2500
	40 X 150 X 2500		
0,00 - 2,50	25 X 125 X 2500	25 X	125 X 2500
	25 X 75 X 2500	40 X	150 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X	150 X 2500
	40 X 140 X 2500	40 X	140 X 2500
	40 X 140 X 2500	40 X	140 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X	160 X 2500
	40 X 125 X 2500		

árvore. Qualquer variação nessa altura, por motivo silvicultural, por exemplo, pode alterar o rendimento total de conversão da árvore em madeira serrada. O seguinte exemplo é ilustrativo: considere uma altura de 0,10 m para o toco remanescente para a mesma árvore analisada. Neste caso, o comprimento seria o mesmo, de 20,0 m, mas a nova solução teria como resultados os produtos listados nos Quadros 27 e 28. Observe que, ao mudar a altura do toco de 0,30 para 0,10 m, foi recuperado mais $0,0049 \text{ m}^3$ de madeira ($0,6425 - 0,6375$) e, ainda, que os tipos e as quantidades de produtos foram diferentes nos dois casos. Este ganho no volume recuperado, na prática, deve ser analisado sob os pontos de vista econômico e silvicultural. Considerando o preço de $\text{U\$}25,00/\text{m}^3$ de madeira serrada, o retorno acumulado, para esta madeira, passaria de 15,94 (Quadro 25) para 16,04 (Quadro 27).

É importante ressaltar que as análises poderiam ser feitas, conforme já exemplificado, com base no valor dos produtos, e, neste caso, a solução e o rendimento poderiam ser diferentes. O usuário é quem deve decidir se a análise deve ser feita com base no volume ou no retorno econômico.

5.3.6. Estudo de Caso Número 6: Conversão de uma Árvore em Compensados, Aglomerados e em Madeira Serrada

Este exemplo praticamente engloba os cinco primeiros estudos de casos. Aqui, o tronco da árvore será transformado em toras, e estas em produtos finais. Dois casos podem ser

QUADRO 27 - Resultados Obtidos ao Alterar a Altura do Toco Remanescente de 0,30 para 0,10 cm, Mantendo as Demais Condições Especificações deste Estudo de Caso

Posição no Tronco (M-M)	Volume (m ³)				Retorno (US\$)				Retorno Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos							
	Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado	Resíduo	Serragem	Madeira	Resíduo			Serragem	Total p/Res.	Mad.	Cas. Res. Ser.				
17,5-20,0	0,0574	0,0009	0,0565	0,0325	0,0160	0,0080	0,812	0,009	0,160	0,080	0,089	16,043	57,5	1	12	6	12	
15,0-17,5	0,0731	0,0015	0,0716	0,0435	0,0188	0,0094	1,088	0,015	0,188	0,094	0,109	15,231	60,7	1	12	6	12	
12,5-15,0	0,1925	0,0043	0,0883	0,0550	0,0222	0,0111	1,375	0,043	0,222	0,111	0,153	14,143	62,0	1	12	6	12	
10,0-12,5	0,1157	0,0092	0,1065	0,0682	0,0255	0,0127	1,705	0,092	0,255	0,127	0,220	12,768	64,1	1	12	6	12	
7,5-10,0	0,1426	0,0164	0,1262	0,0835	0,0285	0,0142	2,088	0,164	0,285	0,142	0,306	11,063	66,2	1	12	6	12	
5,0-7,5	0,1732	0,0258	0,1474	0,1012	0,0308	0,0154	2,530	0,258	0,308	0,154	0,412	8,975	68,6	1	12	6	12	
2,5-5,0	0,2076	0,0374	0,1702	0,1198	0,0336	0,0168	2,975	0,374	0,336	0,168	0,542	6,445	70,4	1	12	6	12	
0,0-2,5	0,2458	0,0513	0,1945	0,1388	0,0371	0,0185	3,470	0,513	0,371	0,185	0,698	3,470	71,4	1	12	6	12	
												0,9612	0,6425					

1 = Serraria; 6 = aglomerado; 7 = laminado; 8 = compensado; 9 = biomassa;
10 = energia; 11 = postes; 12 = serraria.

QUADRO 28 - Estruturas Ótimas de Corte para as Toras Identificadas no Quadro 27, para Uso em Serraria

Posição no Tronco (m-m)	Produtos : Estrutura Ótima de Corte = Espessura X Largura X Comprimento (mm)	
17,50 - 20,00	40 X 100 X 2500	
	40 X 150 X 2500	
	40 X 75 X 2500	
15,00 - 17,50	25 X 75 X 2500	
	40 X 150 X 2500	
	40 X 160 X 2500	
	25 X 125 X 2500	
12,50 - 15,00	40 X 100 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 100 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 100 X 2500
	40 X 100 X 2500	
	40 X 100 X 2500	
10,00 - 12,50	25 X 75 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	25 X 75 X 2500	25 X 125 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 125 X 2500
	40 X 140 X 2500	
7,50 - 10,00	40 X 100 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 125 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 160 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 125 X 2500
	40 X 100 X 2500	
5,00 - 7,50	25 X 75 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 100 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X 140 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X 150 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 125 X 2500
	40 X 100 X 2500	
2,50 - 5,00	25 X 125 X 2500	
	25 X 75 X 2500	25 X 125 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 170 X 2500
	40 X 125 X 2500	40 X 150 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X 150 X 2500
	25 X 75 X 2500	25 X 125 X 2500
	40 X 100 X 2500	
	40 X 100 X 2500	
0,00 - 2,50	25 X 125 X 2500	
	25 X 75 X 2500	25 X 125 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X 150 X 2500
	40 X 140 X 2500	40 X 150 X 2500
	40 X 125 X 2500	40 X 160 X 2500
	40 X 75 X 2500	25 X 160 X 2500
	40 X 125 X 2500	

novamente analisados: (a) maximização do valor e (b) maximização do volume recuperado. Certamente, o primeiro é mais importante e, portanto, será seguido. Então, o objetivo é a maximização do retorno financeiro pelo uso de todo o tronco, considerando três possibilidades para uso da madeira: laminação, produção de aglomerados e produção de madeira serrada.

Sejam, inicialmente, as seguintes especificações:

- a) uma árvore de 33,5 cm de DAP, 29,5 m de altura total e 0,30 m para o toco remanescente;
- b) aglomerado: fator de conversão igual a 0,52; preço igual a U\$17,0/m³; diâmetros mínimo e máximo iguais a 4,0 e 20,0 cm, respectivamente;
- c) serraria: os dez primeiros produtos listados no Quadro 19 e os diâmetros mínimo e máximo de 15,0 e 35,0 cm, respectivamente;
- d) laminado: fator de conversão igual a 0,60; preço igual a U\$39,0/m³, e diâmetros mínimo e máximo de 30,0 e 100,0 cm, respectivamente;
- e) espessura de corte iguais a 4,0 mm, nos níveis 2 e 3;
- f) preço de U\$10,0/m³ de casca, para uso como biomassa;
- g) preço igual a U\$17,0/m³ de cavacos da serraria, para uso em aglomerado;
- h) preço igual a U\$10,0/m³ de serragem gerada na serraria, para uso como energia;
- i) percentual de resíduos da serraria (cavacos + serragem), transformados em serragem, igual a 34%.

Os resultados obtidos, admitindo essas especificações relacionadas, estão nos Quadros 29 e 30.

Mesmo nesse exemplo, a conversão de toras em madeira serrada poderia ser analisada com base no volume de madeira recuperado.

Neste estudo de caso, admitiu-se que 34% da madeira que não é transformada em produtos na serraria foi transformada em serragem. Esta pressuposição pode ser feita com base em estudos de recuperação de produtos, ou com base em observações feitas na própria serraria. Entretanto, esta pressuposição pode ser eliminada, quando algumas relações matemáticas são utilizadas; neste caso, seria calculado um volume aproximado de serragem gerado.

É importante ressaltar que todas as análises sensitivas feitas nos exemplos anteriores poderiam ser aqui repetidas, como, por exemplo, as alterações nos diâmetros mínimo e máximo para cada uso, a alteração na altura do toco, as alterações nas especificações da lista de produtos e as alterações nos comprimentos dos produtos; e que, neste exemplo, ainda foram considerados os preços dos produtos da serraria, e não o preço do m^3 de madeira serrada.

5.4. Aplicações do Modelo de Programação Dinâmica aos Dados da Análise Estrutural

Os resultados da análise estrutural foram utilizados para alimentar o modelo de programação dinâmica. Para efeito de exemplificação, foram consideradas as árvores resultantes dos desbastes efetuados no Distrito de Sertãozinho. O número

QUADRO 29 - Resultados Obtidos com as Especificações do Estudo de Caso Número 6

Posição no	Volume (m ³)				Diâmetro a 1,30 m = 38,0 cm	Altura Total = 25,5 m	Comprimento Utilizável = 24,1 m	Retorno (US\$)	Retorno no Acumulado (US\$)	Rendimento (%)	Usos Atribuídos						
	Tora C/C	Casca	Tora S/C	Recuperado							Resíduo*	Serragem	Ma-deira	Casca	Resíduo*	Serragem	Total p/Res.
25,0-27,5	0,0327	0,0131	0,0196	0,0102	0,0094	0,0000	0,173	0,131	0,094	0,000	0,131	32,037	52,0	6	12	6	12
22,5-25,0	0,0368	0,0068	0,0300	0,0156	0,0144	0,0000	0,265	0,068	0,144	0,000	0,068	31,864	52,0	6	12	6	12
20,0-22,5	0,0447	0,0028	0,0419	0,0218	0,0201	0,0000	0,370	0,028	0,201	0,000	0,028	31,599	51,0	6	12	6	12
17,5-20,0	0,0563	0,0010	0,0554	0,0315	0,0159	0,0079	1,571	0,010	0,159	0,079	0,089	31,229	56,9	1	12	6	12
15,0-17,5	0,0717	0,0014	0,0704	0,0432	0,0181	0,0090	2,320	0,014	0,181	0,090	0,104	29,658	61,4	1	12	6	12
12,5-15,0	0,0908	0,0040	0,0869	0,0532	0,0224	0,0112	2,983	0,040	0,224	0,112	0,152	27,338	61,3	1	12	6	12
10,0-12,5	0,1137	0,0088	0,1049	0,0651	0,0266	0,0133	3,682	0,088	0,266	0,133	0,220	24,355	62,0	1	12	6	12
7,5-10,0	0,1403	0,0158	0,1245	0,0807	0,0292	0,0146	4,372	0,158	0,292	0,146	0,304	20,673	64,8	1	12	6	12
5,0-7,5	0,1707	0,0250	0,1457	0,0967	0,0327	0,0163	5,366	0,250	0,327	0,163	0,413	16,301	66,4	1	12	6	12
2,5-5,0	0,2047	0,0364	0,1683	0,1147	0,0358	0,0179	6,431	0,364	0,358	0,179	0,543	10,935	68,1	1	12	6	12
0,0-2,5	0,2426	0,0501	0,1925	0,1155	0,0770	0,0000	4,504	0,501	0,770	0,000	0,501	4,504	60,0	7	12	6	12

1 = Serraria; 6 = aglomerado; 7 = laminado; 8 = compensado; 9 = biomassa;
 10 = energia; 11 = postes; 12 = serraria; * casca + serragem.

QUADRO 30 - Estruturas Ótimas de Corte para as Toras Identificadas no Quadro 29, para Uso em Serraria

Posição no Tronco (m-m)	Produtos: Estrutura Ótima de Corte = Espessura X Largura X Comprimento (mm)	
17,50 - 20,00	40 X 100 X 2500	
	40 X 140 X 2500	
	40 X 75 X 2500	
15,00 - 17,50	25 X 75 X 2500	
	40 X 150 X 2500	
	40 X 160 X 2500	
	40 X 75 X 2500	
12,50 - 15,00	25 X 100 X 2500	
	40 X 160 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 140 X 2500	
10,00 - 12,50	25 X 100 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 125 X 2500	
7,50 - 10,00	25 X 75 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 140 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 140 X 2500
	40 X 160 X 2500	
5,00 - 7,50	25 X 75 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 160 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 170 X 2500
	40 X 170 X 2500	
	40 X 100 X 2500	
2,50 - 5,00	25 X 75 X 2500	
	40 X 170 X 2500	
	40 X 75 X 2500	40 X 170 X 2500
	40 X 100 X 2500	40 X 170 X 2500
	40 X 75 X 2500	40 X 170 X 2500
	40 X 170 X 2500	

médio de árvores desbastadas por classe de diâmetro constam no Quadro 31.

QUADRO 31 - Número Médio de Árvores Desbastadas, por Classe de Diâmetro, no Distrito Sertãozinho

Classe de Diâmetro (cm)	Número do Desbaste				
	1	2	3	4	5
5,0	46	0	0	0	0
7,0	53	0	0	0	0
9,0	86	20	0	0	0
11,0	107	68	0	0	0
13,0	162	103	26	0	0
15,0	107	128	46	0	0
17,0	42	132	92	33	0
19,0	22	75	58	58	0
21,0	4	35	42	85	20
23,0	7	20	45	38	67
25,0	0	0	8	3	65
27,0	0	0	0	3	102
29,0	0	0	0	0	12

Cada uma das análises efetuadas nos seis estudos de caso poderia ser aplicadas aos dados do Quadro 31. Entretanto, apenas a situação seguinte foi analisada: converter os troncos das árvores desbastadas em madeira serrada, utilizando as especificações do Quadro 32.

O critério de otimização seguido foi o da maximização do volume recuperado de madeira. Para os dados referentes às árvores desbastadas, em cada um dos cinco desbastes, foi ajustado, ainda, o modelo $H_t = e^{\beta_1 + \beta_2 D} + \epsilon$, visando estimar a altura total por classe de diâmetro. Do ajuste desse modelo, foram obtidas seis equações, uma para cada desbaste, além de uma equação geral. A equação geral foi

QUADRO 32 - Especificações Utilizadas para Análise dos Dados da Análise Estrutural*

Espessura (mm)	25	25	25	25	40	40	40	40
Largura (mm)	75	100	125	150	75	100	125	150
Comprimento (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

* Diâmetro mínimo para serraria = 10,0 cm; diâmetro máximo livre; espessura de corte nos níveis 2 e 3 igual a 4 mm.

escolhida por proporcionar estimativas mais precisas, independente do desbaste; a equação resultante foi:

$$Ht = \exp(2,0576048 + 0,0450292D), \text{ com } r_{yy} = 0,830.$$

Os resultados foram obtidos pelo emprego do modelo de programação dinâmica, via MPDAMA, para classes de diâmetro que variavam de 13,0 a 29,0 cm. É importante observar que, nos desbastes 1 e 2, foram colhidas árvores com DAP's entre 5 e 11 cm (Quadro 31); entretanto, tais árvores não serviram para a produção de madeira serrada, em virtude da restrição imposta de diâmetro mínimo igual a 10,0 cm. Obviamente, tais árvores seriam utilizadas, por exemplo, na produção de aglomerados.

