

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Maurício Fernandes Veronese da Silva

**RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS: ESTUDO
PARAMÉTRICO DOS PRINCIPAIS FATORES
QUE A INFLUENCIAM**

Avaliador:

**Defesa: dia 06/15/2015
às 15:10 horas**

Local: UFRGS / Engenharia Nova
Osvaldo Aranha, 99, sala 304

**Anotações com sugestões para
qualificar o trabalho são bem-
vindas. O aluno fará as correções e
lhe passará a versão final do
trabalho, se for de seu interesse.**

Porto Alegre
junho 2015

MAURÍCIO FERNANDES VERONESE DA SILVA

**RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS: ESTUDO
PARAMÉTRICO DOS PRINCIPAIS FATORES
QUE A INFLUENCIAM**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Ronald José Ellwanger

Porto Alegre

junho 2015

MAURÍCIO FERNANDES VERONESE DA SILVA

**RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS: ESTUDO
PARAMÉTRICO DOS PRINCIPAIS FATORES
QUE A INFLUENCIAM**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelos Coordenadores da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2015

Prof. Ronald José Ellwanger
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

Prof. Jean Marie Désir
Dr. pela COPPE/UFRJ
Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ronald José Ellwanger (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Luís Alberto Segóvia Gonzalez (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Amaro e Deonilce, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ronald José Ellwalger, orientador deste trabalho, pela orientação prestada e pela disponibilização dos algoritmos dos programas de análise estrutural elaborados por ele, sem os quais a parte que envolve programação neste trabalho de conclusão de curso teria sido muito mais demorada e complexa do que foi.

Agradeço também à professora Edith Beatriz que prestou um valoroso auxílio no início deste estudo, quando se cogitou usar análise dimensional.

O mundo é cego, e tu vens exatamente dele.

Dante Alighieri

RESUMO

Este trabalho versa sobre a rigidez horizontal de pórticos; mais precisamente: sobre relações – apresentadas através de gráficos – da rigidez horizontal com a variação de alguns dos parâmetros que a influenciam. O Foco deste estudo é a rigidez de conjunto de pórticos planos (que tem influência das rigidezes de cada uma das peças estruturais, além das condições de contorno de cada uma das peças). Buscou-se, através de um estudo paramétrico, entender como as variáveis geométricas das vigas e pilares que formam pórticos planos influenciam no valor da rigidez. Dado que a rigidez horizontal de um pórtico plano é inversamente proporcional ao deslocamento deste pórtico quando submetido a carregamento horizontal na mesma direção dos pavimentos, neste estudo a metodologia empregada foi a análise estrutural de milhares de pórticos planos submetidos a um carregamento horizontal de carga unitária no topo; calculou-se o deslocamento no ponto de aplicação e obteve-se, assim, a rigidez horizontal de muitos pórticos (sendo a rigidez considerada, portanto, nesse caso, o inverso do deslocamento). Tais resultados são apresentados de forma organizada em gráficos. Os milhares de pórticos citados acima foram gerados a partir de uma estrutura padrão ou pequenas variações em relação à estrutura padrão. Algoritmos elaborados em SciLab variaram a estrutura padrão de forma lógica e agruparam os resultados de forma organizada em matrizes, possibilitando posterior elaboração de gráficos. Exemplificando: foram elaborados gráficos expondo a variação da rigidez horizontal como função da razão entre comprimento dos pilares pelo comprimento das vigas. Por fim, foram analisados os gráficos gerados no estudo e buscou-se entender padrões e como as variáveis relacionam-se no que diz respeito à rigidez horizontal.

Palavras-chave: Rigidez de pórticos. Rigidez horizontal de pórticos.
Pórticos planos. Rigidez horizontal em estrutura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado com as principais etapas até a conclusão de um projeto estrutural	17
Figura 2 – Fluxograma indicando as etapas da pesquisa e como elas estão relacionadas entre si	23
Figura 3 – Ilustração mostrando de forma exagerada a deformação em duas estruturas .	26
Figura 4 – Mola submetida a carregamento	31
Figura 5 – Pórtico de 2 vãos e 4 pavimentos submetido a carregamento	32
Figura 6 – Estrutura aporticada com as lajes	33
Figura 7 – Estrutura aporticada sem as lajes	34
Figura 8 – Diafragma rígido apoiado horizontalmente por molas e submetido à carga de vento	34
Figura 9 – Fluxograma simplificado do algoritmo criado para este trabalho	39
Figura 10 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	42
Figura 11 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	43
Figura 12 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	43
Figura 13 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	44
Figura 14 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	44
Figura 15 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	45
Figura 16 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	45
Figura 17 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	46
Figura 18 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	46

Figura 19 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	47
Figura 20 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	47
Figura 21 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	48
Figura 22 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	49
Figura 23 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	49
Figura 24 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	50
Figura 25 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	50
Figura 26 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	51
Figura 27 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	51
Figura 28 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	52
Figura 29 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	52
Figura 30 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	53
Figura 31 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	53
Figura 32 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	54
Figura 33 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	54
Figura 34 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	55
Figura 35 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	56
Figura 36 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	56

Figura 37 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	57
Figura 38 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	57
Figura 39 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	58
Figura 40 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	58
Figura 41 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	59
Figura 42 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	59
Figura 43 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	60
Figura 44 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	60
Figura 45 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	61
Figura 46 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	62
Figura 47 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	62
Figura 48 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	63
Figura 49 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	63
Figura 50 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	64

Figura 51 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	64
Figura 52 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	65
Figura 53 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	65
Figura 54 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	66
Figura 55 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	66
Figura 56 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	67
Figura 57 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	67
Figura 58 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	69
Figura 59 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	70
Figura 60 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	70
Figura 61 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	71
Figura 62 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	71
Figura 63 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	72
Figura 64 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	73

Figura 65 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	73
Figura 66 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	74
Figura 67 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	74
Figura 68 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	75
Figura 69 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	75
Figura 70 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	76
Figura 71 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	77
Figura 72 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	77
Figura 73 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	78
Figura 74 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	78
Figura 75 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	79
Figura 76 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	80
Figura 77 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	80
Figura 78 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	81

Figura 79 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	82
Figura 80 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	82
Figura 81 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	83
Figura 82 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	84
Figura 83 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão	85
Figura 84 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para a padrão deste trabalho, mas apresentando na abcissa relação L_v/L_p pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	86
Figura 85 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – apresentando na abcissa a relação A_p/A_v para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	86
Figura 86 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – apresentando na abcissa a relação I_p/I_v para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	87
Figura 87 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – apresentando na abcissa a relação I_p/I_v para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão	87
Figura 88 – Explicação referente à pouca influência da variação da área da seção das peças estruturais na no resultado da rigidez	88
Figura 89 – Variação na ordenada de gráfico	89
Figura 90 – Variação da ordenada no gráfico e variação da rigidez em duas linhas diferentes	90
Figura 91 – Valores de pontos de L_p/L_v de rigidez máxima para diferentes números de pavimentos	91
Figura 92 – Comparação entre dois gráficos gerados com a mesma estrutura padrão e o mesmo número de vãos, em ambos há variação do momento de inércia, mas em um a área varia e em outro não	92
Figura 93 – Comparação entre dois gráficos gerados com a mesma estrutura padrão e o mesmo número de vãos, em ambos há variação do momento de inércia, mas em um a área varia e em outro não	93

Figura 94 – Comparação entre três pares de gráficos análogos (três elaborados com a estrutura padrão e três com modificações para se encaixar na relação L_p/L_v ideal), todos com o mesmo número de vãos	94
Figura 95 – Comparação entre dois pares de gráficos análogos (cada par tem um gráfico elaborado com a estrutura padrão e o seu análogo com modificações para se encaixar na relação L_p/L_v ideal); um par para cinco vãos e outro para três	95
Figura 96 – Comparação entre gráficos gerados com inversões de parâmetros geométricos em relação à estrutura padrão, com alguns valores destacados evidenciando as diferenças	96
Figura 97 – Comparação entre gráficos gerados com inversões de parâmetros geométricos em relação à estrutura padrão, com alguns valores destacados evidenciando as diferenças	96

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p – área bruta da seção reta de barra de pilar

A_v – área bruta da seção reta de barra de viga

I_p – momento de inércia de barra de pilar

I_v – momento de inércia de barra de viga

L_p – comprimento de barra de pilar

L_v – comprimento de barra de viga

E – módulo de elasticidade

K – rigidez

U – deslocamentos

F – força

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	21
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	21
2.2.1 Objetivo principal	21
2.2.2 Objetivo secundário	21
2.3 PRESSUPOSTO	21
2.4 DELIMITAÇÕES	22
2.5 LIMITAÇÕES	22
2.6 DELINEAMENTO	22
3 MORFOLOGIA ESTRUTURAL	25
3.1 MORFOLOGIAS	25
3.1.1 Estrutura tubular	25
3.1.2 Paredes de cisalhamento	27
3.1.3 Alvenaria estrutural	27
3.1.4 Estrutura aporticada de nós rígidos	28
3.2 RELAÇÕES SOBRE A RIGIDEZ HORIZONTAL ENTRE AS MORFOLOGIAS APRESENTADAS	29
4 RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS	30
4.1 ANALOGIA EM QUE SE TRATA AS SUBESTRUTURAS DE FORMA EQUIVALENTE À MOLAS TRABALHANDO NO REGIME ELÁSTICO	30
4.2 DISTRIBUIÇÃO DA CARGA HORIZONTAL EM SUBESTRUTURAS RESISTENTES	32
4.3 CENTRO ELÁSTICO	35
5 ANÁLISE ESTRUTURAL MATRICIAL	36
5.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO SCILAB PARA PROGRAMAÇÃO	37
5.2 OBSERVAÇÕES SOBRE O ALGORITMO CRIADO PARA ESTE TRABALHO	38
6 GRÁFICOS RELACIONANDO A RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS COM A VARIAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DA ESTRUTURA	41
6.1 GRÁFICOS DA ESTRUTURA PADRÃO	41
6.1.1 Gráficos com variação da área da seção reta das peças estruturais – mantendo-se os momentos de inércia fixos	42
6.1.2 Gráficos com variação dos comprimentos das peças estruturais	48

6.1.3 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – variando-se as áreas da seção bruta de forma coerente	55
6.1.4 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – mantendo-se fixas as áreas da seção bruta	61
6.2 GRÁFICOS DE ESTRUTURAS DIFERENTES DA ESTRUTURA PADRÃO	68
6.2.1 Gráficos com estrutura semelhante à estrutura padrão deste trabalho, mas com relação L_p/L_v ideal	68
6.2.1.1 Gráficos com variação da área da seção reta das peças estruturais – mantendo-se os momentos de inércia fixo, mas com relação L_p/L_v ideal	68
6.2.1.2 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – variando-se as áreas da seção bruta de forma coerente, mas com relação L_p/L_v ideal	72
6.2.1.3 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – mantendo-se fixas as áreas da seção bruta, mas com relação I_p/I_v ideal	76
6.2.2 GRÁFICOS GERADOS A PARTIR DE PÓRTICOS COM CONFIGURAÇÕES DIVERSAS	79
7 RELAÇÕES INTERESSANTES ENTRE AS VARIÁVEIS NO QUE DIZ RESPEITO À RIGIDEZ HORIZONTAL	88
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho versa sobre o estudo da rigidez horizontal de pórticos. A rigidez horizontal de um pórtico é um parâmetro importante no dimensionamento de estruturas aporticadas uma vez que, neste tipo de estrutura, a rigidez horizontal da estrutura é a soma das rigidezes horizontais das subestruturas que resistem ao esforço horizontal, ou seja: os pórticos que a constituem. Estruturas de edifícios devem ter rigidez horizontal porque têm carregamento horizontal que, via de regra, se deve unicamente a cargas de vento e sismos, embora no Brasil este segundo seja menos importante. Em outros termos: geralmente as estruturas de edifícios têm vínculo externo somente na base dos pilares do térreo, inexistindo, portanto, qualquer vinculação horizontal nos andares superiores; dessa forma, a única resistência horizontal que a estrutura oferece é a resistência à deformação das subestruturas que a formam. Esta resistência à deformação dos pórticos que é a rigidez horizontal, tema deste trabalho.

O trabalho de dimensionamento estrutural é, em última análise, um trabalho iterativo, como é mostrado da figura 1. As principais etapas do trabalho influenciam-se mutuamente, de forma que constantemente o projetista vê a necessidade de refazer ou revisar parte do trabalho já terminado.

Figura 1 – Esquema simplificado com as principais etapas até a conclusão de um projeto estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

Um mau lançamento inicial da estrutura pode acarretar em grandes perdas de tempo por retrabalho; por isso, é de grande valia alguma ferramenta capaz de auxiliar nesta fase (pelo menos no que diz respeito à rigidez horizontal dos pórticos). É de grande valia, também, que o

projetista tenha uma boa noção prévia de como a rigidez horizontal é impactada pelo tamanho das vigas, por mudanças no tamanho dos pilares e outras variações possíveis; tal conhecimento diminui as chances da necessidade de grandes ajustes na configuração inicial da estrutura pois, dessa forma, o projetista tende a não ter que fazer grandes mudanças na estrutura inicialmente lançada.

A falta de rigidez horizontal nas subestruturas em um edifício pode acarretar em uma série de problemas, tais como:

- a) acentuados deslocamentos nos andares superiores, provocando desconforto aos usuários da tal estrutura;
- b) flexibilidade tal que pode vir a comprometer a integridade da estrutura em função de fadiga dos materiais;
- c) flexibilidade e deslocamentos tais que impossibilitam a instalação de determinado maquinário ou instrumentação que seja do desejo dos ocupantes da estrutura (por exemplo: manômetros de altíssima precisão em algum laboratório. Pequenos deslocamentos ou vibrações na estrutura podem causar ruído nas leituras desses equipamentos);
- d) incapacidade da estrutura de resistir a sismos;
- e) incapacidade da estrutura resistir às cargas de vento, ou ainda: resistir às cargas de vento porém com uma indesejável e perigosa torção na estrutura do edifício em função de o centro de carregamento estar num posicionamento desfavorável em relação ao centro elástico da estrutura.

Em vista da importância e utilidade de uma ferramenta confiável para a indicação de qual variável deve ser alterada para se obter o valor desejado de rigidez, e ainda, para se fazer uma estimativa da rigidez horizontal de pórticos, este estudo apresenta uma ferramenta que atende a esta demanda: um conjunto de gráficos que expõem diversas análises estruturais de pórticos relacionando a rigidez horizontal com variáveis que a influenciam. Neste trabalho foi feita a análise estrutural de diversos pórticos. Os resultados dessas análises, no que diz respeito à rigidez horizontal, foram organizados em gráficos, de forma que se possa observar a rigidez horizontal como função da relação entre as variáveis das peças estruturais que formam o pórtico.

As variáveis em questão são as variáveis geométricas dos pilares: L_p (comprimento de barra de pilar), A_p (área bruta da seção reta de barra de pilar) e I_p (momento de inércia de barra de pilar); as variáveis geométricas das vigas: L_v (comprimento de barra de viga), A_v (área bruta da seção reta de barra de viga) e I_v (momento de inércia de barra de viga); além de E (o módulo de

elasticidade), embora este tenha sido mantido constante neste trabalho, e o número de pavimentos. Como a rigidez de pórticos (por se tratar de rigidez de conjunto) é influenciada pelas rigidezes das peças estruturais que os formam, é natural que este estudo seja feito com as variáveis acima citadas.

O trabalho de análise estrutural mencionado foi feito através de simulação computacional utilizando um algoritmo que permite agrupar os resultados na forma de matrizes para facilitar a elaboração de gráficos. O programa utilizado para o processamento utiliza o método da rigidez, amplamente usado em análise computacional.

O método da rigidez é usado em análises de estruturas reticuladas, que é um modelo bastante razoável para um pórtico. Inclusive, boa parte das estruturas aporticadas, quando analisadas computacionalmente, são como modelo reticulado pelo método da rigidez.

O algoritmo elaborado para esse trabalho analisou estruturas diversas vezes. Foram feitas análises paramétricas: variou-se um dos parâmetros enquanto os outros foram mantidos constantes. Foi arbitrada uma estrutura padrão, um pórtico plano com dimensões longitudinais e de seção reta de vigas e pilares, além disso, foi fixado um módulo de elasticidade. O número de pavimentos é uma das variáveis do estudo, por isso a estrutura padrão não tem o número de pavimentos pré-estabelecido. A definição de uma estrutura padrão foi necessária exatamente por se tratar de uma análise paramétrica.

O trabalho foi desenvolvido com a calculadora Scilab, na qual é possível escrever *scripts* (algoritmos, sequências de comandos, que geram resultado através de linguagem interpretada, não compilada). Tal linguagem se mostrou ideal para esse uso devido à facilidade de implementação de algoritmos e das ferramentas matemáticas disponíveis no portfólio de comandos, sobretudo a janela de saída gráfica.

No capítulo 3 deste trabalho consta uma breve explanação sobre morfologia estrutural, além de observações referentes à resistência ao carregamento horizontal em estruturas de edifícios.

No capítulo 4 é exposta uma metodologia de distribuição da carga de vento que carrega a estrutura do edifício nas subestruturas resistentes, levando em conta a rigidez horizontal.

No capítulo 5 consta uma explanação sobre o algoritmo criado.

No capítulo 6 são apresentados os gráficos já mencionados, que colocam a rigidez horizontal de pórticos em função da variação de determinados parâmetros.

No capítulo 7 são expostas observações sobre os gráficos gerados. Trata-se da interpretação dos resultados.

As considerações finais são apresentadas no capítulo 8.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como a variação dos fatores que influenciam a rigidez horizontal de pórticos impactam no resultado dessa rigidez?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é: a criação de gráficos, através de análises estruturais, em que se possa observar a variação da rigidez horizontal de pórticos relacionada com a mudança nos valores das variáveis (geométricas e do material) dos pilares e das vigas que o formam.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é: a elaboração de um algoritmo de análise de estruturas aporticadas pelo método da rigidez.

2.3 PRESSUPOSTO

Todo o desenvolvimento deste trabalho tem por pressuposto que a estrutura está em um regime de carregamento tal que o método da rigidez seja válido, ou seja: pequenos deslocamentos e as seções retas das peças estruturais permanecem planas durante o carregamento.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de pórticos de nós rígidos, de barras retas e de seção reta constante.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

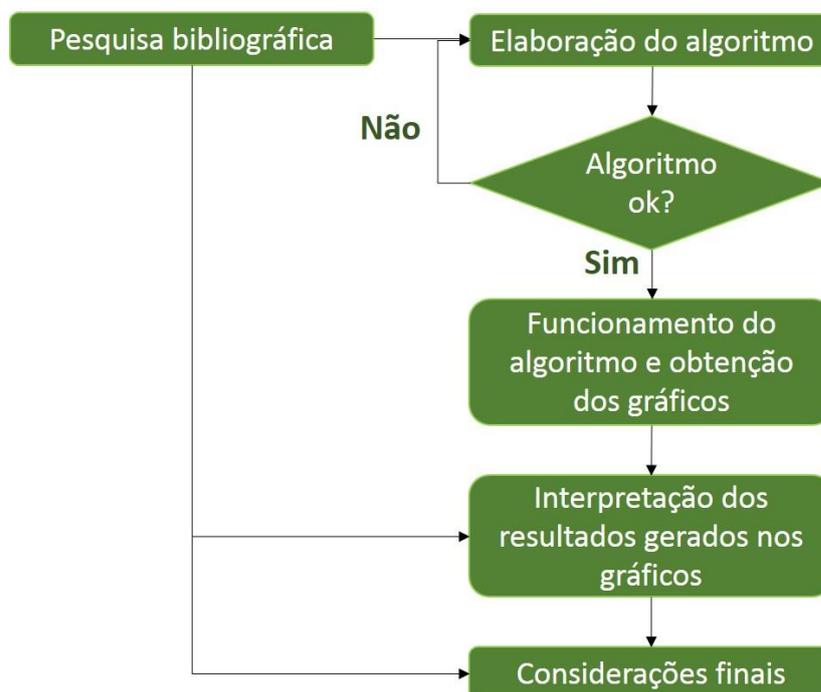
- a) o estudo de apenas pórticos com vãos idênticos e de pés-direitos idênticos;
- b) o estudo de apenas pórticos em que todas as vigas têm propriedades físicas e geométricas (I_v , A_v , L_v) idênticas, sendo o mesmo válido para os pilares, que têm propriedades físicas e geométricas (I_p , A_p , L_p) idênticas. O mesmo vale para o módulo de elasticidade;
- c) o estudo pretende criar ferramentas (gráficos) que indiquem quais variáveis têm maior impacto no aumento da rigidez horizontal, mas não fará nenhuma relação desses impactos com viabilidade executiva nem normativa (não será observado se eventuais áreas brutas ou pés direitos estão de acordo com as normas e códigos de obras vigentes, por exemplo);
- d) o estudo não relacionará a mudança de variáveis com os custos a elas referentes, ou seja: não será estimado quanto a mais de insumos custaria para aumentar a seção bruta de uma das peças, por exemplo (o mesmo vale para as outras variáveis).

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas na figura 2 e listadas a seguir, além de estarem descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do algoritmo;
- c) teste do algoritmo;
- d) funcionamento do algoritmo e obtenção dos gráficos;
- e) interpretação dos resultados contidos nos gráficos;
- f) considerações finais.

Figura 2 – Fluxograma indicando as etapas da pesquisa e como elas estão relacionadas entre si



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica proporciona respaldo técnico e científico ao trabalho. Através da pesquisa, pode-se observar os modelos teóricos que são amplamente aceitos na análise estrutural, bem como os métodos empregados para este fim. Nesta etapa do trabalho foram pesquisadas obras que tratam de estruturas de edifícios altos e análise estrutural computacional.

A elaboração do algoritmo foi, em parte, um trabalho de reprogramação de antigos algoritmos elaborados pelo professor Ronald Ellwanger – orientador deste trabalho. Os referidos algoritmos foram elaborados para a análise estrutural de pórticos planos, tendo sido feitos em linguagem *BASIC*. Estes algoritmos foram primeiramente reprogramados e testados em linguagem interpretada na calculadora SciLab. Posteriormente foi implementada uma adaptação para que ele funcionasse unicamente para a medição da rigidez horizontal do pórtico. O resto do algoritmo foi elaborado unicamente para este trabalho (alguns detalhes são expostos no capítulo 5).

O procedimento de medição da rigidez consiste em aplicar uma carga de valor unitário no topo do pórtico e medir o deslocamento no ponto de aplicação. O inverso do deslocamento no topo é a rigidez do pórtico (SÜSSEKIND, 1985), trata-se de um procedimento análogo à medição

da rigidez de uma mola, tendo como diferença principal que na medição da rigidez horizontal de um pórtico em tamanho real este procedimento deve ser feito teoricamente enquanto que com uma mola se pode, sem muita dificuldade, aplicar uma carga e medir o deslocamento. O procedimento acima citado é explicado em detalhe no capítulo 4 deste trabalho.

Com respaldo da pesquisa bibliográfica, foram avaliadas as maneiras mais adequadas de elaboração do algoritmo, quais são os limites de variação dos parâmetros que aparecerão nos gráficos e detalhes referentes à apresentação dos gráficos, como de quantos em quantos pavimentos deve haver uma curva.

O algoritmo feito foi testado antes de ser colocado em funcionamento efetivamente. Isso poderia ter significado grandes economias de tempo, pois, caso houvesse algum erro que comprometesse os resultados, estes seriam descobertos na hora mais oportuna, possibilitando que fossem feitos os devidos reparos.

A interpretação dos resultados foi a etapa em que se observou padrões ou tendências interessantes. Foram feitas observações que podem auxiliar projetistas e alunos a fazer um bom lançamento inicial de estrutura no que diz respeito à rigidez horizontal dos pórticos planos que formam a estrutura de um edifício que se está projetando; se naquele caso o mais eficaz é alterar a área bruta, o momento de inércia, ou o comprimento das peças, e ainda: de quais peças (vigas ou pilares?).

Uma observação válida é que, via de regra, alterações na área bruta impactam no momento de inércia, e vice-versa, mas o que se quer indicar com a interpretação dos resultados é qual alteração provocará mais efeito separadamente; por isso os resultados foram apresentados de fora separada e posteriormente com a variação de ambos ao mesmo tempo.

3 MORFOLOGIA ESTRUTURAL

Existem diversas morfologias estruturais, cada qual com as suas peculiaridades. Vários fatores, principalmente os custos e a finalidade do edifício (a que ele irá servir) influenciam na escolha.

Neste capítulo serão apresentadas, de forma sucinta, algumas morfologias estruturais e serão pautadas algumas de suas vantagens e desvantagens. Serão, também, expostas algumas considerações sobre a rigidez horizontal em cada uma das morfologias citadas.

3.1 MORFOLOGIAS

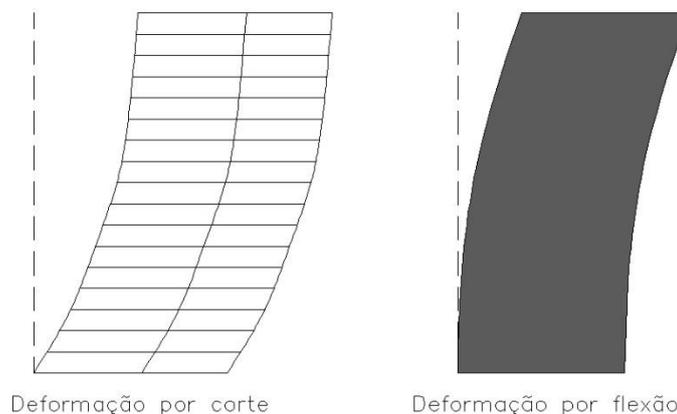
3.1.1 Estrutura tubular

Trata-se de um tipo de fachada estrutural, como mencionado por Shueller (1986, p. 69, tradução nossa) quando escreve sobre estrutura tubular:

Para edifícios altos, o contraventamento feito por barras se mostra mais facilmente acomodado no exterior. O contraventamento feito por barras no interior restringe o fluxo livre dos ocupantes no espaço. As colunas nesta solução têm de ter espaçamento relativamente pequeno para se evitar a necessidade de uma laje demasiadamente robusta.

O modelo tem como premissa que a estrutura responde aos carregamentos horizontais de forma equivalente a uma viga engastada no solo (SCHUELLER, 1986). Esse comportamento se dá pela grande densidade de pilares na fachada que fazem o comportamento da estrutura como um todo ser semelhante à um tubo oco, ou uma viga de seção caixão. Isso significa que a estrutura apresenta grande rigidez horizontal. Estruturas tubulares tendem a ter a configuração de estrutura deformada mais próxima à de uma estrutura que deforma por flexão, diferente de estruturas que deforma por corte; tal diferença pode ser observada na figura 3.

Figura 3 – Ilustração mostrando de forma exagerada a deformação em duas estruturas



(fonte: adaptado de SCHUELLER, 1986, p. 97)

Este é um dos sistemas estruturais mais usados em edifícios altos já há algumas décadas. Tal sistema se caracteriza pela disposição de uma grande quantidade de pilares na fachada, sendo estes pilares postos com o eixo de maior inércia perpendicular à fachada. Além disso, as ligações entre os pilares e vigas devem ser rígidas. O sistema proporciona uma rigidez horizontal bastante satisfatória, fazendo desses pilares da fachada os responsáveis pelo contraventamento. Nesse caso, os pilares dispostos no interior do edifício podem ser dimensionados unicamente para as cargas gravitacionais (SCHUELLER, 1986). Uma observação que cabe é que quando se diz que os pilares no interior do edifício são dimensionados unicamente para carga gravitacional não se quer dizer que tais pilares são submetidos unicamente a esforço normal. Devido à interação com as outras peças estruturais, estes pilares são solicitados também a esforço tipo momento, porém, a uma ordem de grandeza bastante inferior aos outros na fachada.

Ainda conforme Shueller (1986, p. 101, tradução nossa):

A rigidez da fachada pode ser ainda incrementada pela adição de barras diagonais. A rigidez do tubo [formado pela disposição dos pilares na fachada, o que faz a estrutura parecer um grande tubo] é tão alta que responde ao carregamento lateral de forma similar à uma viga engastada.

Este sistema foi concebido para edifícios altos, porém, eventualmente acaba sendo uma boa alternativa para edifícios de aproximadamente vinte pavimentos, devido à execução que pode ser bastante rápida e à grande conveniência de se ter amplos espaços sem pilares, o que é muito bom para edifícios comerciais (TARANAT, c2012). O trabalho de análise estrutural e

dimensionamento nesse sistema não demanda grandes esforços se comparado com sistemas mais empregados, como estrutura aporticada convencional.

O sistema de estrutura tubular tem como ponto crítico as ligações rígidas entre pilares e vigas. Estas ligações devem ser dimensionadas e executadas com muita atenção, pois delas dependem a eficiência do sistema de contraventamento.

3.1.2 Paredes de cisalhamento

Paredes de cisalhamento são estruturas dimensionadas para suportar esforços gravitacionais e laterais. Trata-se de grandes paredes que, lateralmente, oferecem grande resistência ao deslocamento devido às suas dimensões (SCHUELLER, 1986).

Paredes de cisalhamento têm como característica causar na estrutura como um todo uma deformação lateral nos moldes de uma deformação por corte. O que deve ser levado em conta quando (entre outras coisas) se analisar as tensões solicitantes no fechamento de fachada e nas janelas (SCHUELLER, 1986). Isso pode ser decisório no quesito conforto dos ocupantes da edificação. Na figura 3 se pode observar a diferença entre os dois padrões de deformação lateral da estrutura.

Como dito anteriormente, cada caso deve ser analisado em separado, pois cada morfologia tem suas vantagens e desvantagens.

3.1.3 Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural é, provavelmente, o sistema construtivo mais antigo que existe. Por milênios, empilhar pedras unidas com algum ligante rudimentar pareceu a melhor maneira de se construir uma habitação. Nas últimas décadas a alvenaria estrutural vem retomando força devido à evolução na qualidade dos materiais (blocos e argamassas) e a grandes avanços na metodologia de cálculo estrutural que, outrora, era meramente empírica, o que provocava por vezes um dimensionamento exagerado ou uma estrutura instável.

A alvenaria estrutural tem como característica principal a quase ausência de pilares e a significativa redução no volume de vigas. Nessa morfologia estrutural, as paredes têm função dupla: fechamento e estrutura (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

Fazendo uma análise bastante rápida, as principais vantagens da alvenaria estrutural se encontram no custo reduzido em relação a uma estrutura aportricada convencional e à grande produtividade que se consegue imprimir em uma obra de alvenaria estrutural. A alvenaria estrutural não é ideal quando se almeja grandes alturas (para os materiais disponíveis no mercado atualmente e para os empregos convencionas da edificação no Brasil, aparentemente a alvenaria estrutural tem a sua viabilidade máxima em edifícios de até 15 pavimentos aproximadamente) (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

3.1.4 Estrutura aportricada de nós rígidos

Esta é uma morfologia estrutural amplamente empregada em edifícios de todos os tipos.

Segundo Shueller (1986, p. 89, tradução nossa):

Estruturas aportricadas de nós rígidos geralmente são formadas por uma configuração retangular de vigas horizontais e pilares verticais unidos por conectores rígidos de forma a funcionarem estruturalmente em conjunto num mesmo plano. Esta subestrutura pode estar em um plano de paredes internas na fachada da estrutura.

Quando se trata de aço, enrijecer os nós da estrutura significa acrescer o custo nas ligações, além de uma transição de momento fletor para os pilares, o que tende a encarecer a estrutura (BELLEI et al, 2008).

A viabilidade do sistema decai com o aumento dos vãos e, de forma análoga: com o aumento dos pilares (SCHUELLER, 1986). Isso acontece porque a rigidez horizontal dos pórticos é inversamente proporcional ao distanciamento dos pilares; sendo assim, as peças estruturais deverão ser mais robustas para que o pórtico seja suficientemente rígido.

Uma das maiores vantagens dessa morfologia é a dispensa de barras inclinadas e de grandes subestruturas (como núcleos centrais e paredes de cisalhamento) (SCHUELLER, 1986); em tais casos, quando há peças estruturais cujo tamanho destoa das demais, muitas vezes se enfrenta problemas práticos durante a produção.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A RIGIDEZ HORIZONTAL ENTRE AS MORFOLOGIAS APRESENTADAS

No que diz respeito à rigidez horizontal, a estrutura aporticada de nós rígidos apresenta, via de regra, rigidez maior (para a mesma massa de material empregada na estrutura) que outras estruturas aporticadas de dimensões semelhantes com enrijecimento feito de outra forma (com barras inclinadas, por exemplo) (SCHUELLER, 1986). Porém, estruturas aporticadas costumam ser menos rígidas que outras, como estrutura tubular.

O sistema tubular apresenta rigidez horizontal muito boa se comparado a sistemas como estrutura aporticada de nós rígidos; inclusive, a rigidez horizontal é uma das suas maiores vantagens deste sistema em comparação a outros sistemas quando se analisa a viabilidade para grandes estruturas (SCHUELLER, 1986).

Na comparação entre a estrutura tubular e a estrutura aporticada, esta última tem um inconveniente que é a possibilidade de acentuadas torções caso uma região da estrutura, próxima à uma das extremidades, seja muito mais rígida que a outra. No caso de estruturas tubulares, como comumente são simétricas, esse inconveniente não é tão grave.

Já as paredes de cisalhamento podem ser uma alternativa eficaz caso haja a necessidade de se ter um elemento estrutural de grandes dimensões suportando carga gravitacional e consiga-se fazer a parede de cisalhamento se encaixar nesse contexto. Caso contrário ela tende a ser uma solução custosa, além de causar uma baixa na produtividade da obra.

Na alvenaria estrutural, a carga de vento será suportada pelas paredes, porém, nem todas as paredes suportarão exatamente a mesma carga. Paredes mais rígidas suportarão mais carga que as de menor rigidez. No caso da alvenaria estrutural a rigidez horizontal pode ser relacionada com o momento de inércia da parede (momento de inércia calculado com as dimensões de vista superior da parede) (RAMALHO; CORRÊA, 2003). Isso faz com que, no lançamento da estrutura, o projetista tenha alguns cuidados. Estruturas assimétricas podem vir a apresentar acentuada torção dependendo da esbeltez e da distribuição das paredes resistentes à carga horizontal.

4 RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia de distribuição das cargas horizontais que carregam edifícios nas suas subestruturas resistentes fazendo uso de uma analogia que considera as subestruturas resistentes como molas.

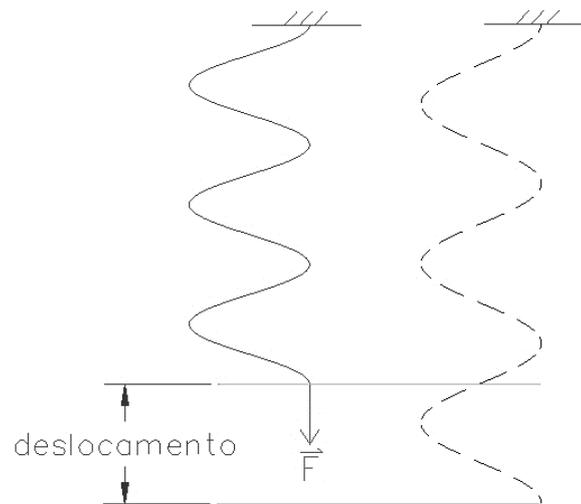
4.1 ANALOGIA EM QUE SE TRATA AS SUBESTRUTURAS DE FORMA EQUIVALENTE À MOLAS TRABALHANDO NO REGIME ELÁSTICO

A analogia de distribuição da carga de vento nas subestruturas trata-se de um método simplificado que foi bastante usado por ser relativamente simples se comparado com outros métodos. Embora não seja exato, oferece resultados bastante satisfatório.

O método consiste em substituir teoricamente as subestruturas resistentes por molas. A função destas molas teóricas é a de tentar reproduzir a característica das subestruturas resistentes que não são plenamente rígidas. Dessa forma, um parâmetro importante é a rigidez da subestrutura em questão.

Pode-se medir a rigidez de uma mola aplicando-se nesta uma carga, observando-se o deslocamento e, se a mola está funcionando no regime elástico, a relação entre a carga aplicada e o deslocamento será linear e será dada pela rigidez. A rigidez será a razão entre a força e o deslocamento. Imaginando a força F como sendo de módulo unitário, a rigidez K será o inverso do deslocamento (em unidades coerentes). Este procedimento de medição da rigidez de uma mola nada mais é que o procedimento exposto nos cursos básicos de física e válido quando a Lei de Hooke é válida. Na figura 4 pode-se observar uma mola submetida a um carregamento aplicado pelo vetor F ; na esquerda: a mola indeformada, antes do carregamento, à direita, em linha tracejada: a configuração deformada da mola sob a ação da carga.

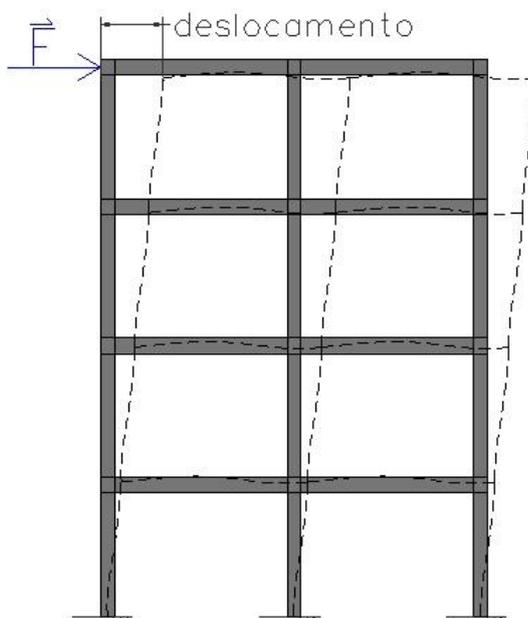
Figura 4 – Mola submetida a carregamento.



(fonte: elaborado pelo autor)

Trazendo a maneira de medir a rigidez de uma mola para o caso de um pórtico, o procedimento consiste em aplicar uma força F de valor unitário no topo do edifício. Como o interesse é a rigidez horizontal do pórtico no seu próprio plano, a força deve ser aplicada na horizontal e paralela às vigas. Uma vez aplicada a força, o objetivo é calcular o deslocamento no ponto de aplicação. A figura 5 mostra um pórtico com a força aplicada e o deslocamento que ela causa; em linha tracejada: a configuração exagerada da estrutura deformada. O cálculo do deslocamento pode ser feito sem muito esforço em algum *software* de análise estrutural ou até mesmo a mão, dependendo do tamanho do pórtico em questão. Assim como na mola, em que a rigidez relaciona a carga aplicada com o deslocamento, neste caso será análogo, supondo que a estrutura funcione no regime elástico, e a carga aplicada é unitária, a rigidez será o inverso do deslocamento (em unidades coerentes).

Figura 5 – Pórtico de 2 vãos e 4 pavimentos submetido a carregamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Uma vez medidas as rigidezes dos pórticos que atuam como subestrutura de contraventamento da estrutura maior (sendo chamada aqui de “estrutura maior” a estrutura do edifício todo, estrutura composta pelas lajes e pelas subestruturas, que no caso são os pórticos), resta distribuir a carga de vento nestas subestruturas e observar como a estrutura maior se deforma.

4.2 DISTRIBUIÇÃO DA CARGA HORIZONTAL EM SUBESTRUTURAS RESISTENTES

A distribuição da carga horizontal como procedimento de análise estrutural é um trabalho bastante importante.

Segundo Ellwanger (2005. p. 27):

Uma questão fundamental na análise da estrutura de um edifício é a determinação das parcelas de distribuição do carregamento horizontal entre as subestruturas de contraventamento. Para isso, é assumido o comportamento dos pavimentos como diafragmas rígidos, isto é, indeformáveis em seus planos.

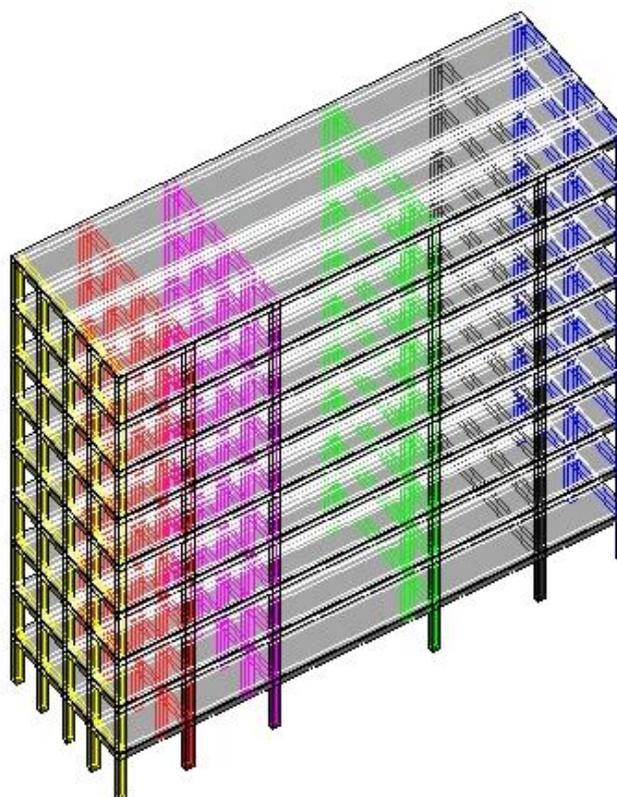
Uma vez que a estrutura dos pavimentos seja constituída de diafragmas rígidos, a distribuição das cargas de vento pode ser feita se aproveitando essa condição. Entende-se que o pavimento,

no seu próprio plano, rotaciona e translada, mas não comprime, de forma que a deformação de cada subestrutura está relacionada com a sua própria rigidez (ELLWANGER, 2005).

Sendo assim, um procedimento simplificado bastante razoável para a distribuição da carga de vento em subestruturas resistentes é a analogia de diafragma rígido apoiado horizontalmente por molas, onde cada mola é a representação estrutural da subestrutura contida naquele ponto (ELLWANGER, 2005)

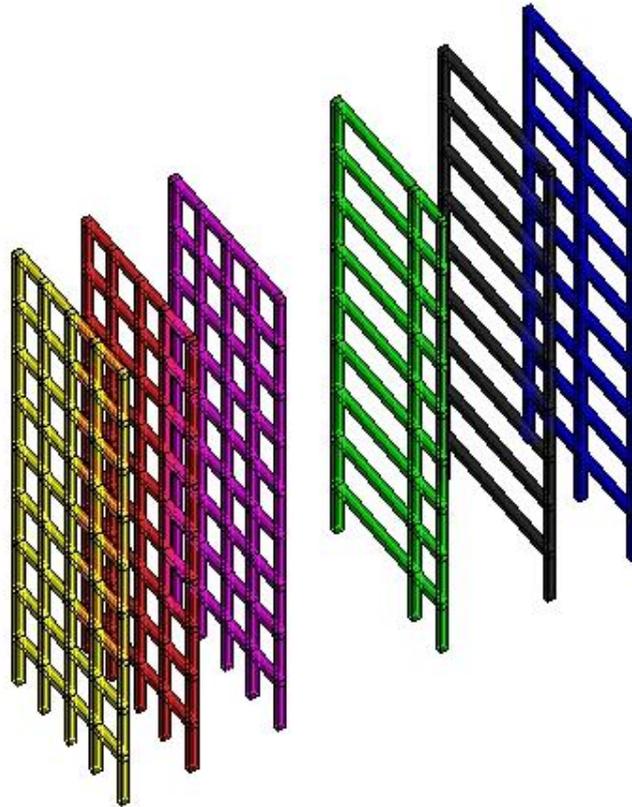
Nas figuras 6, 7 e 8 pode-se observar uma representação gráfica da analogia mencionada. Nas figuras 6 e 7 se vê uma estrutura aporticada, na qual é possível perceber pórticos de diferentes cores que são os responsáveis pela resistência horizontal de cargas incidindo na face maior (na figura 7 as lajes foram retiradas para facilitar a visualização); já na figura 8 se vê a estrutura de um pavimento apoiada horizontalmente pelas molas de rigidez equivalente aos pórticos (trata-se da vista superior de um pavimento com molas fictícias).

Figura 6 – Estrutura aporticada com as lajes



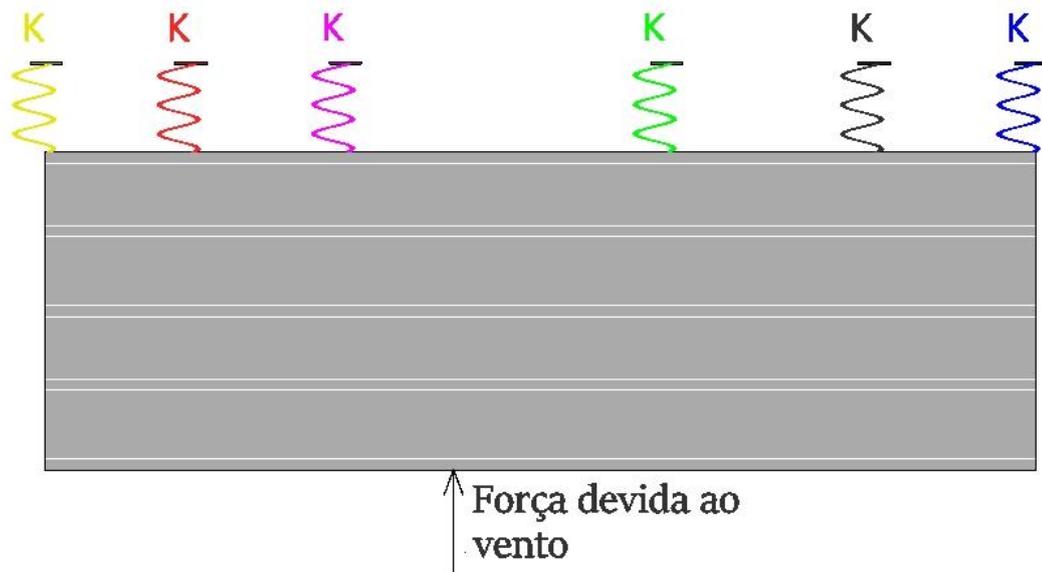
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 – Estrutura aporricada sem as lajes



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – Diafragma rígido apoiado horizontalmente por molas e submetido à carga de vento



(fonte: elaborado pelo autor)

Süssekind (1985, p. 177) explica as premissas da consideração das lajes como rígidas no plano horizontal e sobre as considerações de constante de mola das subestruturas:

Na análise da estabilidade horizontal dos prédios, as diversas lajes são consideradas com rigidez infinita no plano horizontal (hipótese bastante razoável, ainda mais face aos baixos valores de cargas horizontais normalmente atuantes ao nível de cada piso) e, assim, a repartição entre os sistemas de contraventamento das ações horizontais se dará em função da posição e constante de mola de cada elemento de contraventamento.

Mesmo que o projetista não use o referido método no seu projeto, o entendimento desse procedimento simplificado ajuda no entendimento da estrutura como um todo, ou seja: ter uma ideia qualitativa de como a estrutura deve se deformar quando submetida ao carregamento, como o projeto pode ser melhorado e ainda, entre as variáveis que influenciam na rigidez horizontal das subestruturas, qual provoca maior variação na rigidez se for alterada; todo esse entendimento qualitativo da estrutura não é muito fácil de ser obtido com o uso de métodos mais precisos como a modelagem do edifício todo como pórtico espacial. Nem sempre é claro qual das variáveis é mais significativa na rigidez horizontal de pórticos. Pode-se encontrar na bibliografia explicações qualitativas a este respeito mas, raramente, explicações numéricas.

4.3 CENTRO ELÁSTICO

A determinação do centro elástico do edifício é bastante importante, entre outras coisas, para se verificar a torção máxima na estrutura, o que está diretamente ligado à esforços máximos na fachada.

ELLWANGER (2005, p. 27-28) define centro elástico da seguinte maneira:

O centro elástico ou centro de rigidez é definido como um ponto do sistema caracterizado pela condição: qualquer força, cuja reta de ação passe por este ponto, não provoca rotação do sistema dentro de seu plano, havendo, portanto, somente uma translação na direção da força.

A determinação do centro elástico pode ser feita, portanto, caso se use a analogia descrita acima, com facilidade quando se tem a rigidez de cada uma das subestruturas. O modelo final de diafragma rígido apoiado horizontalmente por molas (como mostrado na figura 8) é de fácil resolução e sem muitos esforços se obtém os parâmetros desejados.

5 ANÁLISE ESTRUTURAL MATRICIAL

Neste capítulo são feitos alguns comentários sobre análise estrutural matricial e sobre o algoritmo desenvolvido para este trabalho.

Este trabalho usou técnicas de programação para gerar o produto final que propõe: os gráficos. Trata-se de algoritmos de solução direta, procedimento mais adequado nesse caso.

Soriano (2005, p. 251) define solução direta em oposição a resolução por sistemas iterativos da seguinte maneira:

Os métodos de resolução de sistemas de equações algébricas lineares podem ser classificados em iterativos e diretos. Nos métodos iterativos, arbitra-se uma “solução tentativa”, para, por meio de aproximações sucessivas, chegar-se à solução procurada. Nos métodos diretos, têm-se algoritmos que fornecem diretamente a solução procurada. Os primeiros são adequados quando da análise de estruturas com muitas centenas de milhares de equações. Contudo, métodos diretos se mostram mais eficientes [...].

No método da rigidez o objetivo máximo (sem entrar em detalhes muito específicos) é resolver a matriz de rigidez da estrutura. Soriano (2005, p. 49) explica como ela é formada:

O método dos deslocamentos é também denominado **método da rigidez**. Nele, determina-se um sistema de equações de equilíbrio, em que a matriz dos coeficientes é chamada de **matriz de rigidez** e o vetor dos termos independentes, **vetor das forças nodais**. [...] Identifica-se, então o significado físico de seus coeficientes e revela-se que esse sistema pode ser obtido a partir dos sistemas de equações de equilíbrio das diversas barras da estrutura consideradas isoladamente.

Em forma de equação matricial:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

K = matriz de rigidez;

U = vetor de deslocamentos;

F = vetor de forças.

Um recurso interessante, comumente aplicado em análise estrutural é a reorganização da matriz de rigidez em uma matriz banda. Esse procedimento economiza vários passos de programação, uma vez que a matriz de rigidez é simétrica e com as variáveis agrupadas em uma banda na região central da matriz. (SORIANO, 2005, p. 241). Esse procedimento é empregado no algoritmo produzido para esse trabalho e, de fato, o deixa mais rápido se comparado a outro que não tem esse procedimento empregado.