Os resultados obtidos por classes de diâmetro foram utilizados em conjunto com as informações do IFC (Quadro 31), resultando nos valores otimizados por unidade de área. Estes resultados correspondem às quantidades máximas de produtos que poderiam ser obtidas das árvores desbastadas,

ao considerar as especificações definidas no Quadro 32. Ainda, como resultado do emprego do MPDAMA em nível de povoamento, utilizando árvores cortadas em cada desbaste, foram relacionados, no Quadro 34, os volumes em m^3 de madeira, com e sem casca, além do volume de madeira serrada e do rendimento de conversão (Quadro 33).

Uma aplicação mais realista deveria considerar todos os usos possíveis para a madeira, em cada desbaste, e, ainda, incluir o valor dos produtos como variável a ser maximizada, isto é, utilizar o critério de maximização do retorno econômico.

No exemplo discutido neste estudo de caso (número 6), o valor dos produtos não foi considerado, pelo fato de o mesmo não ser conhecido em todas as ocasiões. Contudo, na prática, esses valores certamente estariam disponíveis, e o usuário poderia utilizá-los no modelo.

Outra aplicação importante do modelo de programação dinâmica seria utilizá-lo para decidir sobre a validade de se realizar em desbastes. Como exemplo, considere a situação: Supondo existir uma demanda definida para cada tipo de produto relacionado no Quadro 32, em cada desbaste realizado, e que existem, também, restrições quanto f intensidade do desbaste, como definir o número de árvores a ser desbastado em cada ocasião, em cada classe de diâmetro, de maneira a atender f demanda, porém, convertendo as árvores numa base ótima?

A conversão numa base ótima, para qualquer tipo de árvore, é automaticamente definida pelo modelo, o que gera um banco de dados do tipo: Uma árvore de 40,0 cm de

QUADRO 33 - Número de Produtos Obtidos, por Hectare, a partir das Árvores Colhidas em cada um dos Cinco Desbastes, no Distrito de Sertãozinho

Dimensão dos Produtos (mm)	Classe de DAP (cm)	Número de Produtos/Desbaste/ha				
		1	2	3	4	5
25x75x2500	13	162	103	26		
	15	214	256	92		
	17	126	396	276	99	
	19	66	225	174	174	
	21	16	140	168	340	80
	23	35	100	225	190	335
	25			40	15	325
	27				21	714
	29					96
	Total	619	1220	1001	839	1550
25x100x2500	15	107	128	46		
	17	42	132	92	33	
	19					
	21	4	35	42	85	20
	23	14	40	90	76	134
	25			48	18	390
	27				15	510
	29					84
	Total	167	335	318	227	1138
25x125x2500	19	22	75	58	58	
	21	20	175	210	425	100
	23	28	80	180	152	268
	25			32	12	260
	27				21	714
	29					36
	Total	70	330	480	668	1378
25x150x2500	21	4	35	42	85	20
	23	21	60	135	114	201
	25			32	12	260
	27				6	204
	29					24
	Total	25	95	209	217	709

Continua ...

QUADRO 33, Cont.

Dimensão dos Produtos (mm)	Classe de DAP (cm)	Número de Produtos/Desbaste/ha				
		1	2	3	4	5
40x75x2500	13	162	103	26		
	15	214	256	92		
	17	84	264	184	66	
	19	44	150	116	116	
	21	16	140	168	340	80
	23	28	80	180	152	268
	25			64	27	585
	27				24	816
	29					156
	Total	548	993	830	725	1905
40x100x2500	17	42	132	92	33	
	19	66	235	174	174	
	21					
	23	42	120	270	228	402
	25			32	12	260
	27				18	612
29					72	
	Total	150	487	568	465	1346
40x125x2500	17	42	132	92	33	
	19	22	75	58	58	
	21	4	35	42	85	20
	25			16	6	130
	27				12	408
	29					108
	Total	68	242	208	194	630
40x150x2500	19	22	75	58	58	
	21	4	35	42	85	20
	23	7	20	45	38	67
	25			8	3	65
	27				12	408
	29					108
	Total	33	130	153	196	668
Totais por Hectare		1	2	3	4	5
25x75x2500		619	1220	1001	839	1550
25x100x2500		167	335	318	227	1138
25x125x2500		70	330	480	668	1378
25x150x2500		25	95	209	217	709
40x75x2500		548	993	830	725	1905
40x100x2500		150	487	568	465	1346
40x125x2500		68	242	208	194	630
40x150x2500		33	130	153	196	668

QUADRO 34 - Volumes com Casca, sem Casca e de Madeira Serrada, Obtidos por Hectare, em cada Desbaste Realizado no Distrito Sertãozinho

Volume (m ³ /ha)	Número do Desbaste				
	1	2	3	4	5
Comercial com Casca ¹	49,67	88,68	76,51	64,49	125,55
Comercial sem Casca ²	34,57	66,27	60,71	54,38	109,87
de Madeira Serrada	11,68	28,57	29,19	28,06	77,43
Rendimento com Casca*	23,51	32,22	38,15	43,51	61,67
Rendimento sem Casca**	33,79	43,11	48,08	51,60	70,47

* Em relação a (1); ** em relação a (2).

Um modelo simples de programação linear poderia ser desenvolvido para determinar a quantidade ótima de árvores de diâmetro e 23,5 m de altura total, convertida numa base ótima, gera n_1 produtos do tipo 1, n_2 produtos do tipo 2, ... e n_p produtos do tipo p.

Estabelecendo restrições quanto à quantidade de produtos de cada tipo, para os quais existe uma demanda, juntamente com restrições silviculturais, um modelo simples de PL, ou mesmo de PD, pode ser desenvolvido para decidir sobre o seguinte problema: Quanto desbastar em cada classe de diâmetro, para atender f demanda, convertendo árvores de maneira ótima e, conseqüentemente, maximizando o retorno líquido pelo processamento das árvores?

Extensões dessa ordem no modelo compõem as futuras investigações, e, com a finalidade de ilustração, é apresentado, a seguir, um modelo simples de programação linear, para a situação analisada anteriormente. Neste

exemplo, estabeleceu-se um número máximo de árvores a serem desbastadas em cada classe de diâmetro, sendo que muitas outras restrições poderiam ser introduzidas.

Sejam:

Q_{ijk} = quantidade do produto i , obtido a partir de uma árvore com DAP j e altura total k ;

N_{jk} = número de árvores a serem desbastadas na classe de DAP j e de altura total k ;

b_i = quantidade desejada do produto i ;

QN_{jk} = número máximo de árvores com DAP j e altura total k que podem ser desbastadas por hectare;

P_i = preço do produto i .

Um modelo simples de programação linear poderia ser formulado da seguinte maneira:

$$\text{Máx } \sum N_{jk} Q_{ijk}$$

$$\text{s.a. } N_{jk} \leq b_{jk}$$

$$\sum N_{jk} Q_{ijk} \geq b_i$$

$$N_{jk} \geq 0, \text{ qualquer } j, k.$$

Futuras investigações deverão ser conduzidas, com o propósito de incorporar, no próprio modelo de programação dinâmica, restrições de demanda e restrições silviculturais, bem como visando incorporar o modelo de PD em sistemas de prognose da produção.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

A conversão de troncos em toras, e destas em madeira serrada, em aglomerados e em laminados e compensados, foi investigada neste estudo. O objetivo principal do trabalho foi desenvolver um modelo de programação dinâmica (PD) para otimização de multiprodutos da árvore. Outros objetivos foram: aplicar o modelo de PD a dados de inventário florestal e classificar a capacidade produtiva de povoamentos inventariados. Para isto, foram utilizados dados de um inventário florestal contínuo, realizado em povoamentos de **Pinus oocarpa**, provenientes de plantações situadas no Município de Agudos, Estado de São Paulo. Além dos dados do inventário, foram também utilizadas 1100 árvores-amostra, cubadas rigorosamente.

O estudo foi dividido em três etapas. Na primeira, os dados do IFC foram utilizados para efetuar uma análise estrutural dos povoamentos de **Pinus oocarpa** e para classificação de sua capacidade produtiva. Ainda nesta

etapa, os dados das árvores-amostra foram utilizados para o ajuste de equações volumétricas e de "taper". Na segunda, a programação dinâmica foi utilizada para desenvolver um modelo matemático, visando a otimização de multiprodutos de árvores individuais; este modelo foi posteriormente codificado e implementado em um programa denominado MPDAMA (Modelo de Programação Dinâmica para Avaliação de Multiprodutos de Árvores Individuais). Numa terceira etapa, alguns estudos de caso foram idealizados e resolvidos pelo emprego do MPDAMA. Além disto, o programa foi também utilizado para a otimização dos dados da análise estrutural desenvolvida na primeira etapa.

A partir da análise estrutural, foram obtidas as distribuições de frequência e de volume, por classes de idade e de diâmetro, para cada um dos desbastes realizados nos povoamentos. As equações de "taper" foram obtidas por classe de idade, o mesmo ocorrendo com as equações de volume. Foram obtidas, também, curvas de índices de locais, pelo emprego de dois métodos, isto é: a) método da curva-guia, empregando o modelo de Schumacher, e b) estabelecendo índices de locais preliminares e empregando a função monomolecular-exponencial para gerar as curvas. Os dois métodos proporcionaram resultados satisfatórios.

O modelo de programação dinâmica foi desenvolvido em três níveis, sendo que, no primeiro, analisou-se a conversão de troncos em toras e no segundo e terceiro níveis, analisou-se a conversão de toras em produtos, ou seja, em aglomerados, laminados e em madeira serrada. As relações de recorrência obtidas foram codificadas para o uso em computador.

De posse dos resultados da análise estrutural e do programa de computação, foram analisados os seguintes estudos de caso: conversão de troncos em toras, para diferentes usos; conversão de troncos em toras, com o emprego de fatores de conversão da madeira em produtos; conversão de toras em madeira serrada, visando o lucro máximo; conversão de toras em madeira serrada, visando a minimização de resíduos; conversão de troncos em serrarias; e conversão de árvores em madeira serrada, em aglomerados e em compensados. Finalmente, o programa foi utilizado para quantificar, numa base ótima, os multiprodutos das árvores desbastadas, sendo estas provenientes da análise estrutural efetuada em uma parte dos povoamentos inventariados. Dessa quantificação, verificou-se que o rendimento máximo de conversão das árvores desbastadas, em madeira serrada, ocorreu no último desbaste efetuado, quando as árvores atingiram o maior porte; esse rendimento em madeira serrada foi de 70,5%, em relação ao volume total sem casca por hectare. Por ocasião do primeiro desbaste, a uma idade aproximada de cinco anos, esse rendimento foi de 33,8%.

Algumas simulações foram efetuadas pela alteração das espessuras de corte nas serrarias, por alterações na lista de produtos disponíveis e pela manipulação dos fatores de conversão da madeira em produtos. Essas simulações foram efetuadas para troncos e toras de diferentes dimensões. O rendimento máximo, obtido ao converter toras em madeira serrada, foi de 79,6%, em relação ao volume total com casca da tora. Essas simulações permitiram analisar o efeito da forma e das dimensões de troncos e de toras no rendimento de

conversão. Os troncos e as toras com forma mais cilíndrica resultaram em maior rendimento.

Os resultados deste estudo permitiram concluir que:

- a) a implementação de modelos de programação dinâmica, destinados à otimização de multiprodutos, juntamente com a análise do crescimento e da produção dos povoamentos, permite aumentar, de forma significativa, o retorno pelo uso das florestas;
- b) os rendimentos de conversão de toras em madeira serrada podem ser elevados até próximo de 80%, pelo emprego do modelo desenvolvido, e mesmo que, na prática, haja uma redução neste valor, ele será muito superior àqueles geralmente obtidos nas serrarias de porte médio, no Brasil, que em geral não ultrapassam 40%, para toras de diâmetros acima de 30 cm;
- c) o modelo desenvolvido é aplicável a empresas verticalizadas que produzem laminados, compensados, aglomerados e madeira serrada, contudo, pode ser utilizado, também, para quantificação de outros produtos da madeira;
- d) ao otimizar a estrutura de corte na serraria, há de considerar, ainda, as necessidades de investimentos para mudanças nos equipamentos utilizados, no sentido de verificar a viabilidade das estruturas ótimas de corte definidas;
- e) a distribuição da produção em número de árvores e em volume, bruta, desbastada e remanescente, por classe de diâmetro, nos povoamentos inventariados, evidenciou um desbaste seletivo e mais ou menos constante em termos de intensidade e intervalos, com remoção de árvores de

diâmetro entre o mínimo e o máximo observados em cada ocasião;

f) a alternativa de classificação da capacidade produtiva, quando se estabelecem índices de locais preliminares, fornece estimativas precisas e consistentes, permitindo uma classificação precisa da capacidade produtiva;

g) no emprego do modelo de Schumacher, $\ln(Hd) = f(1/I^\alpha) + \epsilon$, deve-se investigar, preliminarmente, o valor de α , ou, então, ajustar o modelo na sua forma não-linear, incluindo este parâmetro; isto porque diferentes valores de α geram curvas de formas diferentes;

— h) o modelo de programação dinâmica desenvolvido neste estudo pode ser utilizado, com algumas adaptações, para definição da intensidade e do intervalo entre desbastes a serem efetuados nos povoamentos, de forma a maximizar o rendimento total das empresas.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram, ainda, inferir sobre futuras investigações, dentre elas: o uso da computação gráfica para ilustrar graficamente as soluções ótimas geradas pelo MPDAMA; a introdução da análise de defeitos e de restrições de demanda pelos produtos no modelo matemático desenvolvido; a implementação do modelo de PD, juntamente com modelos de distribuição diamétrica, para uso em manejo e geranciamento florestal; o desenvolvimento de modelos adicionais para estudo de desbastes em povoamentos de *Pinus*; a implementação de relações matemáticas mais elaboradas para quantificação de aglomerados e de compensados.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- ADKINS, W.K. & RICHARDS, C.H. / MILLER, R.M.
Program for computer simulation of hardwood log sawing
Madison, USDA, 1960. 57 p. (Research paper, 357)
- ALDER, D. Forest volume equations and yield prediction.
Rome, FAO, 1960. 194 p. (Forestry paper, 22/3)
- ALLEN, I.S. Site index equations for white spruce in the
northwest territories, Canada. Silvicultural Science Publishers
S. V. For. Eco. Canada, 1961-72, 1962.
- ANASTAS, R.L. & BURROUGHS, H.B. / KUMAR, Y.S. A ratio approach
to predicting acceptable yields of unthinned loblolly
pine plantations. For. Sci., 12(2):227-238, 1966.
- ARFING, D.R. & GRANT, E. / KACHWINDA, S.G. Application of
mathematical programming to the plywood design and
manufacturing problem. Manag. Sci., 10(12):1404-41, 1964.
- SALMONS, J.E. & LINDY, G.B. Timber harvest and product
markets on revenue gains from multiproduct harvesting
For. Prod. J., 30(7):33-37, 1962.
- SAYLOR, H.S. & JAYNE, J. Linear programming and net
work flows. New York: John Wiley and Sons, 1977.