5.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO SCILAB PARA PROGRAMAÇÃO

Para este trabalho foi escolhida a calculadora SciLab para a elaboração do algoritmo que fará a geração dos gráficos.

O SCILAB não é uma linguagem de programação compilada, como, por exemplo C, *BASIC* ou *Fortran*, trata-se de uma calculadora no computador que pode-se fazer as operações desejadas por meio de algoritmos. Para tanto, o SciLab tem o seu próprio ambiente de programação e os comandos essenciais se assemelham bastante aos comandos em C (LEITE, 2009).

Leite (2009, p. 1) explica qual a utilidade do SciLab e a que grupo de *softwares* ele pertence:

O SciLab – iniciais em inglês para *Scientific Laboratory* – é um *software* para ser empregado em ambientes de cálculos numéricos. É uma ferramenta de alta performance, utilizada em situações que requeiram soluções baseadas em complexos cálculos numéricos, sendo manipulada interativamente ou através de programação. O SciLab faz parte de um grupo de *softwares* que simula um ambiente de computação numérica, como o MatLab, Octave, Maple, Simulink, MuPAD, etc. Entre estes, o mais conhecido é o MatLab (*Matrix Laboratory*); a diferença é que enquanto o Matlab é um *software* proprietário, o SciLab é *open source*. Isso quer dizer que seu uso é livre, apesar da distribuição estar sujeita ao tipo de licença. E mesmo sendo considerado uma ferramenta CASD (*Computer Aided Control System Design* – Projeto de Sistemas de Controle Auxiliado por Computador), o SciLab é utilizado na prática como um poderoso sistema de computação, podendo até ser empregado em desenvolvimento de sistemas complexos de cálculos numéricos

As maiores vantagens do SciLab para este trabalho, que o fizeram ser escolhido como plataforma de programação, são a facilidade de implementação de algoritmo e o portfólio de funções matemáticas disponíveis.

É possível a elaboração de *scripts* no SciLab que, para fins práticos, são como algoritmos nos quais se coloca os comandos de forma ordenada e se executa a qualquer momento. (LEITE, 2009, p. 86).

Leite (2009, p. 135) explica como funciona a estruturação de vetores e matrizes:

Os tipos estruturados são definidos como *arrays* ou estruturas homogêneas na maioria das linguagens de programação. Nesse contexto são definidos vetores e matrizes; sendo os vetores casos particulares das matrizes. Assim, de um modo geral, pode-se dizer que vetores são matrizes unidimensionais: uma matriz com apenas uma linha e uma coluna. [...] Na verdade o próprio SciLab é baseado, fundamentalmente, em vetores e matrizes. Por exemplo, um escalar (real ou complexo) é considerado como uma matriz 1×1 ; um vetor de n elementos é visto como uma matriz $1 \times n$, e um vetor coluna como uma matriz $n \times 1$. Até as variáveis são tratadas como matrizes no SciLab.

Essa definição é bastante importante. Algumas linguagens compiladas, ou até mesmo outras interpretadas tem a sua definição de matrizes e vetores bastante complexa, o que dificulta substancialmente a implementação de alguns projetos.

Como maior limitação para este trabalho, o SciLab apresenta a baixa velocidade de processamento.

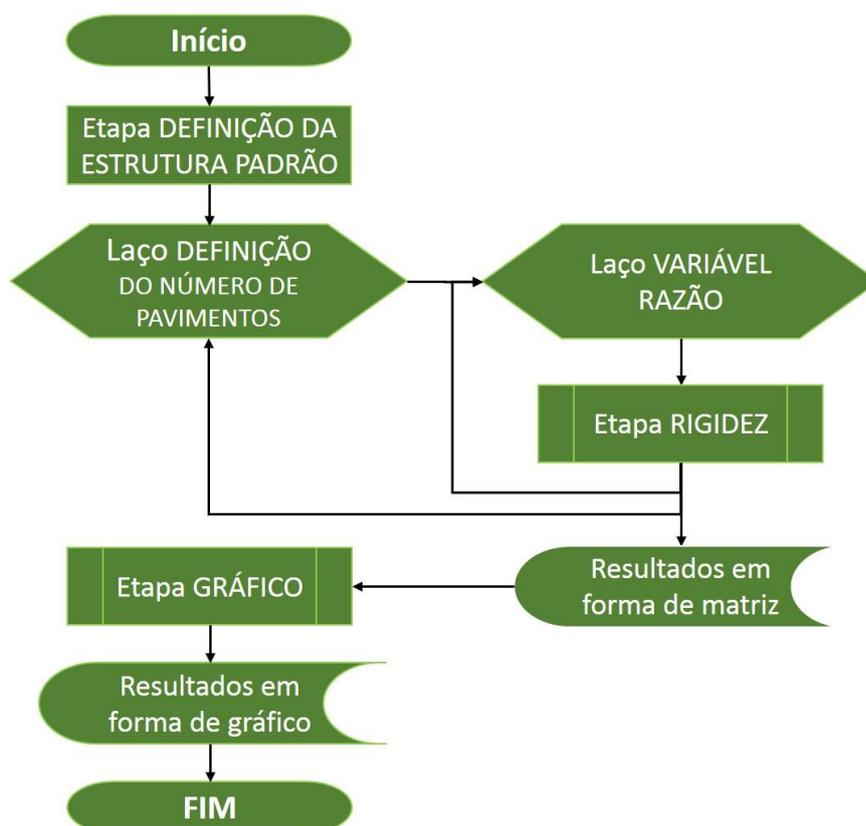
5.2 OBSERVAÇÕES SOBRE O ALGORITMO CRIADO PARA ESTE TRABALHO

Como mencionado anteriormente, o algoritmo desenvolvido para este trabalho teve como base outros algoritmos elaborados pelo professor Ronald Ellwanger. Como os algoritmos estavam em linguagem *BASIC* e desde o início a intenção era desenvolver o trabalho com *scripts* para o SciLab, o primeiro trabalho foi de reprogramação. Foi necessário estudar a linguagem *BASIC* para entender os comandos para reproduzir o código no SciLab, criando assim um programa com a mesma funcionalidade. Após término do trabalho de reprogramação, com os devidos testes atestando o bom funcionamento do código (foram feitas as análises estruturais de dezenas de pórticos no programa antigo e no código em SciLab; posteriormente a isso, foram comparados os resultados e sempre foram idênticos) retirou-se do código de análise de pórticos uma série de detalhes que para este trabalho eram irrelevantes, como a possibilidade de entrada de cargas distribuídas, ou cargas pontuais aplicadas na vertical; retirou-se do código, também, a saída de resultados completa; por fim, o código foi preparado para efetuar análises de pórticos com uma carga unitária pontual, aplicada em um nó no topo do edifício (conforme

procedimento descrito no capítulo 4 deste trabalho) e posteriormente informar o deslocamento deste mesmo nó. A rigidez do pórtico é o inverso do deslocamento neste nó.

Na figura 9 pode-se observar o fluxograma simplificado do algoritmo criado.

Figura 9 – Fluxograma simplificado do algoritmo criado para este trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Na etapa de definição da estrutura padrão é informado no algoritmo os parâmetros de entrada que permanecem fixos. No capítulo 6, onde são apresentados os gráficos neste trabalho, são especificados quais parâmetros foram mantidos fixos e qual (ou quais) parâmetro variou.

No laço de definição do número de pavimentos é definido quantos pavimentos terá o pórtico que será analisado. Após alguns testes optou-se por fazer gráficos com pórticos com até 10 pavimentos (1, 3, 5, 7 e 10 pavimentos) e posteriormente gerar outro gráfico, com a mesma estrutura padrão e mesmo parâmetro variável para pórticos com mais de 10 pavimentos (15, 20, 30, 40 e 50 pavimentos). Este segundo gráfico é uma continuação do primeiro mencionado, mas, por causa da escala, eles são elaborados de forma separada; ambos em uma única janela

gráfica tornariam a visualização difícil. Por se tratar de um laço o número de pavimentos só muda quando o laço que define a razão que relaciona o parâmetro fixo e o parâmetro variável e a etapa que obtém o valor da rigidez são concluídas para aquele número de pavimentos.

Na etapa que define a razão que relaciona o parâmetro fixo e o parâmetro variável é que o parâmetro variável mudava de valor. Foi criada uma variável denominada RAZAO, que variou de 0,3 a 3, com incrementos de 0.1 a cada ciclo (é o valor desta variável que aparece no eixo das abcissas nos gráficos gerados nesse trabalho). Exemplificando o procedimento: no caso dos gráficos que o parâmetro variável é o comprimento de uma das peças (neste caso o L_p foi mantido fixo e o L_v variou); o valor de L_p foi informado anteriormente na etapa de definição da estrutura padrão, enquanto que L_v tem o seu valor atualizado a cada vez que o laço de definição da variável razão é executado. A cada ciclo é atribuído a L_v o valor de L_p multiplicado pela variável RAZAO. Desta maneira, se o valor de L_p inicial for 250 cm, no ciclo em que a variável RAZAO estiver valendo 2, a L_v será dado o valor de 500 cm e a etapa seguinte será feita com estes valores. Por se tratar de um ciclo, o valor de da variável RAZAO só é incrementado quando for completada a etapa seguinte.

Na etapa de cálculo da rigidez é executado o procedimento descrito no capítulo 4: é aplicada uma carga unitária no topo do pórtico e calculado o deslocamento no ponto de aplicação da carga. Por esta etapa estar dentro de um laço, que por sua vez está dentro de outro, os resultados gerados armazenados de forma organizada em uma matriz (uma coluna de resultados para cada número de pavimentos e uma linha para cada valor da variável RAZAO descrita acima). Ao final do último ciclo a matriz está terminada e pronta para ser processada pela etapa seguinte.

Na etapa de plotagem dos gráficos a matriz mencionada acima é lida pelo algoritmo, uma função interpoladora calcula valores intermediários e plota o gráfico (pronto, com a devida legenda e título) e salva com um nome específico.

6 GRÁFICOS RELACIONANDO A RIGIDEZ HORIZONTAL DE PÓRTICOS COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DA ESTRUTURA

Neste capítulo são apresentados os gráficos.

O item 6.1 apresenta gráficos elaborados com uma estrutura padrão, na qual se mantiveram fixos quase todos os parâmetros de entrada e se variou somente o parâmetro de interesse. O item 6.2 apresenta gráficos feitos para estruturas diferentes estrutura padrão (em que o objetivo é investigar algum ponto específico) conforme procedimento detalhado no capítulo 4 e executado pelo algoritmo exposto no capítulo 5. Para a estrutura padrão foi gerada uma grande quantidade de gráficos: para cada variável de interesse dois gráficos a cada número de vãos (de 1 vão até 6 vãos); no caso das outras estruturas que não a padrão, foi gerado um número reduzido de gráficos.

6.1 GRÁFICOS DA ESTRUTURA PADRÃO

Foi adotada como **estrutura padrão para este trabalho** o pórtico com as seguintes características:

Número de pavimentos: variável

$$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$$A_v = 800 \text{ cm}^2$$

$$I_v = 106.666,67 \text{ cm}^4$$

$$L_v = 500 \text{ cm}$$

Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$$A_p = 900 \text{ cm}^2$$

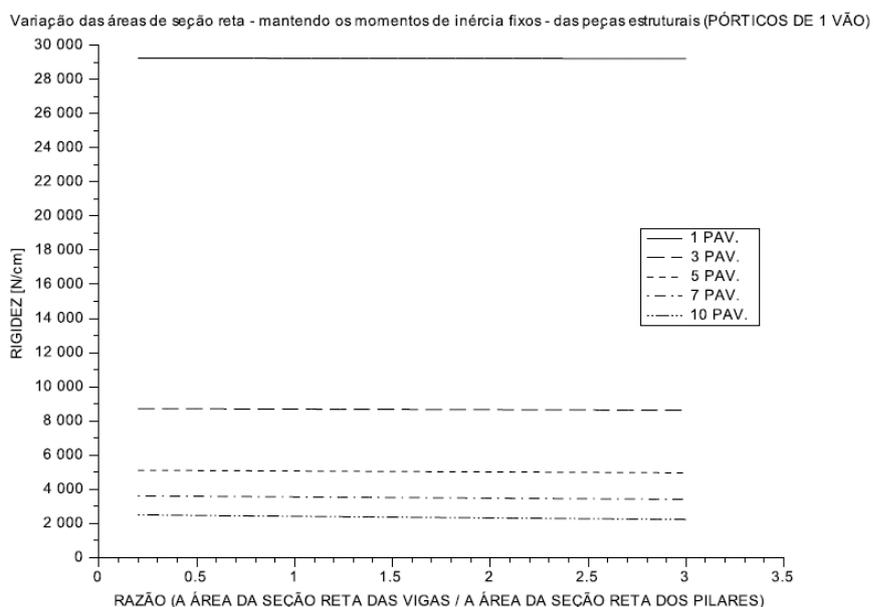
$$I_p = 67.500 \text{ cm}^4$$

$$L_p = 250 \text{ cm}$$

6.1.1 Gráficos com variação da área da seção reta das peças estruturais – mantendo-se os momentos de inércia fixos

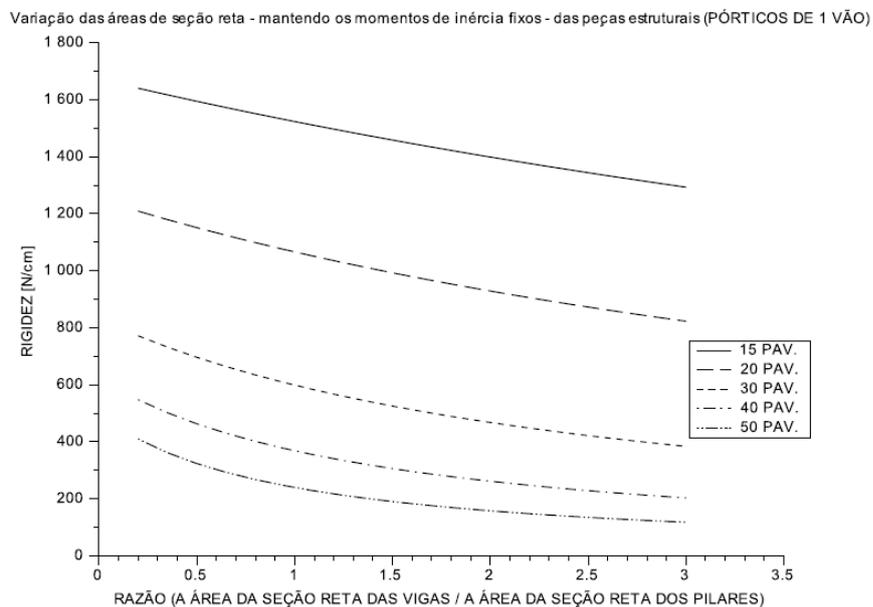
Este grupo de gráficos foi elaborado para se observar especificamente a variação da área da seção bruta. A_v foi mantido fixo e A_p variou para satisfazer a razão A_v/A_p exposta na abcissa dos gráficos.

Figura 10 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



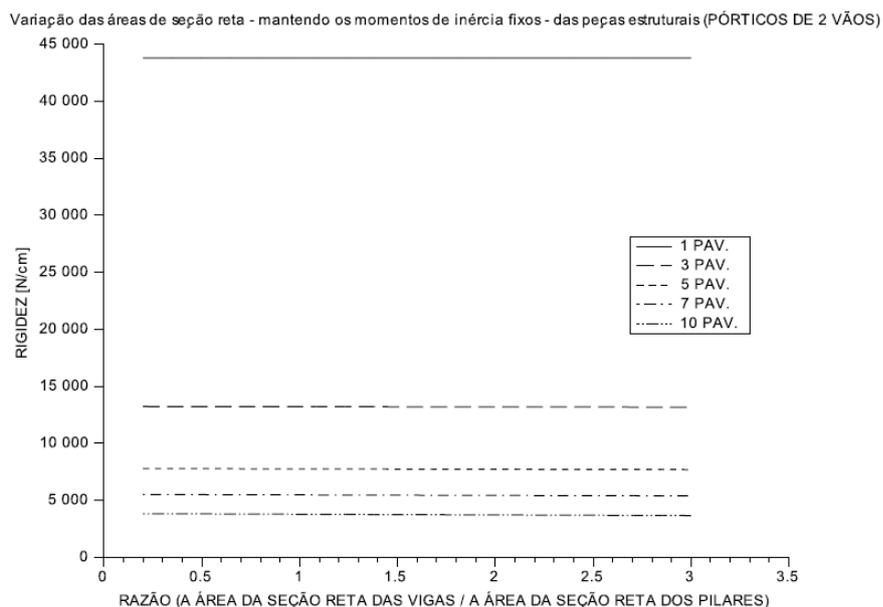
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



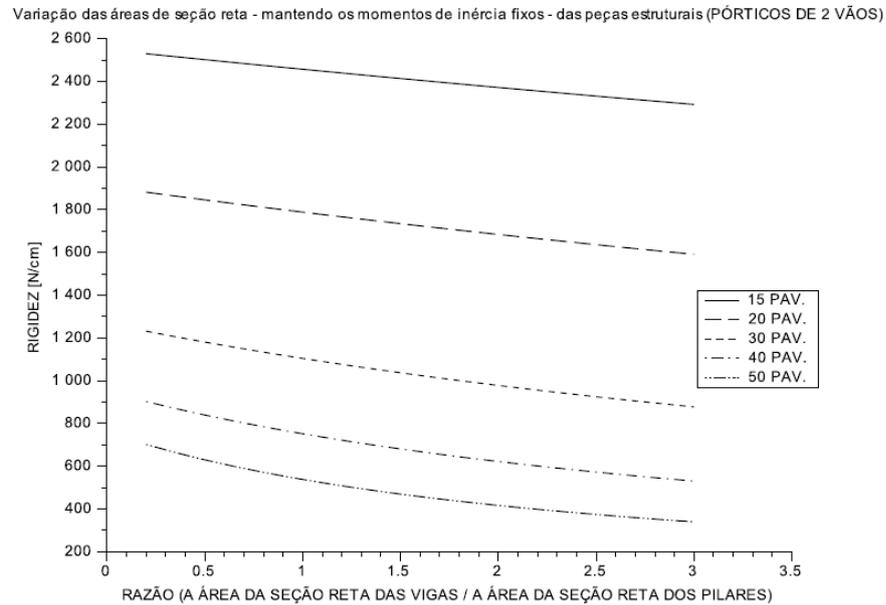
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



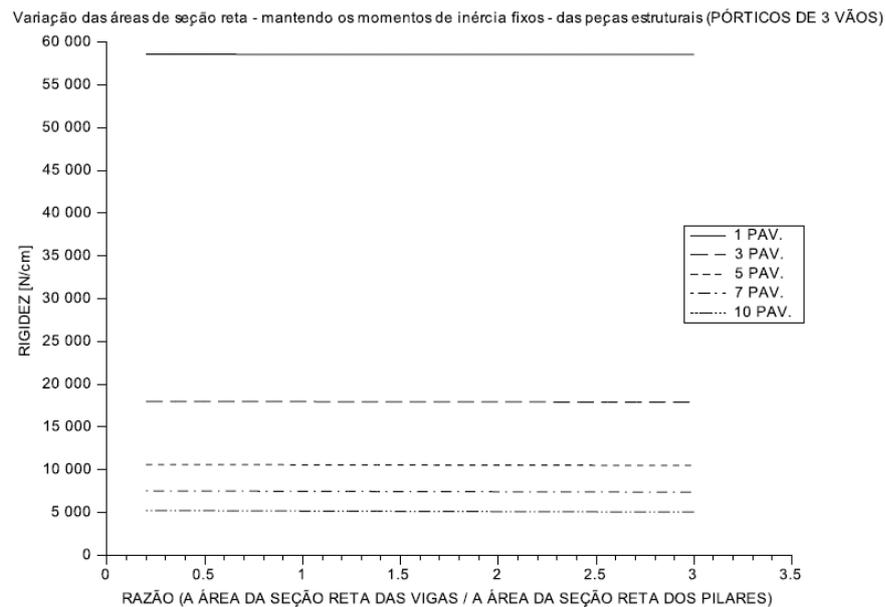
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



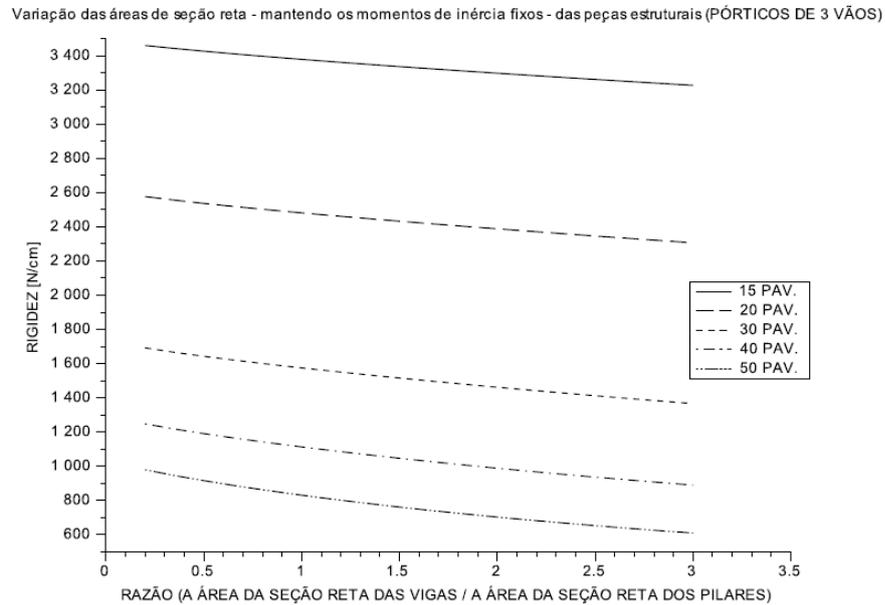
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



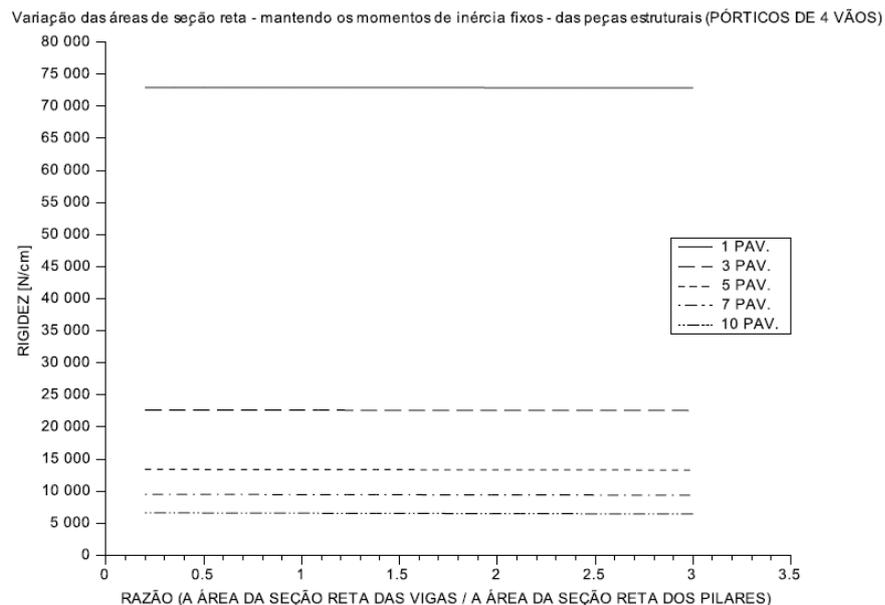
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



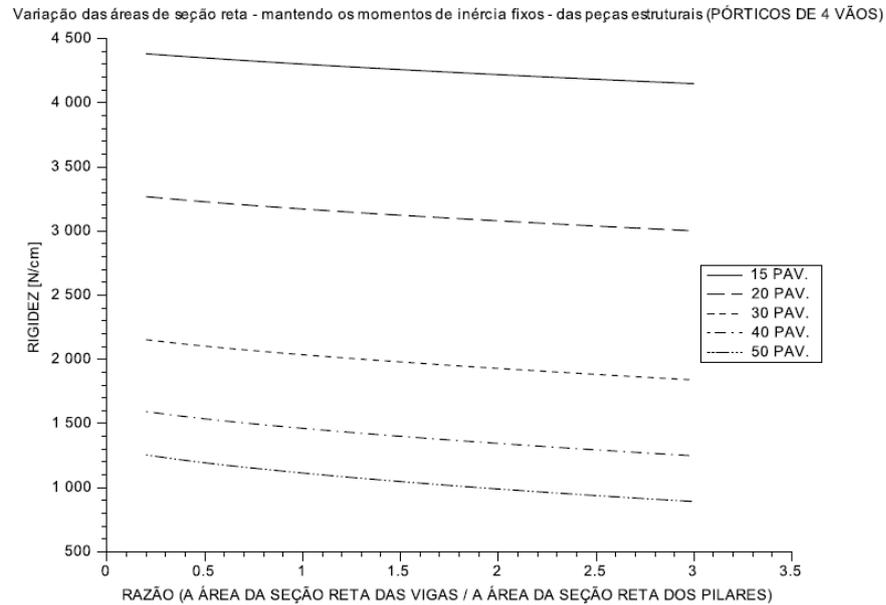
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