BERNERT, F.A. & CLUTTER, J.L. Multiple-product yield estimates for unthinned slash pine plantations - pulpwood, sawtimber, gum. S.I. South. For. Exp. Station, 1988. 14p. (Research Paper, 88-35)

BETHEL, J.S. Forest utilization system. IV. Wood for fuel in a tropical forest utilization system. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod., 1977. 14p. (Contribution, 29)

BETHEL, J.S. & BRIGGS, G.D. Forest utilization system. II. Lumber manufacturing models for a tropical forest utilization system. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod., 1977. 14p. (Contribution, 27)

BIBLIOGRAFIA

BETHEL, J.S. & HANDEL, C. Linear programming in plywood production and distribution. For. Prod. J., 7(7):371-3, 1957.

BILLINGS, W.D. The environmental complex in relation to plant growth and distribution. Univ. Rev. Biol.

ADKINS, W.K.; RICHARDS, D.B.; LEWIS, D.H.; BULGRIN, E.H. Program for computer simulation of hardwood log sawing. Madison, USDA, 1980. 57 p. (Research paper, 357)

ALDER, D. Forest volume equations and yield prediction. Rome, FAO, 1980. 194 p. (Forestry Paper, 22/2)

ALEMDAG, I.S. Site index equations for white spruce in the northwest territories, Canada. Elsevier Science Publishers B. V., For. Eco. Manag., 23:61-71, 1988.

AMATEIS, R.L.; BURKHART, H.E.; BURK, T.E. A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. For. Sci., 32(2):287-296, 1986.

ATKINS, D.R.; GRANOT, D.; RAGHAVENDRA, B.G. Application of mathematical programming to the plywood design and manufacturing problem. Manag. Sci., 30(12):1424-41, 1984.

BAUMGRAS, J.E. & LeDOUX, C.B. Impact diameter and product markets on revenue gains from multiproduct harvesting. For. Prod. J., 38(7/8):57-63, 1988.

BAZARAA, M.S. & JARVIS, J.J. Linear programming and net work flows. New York, John Wiley and Sons, 1977.

- BENNETT, F.A. & CLUTTER, J.L. Multiple-product yield estimates for unthinned slash pine plantations - pulpwood, sawtimber, gum. s.l. South. For. Exp. Station, 1968. 21p. (Research Paper, SE 35)
- BETHEL, J.S. Forest utilization system. IV. Wood for fuel in a tropical forest utilization system. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod., 1977. 14p. (Contribution, 29)
- BETHEL, J.S. & BRIGGS, D.G. Forest utilization system. II. Lumber manufacturing models for a tropical forest utilization system. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod. 1977. 51p. (Contribution, 27)
- BETHEL, J.S. & HARREL, C. The application of linear programming in plywood production and distribution. For. Prod. J., 7(7):221-7. 1957.
- BILLINGS, W.D. The environmental complex in relation to plant growth and distribution. Quart. Rev. Biol., 7(3):251-65, 1952.
- BRAND, G.J. Simulating timber management in lake states forests. Sst Paul, USDA, Forestry Service, 1981. 25p. (Genetics Technical Report, NC, 69)
- BRIGGS, L.J. Forest utilization system. III. Models for predicting veneer yield and residues from circular and elliptically shaped logs. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod., 1977a. 28p. (Contribution, 28)
- BRIGGS, D.G. Tropical forest utilization system. V. A dynamic programming model for bucking tree stems into logs. College of Forest Resources, Univ. Wash. Inst. For. Prod., 1977b. 12p. (Contribution, 30)
- BRIGGS, D.G. Tree value system: description and assumptions. Gen Tech. Rep. PNW-GTR-239. Portland, U.S. Dep. of Agric., Forestry Service, Pacific North. Res. Stat. 1989. 24p.
- * BRIGGS, D.G. A dynamic programming approach to optimizing stem conversion. Seattle, University of Washington, 1980. 299 p. (Tese Ph.D.).

- BRUCE, D.M. & STRUB, M.R. A model for simulation of planted loblolly pine stands. In: **Growth models for tree and stands simulation**. Swedew, Royal College of Forestry, Stockolm, 1974. p. 128-135.
- CAHILL, J.M.; SNELGROVE, T.A; FAHEY, T.D. Lumber and veneer recovery from pruned Douglas-fir. **For. Prod. J.**, 38(9):27-32, 1988.
- CAMPBELL, R.G.; FERGUSON, I.S.; OPIE, J.E. Simulating growth and yield of Moutain ash stands: A deterministic model. **Aust. For. Res.**, 9:189-202, 1979.
- CAMPOS, J.C.C. Análise de crescimento e produção em plantações desbastadas. **R. Árv.**, 4(2):157-69, 1980.
- CAMPOS, J.C.C. & TURNBULL, K.J. Um sistema para estimar a produção por classe de diâmetro e sua aplicação na interpretação do efeito de desbastes. **R. Árv.**, 6(1):1-16, 1981.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G.; SOUZA, R.N. Classificação de árvores de eucalipto para postes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA FLORESTAL, 6, Campos do Jordão, 1991. **Anais...** São Paulo, SBEF/SBS, 1991. p. 72-77.
- CARINO, H.F. & FORONDA, S.V. Determining optimum log requirements in lumber manufacturing. **For. Prod. J.**, 3(11/12):8-14, 1987.
- CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.U.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: A quantitative approach**. New York, John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CLUTTER, J.L; HARMS, W.R.; BRISTER, G.H.; RENEY, J.W. Stand structure and yields of site-prepared loblolly pine planations in the lower coastal plain of the Carolinas, Georgia, and north Florida. Asheville, U.S. Dep. of Agric., Forest Service, South. For. Exp. Sta., 1984. 173p. (Genetics Technical Report, SE-27)
- CUMMINS, J.K. & CULBERTSON, D.D. Sawmill simulation model for maximizing log yields values. **For. Prod. J.**, 22(10):34-40, 1972.
- DANTIZIG, G.B. **Linear programming and extensions**. Princeton, Princeton University Press, 1963. n.p.

- DEMAERSCHALK, J.P. Integrated systems for the estimations of tree taper and volume. *Can. J For. Res.*, 3(1):90-4, 1976.
- DEPTA, D.J. Manager of strategic forest planning Weyerhaeuser Company, USA. In: IUFRO SIMPOSIUM ON FORESTRY MANAGEMENT PLANING AND MANAGERIAL ECONOMICS, Tokyo, 1984. **Proceedings...** Tokyo, University of Tokyo, 1984. p. 183-94.
- DONNELLY, R.H. Linear programming in plywood manufacturing. In: IBM SEMINAR IN OPERATIONS RESEARCH IN THE FOREST PRODUCTS INDUSTRY INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES, Los Angeles, 1966. **Proceedings...** Los Angeles, IBM, 1966. p. 22-39.
- DREYFUS, S.E. & LAW, A.M. **The art and theory of dynamic programming.** Orlando, Academic Press, 1986. 284p.
- FAALAND, B. & BRIGGS, D. Log ucking and lumber manufacturing using dynamic programming. *Manag. Sci.*, 30(2):245-57, 1984.
- FAHEY, D.T. Douglas-fir veneer: green veneer grades, layup loss, and green veneer and plywood recovery. *For. Prod. J.*, 37(11/12):45-50, 1987.
- GEERTS, J.M.P. **Optimal croscutting of timber: Forest technique and forest products.** Netherlands, Agricultural University Wageningen, 1979. 8p.
- GEERTS, J.M.P. Mathematical solution for optimizing the sawing pattern of a log given its dimension and its defect core. *N. Z. J. For. Sci.*, 14(1):124-34, 1984.
- GOLDING, C.J. & MURRAY, J.C. Polynomial taper equation that are compatible with tree volume equations. *N. Z. J. For. Sci.*, 5(3):313-22. 1975.
- GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model.** Massachusetts, Belmont Duxbury Press, 1976. 704p.
- GREEN, E.J.; BURKHART, H.E.; CLASON, T.R. A model for basal area distributions in loblolly pine. *For. Sci.*, 30(3):617-28, 1984.

- GUIMARÃES, D.P. & LEITE, H.G. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. *R. Árv.*, 16(2):170-80, 1992.
- HALLOCK, H. **The effect of log taper on lumber recovery.** *For. Prod. Tec.*, U.S.Forest Products Laboratoty, Madison, 1979. p. 72-8.
- HEGYI, F. **A simulation model for managing jack-pine stands.** Stocholm. IUFRO, 1973. p.74-91.
- HEGYI, R.P.F. **Site index equations and curves for the major tree species in Brotsh Columbia.** Province of British Columbia, Ministry of Forest, 1981. 54 p. (Report, 1).
- HILLIER, F.S. & LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research.** 3. ed. San Francisco, Ed Holden-Day, 1980. 829p.
- HOLDAWAY, M.R & BRAND, G.L. **An evaluation of the stems tree growth projection system.** Dep. of Agric., Forest service. North Central Forest Experiment Station, 1983. 20p. (Research Paper, NC-234)
- HOWARD, A.F. **Modelling sawmill production, costs, and profiability as guide to preparing bids for timber.** *For. Prod. J.*, 38(3):29-34, 1988.
- HUERTA, R.V.B. **Optimizacion de la producion de uma empresa de contrachapado en Costa Rica.** Uno exemplo de investigación de operaciones. Turrialba, IICA, 1971. 120p. (Tese M.S.).
- HUGHES, G.A. & SENDAK, P.E. **Key algorithmins used in GROZ: A computer simulation model for predicting tree and stand growth.** USDA For. Serv., North. Forest Experiment Station, 1985. 17p. (Research Paper, NE-570)
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEEERS, T.W. **Forest mensuration.** 2. ed. New York, Ronald Press, 1972. 410p.
- JOYCE, L.A, MEKINNON, B.; HOF, J.G.; HOEKSTRA, T.W. **Analysis multiresource production for national assesment and appraisals.** Rocky Mountain Forest and Rand Experiment Station, USDA, Forestry Service, 1983. p.1-20 (Genetics Technical Report, RM-101)

- KOENIGSBERG, E. Applying linear programming to the plywood industry. *For. Prod. J.*, 10(9):481-6, 1960.
- KOZAK, A., MUNRO, D.D.; SMITH, J.G.H. Taper function and their application in forest inventory. *For. Chron.*, 45(4):278-83, 1969.
- KNOEBEL, B.R.; BURKHART, H.E.; BECK, D.E. A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar. *For. Sci.*, 1986. 62 p. (Monography).
- KRUG, A.G.; NORDHEIN, E.V.; GIESE, R.L. Determining initial values for parameters of a Weibull model: A case study. *For. Sci.*, 30(3):573-81, 1984.
- LAPPI, J. & BAILEY, R.L. A height prediction model with random stand and tree parameters: An alternative to traditional site index methods. *For. Sci.*, 34(4):907-27, 1988.
- LEITE, H.G. Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro, para povoamentos de Eucalyptus saligna Smith. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1990. 81p. (Tese M.S.)
- LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.J.; REGAZZI, A.J.; COUTO, L. Um modelo para estimar a produção de madeira para celulose e energia derivado a partir da função Weibull. *R. Árv.*, 14(2):102-18, 1990.
- LEITE, H.G. & REGAZZI, A.J. Métodos estatísticos para comparar a igualdade de equações volumétricas. *R. Árv.*, 16(1):59-71, 1992.
- LEUSCHNER, W.A. *Introduction to forest resource management*. New York, John Willey & Sons, 1984. 298p.
- LEWIS, D.W. *Sawmill simulation and the best opening face system: A user's guide*. Madison, U.S. Department of Agricultural Forest Service, Forest Products Laboratory, 1985. 29p. (Genetics Technical Report, FPL-48)
- LIMA, F.S. *Análise de funções de "taper" destinadas f avaliação de multiprodutos de árvores de Pinus elliottii*. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1986. 79p. (Tese M.S.)

- LITTLE, S.N. Weibull diameter distributions for mixed stands of western conifers. *Can. J. For. Res.*, 13(1):85-8. 1983.
- LUNDGREEN, A.L. & DOLID, W.A. Biological growth functions described published site index curves for lake states timber species. N. Cent. Forest Exp. Sta., 1970. 9p. (USDA Forest Serv. Res. Pap., NC-36).
- MAGNUSSEN, S. Diameter distributions in *Picea abies* described by Weibull model. *Scand. J. For. Res.*, (1):493-502, 1986.
- MATNEY, T.G. & SULLIVAN, A.D. Compatible stand and stock tables for thinned and unthinned loblolly pine stands. *For. Sci.*, 28(1):161-71, 1982.
- MINER, C.L. & WALTERS, N.R. Stems: A nonthechnical description for foresters. s.l. USDA For. Serv., North Central Forest Experiment Station, 1984. 12p. (Research Paper, NC-252)
- NENHAUSER, G.L. Introduction to dynamic programming. New York, John Wiley & Sons, 1966. 256p.
- PARK, J.C. & LEMAN, C.S.E. A sawing study method for evaluating timber from pruned logs. New Zealand, Forest Research Institute, Forest Service, 1983. (FRI Bulletin, 47)
- PNEVMATICOS, S.M. & MANN, S.H. Dynamic programming in tree bucking. *For. Prod. J.*, 22(2):6-30, 1972.
- PUCCINI, A.L. Introdução à programação linear. Rio de Janeiro, LTC, 1985. 252p.
- PULKKI, R.E. Wood quality in modeling stand investment and harvesting decisions. In: BOUCHTON, B.J. e SAMOIL, JK. FOREST MODELING SYMPOSIUM, Northwest Region, 1990, Proceedings... Forestry Canada. Northwest Region. Northern Centre, 1990.
- RAYMOND, L.; CZAPLEWSKI and JOE, P. Mc Clure. Conditioning a segmented stem profile model for two diameter measurements. *For. Sci.*, 34(2):512-22, 1988.