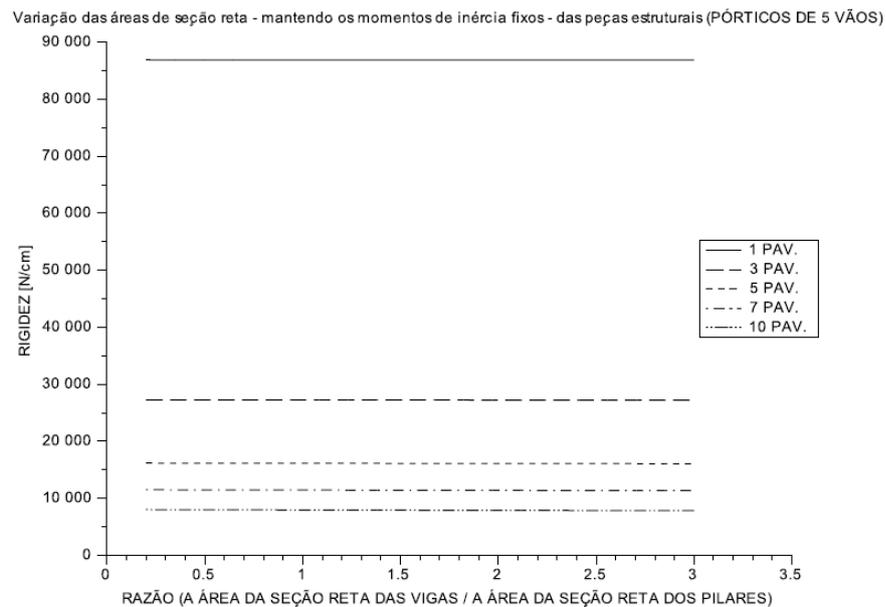
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



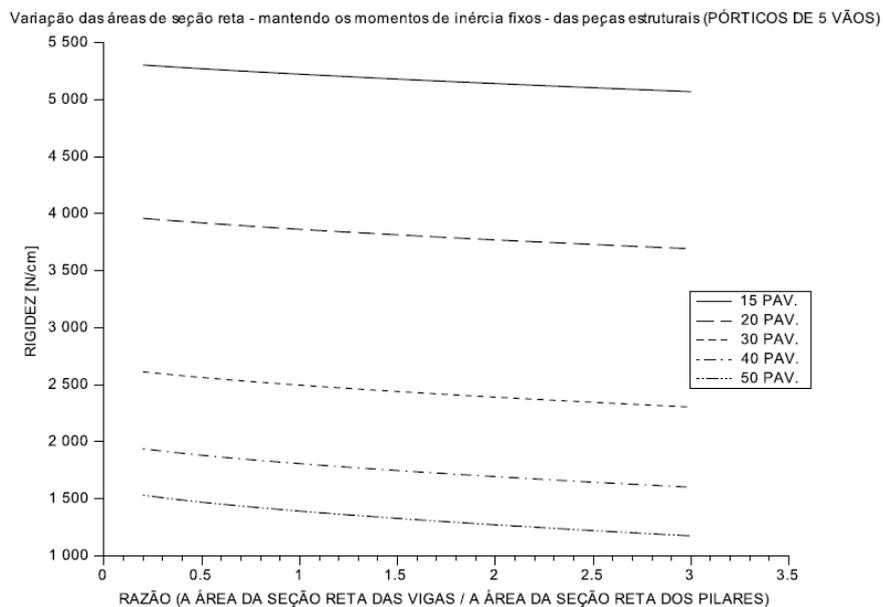
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



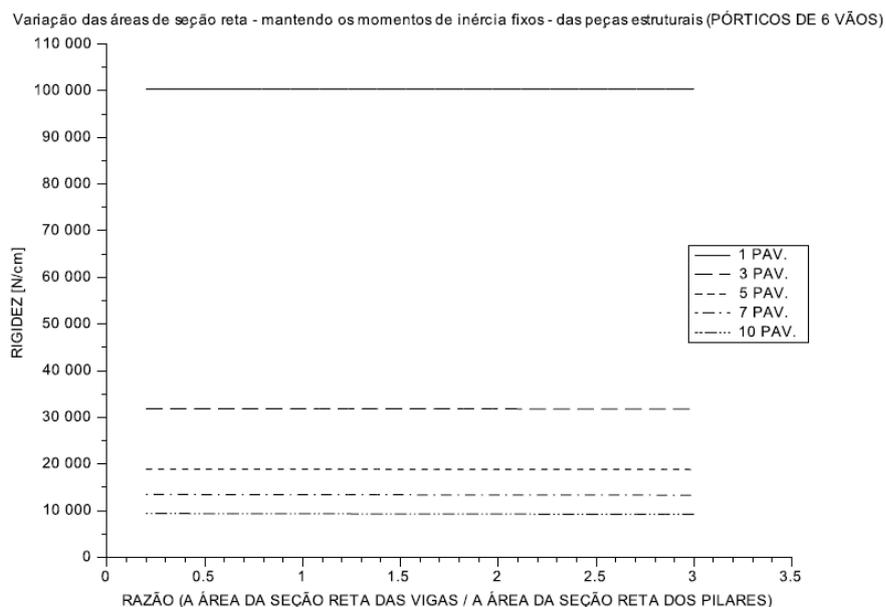
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



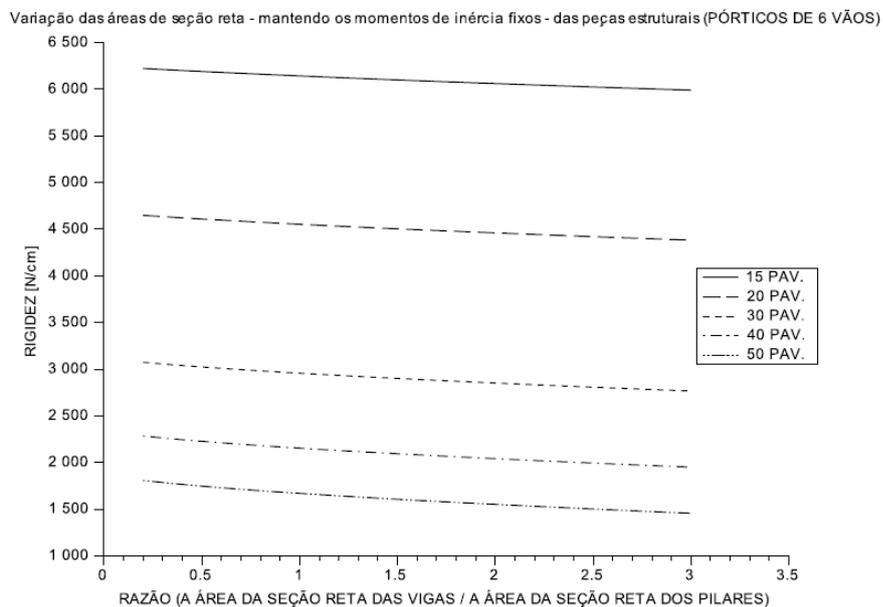
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão

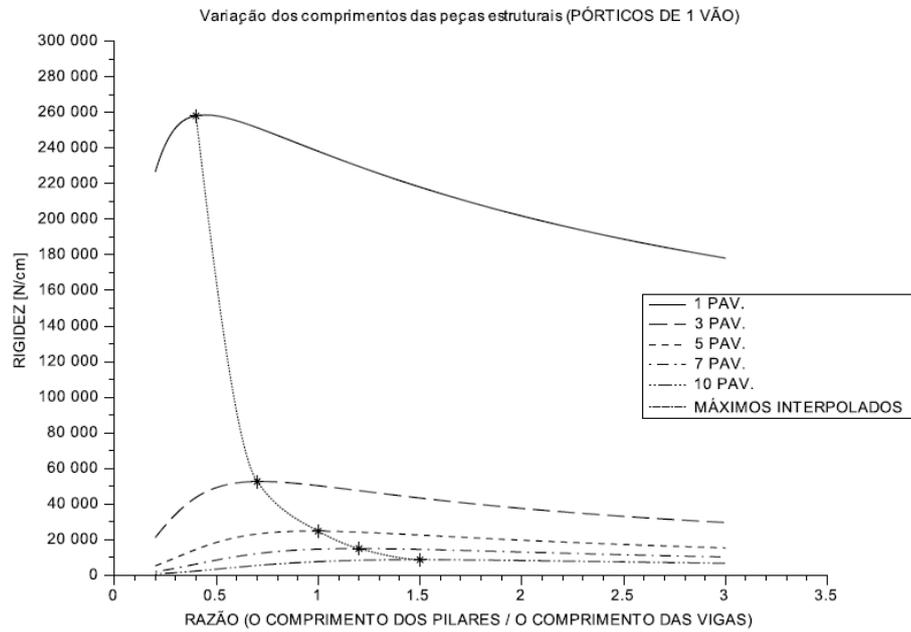


(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Gráficos com variação dos comprimentos das peças estruturais

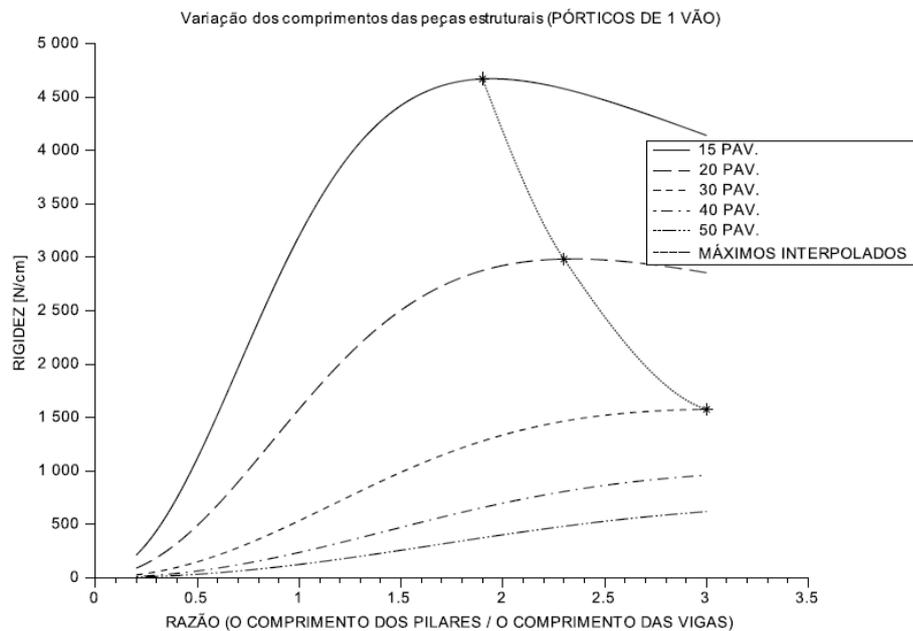
Este grupo de gráficos foi um dos mais interessantes por apresentar pontos de derivada nula, que indica que existe uma relação ótima entre o comprimento das peças estruturais, na qual se tem a maior rigidez possível. L_p foi mantido fixo e L_v variou para satisfazer a razão L_p/L_v exposta na abcissa dos gráficos. Os outros parâmetros (módulo de elasticidade, momento de inércia e área de seção de todas as peças foram mantidos fixos).

Figura 22 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



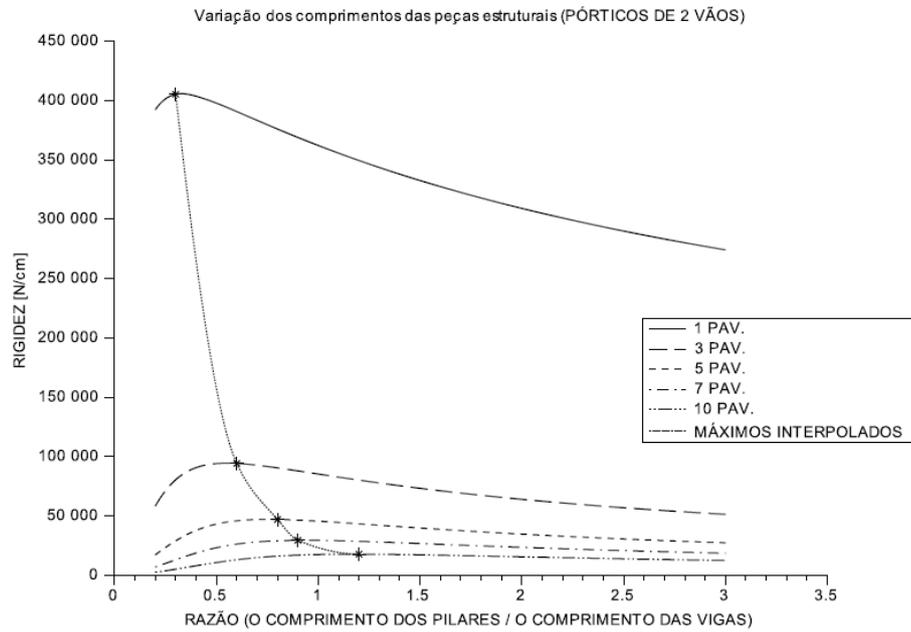
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



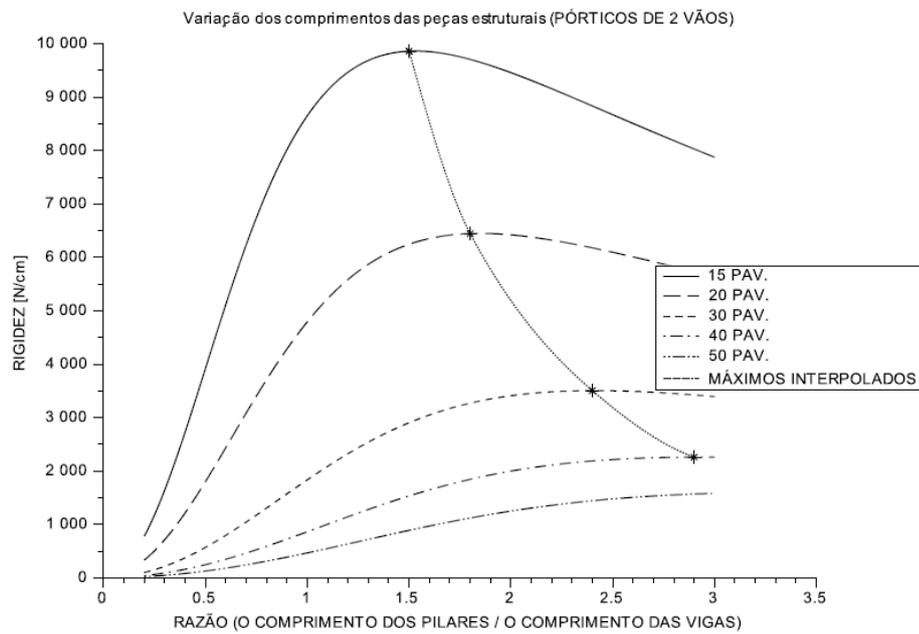
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



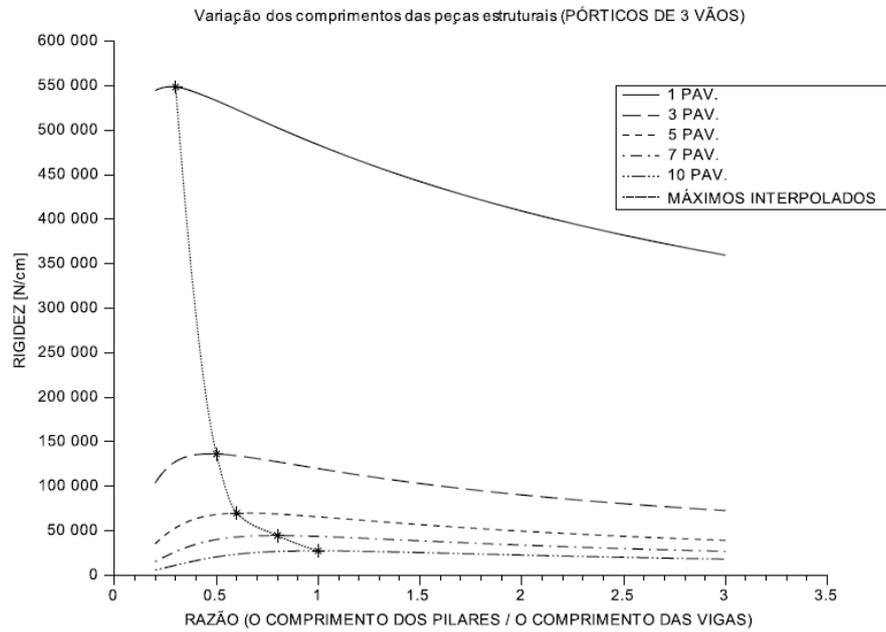
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



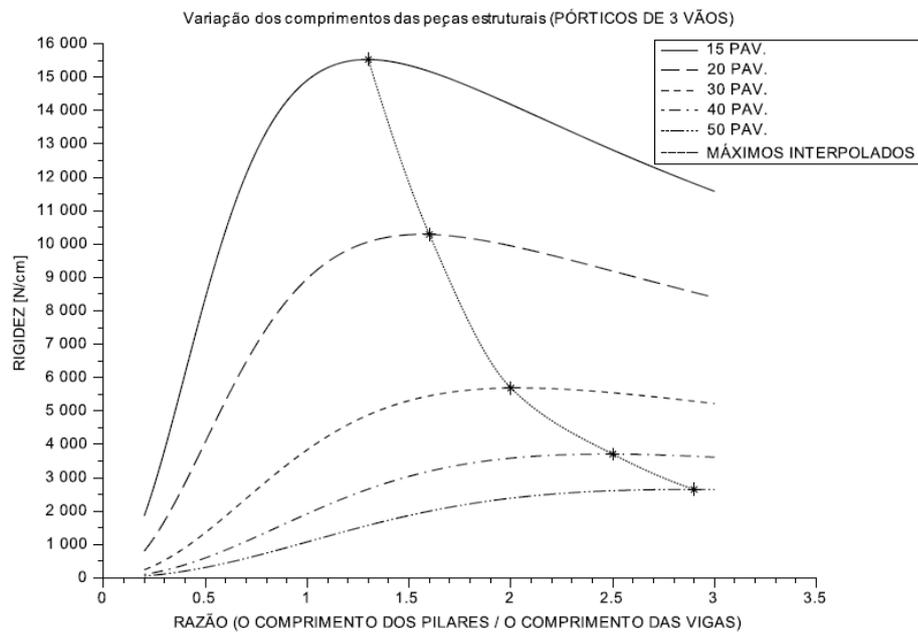
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



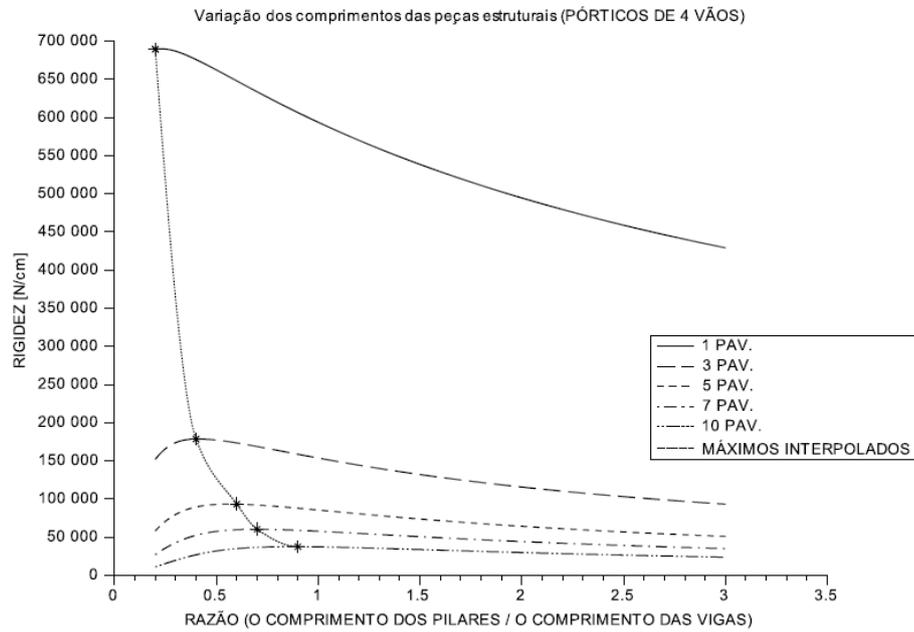
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



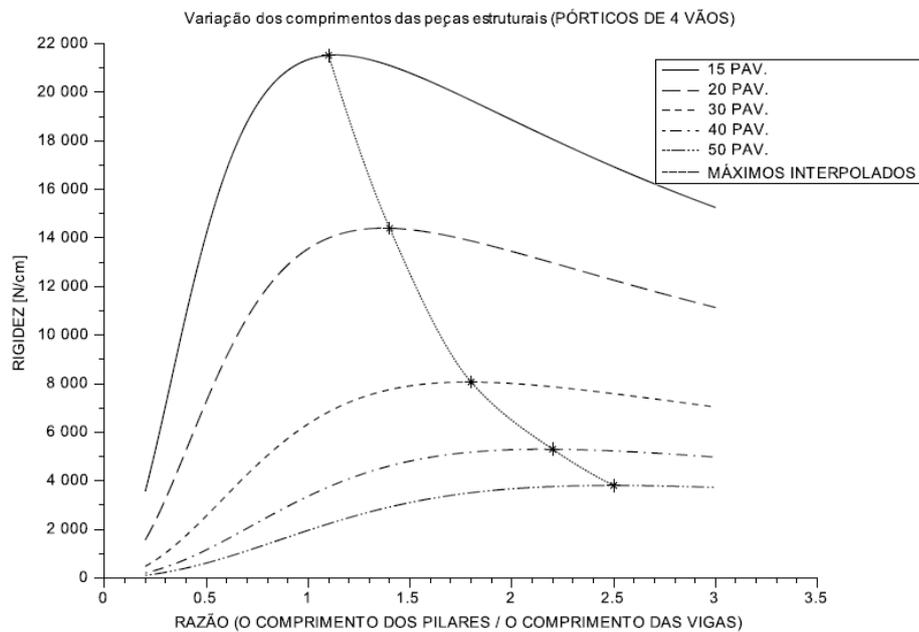
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



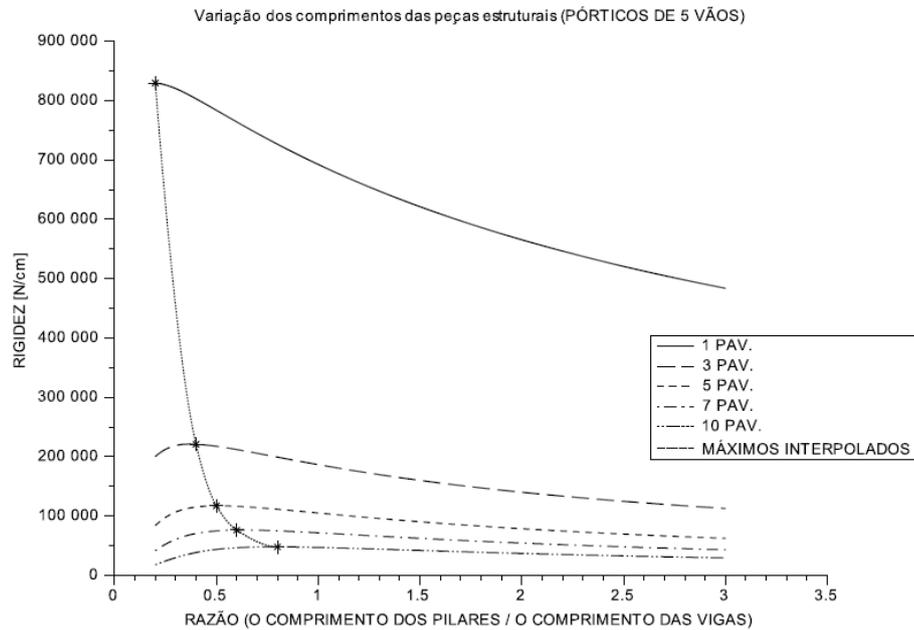
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



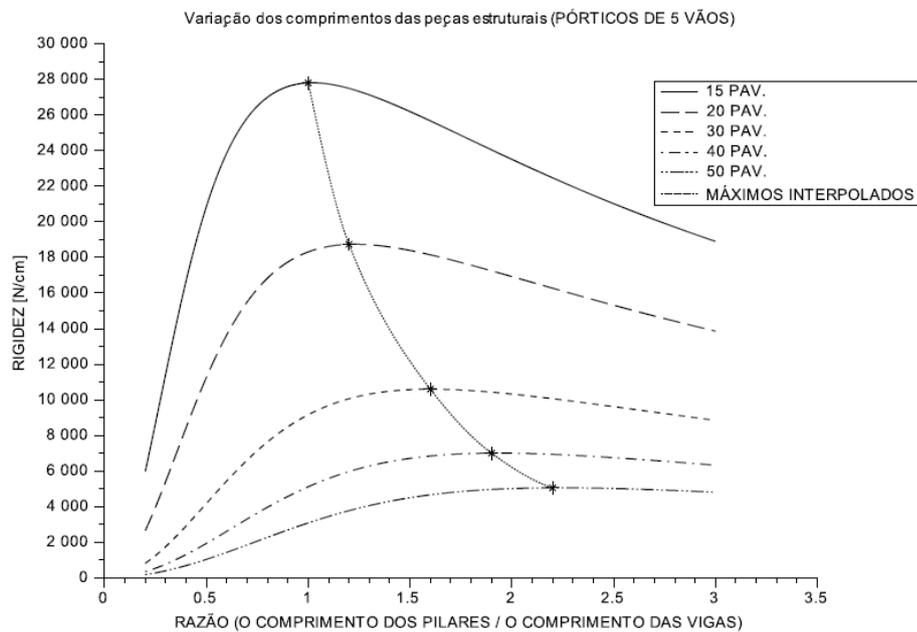
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