- REGAZZI, A.J. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de alguns parâmetros num modelo polinomial ortogonal. *R. Ceres*, 40(228):176-95, 1993.
- REINDERS, M.P. **IDEAS, for integral logistics in centralized wood processing.** Netherlands, Wageningen Agricultural University, 1989. 237p. (Tese Ph.D.)
- RODRIGUEZ, L.C.E. **Planejamento agropecuário através de um modelo de programação linear não determinista.** Piracicaba, S.P., ESALQ, 1987. 180p. (Tese M.S.).
- ROISE, J.P. An approach for optimizing residual diameter class distributions when thinning even-aged stands. *For. Sci.*, 32(4):871-81, 1986.
- ROSS, S. **Introduction to stochastic dynamic programming.** Orlando, Academic Press, 1983. 164p.
- SACHET, J.K.A.; BRIGGS, D.G.; FIGHT, R.D. **Tree volume system: Users guide.** Portland, US Department of Agricultural, For. Serv., Pacific Northwest Research Station, 1989. 45p. (Genetics Technical Report, PNW-234)
- SCHLIETER, J.A & HAWKINS, C.H. **III Estimating commercial product potential in small-stem lodgepole pine: methods, products values.** s.l. Research Station, 1989. 58p. (Genetics Technical Report)
- SHIFLEY S.R. **A generalized system of models forecasting central states tree growth.** s.l. USDA Forestry Service, 1987. 10p. (Research Paper, NC-279)
- SILVA, J.A.A. **Dynamics of stand structure in fertilized slash pine plantations.** Athens, Georgia, University of Georgia, 1986. 138p. (Tese M.S.)
- SIM, H-C; GOVETT, R.L.; MORRIS, J.S. Linear programming model for the conversion of small hardwood logs into furniture shorts. Part 1. Conventional basic models and effects of demand constraints. *For. Prod. J.*, 41(9):19-24, 1991.
- SIM, H-C; GOVETT, R.L.; MORRIS, J.S. Linear programming model for the conversion of small hardwood logs into furniture shorts. Part 2. Probabilistic extension of the basic linear programming models. *For. Prod. J.*, 41(10):76-80, 1991.

- SPELTER, H. **PLYMAP-A computer simulation model of the rotary peeled softwood plywood manufacturing process.** Madison, US Department of Agriculture, Forest Service, For. Prod. Lab., 1990. 54p. (Genetics Technical Report, FPL-GTR-65)
- SPELTER, H. **VENVAL: A plywood mill cost account program.** Madison, U.S. Department of Agriculture, For. Serv. Prod. Lab., 1991. 25p. (Genetics Technical Report, FPL-GTR-68)
- STEELE, P.H. **Factors determining lumber recovery in sawmilling.** Madison, United States Department of Agriculture, Forestry Service, 1984. 8p. (Genetics Technical Report, FPL-39)
- STRUB, M.R. & BURKHART, H.E. **A class-interval free method for obtaining expected yields from diameter distributions.** *For. Sci.*, 21(1):67-8, 1975.
- SUCHEK, V.L. **Mercado para produtos de pinus.** Lages, ACR 1991. 15p.
- TAVARES, M.F.R. **Análise técnica e econômica do desdobro de toras de pinus.** Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ. 1988. 62p. (Tese M.S.).
- WILLISTON, E.D.M. **Lumber manufacturing: The design and operation of sawmills and planer mills.** San Francisco, Miller Freeman Publication, 1983. 512p.

APÊNDICES

TENDÊNCIAS DE PREVISÃO DE RECURSOS DE EXERCÍCIOS POR REGISTRO 2
POR CLASSE DE ATIVIDADE DE REGISTRO DE SÃO PAULO,
MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, ANOS DE 2010

APÊNDICE A



APÊNDICE A

TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E
POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE BOM SUCESSO,
MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO



FIGURA 1A - Produção em número de árvores, diâmetro, densidade e regeneração, por hectare e por classe de diâmetro, observada na Fazenda Matão (a), no Sítio do Gato (b) e no Equador Imbuicaba (c), no Distrito de Bom Sucesso, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE A

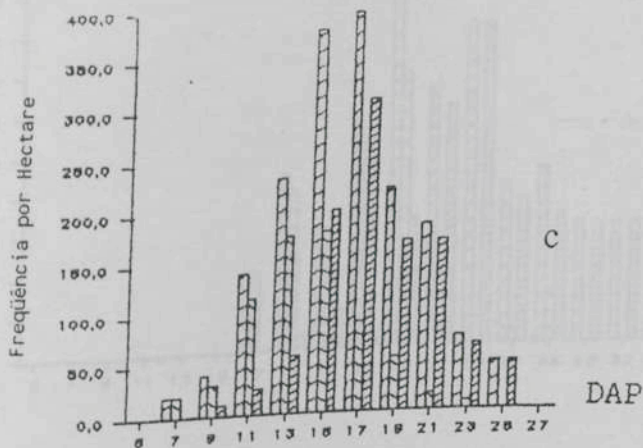
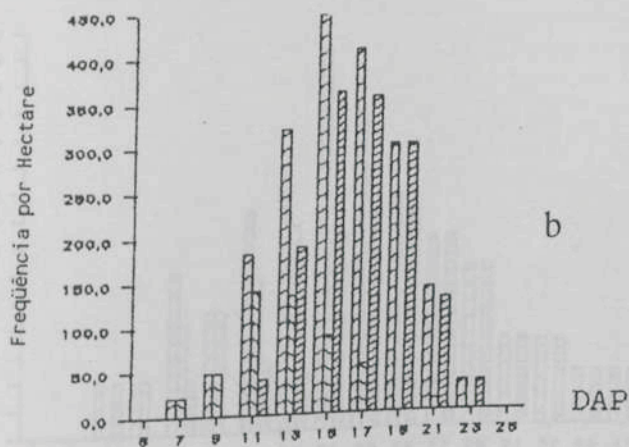
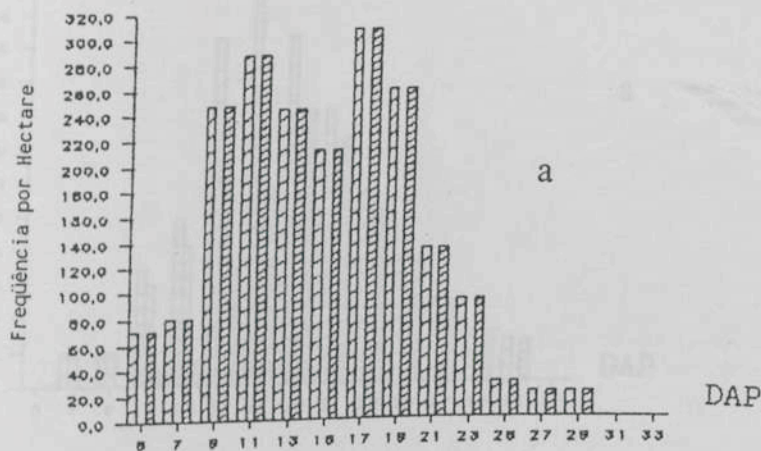


FIGURA 1A - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada na Primeira Medição (a), no Primeiro Desbaste (b) e no Segundo Desbaste (c), no Distrito de Bom Sucesso, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

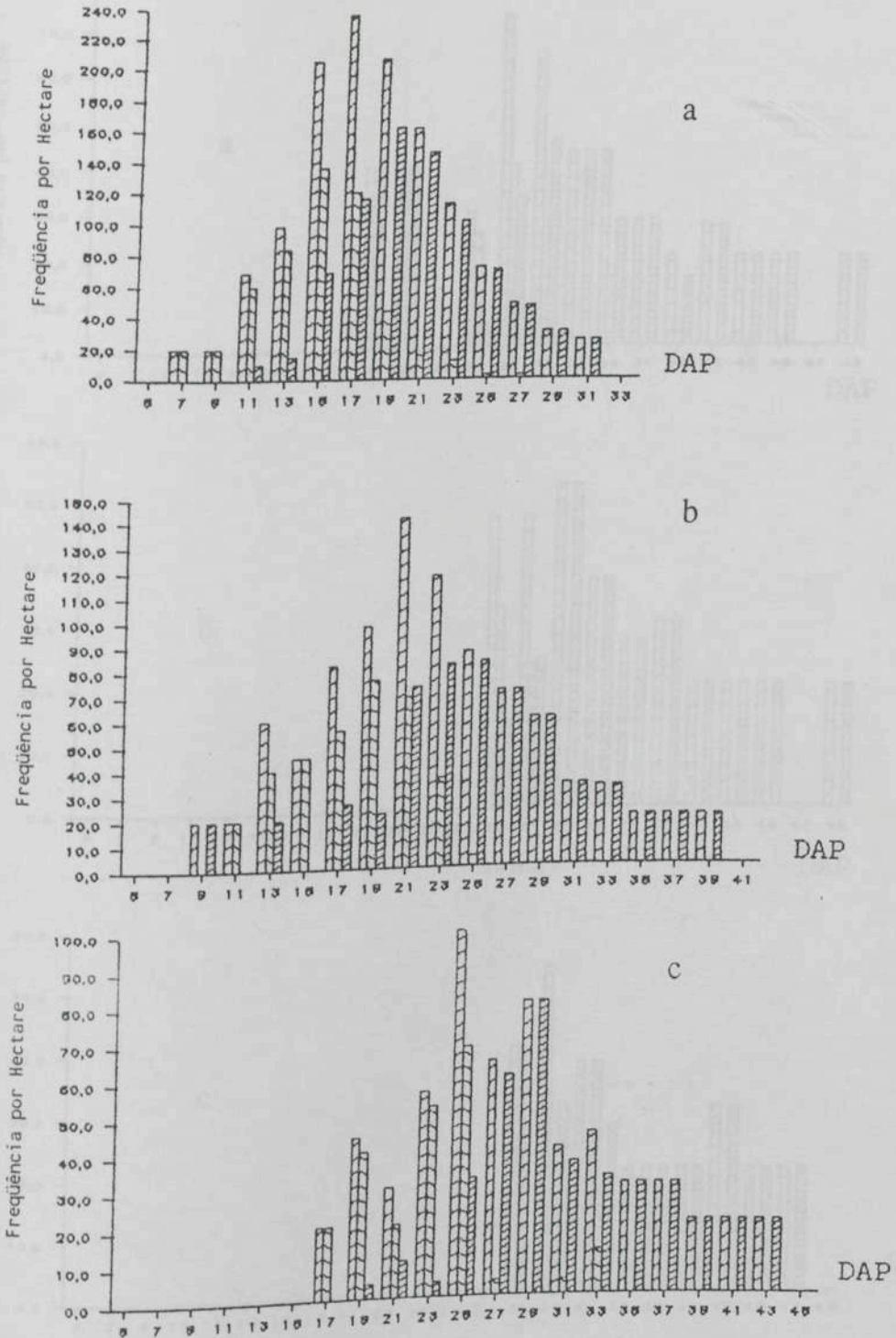


FIGURA 2A - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Terceiro Desbaste (a), no Quarto Desbaste (b) e no Quinto Desbaste (c), no Distrito de Bom Sucesso, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

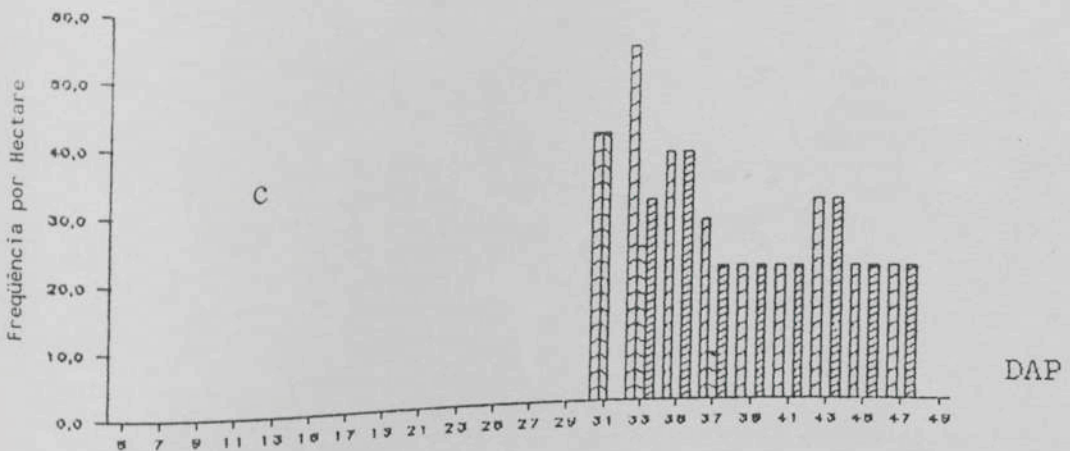
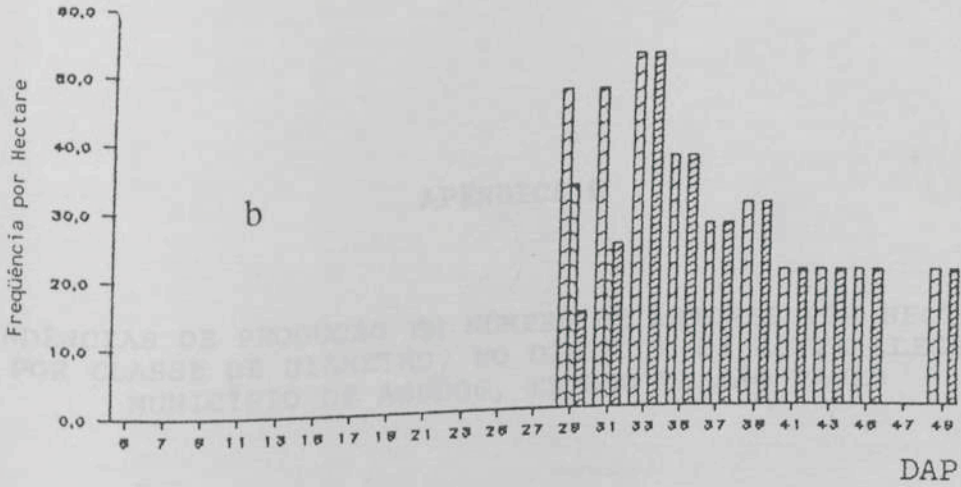
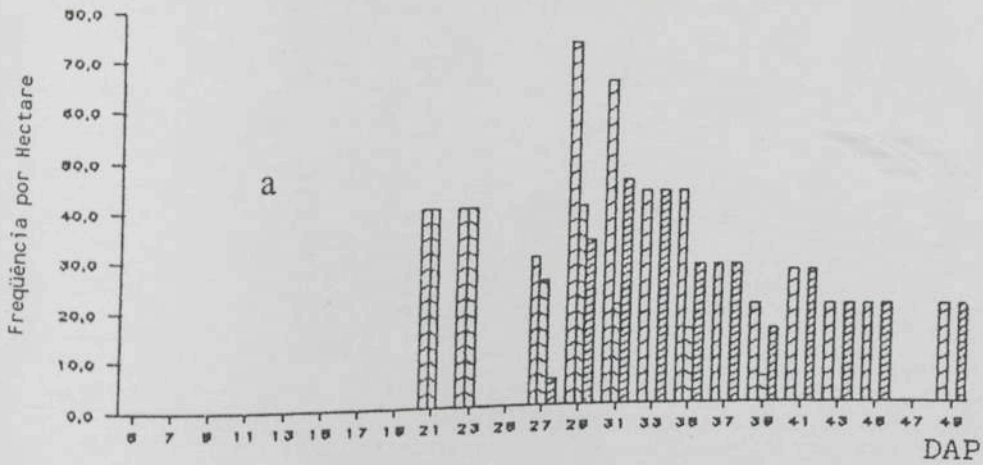