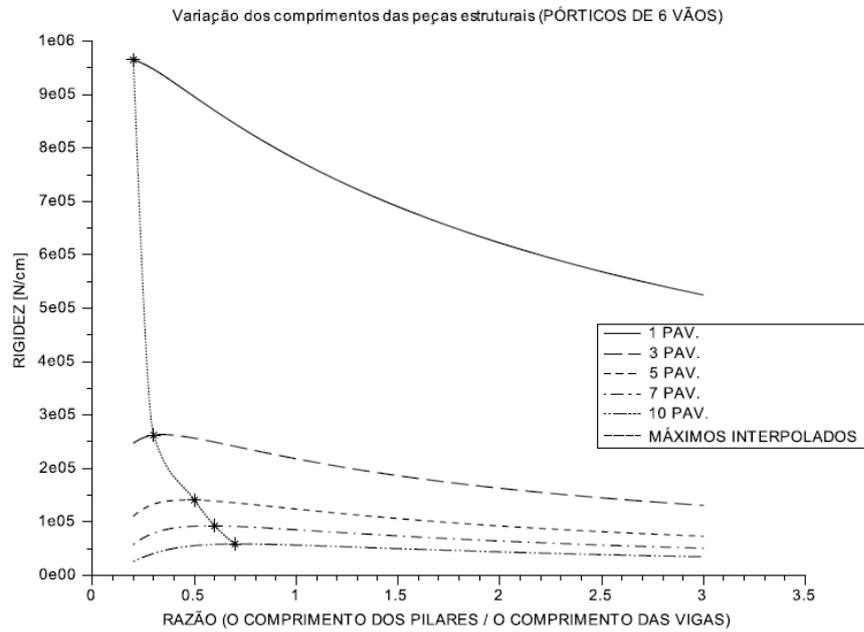
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



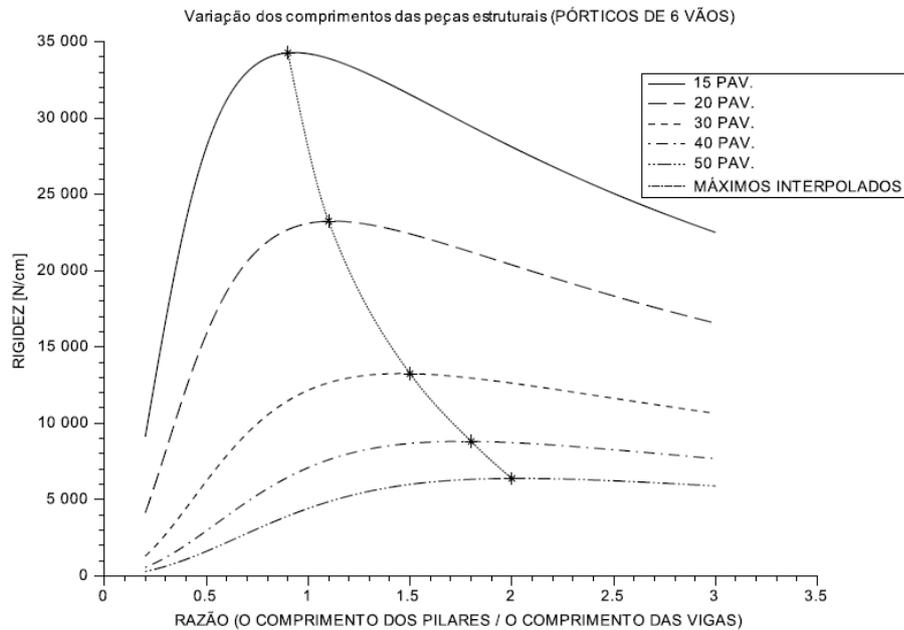
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão

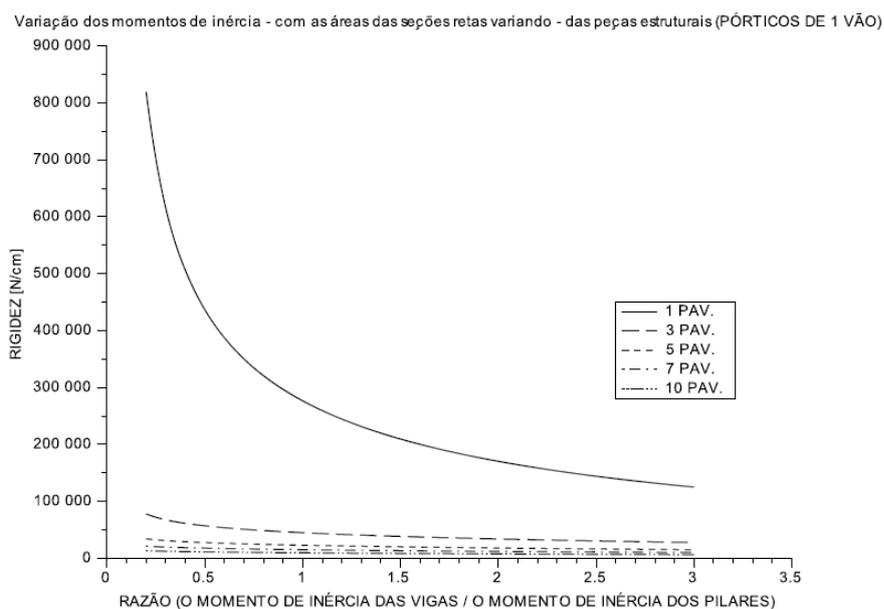


(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.3 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – variando-se as áreas da seção bruta de forma coerente

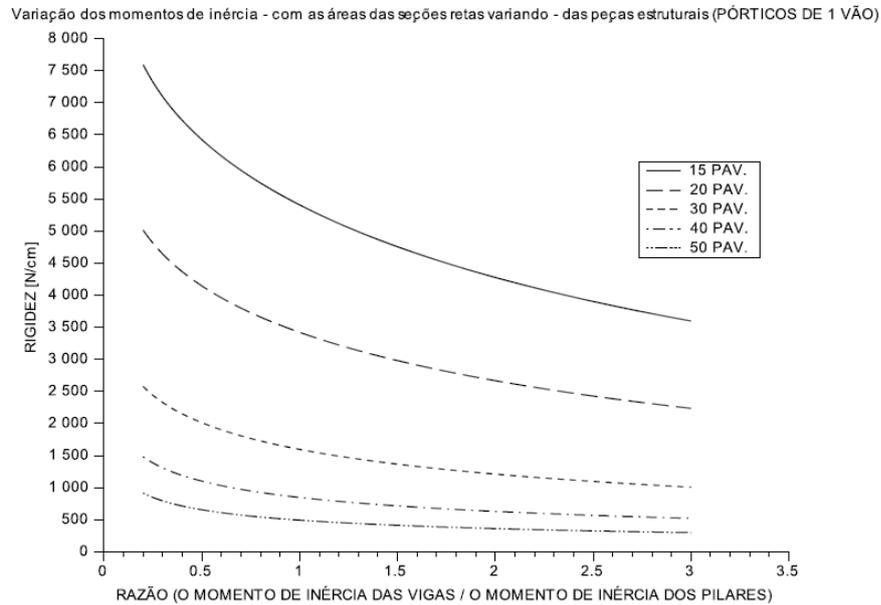
Este é o único grupo de gráficos em que se varia mais de um parâmetro a cada ciclo. Para a obtenção de cada ponto foi variado o momento de inércia dos pilares e depois calculado qual seria a área de seção reta dos mesmos para que se obtivesse aquele valor de momento de inércia (observando que todo o estudo foi feito unicamente com pilares de seção reta quadrada). I_v foi mantido fixo e I_p variou para satisfazer a razão I_v/I_p exposta na abcissa dos gráficos. De forma análoga, A_v foi mantido fixo e A_p variou de forma coerente para satisfazer o valor de I_p (tudo foi calculado levando-se em conta pilares de seção quadrada).

Figura 34 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



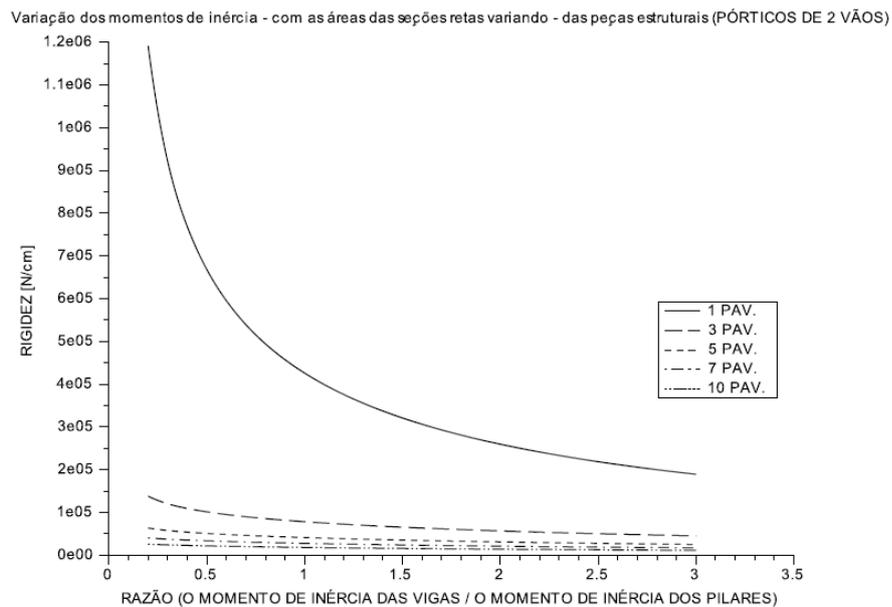
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



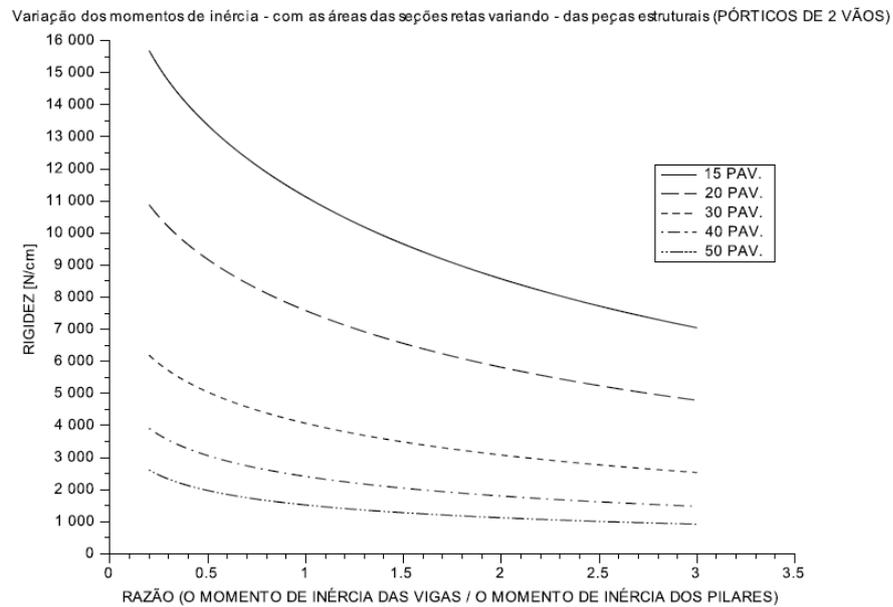
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



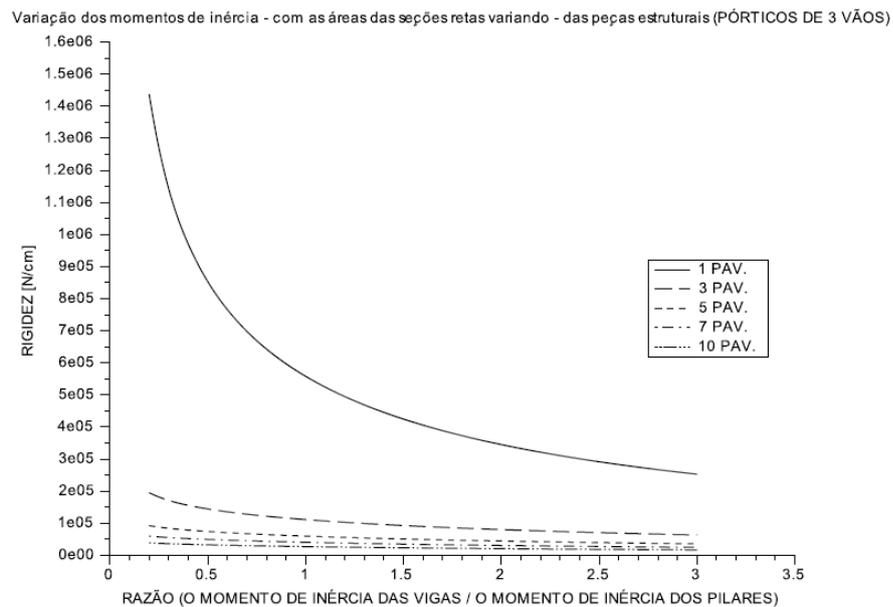
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



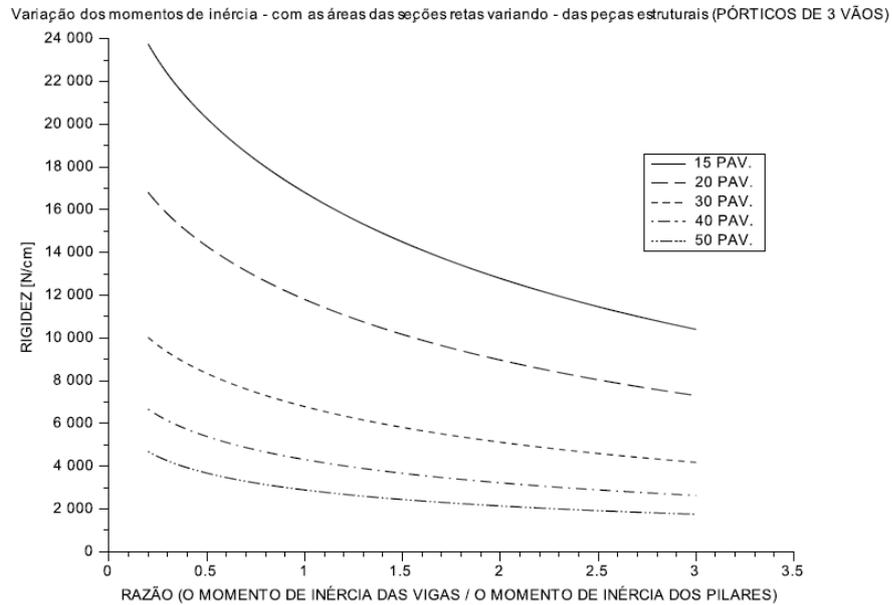
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



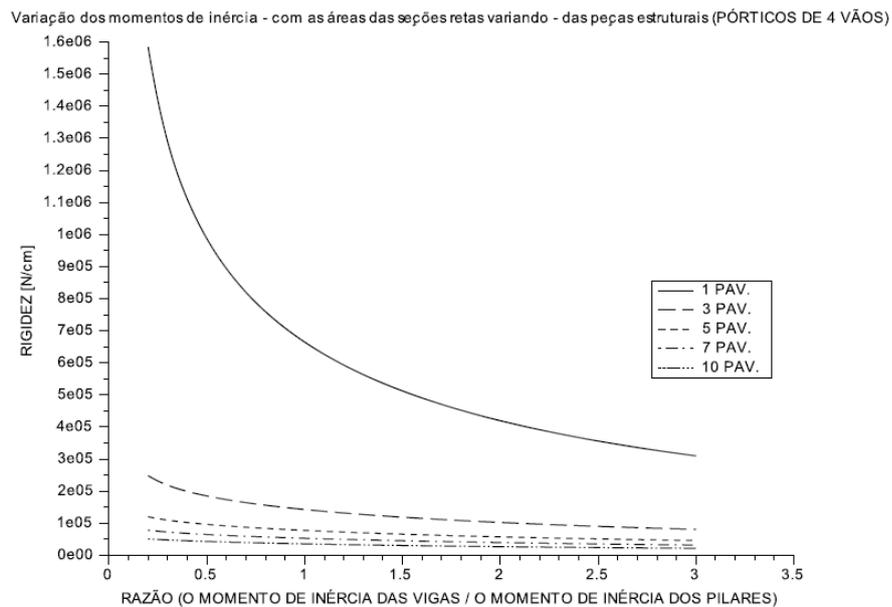
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



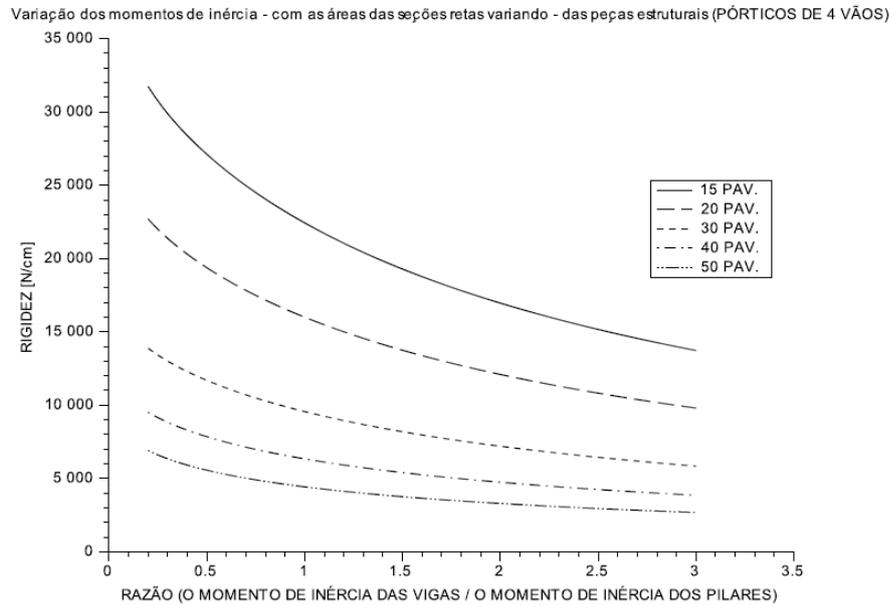
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



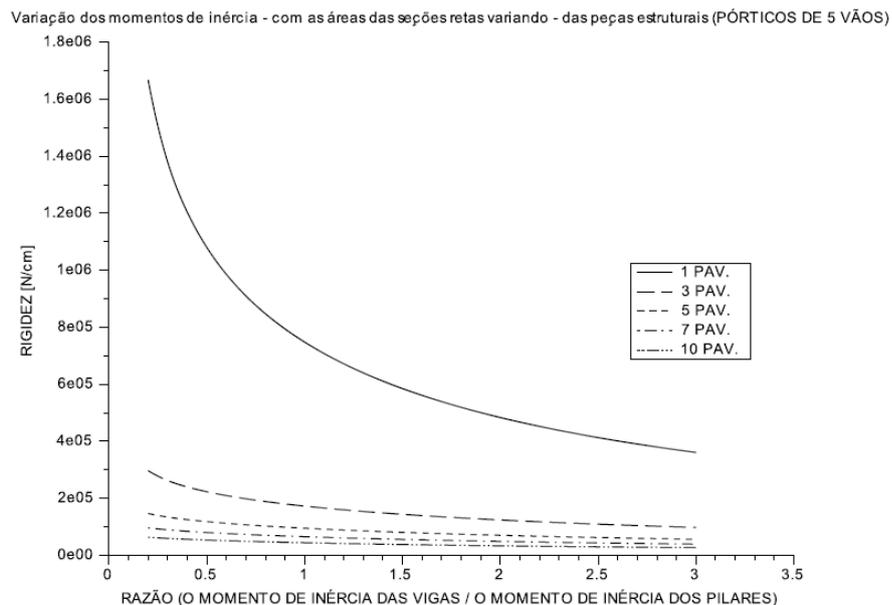
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



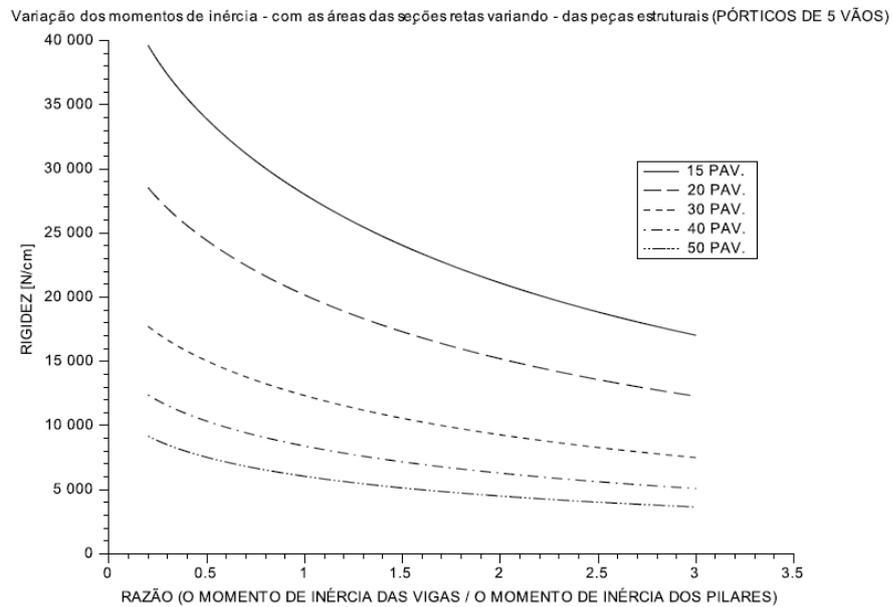
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



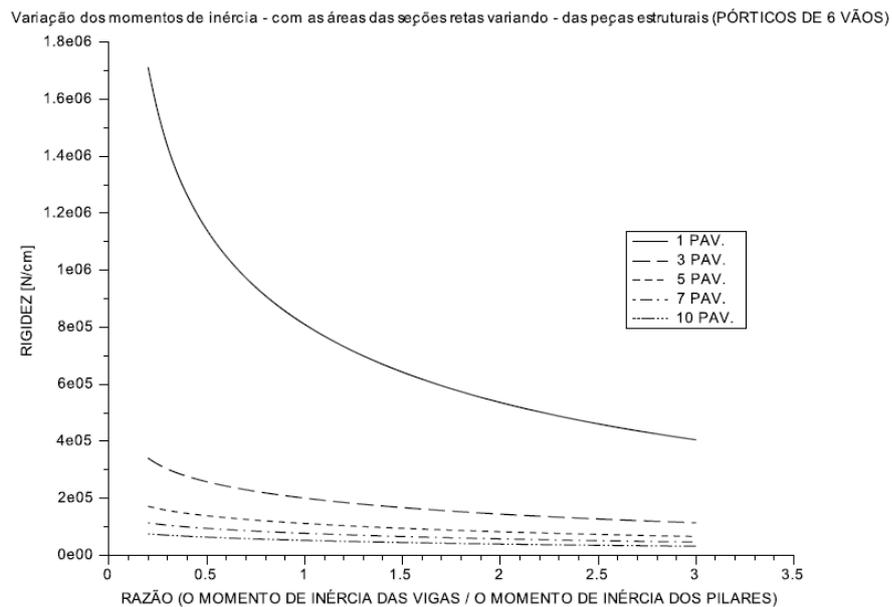
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 43 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



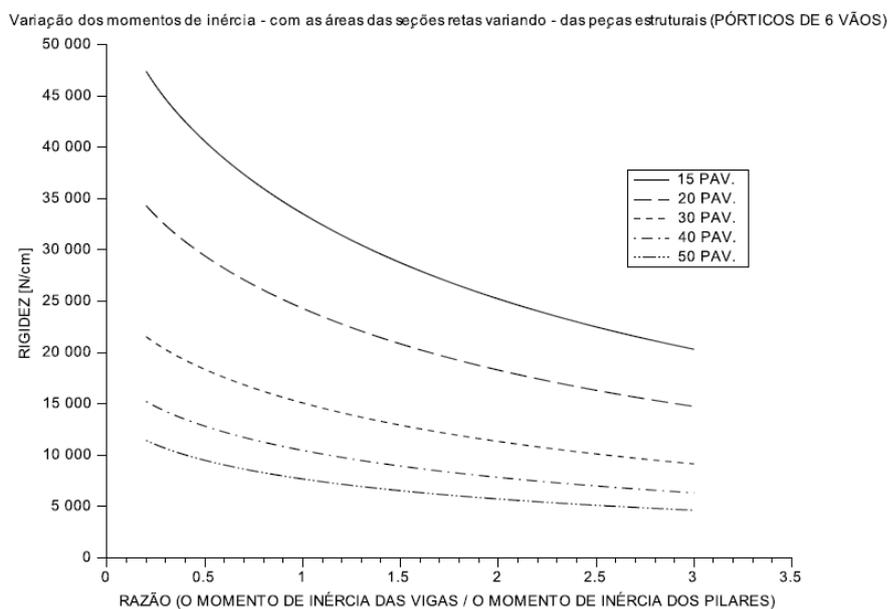
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais
– com a variação coerente das áreas de seção bruta –
para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão

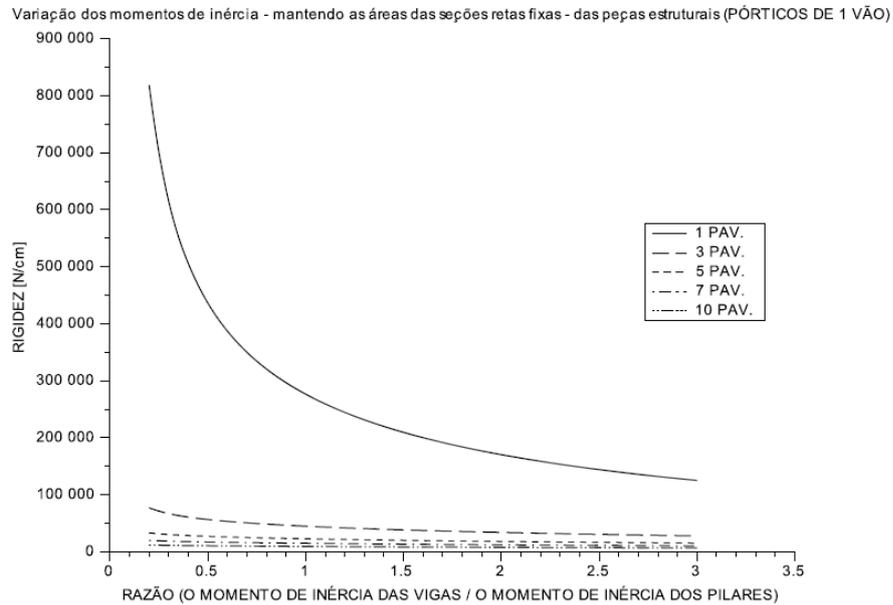


(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.4 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – mantendo-se fixas as áreas da seção bruta

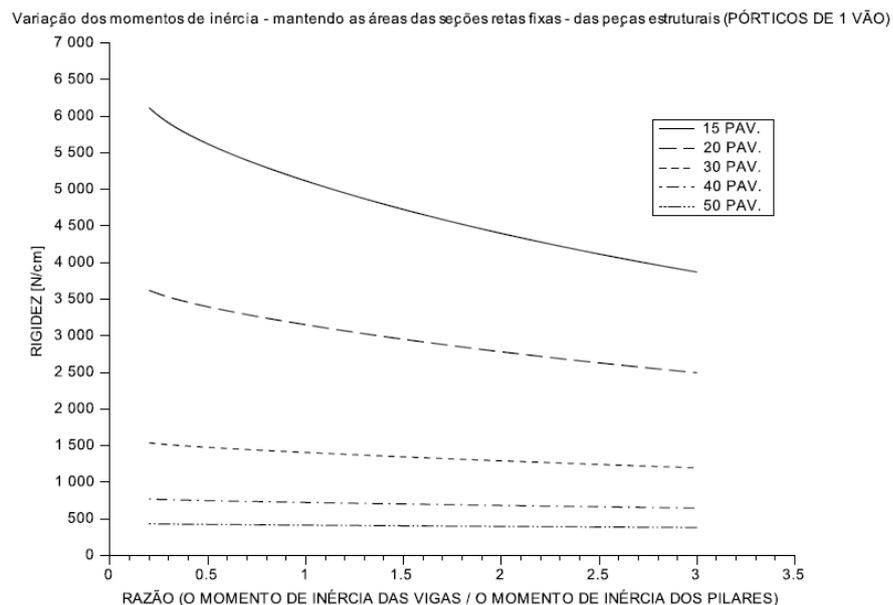
Assim como o primeiro grupo de gráficos apresentado nesse trabalho, este é, na prática, quase que puramente teórico, uma vez que dificilmente se varia o momento de inércia de uma peça estrutural sem variar a área da seção. I_v foi mantido fixo e I_p variou para satisfazer a razão I_v/I_p exposta na abcissa dos gráficos. A_v e A_p foram mantidos idênticos aos da estrutura padrão.

Figura 46 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



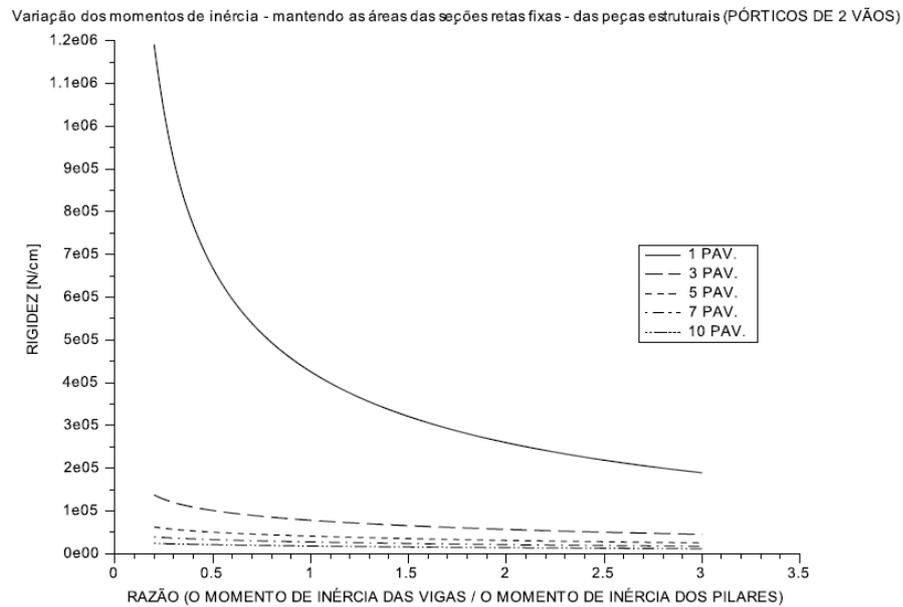
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 47 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 1 vão, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



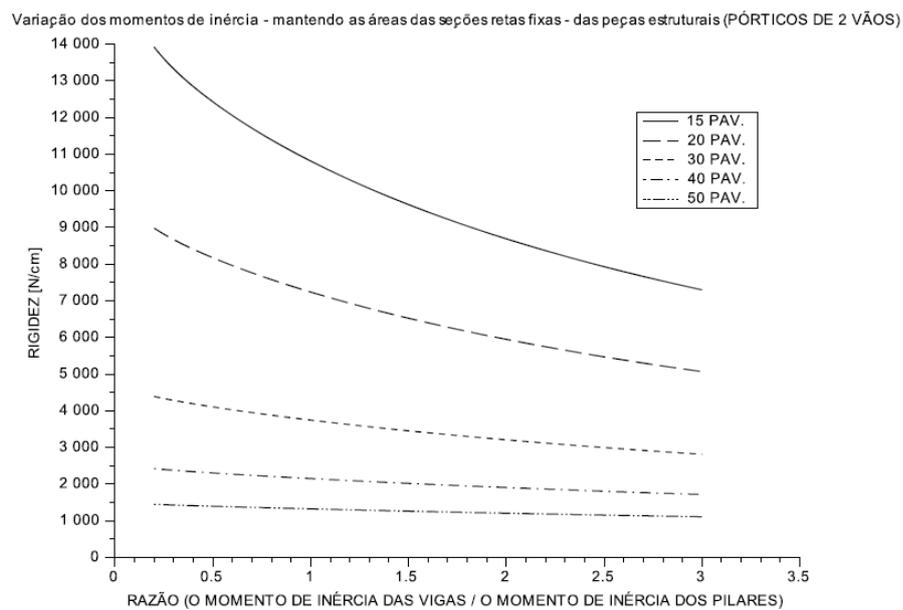
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



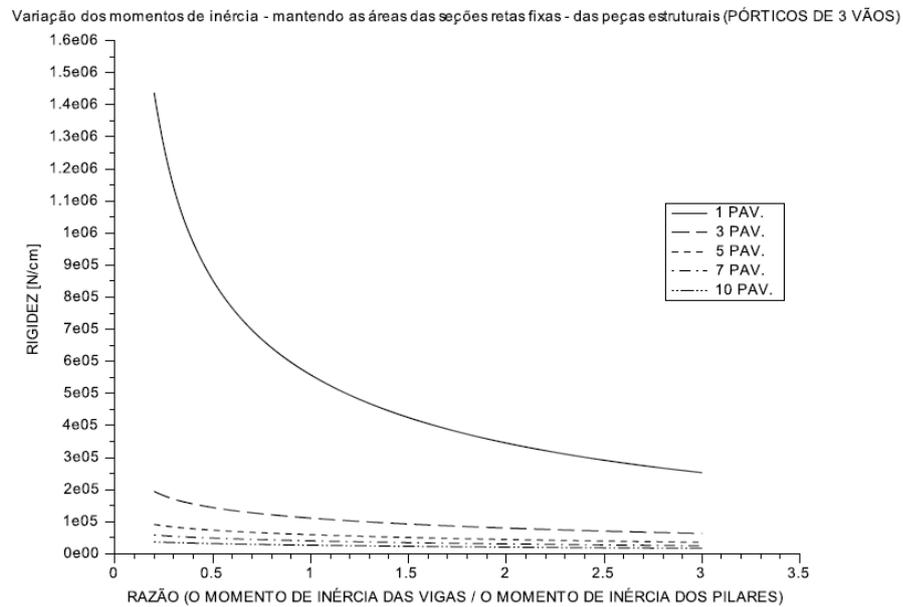
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 2 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



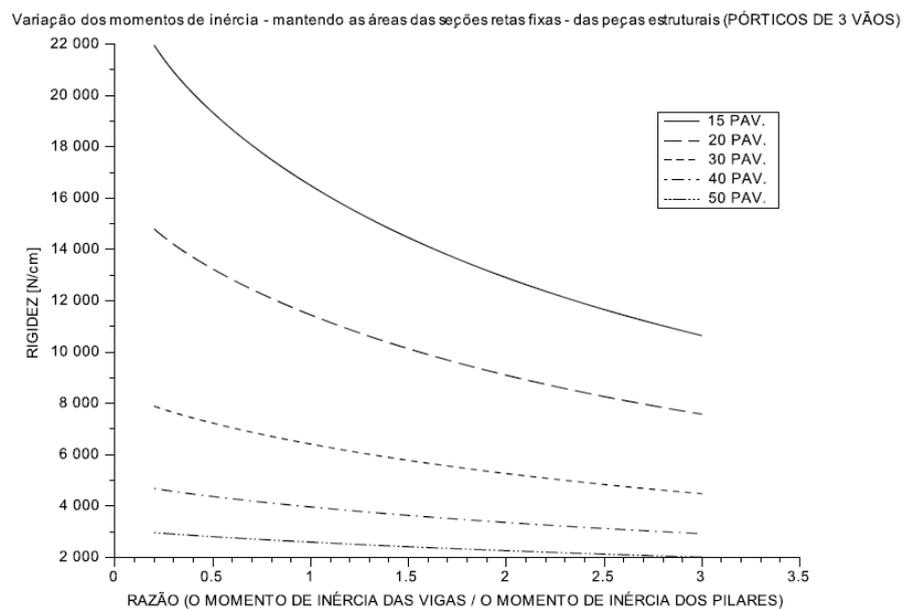
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 50 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 51 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 52 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão

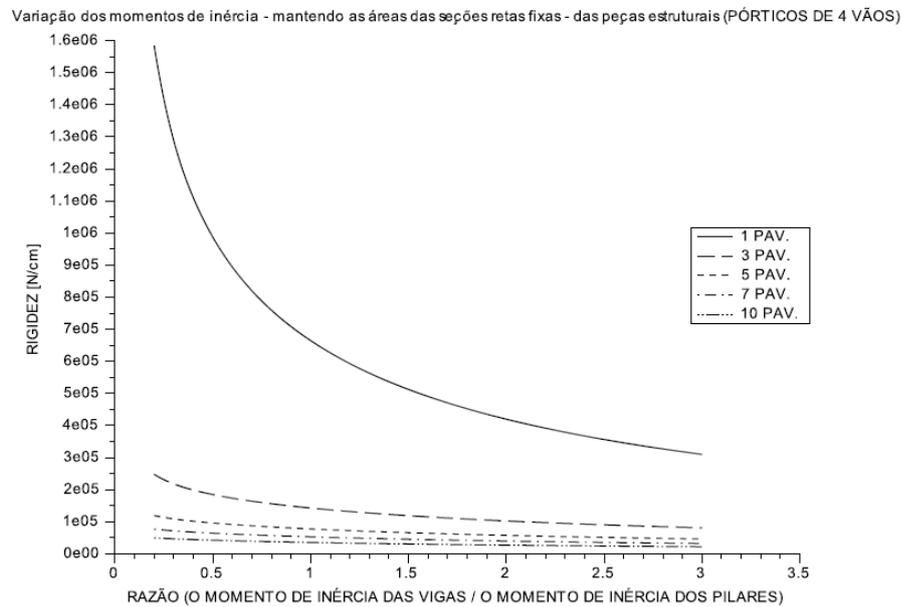
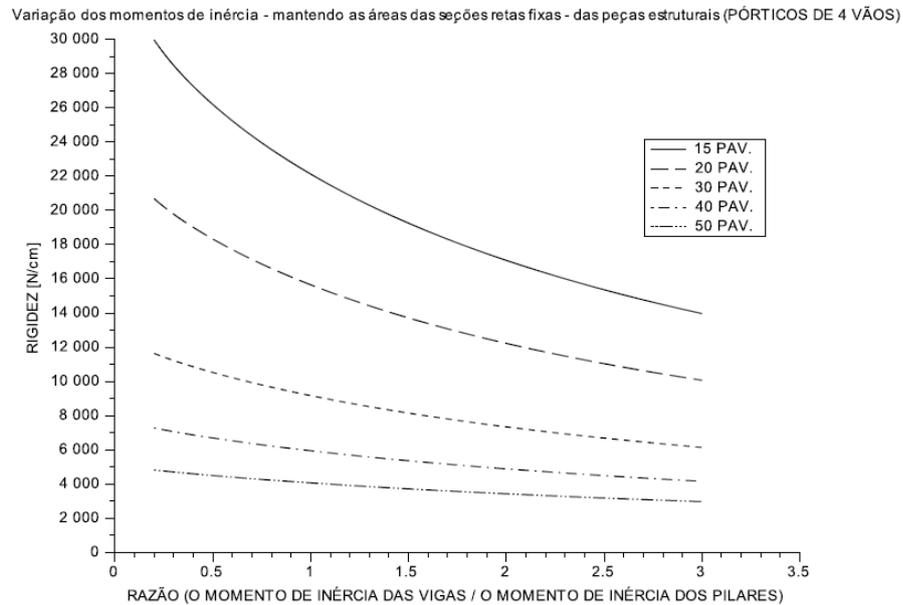
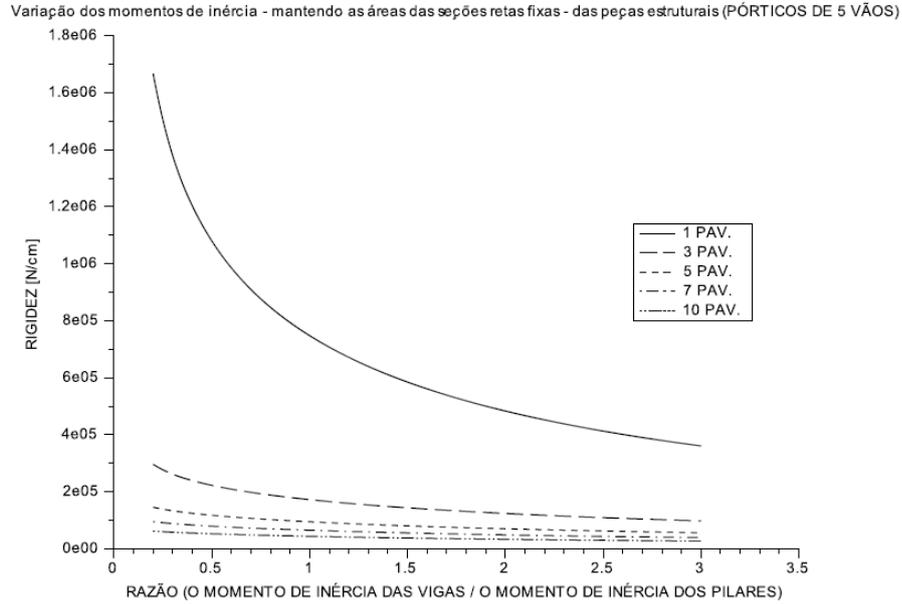


Figura 53 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



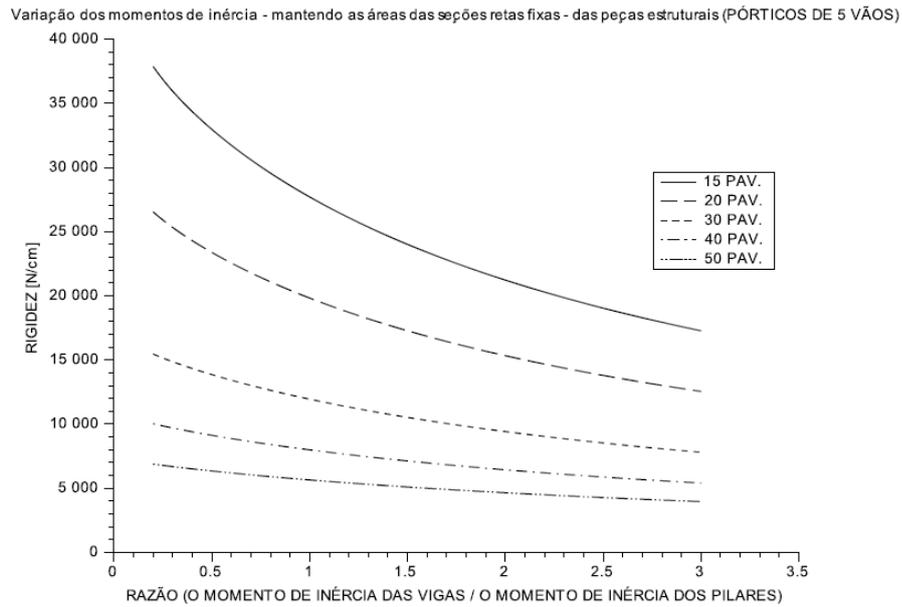
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 54 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



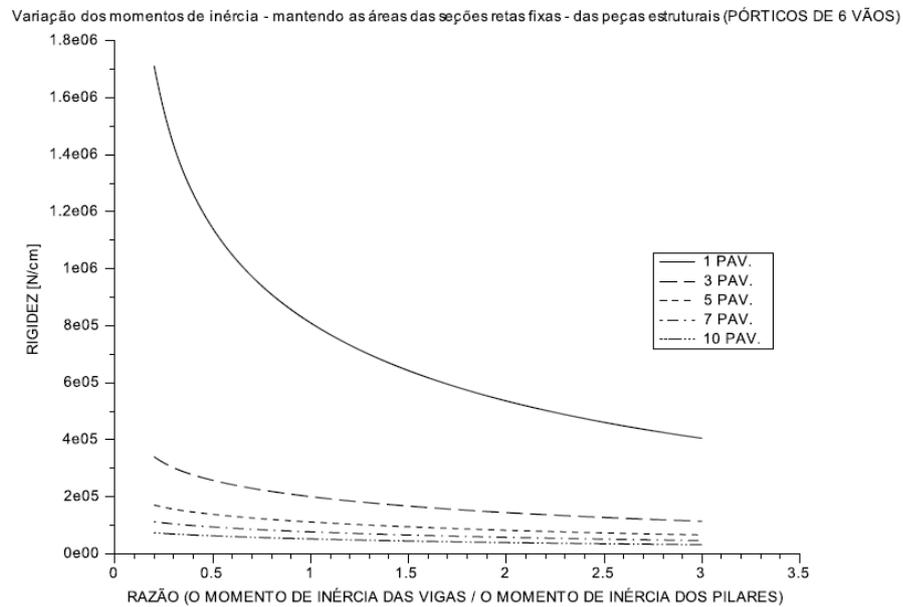
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 55 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



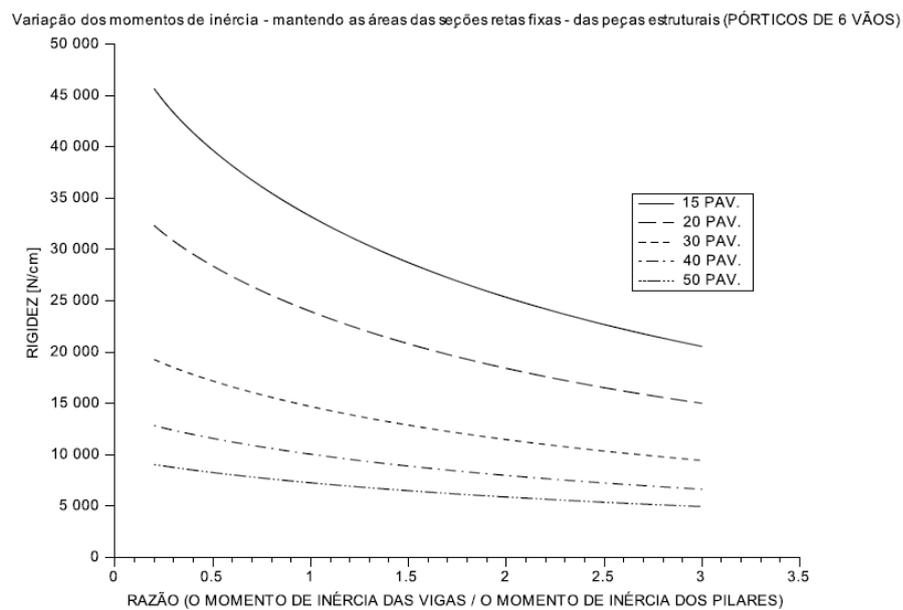
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 56 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 57 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – para pórticos de 6 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 GRÁFICOS DE ESTRUTURAS DIFERENTES DA ESTRUTURA PADRÃO

Os gráficos apresentados aqui não foram gerados com a estrutura padrão do trabalho, mencionada no item 6.1.

Alguns foram gerados com estruturas semelhantes à estrutura padrão apresentada e outros, expostos a seguir, foram gerados com uma estrutura semelhante à estrutura padrão apresentada, porém, com a relação L_p/L_v ideal, em que se têm a maior rigidez, que foi encontrada nos gráficos expostos no item 6.1.2.

6.2.1 Gráficos com estrutura semelhante à estrutura padrão deste trabalho, mas com relação L_p/L_v ideal

Para a geração destes gráficos foi adotada uma estrutura de pórtico semelhante à estrutura padrão deste trabalho, tendo como diferença fundamental que nos gráficos a seguir o tamanho das peças estruturais está calculado de forma tal que se tenha a mesma relação L_p/L_v em que se observa ponto de rigidez máxima, estes pontos podem ser observados nos gráficos do item 6.1.2 deste trabalho e, por uma questão de praticidade, são chamados de “relações de relação L_p/L_v ideal”. Os mencionados pontos de relação L_p/L_v ideal foram levantados pelo próprio algoritmo desenvolvido para o trabalho. Não foram gerados gráficos para pórticos de 2, 4 nem 6 vãos.