FIGURA 3A - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Sexto Desbaste (a), no Sétimo Desbaste (b) e no Oitavo Desbaste (c), no Distrito de Bom Sucesso, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE B



APÊNDICE B

TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE MONTE ALEGRE, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO

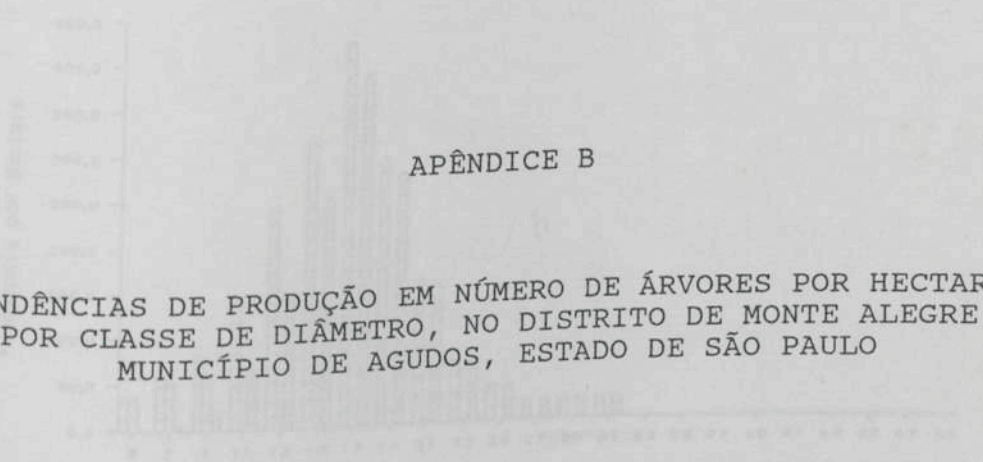


FIGURA 1B - Produção em número de árvores, brutas, desbastadas e passasocadas, por hectare e por classe de diâmetro, observada na Primeira Medição (a), na Primeira Submedida (b) e na Segunda Desbasta (c), no Distrito de Monte Alegre, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE B

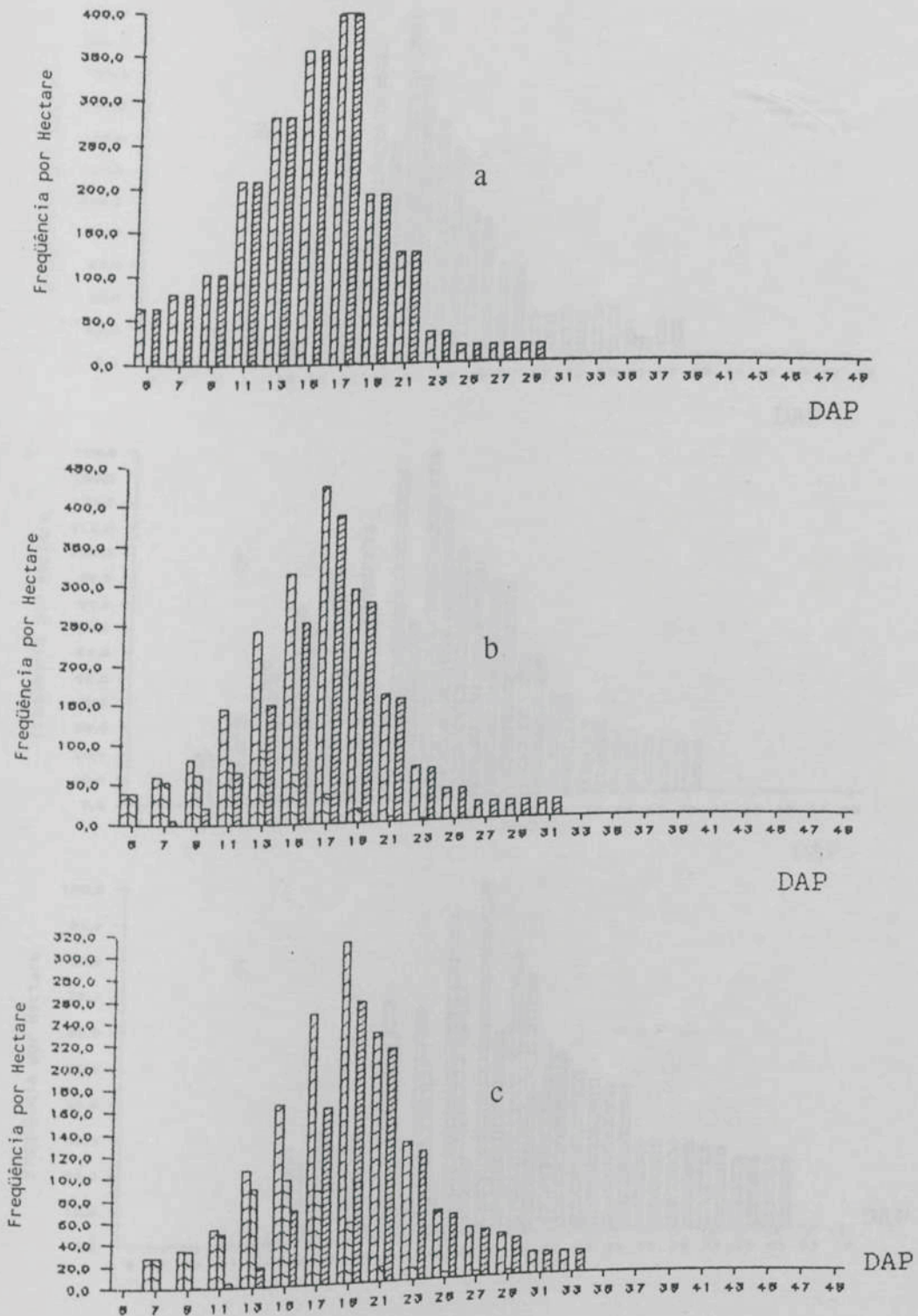


FIGURA 1B - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada na Primeira Medição (a), no Primeiro Desbaste (b) e no Segundo Desbaste (c), no Distrito de Monte Alegre, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

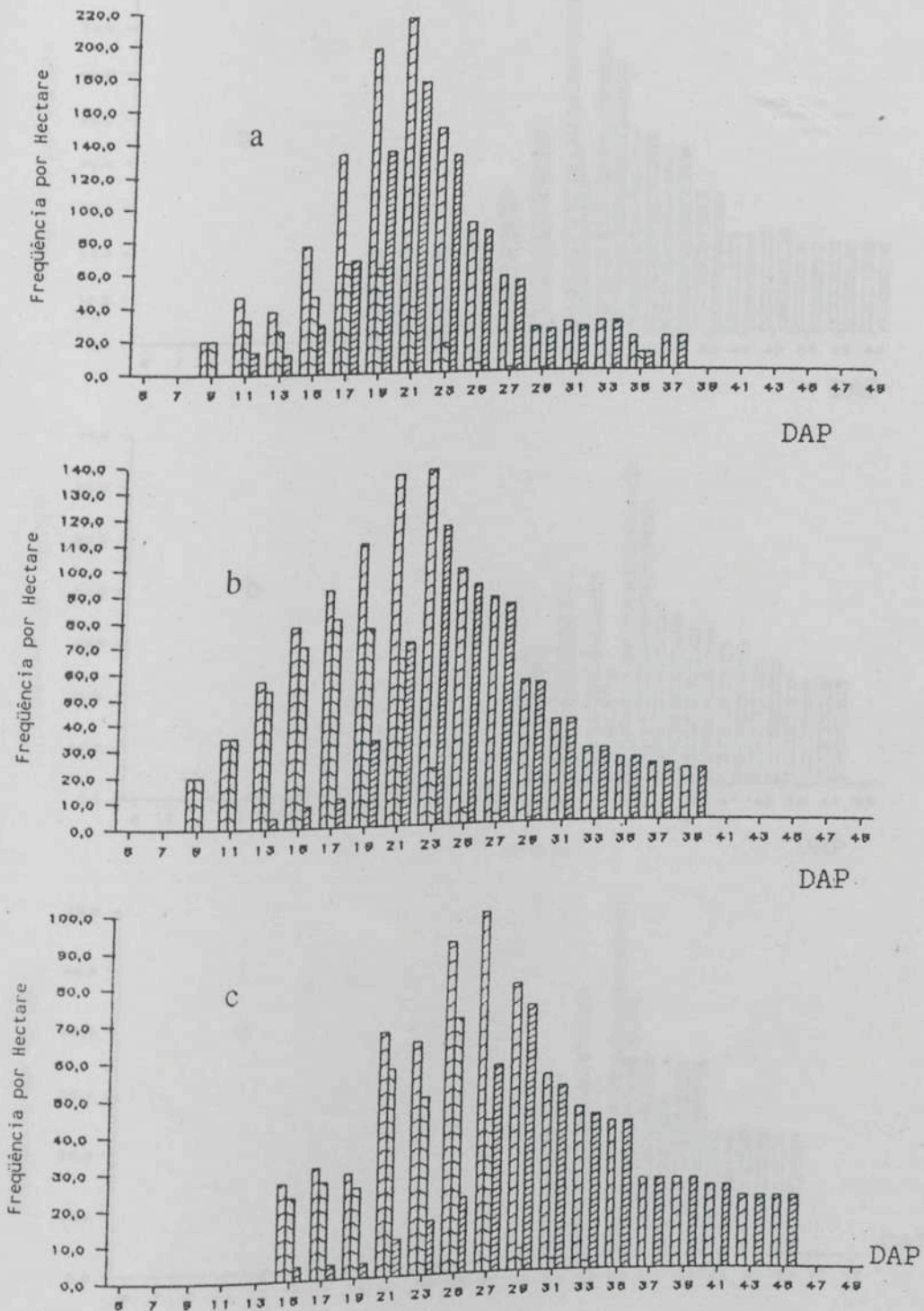


FIGURA 2B - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Terceiro Desbaste (a), no Quarto Desbaste (b) e no Quinto Desbaste (c), no Distrito de Monte Alegre, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

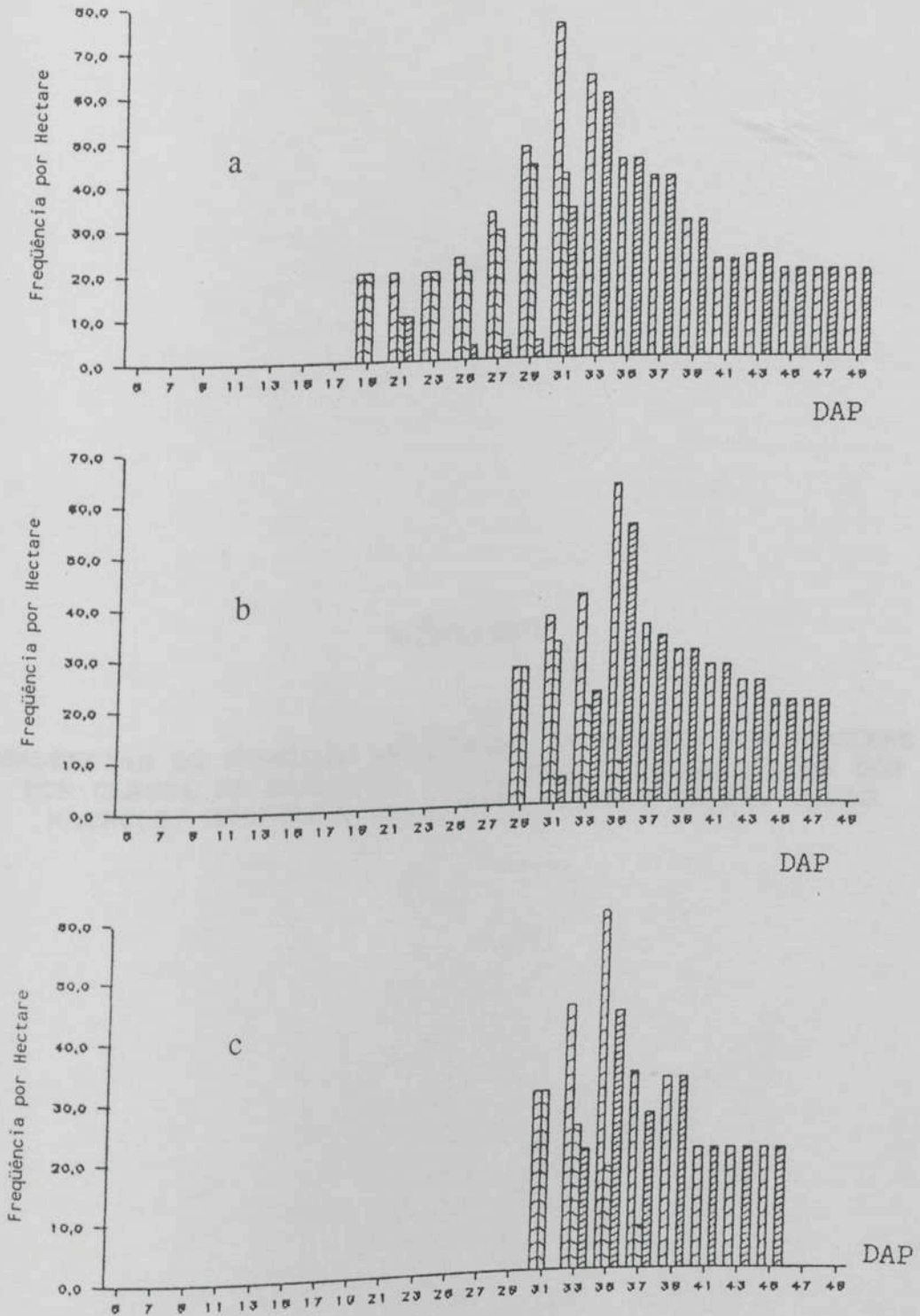


FIGURA 3B - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Sexto Desbaste (a), no Sétimo Desbaste (b) e no Oitavo Desbaste (c), no Distrito de Monte Alegre, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE C