6.2.1.1 Gráficos com variação da área da seção reta das peças estruturais – mantendo-se os momentos de inércia fixos, mas com relação L_p/L_v ideal

Este conjunto de gráficos foi gerado com a seguinte estrutura de pórtico:

Número de pavimentos: variável

$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$A_v = 800 \text{ cm}^2$

$I_v = 106.666,67 \text{ cm}^4$

$L_v =$ dado pela relação L_p/L_v ideal de máxima rigidez

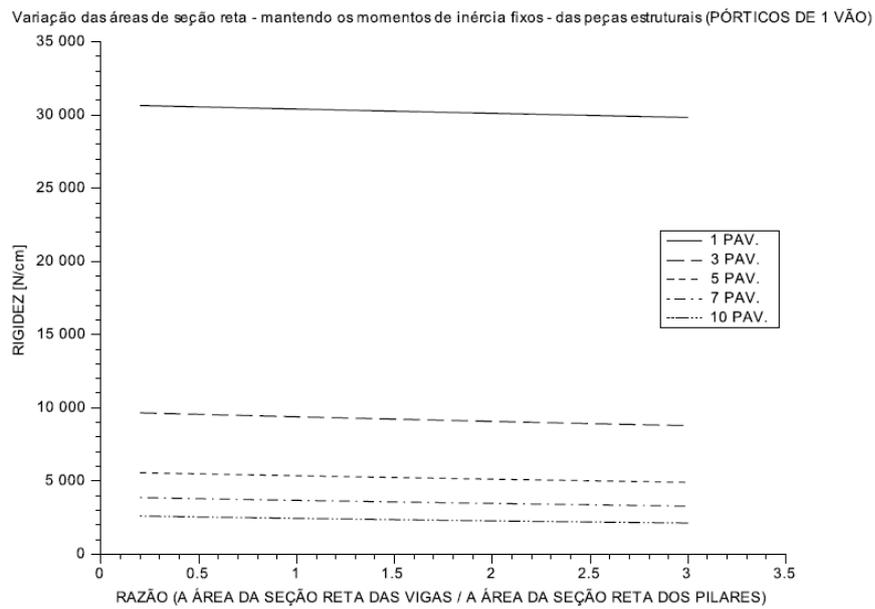
Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$A_p = \text{variável}$

$I_p = 67.500 \text{ cm}^4$

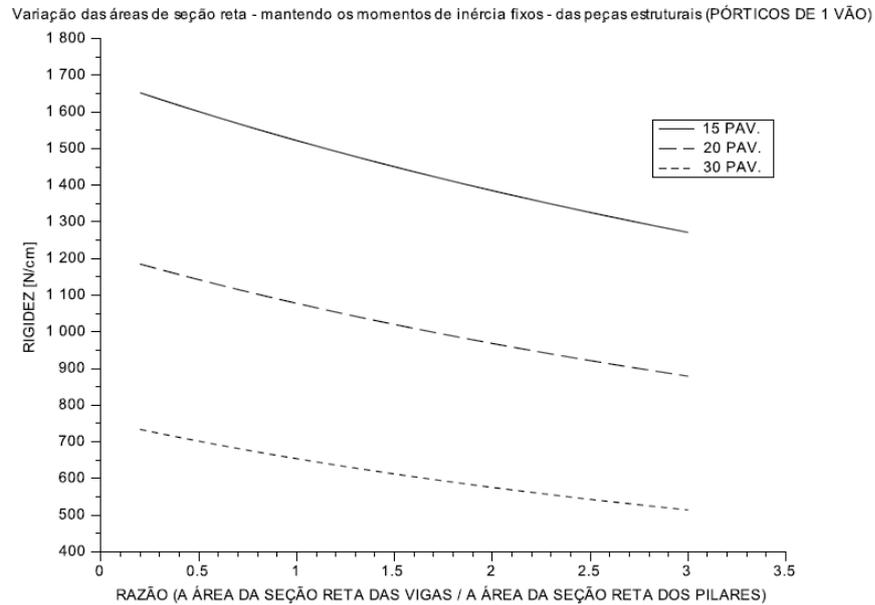
$L_p = 250 \text{ cm}$

Figura 58 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



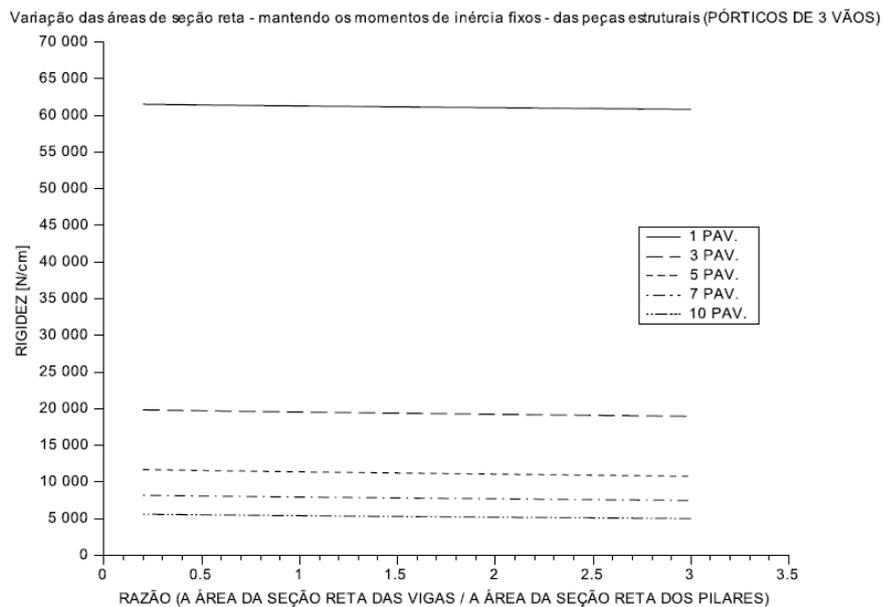
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 59 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 30 pavimentos, na estrutura padrão



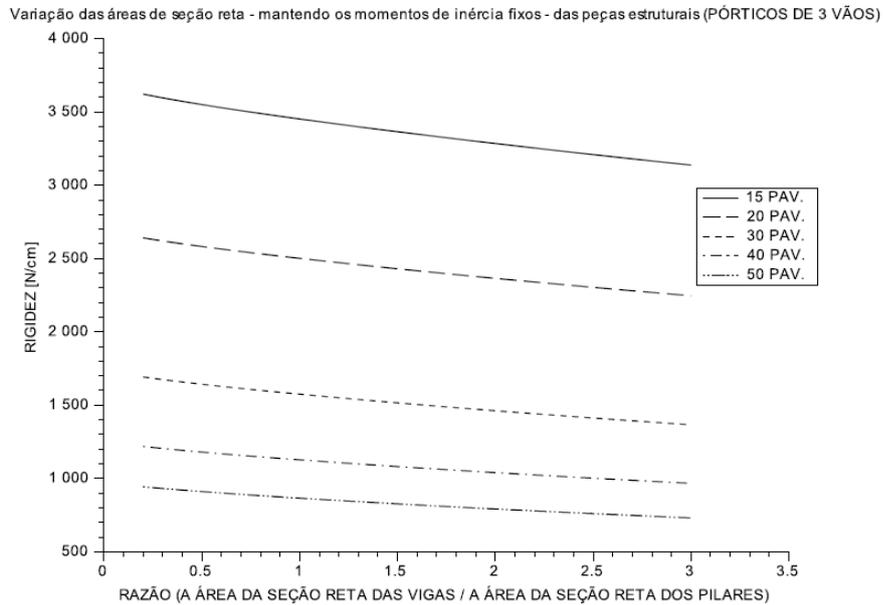
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 60 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



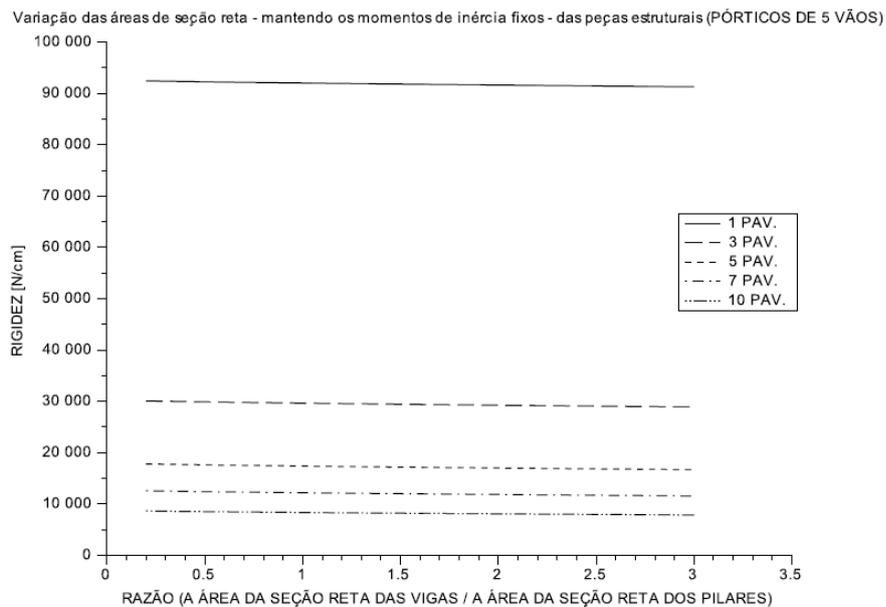
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 61 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



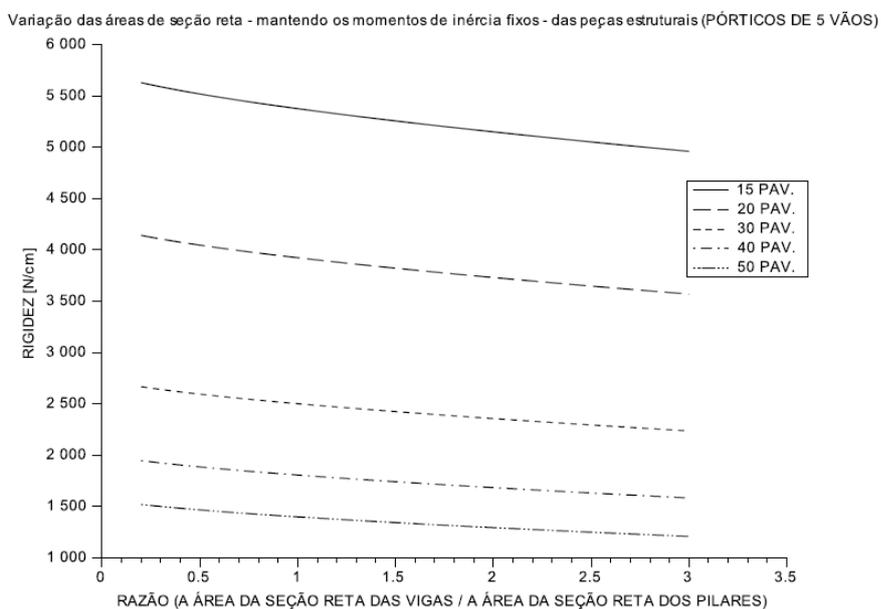
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 62 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 63 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.1.2 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – variando-se as áreas da seção bruta de forma coerente, mas com relação L_p/L_v ideal

Este conjunto de gráficos foi gerado com a seguinte estrutura de pórtico:

Número de pavimentos: variável

$$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$$A_v = 800 \text{ cm}^2$$

$$I_v = 106.666,67 \text{ cm}^4$$

L_v = dado pela relação L_p/L_v ideal de máxima rigidez

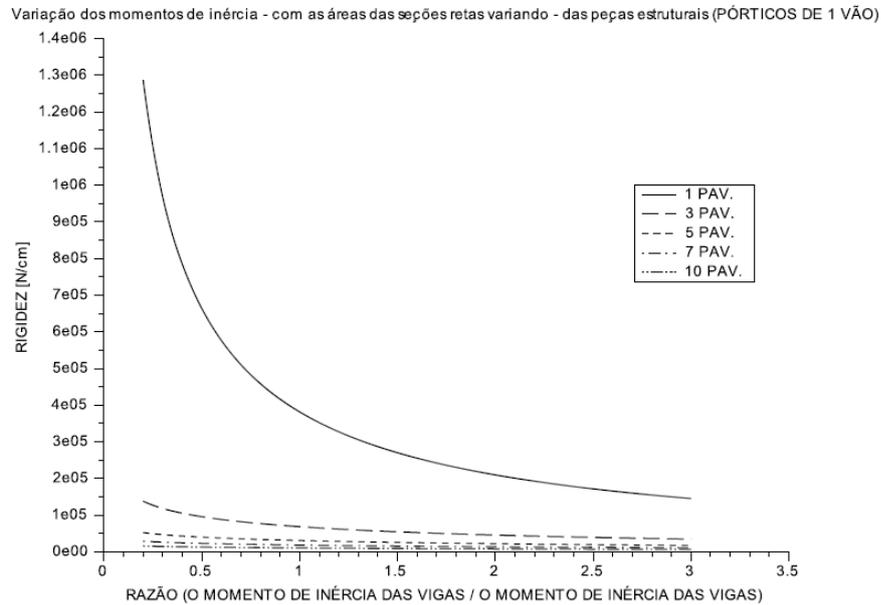
Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

A_p : variável

I_p = variável

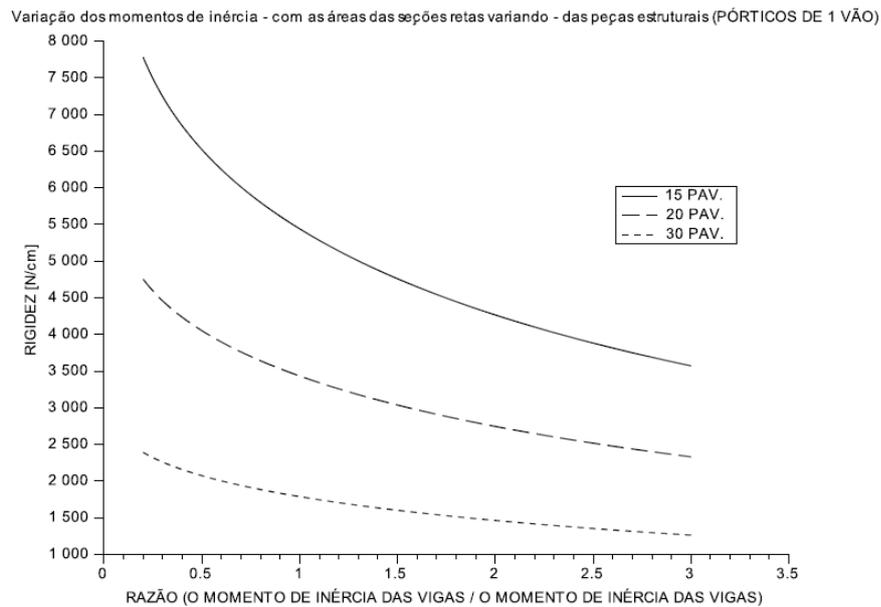
$$L_p = 250 \text{ cm}$$

Figura 64 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



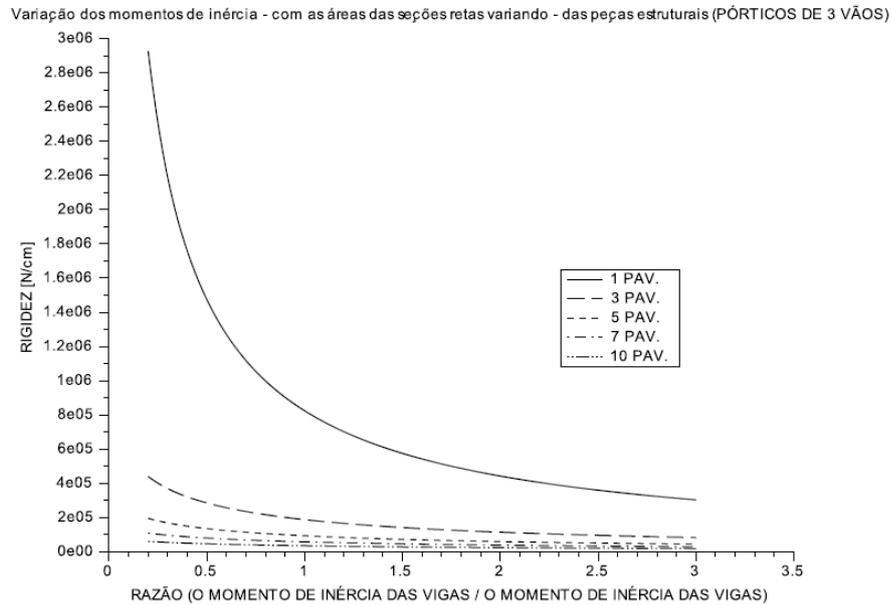
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 65 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 30 pavimentos, na estrutura padrão



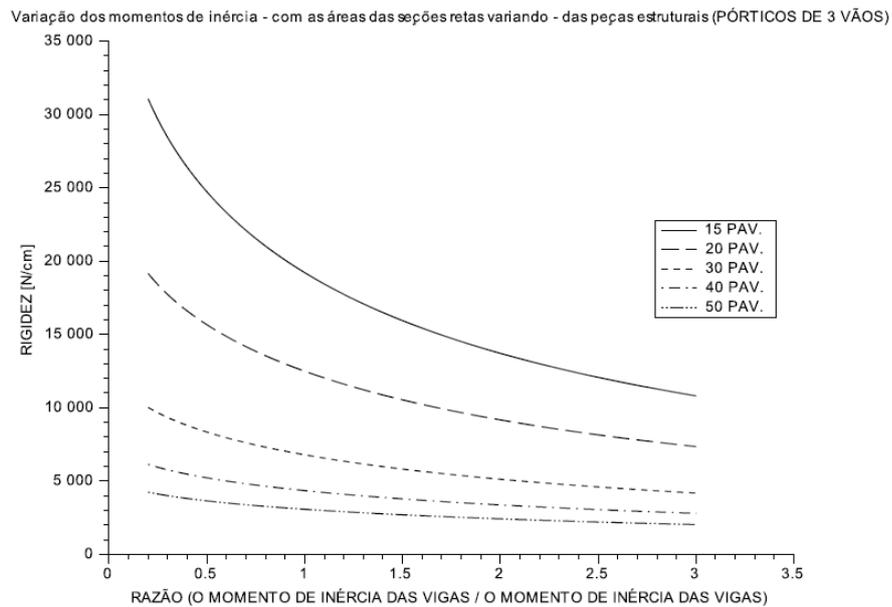
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 66 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



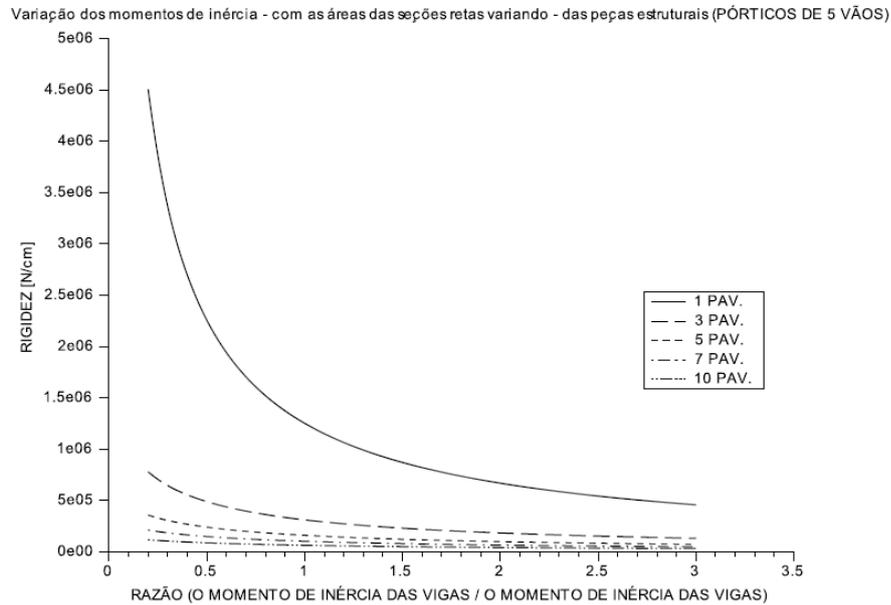
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 67 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



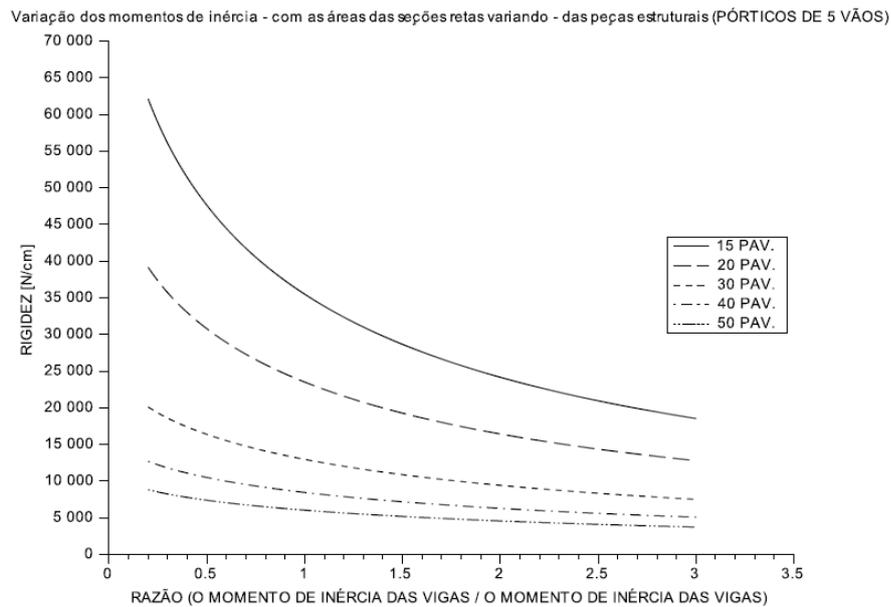
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 68 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 69 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.1.3 Gráficos com variação dos momentos de inércia das peças estruturais – mantendo-se fixas as áreas da seção bruta, mas com relação I_p/I_v ideal

Este conjunto de gráficos foi gerado com a seguinte estrutura de pórtico:

Número de pavimentos: variável

$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$A_v = 800 \text{ cm}^2$

$I_v = 106.666,67 \text{ cm}^4$

$L_v =$ dado pela relação L_p/L_v ideal de máxima rigidez

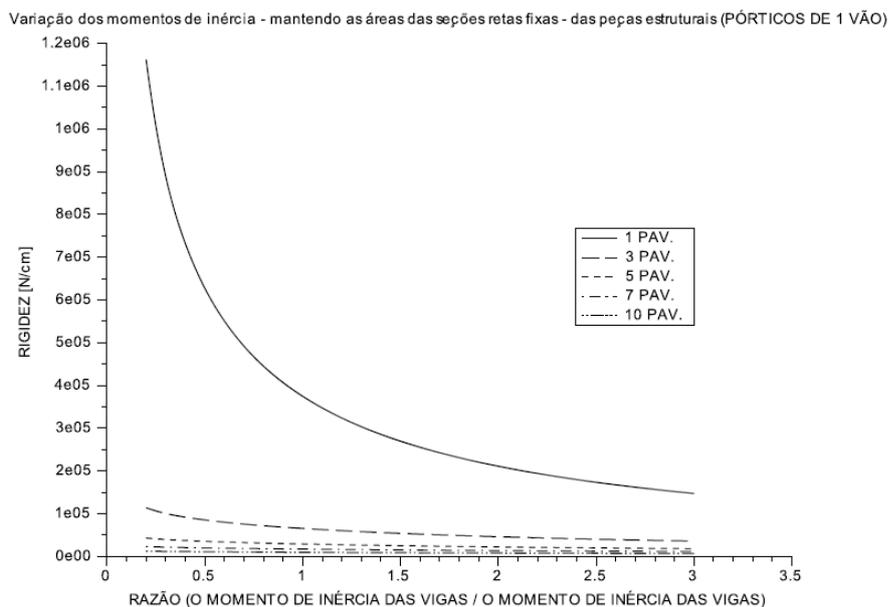
Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$A_p = 900 \text{ cm}^2$

$I_p =$ variável

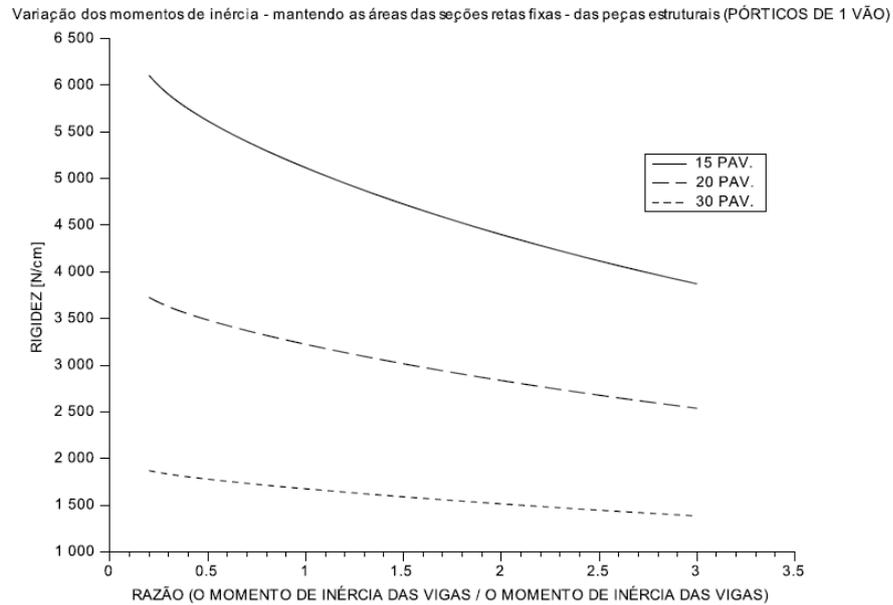
$L_p = 250 \text{ cm}$

Figura 70 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



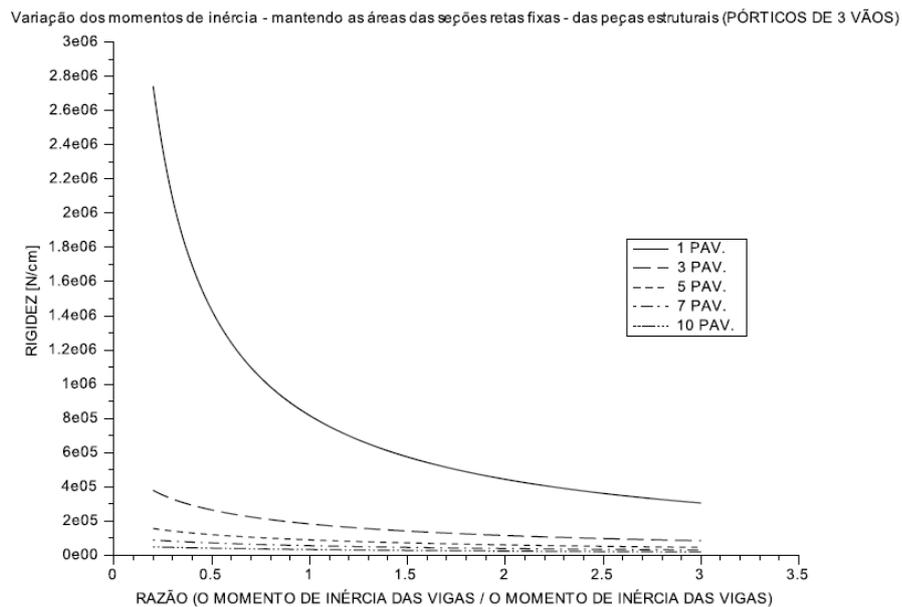
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 71 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 1 vão, de 15 a 30 pavimentos, na estrutura padrão