APÊNDICE C

TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE CACHOEIRA DOS MACACOS, MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO

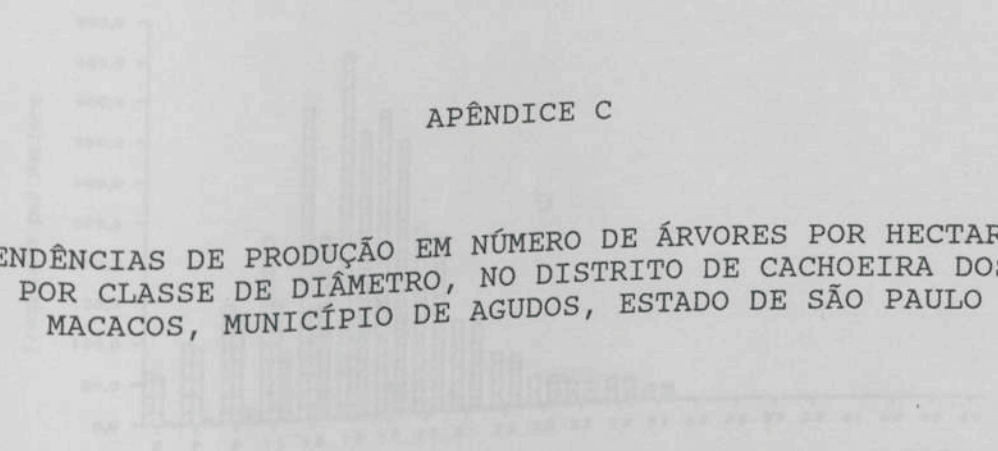


FIGURA 10C - Produção em Número de Árvores, Braca, fechada de 4 e 37 cm de diâmetro, por hectare e por classe de diâmetro, observada na Primeira Medição (1971) no Distrito de Cachoeira dos Macacos, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE C

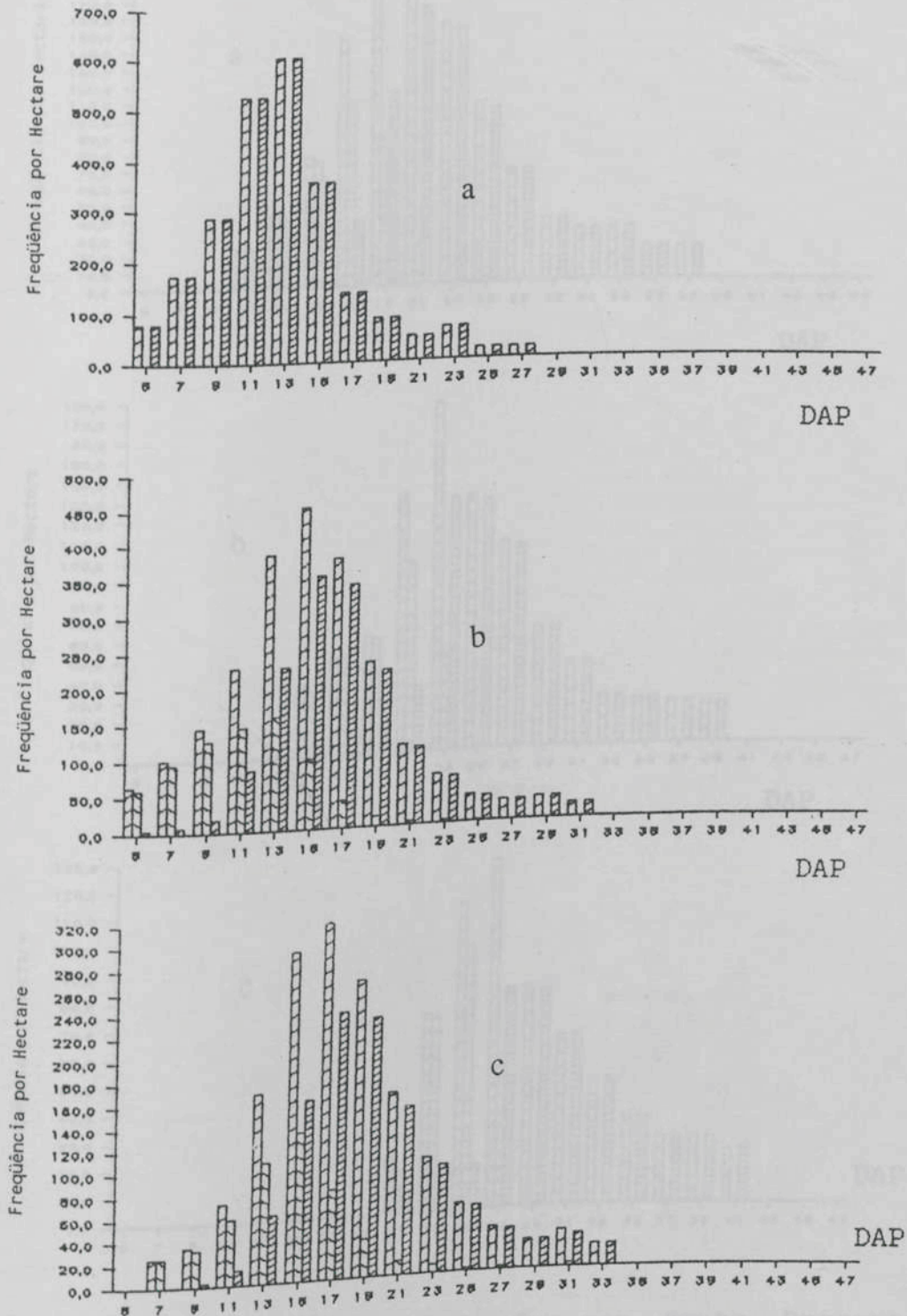


FIGURA 1C - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada na Primeira Medição (a), no Primeiro Desbaste (b) e no Segundo Desbaste (c), no Distrito de Cachoeira dos Macacos, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

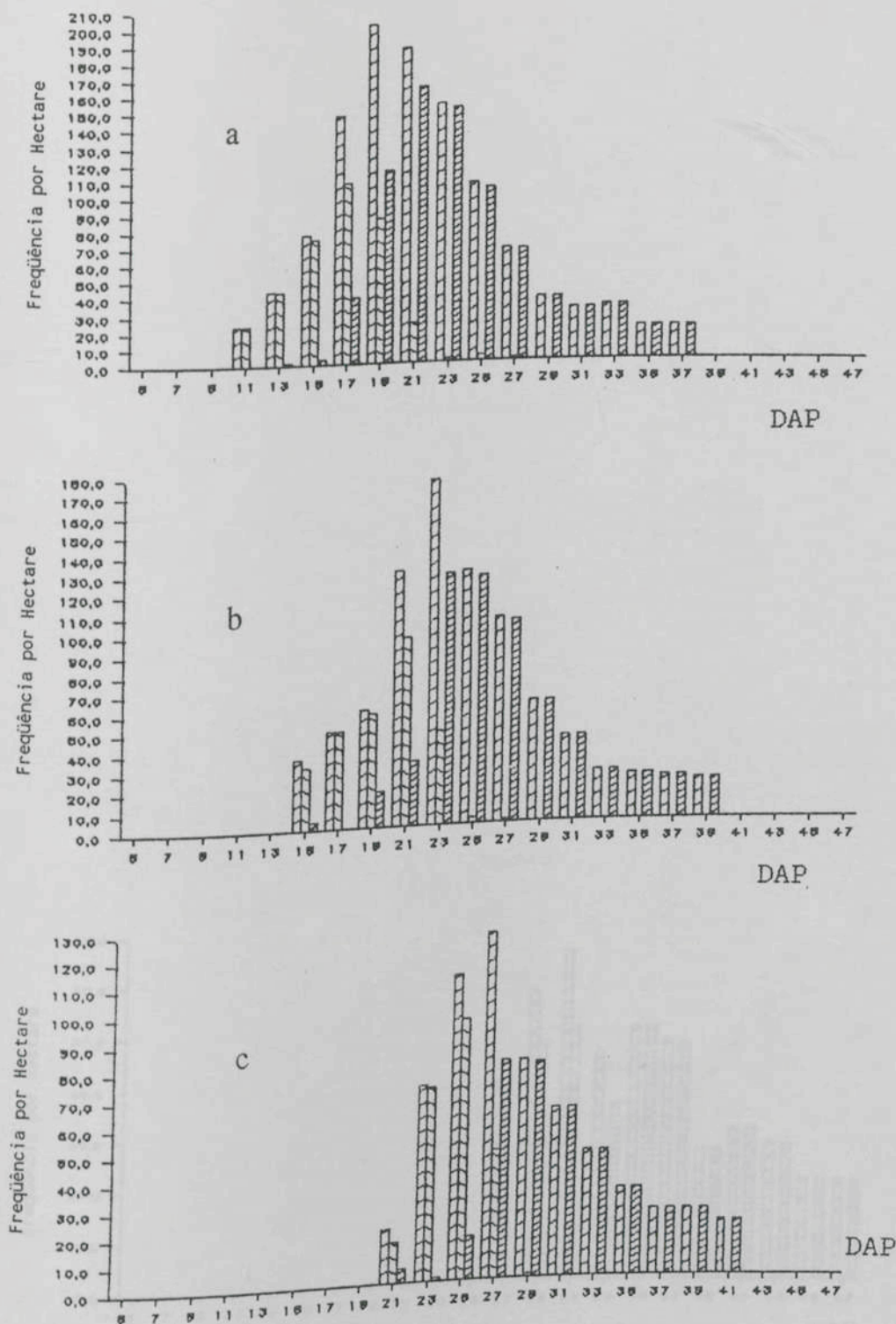


FIGURA 2C - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Terceiro Desbaste (a), no Quarto Desbaste (b) e no Quinto Desbaste (c), no Distrito de Cachoeira dos Macacos, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE D

TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E
 POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE ABELHA BRANCA,
 MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO

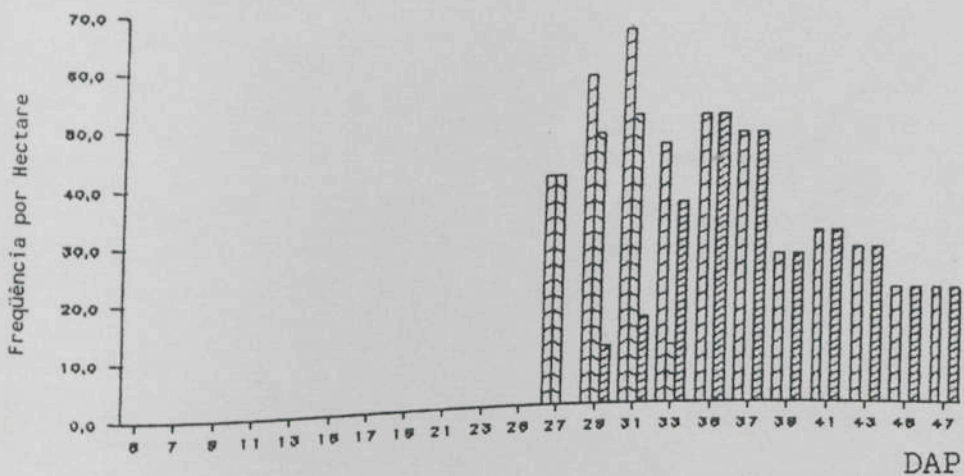


FIGURA 3C - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Sexto Desbaste, no Distrito de Cachoeira dos Macacos, Município de Agudos, Estado de São Paulo.



APÊNDICE D

TENDÊNCIAS DE PRODUÇÃO EM NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E
 POR CLASSE DE DIÂMETRO, NO DISTRITO DE AREIA BRANCA,
 MUNICÍPIO DE AGUDOS, ESTADO DE SÃO PAULO

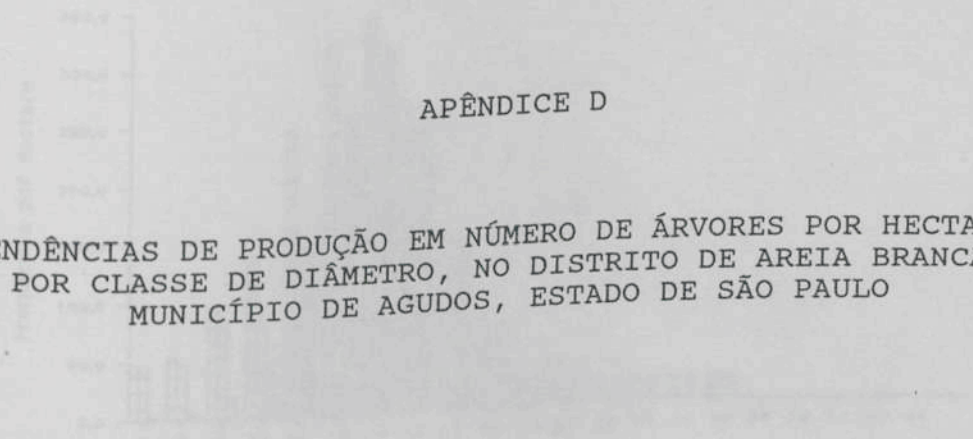


FIGURA 12 -

APÊNDICE D

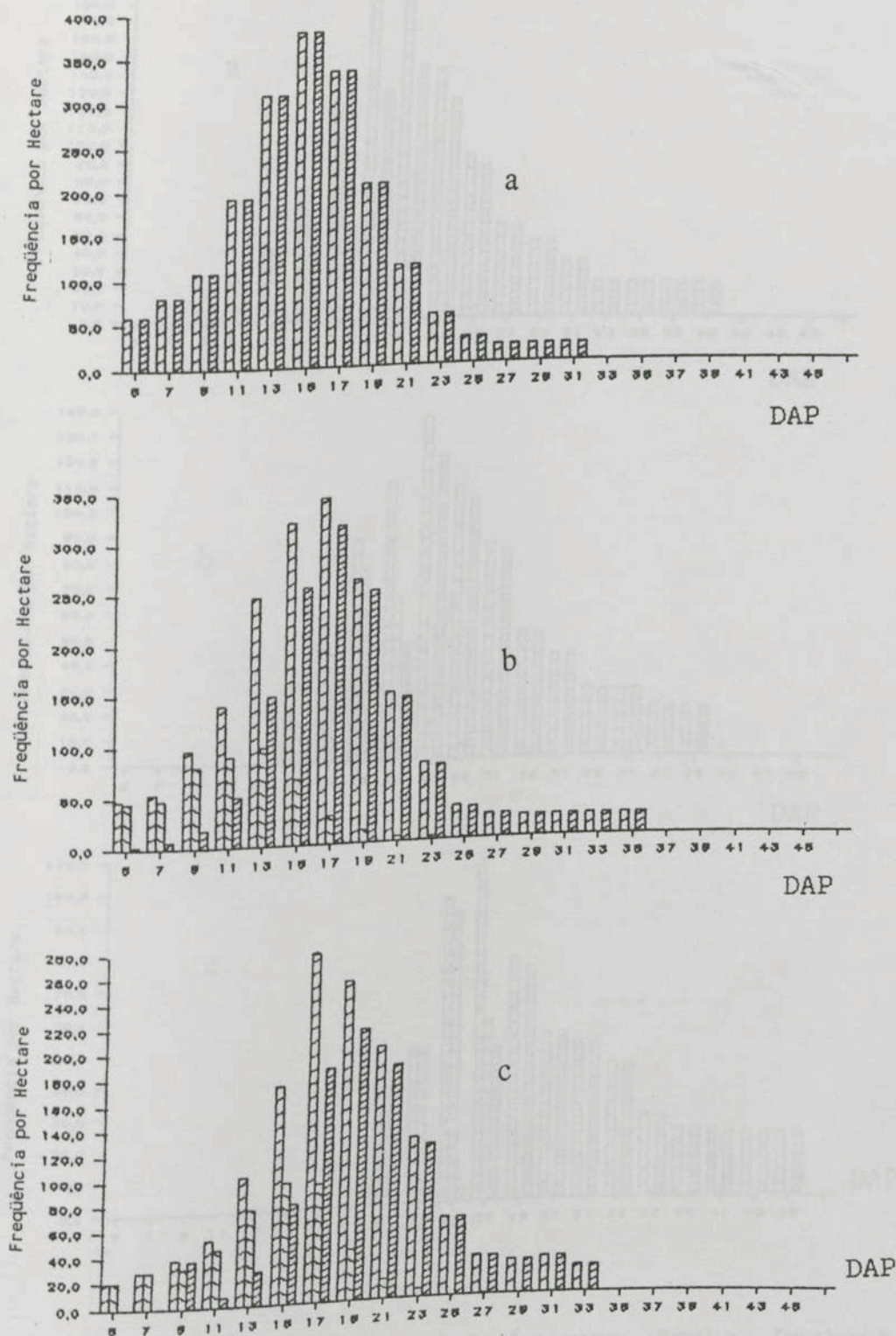


FIGURA 1D - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada na Primeira Medição (a), no Primeiro Desbaste (b) e no Segundo Desbaste (c), no Distrito de Areia Branca, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

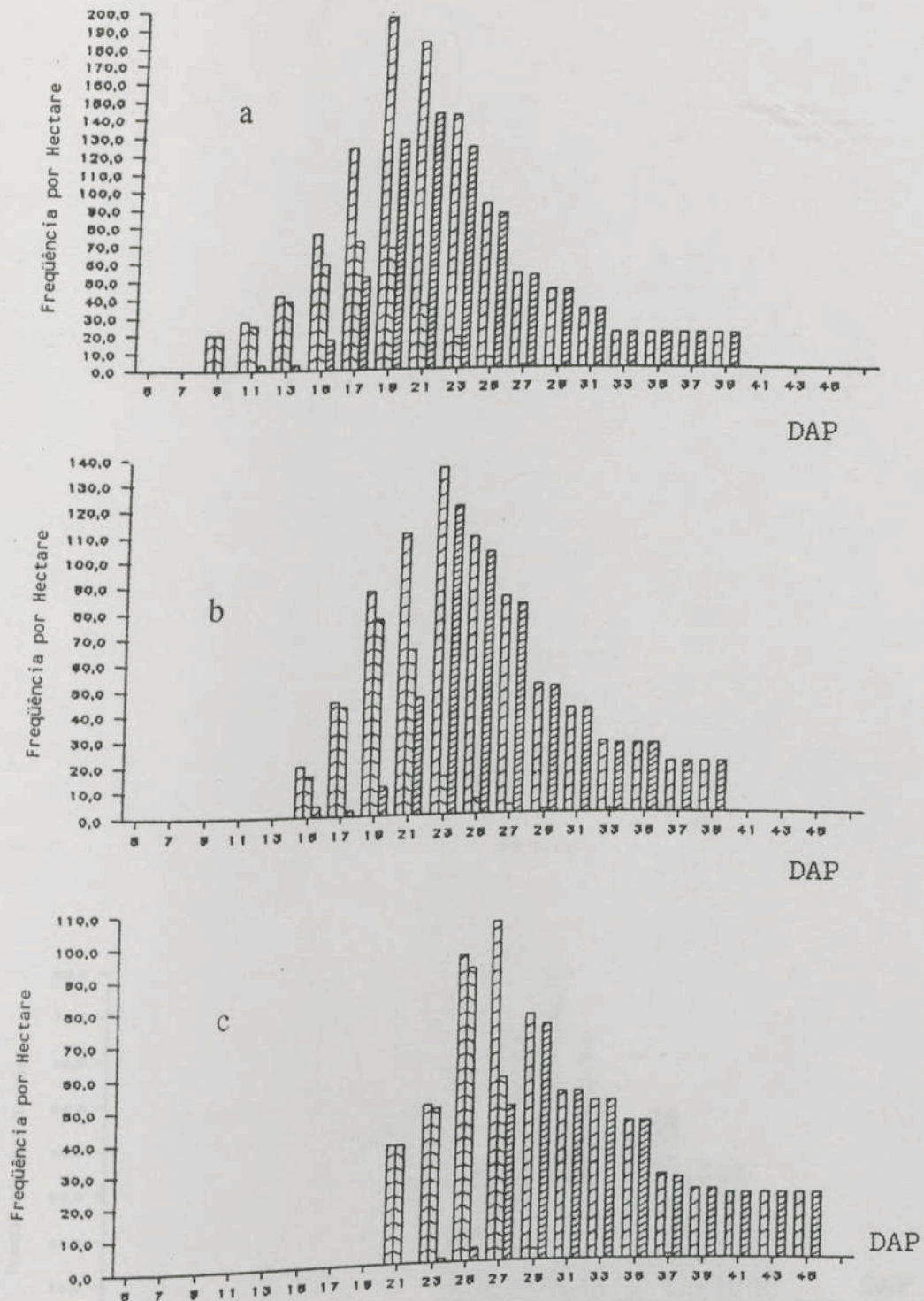


FIGURA 2D - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Terceiro Desbaste (a), no Quarto Desbaste (b) e no Quinto Desbaste (c), no Distrito de Areia Branca, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

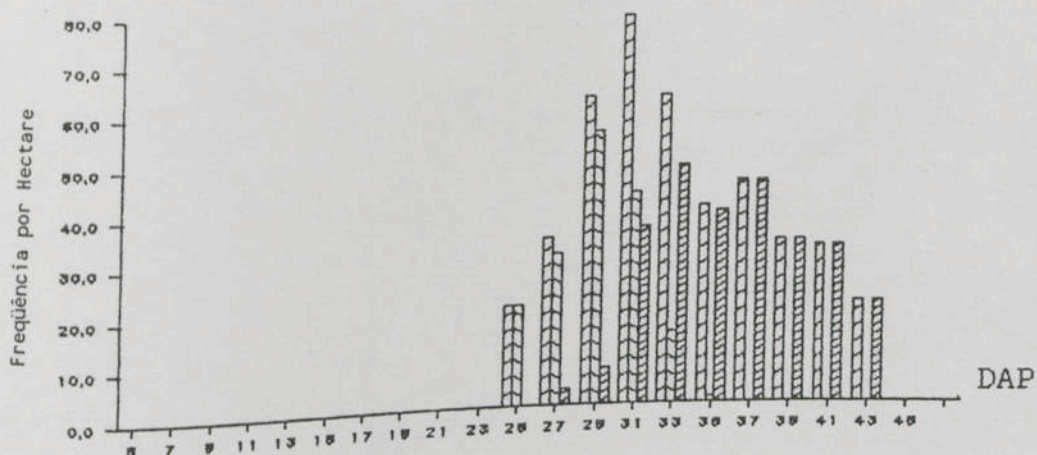


FIGURA 3D - Produção em Número de Árvores, Bruta, Desbastada e Remanescente, por Hectare e por Classe de Diâmetro, Observada no Sexto Desbaste, no Distrito de Areia Branca, Município de Agudos, Estado de São Paulo.

APÊNDICE E

Quando se pensa em aproveitar ao máximo uma árvore, imaginamos que a madeira do tronco será utilizada para produzir produtos sólidos (madeira, compensado, aglomerado, pólen, carvão vegetal, pasta de celulose, outros). Entretanto, na prática, costuma ser difícil estabelecer a solução ótima via cálculos e resoluções. Será ilustrada apenas a produção de três tipos de toras. Lembra-se que, na maioria dos casos, há de se considerar os produtos finais e não apenas o volume das toras, conforme exemplificado neste Apêndice.

APÊNDICE E

UM EXEMPLO DIDÁTICO SIMPLIFICADO DO PROCESSO DINÂMICO DE CONVERSÃO DE TRONCO EM TORAS

Produto*	Compensado	Aglomerado	Torça	Costo	Preço
(2)	D(1)	D(2)	D(3)	/A	/A
1	2,0	10,0	100,0	0,425	4,00
2	2,0	4,0	100,0	0,400	3,00
3	2,0	10,0	100,0	0,425	4,00

* Torça = 1/4" x 1/4" x 10' = 0,000125 m³
 1 = compensado, 2 = aglomerado, 3 = madeira serrada
 (Luzar)

APÊNDICE E

Quando se pensa em aproveitamento ótimo da madeira de uma árvore, imagina-se que a madeira do tronco será utilizada para produzir multiprodutos (laminados, compensados, aglomerados, polpa, carvão vegetal, madeira serrada, dentre outros). Entretanto, na prática, torna-se muito difícil estabelecer a solução ótima, via calculadora manual. Assim, será ilustrada apenas a produção de três tipos de toras. Lembre-se que, na maioria dos casos, busca-se conhecer os produtos finais e não apenas o volume das toras, conforme exemplificado neste Apêndice.

Suponha: dado uma árvore de 26,3 m de altura total e 40,0 cm de DAP, além das especificações do quadro a seguir, deseja-se otimizar o uso da madeira e resolver o problema, utilizando o modelo de programação dinâmica desenvolvido neste estudo.

Produto* (z)	Comprimento L[z]	Diâmetro		Fator de Conversão	Custo /m ³	Preço /m ³
		Dmin[z]	Dmax[z]			
1	2,0	35,0	100,0	0,625	0,600	38,00
2	2,0	4,0	100,0	0,500	0,400	32,00
3	2,5	15,0	100,0	0,400	0,650	40,00

"Taper": $\overline{(d/D^2)} = 0,93 - 1,16(d/D) + 0,20(d/D)^2$, $R^2 = 0,962$
 * 1 = Compensado; 2 = aglomerado; 3 = madeira serrada
 (Lumber).

Sejam as seguintes variáveis:

D = diâmetro a 1,30 m;

d = diâmetro em algum ponto superior do tronco (h), em cm;

H_t , H_c e H_b = altura total, comercial e do toco remanescente, em m;

$d1_u$ = menor diâmetro para o uso u , em cm;

$d2_u$ = maior diâmetro para o uso u , em cm;

$Dmax_u$ = maior diâmetro da tora convertida no uso u , em cm;

$Dmin_u$ = menor diâmetro da tora convertida no uso u , em cm;

$L[z]$ = comprimento da tora a ser utilizada para o produto z , em m;

$Lmin$ = menor tora especificada, considerando todos os usos, em m;

k = intervalo de comprimento no tronco, que é o intervalo de estágio, em m;

n = número de estágios contidos na parte comercializável do tronco, $n = 0, 1, 2, \dots, \lfloor (H_c - H_b) / k \rfloor$;

$nk + H_b$ = local onde o menor diâmetro da i -ésima tora é medido;

j = variável de estado, tal que jk seja uma tora específica, $Lmin \leq jk \leq Min(nk, Lmax)$;

$jk \in X, X = \{L[z], z\}$

r_{iuz} = quantidade do z -ésimo produto final, obtido da i -ésima tora convertida no uso u ;

P_{iuz} = preço de mercado para o z -ésimo produto final, obtido no uso u , a partir da i -ésima tora;

C_{iuz} = custo para a i -ésima tora de comprimento jk , menor diâmetro ($Dmin$) e maior ($Dmax$), para processamento no uso u , gerando o produto z .

O retorno econômico pela conversão de uma tora de comprimento jk , menor diâmetro (D_{min}) e maior (D_{max}), no uso u , é igual ao total de receitas obtidas dos produtos finais (z), produzidos a partir da tora (jk, D_{max}, D_{min}), no uso u , menos os custos de conversão da referida tora. Assim, pode-se escrever:

$$Re_u(jk, D_{max}, D_{min}) = \sum r_{iuz}(jk, D_{max}, D_{min}) \times P_{iuz} - \sum C_{iuz}(jk, D_{max}, D_{min})$$

Seja:

$F_{n-j}(nk-jk, D, H_b)$ = valor da solução ótima, obtida para a parte da árvore entre a base da parte comercializável e o maior diâmetro (D_{max}) da tora analisada.

$F_n(H_t, D, H_b)$ = retorno acumulado até o estágio n , em uma árvore com altura total (H_t), diâmetro a 1,30 m (D) e altura do toco remanescente (H_b).

Com essas definições, pode-se estabelecer a seguinte relação de recorrência :

$$\begin{aligned} F_n(H_t, D, H_b) &= \text{Max}_{j,u} \{ Re_u(jk, d_{1u}, d_{2u}) + f_{n-j}(nk-jk, D, H_b) \}, \\ &= \text{Max}_{j,u} \{ \sum r_{iuz}(jk, d_{1u}, d_{2u}) \times P_{iuz} - \sum C_{iuz}(jk, d_{1u}, d_{2u}) \\ &\quad - f_{n-j}(nk-jk, D, H_b) \}. \end{aligned} \quad (I)$$

Da equação de "taper", pode-se escrever que:

$$d = D \sqrt{0,93 - 1,16(h/H) + 0,20(h/H)^2} \quad (II)$$

$$h = [1,16Ht - \sqrt{(0,93Ht)^2 - 0,8(0,93Ht^2 - d^2Ht^2/D^2)}] / 0,4 \quad (III)$$

A expressão III é utilizada, inicialmente, para calcular o comprimento utilizável do tronco, considerando um diâmetro limite no topo da árvore igual a 4,0 cm. Com a expressão II, estimam-se os diâmetros em qualquer ponto do tronco.

Definido o diâmetro em dois pontos ao longo do tronco, o volume da tora é obtido via fórmula de Smalian, ou seja,

$$V_i(d1_u, d2_u) = \pi(d1_u^2 + d2_u^2) \times jk/80000 \quad (IV)$$

Substituindo os valores de D, Ht e d, na equação II, obtém-se $Hc - Hb = 24,5$, que é a parte disponível para conversão. Adotando um intervalo de estágio de 0,5 m, tem-se um total de $N = L/k = 24,5/0,5 = 49$ estágios para serem avaliados.

Aplicando a relação de recorrência I em cada um dos 49 estágios, obtêm-se os seguintes resultados:

$$F_0(Ht, D, Hb) = F_1(Ht, D, Hb) = F_2(Ht, D, Hb) = F_3(Ht, D, Hb) = 0$$

Observação: com o propósito de simplificação, será utilizada apenas a notação F_n .

$$F_4 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(36,4^2 + 38,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,625) (38,0) - 0,6 + F_{4-4} \\ \frac{\pi(36,4^2 + 38,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{4-4} \end{array} \right]$$

$$F_4 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 4,608 \\ 3,108 \end{array} \right] = 4,108 \Rightarrow u = \text{Laminação} \Rightarrow z = \text{Compensado}$$

$$F_5 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(36,0^2 + 37,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,625) (38,0) - 0,6 + F_{5-4} \\ \frac{\pi(36,0^2 + 37,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{5-4} \\ \frac{\pi(36,0^2 + 38,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{5-5} \end{array} \right]$$

$$F_5 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 4,427 \\ 2,986 = 4,427 \implies u = \text{Laminação} \implies z = \text{Compensado} \\ 2,822 \end{array} \right]$$

$$F_6 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(35,5^2 + 37,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,625) (38,0) - 0,6 + F_{6-4} \\ \frac{\pi(35,5^2 + 37,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{6-4} \\ \frac{\pi(36,4^2 + 37,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{6-5} \end{array} \right]$$

$$F_6 = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 4,346 \\ 2,932 = 4,346 \implies u = \text{Laminação} \implies z = \text{Compensado} \\ 2,810 \end{array} \right]$$

$$F_7 = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(35,0^2 + 36,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,625) (38,0) - 0,6 + F_{7-4} \\ \frac{\pi(35,0^2 + 36,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{7-4} \\ \frac{\pi(35,0^2 + 36,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{7-5} \end{cases}$$

$$F_7 = \text{Max} \begin{cases} 4,225 \\ 2,850 = 4,225 \implies u = \text{Laminação} \implies z = \text{Compensado} \\ 2,554 \end{cases}$$

$$F_8 = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(34,5^2 + 36,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{8-4} \\ \frac{\pi(34,5^2 + 36,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{8-5} \end{cases}$$

$$F_8 = \text{Max} \begin{cases} 7,369 \\ 2,557 = 7,369 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado} \end{cases}$$

$$F_9 = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(34,0^2 + 36,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{9-4} \\ \frac{\pi(34,0^2 + 36,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{9-5} \end{cases}$$

$$F_9 = \text{Max} \begin{cases} 7,108 \\ 7,076 = 7,108 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber} \end{cases}$$

$$F_{10} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(33,6^2 + 35,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{10-4} \\ \frac{\pi(33,6^2 + 36,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{10-5} \end{array} \right]$$

$$F_{10} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 6,948 \\ 6,824 \end{array} \right] = 6,948 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{11} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(33,0^2 + 35,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{11-4} \\ \frac{\pi(33,0^2 + 35,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{11-5} \end{array} \right]$$

$$F_{11} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 6,733 \\ 6,648 \end{array} \right] = 6,733 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{12} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(32,6^2 + 34,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{12-4} \\ \frac{\pi(32,6^2 + 35,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{12-5} \end{array} \right]$$

$$F_{12} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 9,800 \\ 6,449 \end{array} \right] = 9,800 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{13} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(32,0^2 + 34,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{13-4} \\ \frac{\pi(32,0^2 + 34,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{13-5} \end{array} \right]$$

$$F_{13} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 9,447 \\ 9,502 \end{array} \right] = 9,502 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{14} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(31,6^2 + 33,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{14-4} \\ \frac{\pi(31,6^2 + 34,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{14-5} \end{array} \right]$$

$$F_{14} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 9,222 \\ 9,165 \end{array} \right] = 9,222 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{15} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(31,0^2 + 33,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{15-4} \\ \frac{\pi(31,0^2 + 34,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{15-5} \end{array} \right]$$

$$F_{15} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 8,909 \\ 8,958 \end{array} \right] = 8,958 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{16} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(30,6^2 + 32,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{16-4} \\ \frac{\pi(30,6^2 + 33,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{16-5} \end{array} \right]$$

$$F_{16} = \text{Max}\{11,912; 8,628\} \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{17} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(30,0^2 + 32,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{17-4} \\ \frac{\pi(30,0^2 + 32,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{17-5} \end{array} \right]$$

$$F_{17} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 11,520 \\ 11,616 \end{array} \right] = 11,616 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{18} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(29,5^2 + 31,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{18-4} \\ \frac{\pi(29,5^2 + 32,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{18-5} \end{array} \right]$$

$$F_{18} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 11,170 \\ 11,232 \end{array} \right] = 11,232 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{19} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(29,0^2 + 31,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{19-4} \\ \frac{\pi(29,0^2 + 31,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{19-5} \end{array} \right]$$

$$F_{19} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 10,822 \\ 10,884 \end{array} \right] = 10,884 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{20} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(28,5^2 + 30,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{20-4} \\ \frac{\pi(28,5^2 + 31,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{20-5} \end{array} \right]$$

$$F_{20} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 13,709 \\ 10,536 \end{array} \right] = 13,709 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{21} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(27,9^2 + 30,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{21-4} \\ \frac{\pi(27,9^2 + 30,6^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{21-5} \end{array} \right]$$

$$F_{21} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 13,325 \\ 13,417 \end{array} \right] = 13,417 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{22} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(27,4^2 + 29,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{22-4} \\ \frac{\pi(27,4^2 + 30,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{22-5} \end{cases}$$

$$F_{22} = \text{Max} \begin{cases} 12,869 \\ 13,040 \end{cases} = 13,040 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{23} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(26,8^2 + 29,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{23-4} \\ \frac{\pi(26,8^2 + 29,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{23-5} \end{cases}$$

$$F_{23} = \text{Max} \begin{cases} 12,443 \\ 12,578 \end{cases} = 12,578 \implies u = \text{Aglomerado}$$

$$F_{24} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(26,3^2 + 28,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{24-4} \\ \frac{\pi(26,3^2 + 29,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{24-5} \end{cases}$$

$$F_{24} = \text{Max} \begin{cases} 15,199 \\ 12,160 \end{cases} = 15,199 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{25} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(25,7^2 + 27,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{25-4} \\ \frac{\pi(25,7^2 + 28,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{25-5} \end{cases}$$

$$F_{25} = \text{Max} \begin{cases} 14,825 \\ 14,910 \end{cases} = 14,910 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{26} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(25,0^2 + 27,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{26-4} \\ \frac{\pi(25,0^2 + 27,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{26-5} \end{cases}$$

$$F_{26} = \text{Max} \begin{cases} 14,369 \\ 14,530 \end{cases} = 14,530 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{27} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(24,5^2 + 26,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{27-4} \\ \frac{\pi(24,5^2 + 27,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{27-5} \end{cases}$$

$$F_{27} = \text{Max} \begin{cases} 13,835 \\ 14,088 \end{cases} = 14,088 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{28} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(23,9^2 + 26,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{28-4} \\ \frac{\pi(23,9^2 + 26,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{28-5} \end{array} \right]$$

$$F_{28} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 16,386 \\ 13,548 \end{array} \right] = 16,386 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{29} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(23,3^2 + 25,7^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{29-4} \\ \frac{\pi(23,3^2 + 26,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{29-5} \end{array} \right]$$

$$F_{29} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 16,022 \\ 16,100 \end{array} \right] = 16,100 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{30} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(22,7^2 + 25,7^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{30-4} \\ \frac{\pi(22,7^2 + 25,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{30-5} \end{array} \right]$$

$$F_{30} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 15,608 \\ 15,693 \end{array} \right] = 15,693 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{31} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(22,1^2 + 24,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{31-4} \\ \frac{\pi(22,1^2 + 25,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{31-5} \end{cases}$$

$$F_{31} = \text{Max} \begin{cases} 15,056 \\ 15,279 \end{cases} = 15,279 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{32} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(21,5^2 + 23,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{32-4} \\ \frac{\pi(21,5^2 + 24,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{32-5} \end{cases}$$

$$F_{32} = \text{Max} \begin{cases} 17,285 \\ 14,773 \end{cases} = 17,285 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{33} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(20,8^2 + 23,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{33-4} \\ \frac{\pi(20,8^2 + 23,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{33-5} \end{cases}$$

$$F_{33} = \text{Max} \begin{cases} 16,926 \\ 16,997 \end{cases} = 16,997 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{34} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(20,0^2 + 22,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{34-4} \\ \frac{\pi(20,0^2 + 23,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{34-5} \end{cases}$$

$$F_{34} = \text{Max} \begin{cases} 16,455 \\ 16,635 \end{cases} = 16,635 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{35} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(19,4^2 + 22,1^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{35-4} \\ \frac{\pi(19,4^2 + 22,7^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{35-5} \end{cases}$$

$$F_{35} = \text{Max} \begin{cases} 15,966 \\ 16,163 \end{cases} = 16,163 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{36} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(18,3^2 + 21,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{36-4} \\ \frac{\pi(18,3^2 + 22,1^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{36-5} \end{cases}$$

$$F_{36} = \text{Max} \begin{cases} 17,887 \\ 15,664 \end{cases} = 17,887 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{37} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(18,8^2 + 20,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{37-4} \\ \frac{\pi(18,8^2 + 21,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{37-5} \end{cases}$$

$$F_{37} = \text{Max} \begin{cases} 17,585 \\ 17,660 \end{cases} = 17,660 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{38} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(17,3^2 + 20,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{38-4} \\ \frac{\pi(17,3^2 + 20,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{38-5} \end{cases}$$

$$F_{38} = \text{Max} \begin{cases} 17,114 \\ 17,267 \end{cases} = 17,267 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{39} = \text{Max} \begin{cases} \frac{\pi(19,8^2 + 19,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{39-4} \\ \frac{\pi(19,8^2 + 20,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{39-5} \end{cases}$$

$$F_{39} = \text{Max} \begin{cases} 16,728 \\ 16,980 \end{cases} = 16,980 \implies u = \text{Serraria} \implies z = \text{Lumber}$$

$$F_{40} = \text{Max} \left[\begin{array}{l} \frac{\pi(15,7^2 + 18,7^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{40-4} \\ \frac{\pi(15,7^2 + 19,4^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,400) (40,0) - 0,65 + F_{40-5} \end{array} \right]$$

$$F_{40} = \text{Max}\{18,236; 16,296\} \Rightarrow u = \text{Agglomerado} \Rightarrow z = \text{Agglomerado}$$

$$F_{41} = \text{Max} \left[\frac{\pi(14,8^2 + 18,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{41-4} \right]$$

$$= 17,942 \Rightarrow u = \text{Agglomerado} \Rightarrow z = \text{Agglomerado}$$

$$F_{42} = \text{Max} \left[\frac{\pi(14,0^2 + 17,3^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{42-4} \right]$$

$$= 17,489 \Rightarrow u = \text{Agglomerado} \Rightarrow z = \text{Agglomerado}$$

$$F_{43} = \text{Max} \frac{\pi(13,0^2 + 16,5^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{43-4}$$

$$= 17,134 \Rightarrow u = \text{Agglomerado} \Rightarrow z = \text{Agglomerado}$$

$$F_{44} = \text{Max} \frac{\pi(12,0^2 + 15,7^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{44-4}$$

$$= 18,327*** \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{45} = \text{Max} \left[\frac{\pi(10,9^2 + 14,8^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{45-4} \right]$$

$$= 17,967 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{46} = \text{Max} \left[\frac{\pi(9,7^2 + 14,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{46-4} \right]$$

$$= 17,454 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{47} = \text{Max} \left[\frac{\pi(8,4^2 + 13,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{47-4} \right]$$

$$= 17,035 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

$$F_{48} = \text{Max} \left[\frac{\pi(6,8^2 + 12,0^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{48-4} \right]$$

$$= 18,166 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

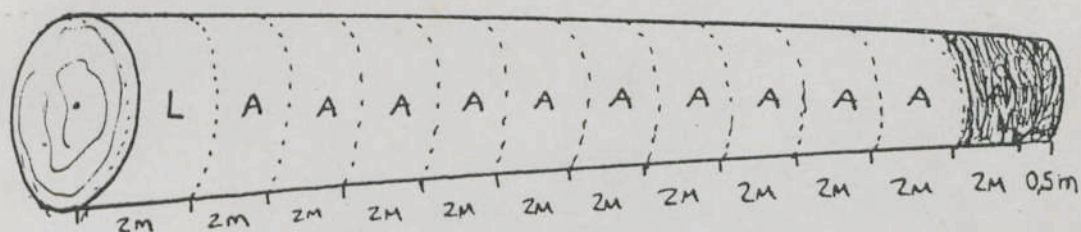
$$F_{49} = \text{Max} \left[\frac{\pi(4,7^2 + 10,9^2)}{80000,0} (4) (0,5) (0,500) (32,0) - 0,4 + F_{49-4} \right]$$

$$= 17,744 \implies u = \text{Aglomerado} \implies z = \text{Aglomerado}$$

A solução ótima é obtida a partir do estágio 44(***), em que foi encontrado o maior valor da função ou relação de recorrência (18,327). Então, a solução ótima, da base para o topo da árvore, é:

L - A - A - A - A - A - A - A - A - A - A

em que A significa que foi obtida uma tora para produção de aglomerado e L, uma tora para laminação, conforme esquema a seguir:



laminação

aglomerado

Foram "perdidos" 2,5 m de tora na parte superior do tronco, embora fosse possível obter, ainda, uma tora de 2,0 m para aglomerado. O custo de conversão desta última tora em aglomerado foi maior do que o preço definido para este uso. Assim, o retorno seria negativo, ou seja, não seria recomendável converter essa última tora para este uso. É óbvio afirmar que esta decisão ocorreu em função dos valores estabelecidos para o preço do aglomerado e para o custo de conversão.