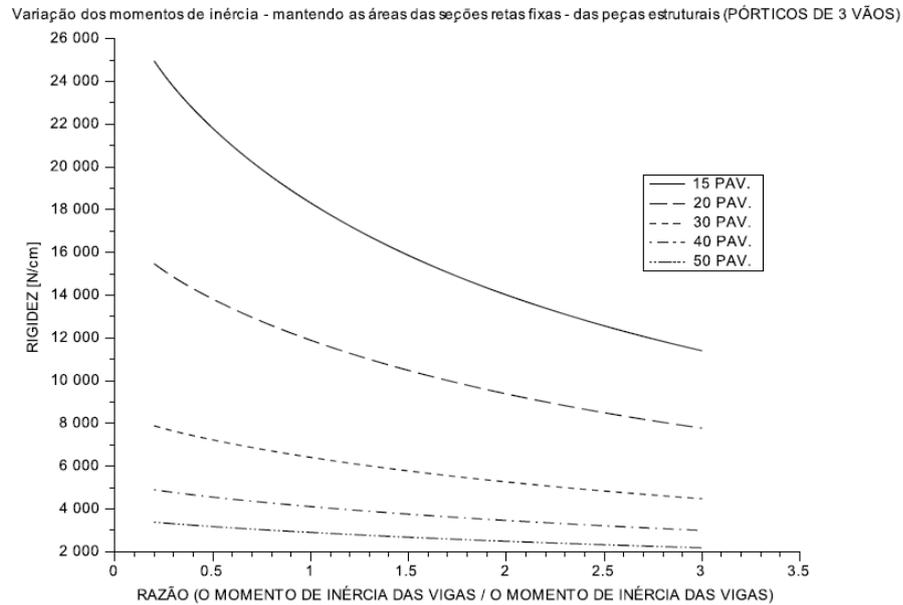
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 72 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



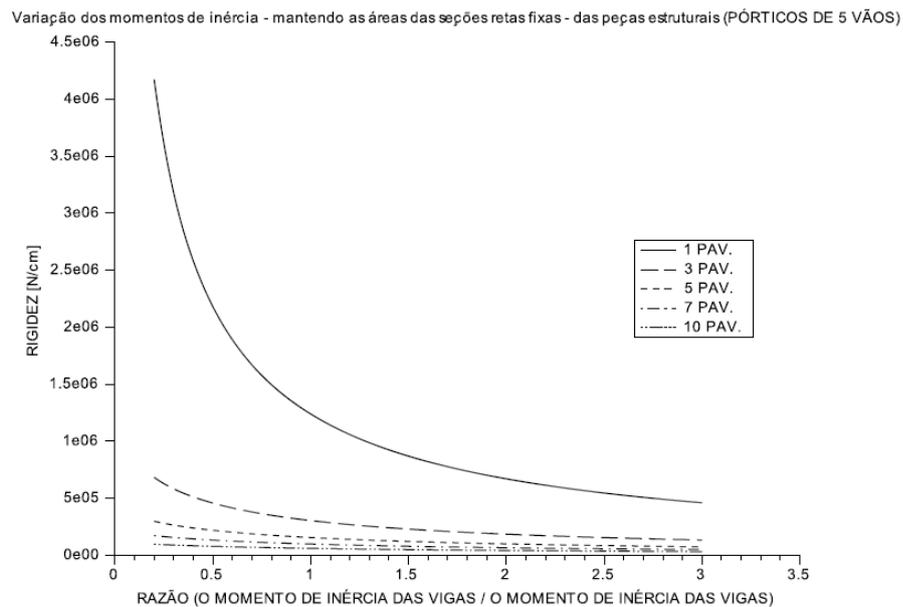
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 73 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



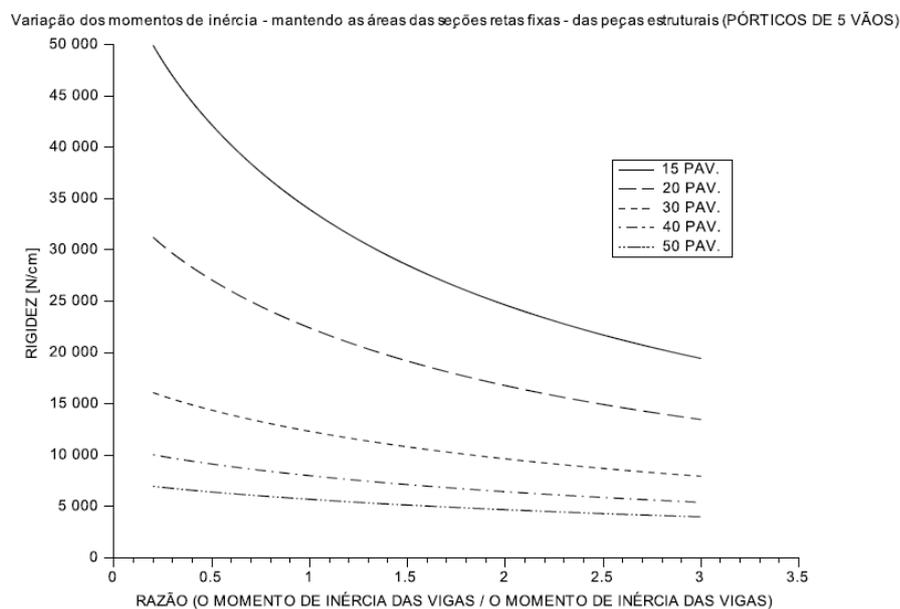
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 74 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 75 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – com pórticos com relação L_p/L_v ideal para pórticos de 5 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.2 GRÁFICOS GERADOS A PARTIR DE PÓRTICOS COM CONFIGURAÇÕES DIVERSAS

Aqui serão apresentados os últimos gráficos gerados.

Os gráficos das figuras 76 e 77 foram gerados a partir da seguinte estrutura de pórtico (trata-se de uma inversão entre as A_p e A_v em relação à estrutura padrão do trabalho):

Número de pavimentos: variável

$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$

Vigas de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$A_v = 900 \text{ cm}^2$

$I_v = 67.500 \text{ cm}^4$

L_v : variável

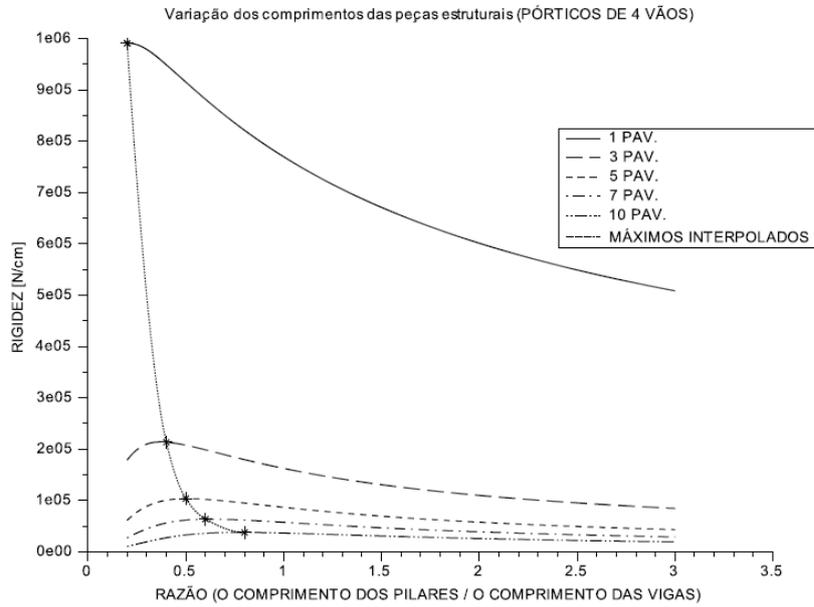
Pilares de seção retangular. Seção com 20 cm x 40 cm:

$A_p = 800 \text{ cm}^2$

$I_p = 106.666,67 \text{ cm}^4$

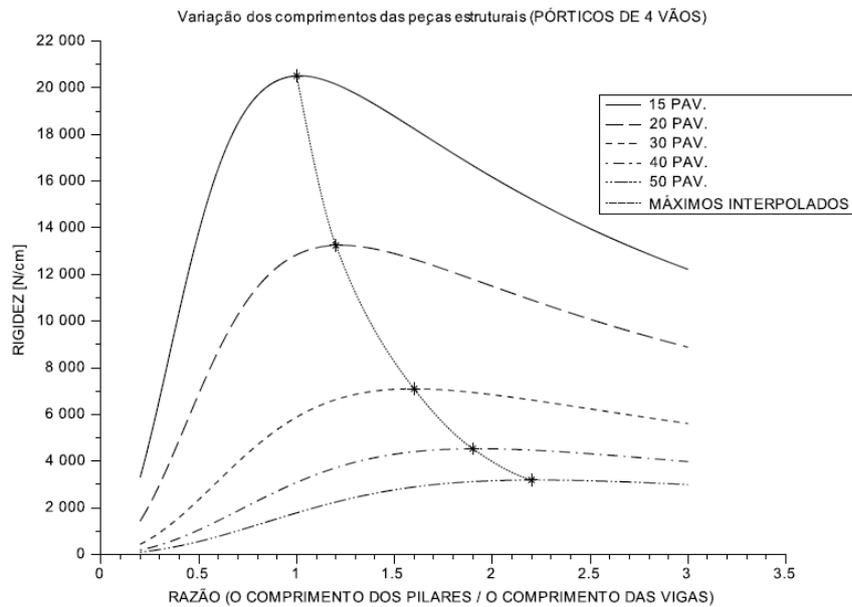
$L_p = 250 \text{ cm}$

Figura 76 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 77 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos das figuras 78 e 79 foram gerados a partir da seguinte estrutura de pórtico (trata-se de uma inversão entre as L_p e L_v em relação à estrutura padrão do trabalho):

Número de pavimentos: variável

$$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$$A_v = 800 \text{ cm}^2$$

$$I_v = 106.666,67 \text{ cm}^4$$

$L_v = \text{variável}$

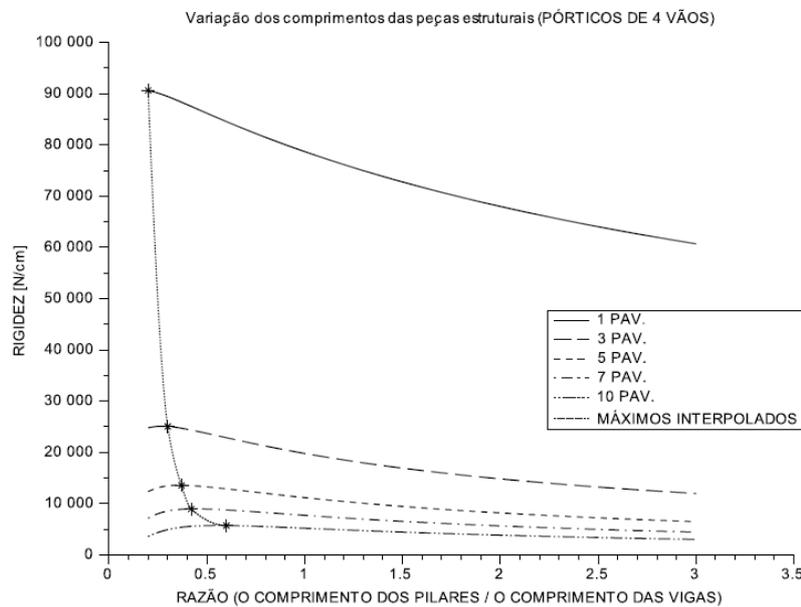
Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$$A_p = 900 \text{ cm}^2$$

$$I_p = 67.500 \text{ cm}^4$$

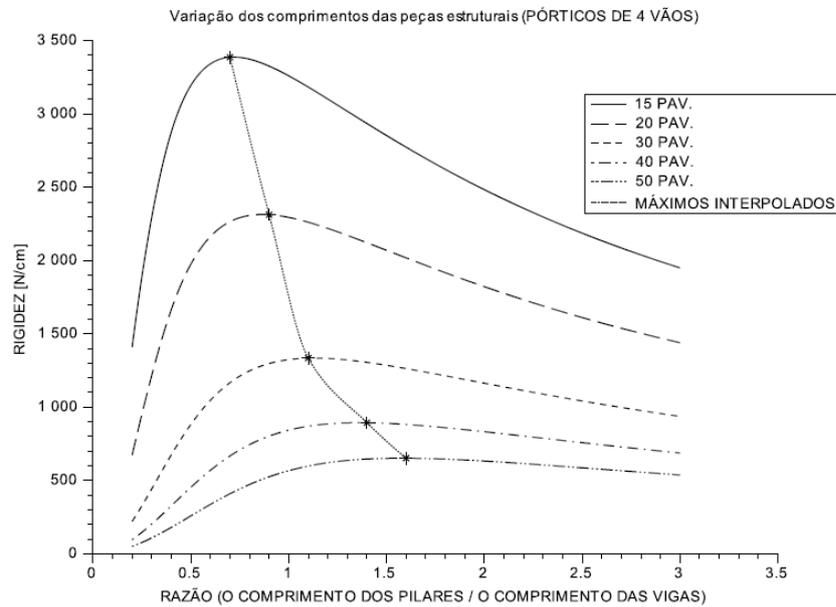
$$L_p = 500 \text{ cm}$$

Figura 78 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 79 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos das figuras 80 e 81 foram gerados a partir da seguinte estrutura de pórtico (trata-se de uma estrutura que tem os pilares e as vigas com mesma seção reta e mesmo momento de inércia):

Número de pavimentos: variável

$$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$$

Vigas de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$$A_v = 900 \text{ cm}^2$$

$$I_v = 67.500 \text{ cm}^4$$

L_v : variável

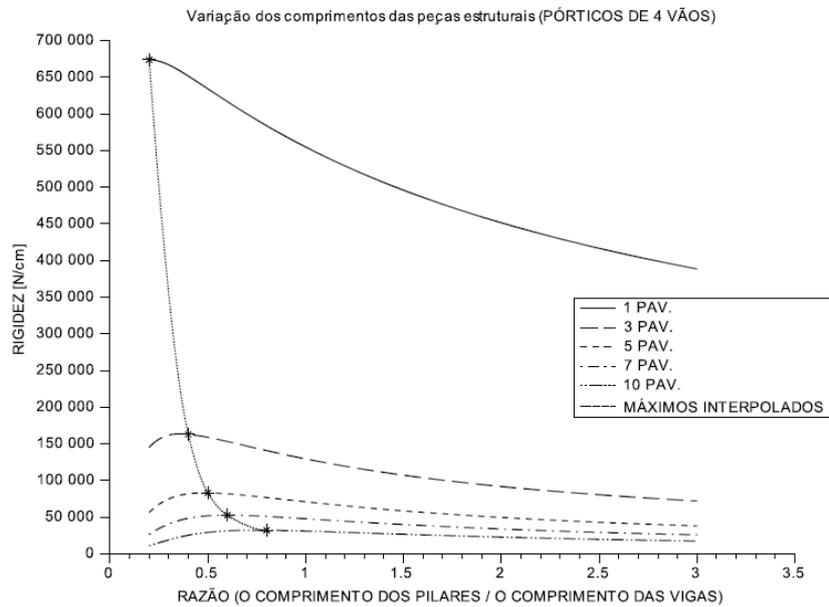
Pilares de seção quadrada. Seção com 30 cm lado:

$$A_p = 900 \text{ cm}^2$$

$$I_p = 67.500 \text{ cm}^4$$

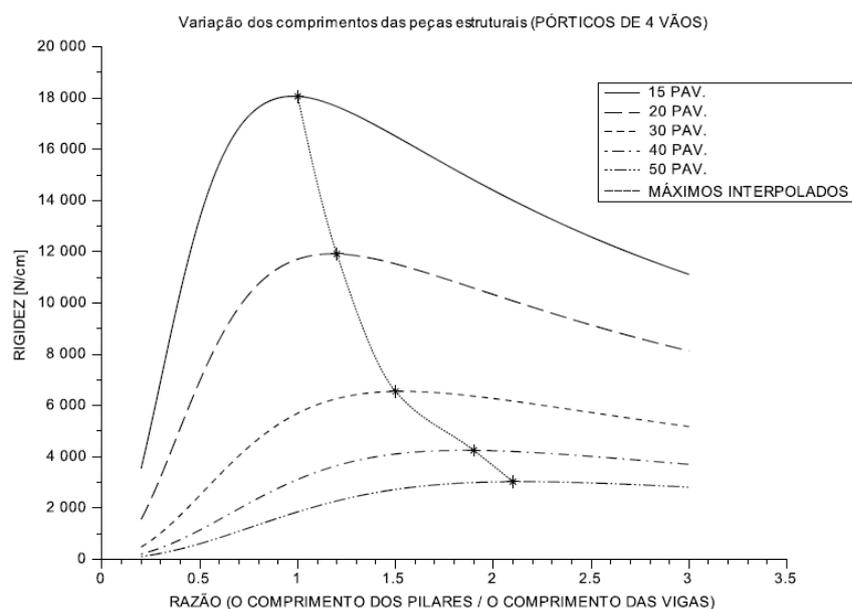
$$L_p = 250 \text{ cm}$$

Figura 80 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 81 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos das figuras 82 e 83 foram gerados a partir da seguinte estrutura de pórtico (trata-se de uma estrutura que tem os pilares e as vigas com mesma seção reta e mesmo momento de inércia):

Número de pavimentos: variável

$$E = 3.000.000 \text{ N/cm}^2$$

Vigas de seção retangular. Seção com 20 cm de base e 40 cm de altura:

$$A_v = 800 \text{ cm}^2$$

$$I_v = 106.666.67 \text{ cm}^4$$

L_v : variável

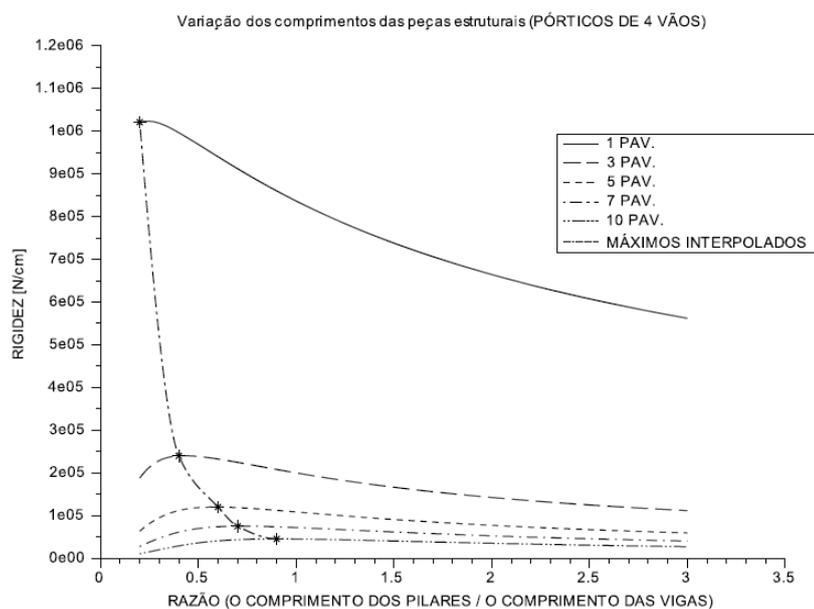
Pilares de seção retangular. Seção com 20 cm x 40 cm (peça com eixo de maior inércia paralelo ao plano do pórtico):

$$A_p = 800 \text{ cm}^2$$

$$I_p = 106.666.67 \text{ cm}^4$$

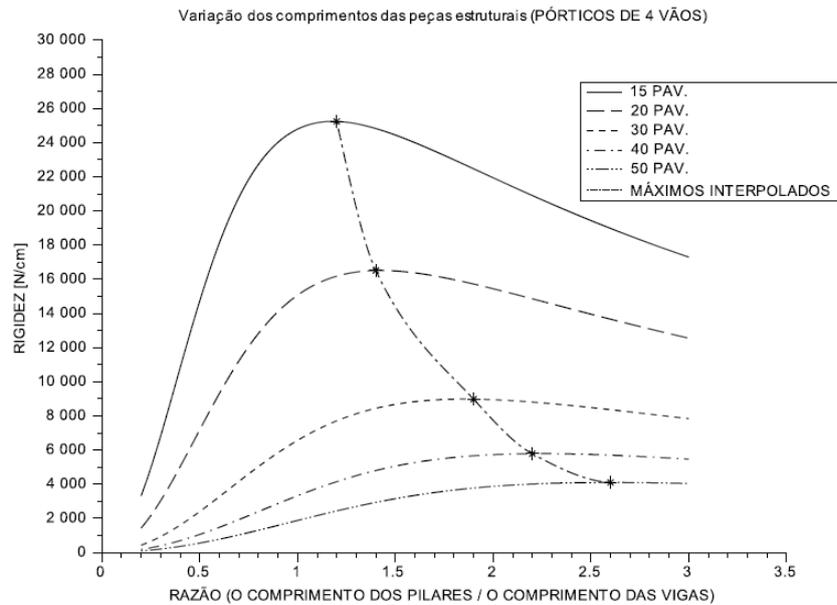
$$L_p = 250 \text{ cm}$$

Figura 82 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

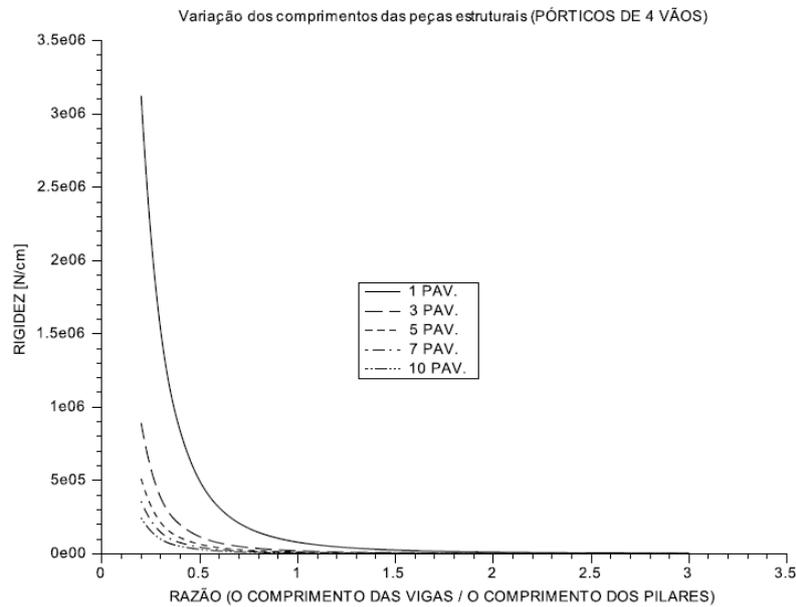
Figura 83 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para uma estrutura diferente da estrutura padrão deste trabalho para pórticos de 4 vãos, de 15 a 50 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

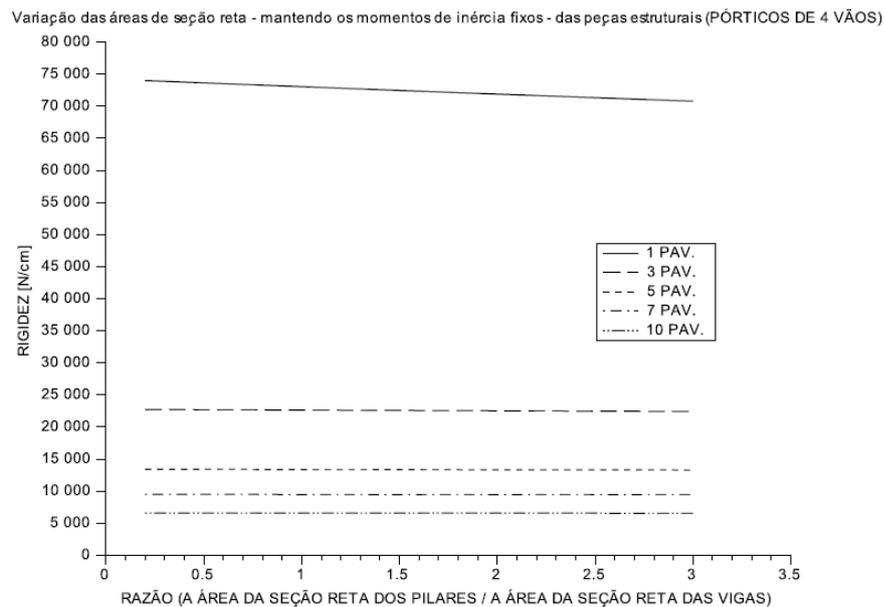
Os gráficos das figuras 84, 85, 86 e 87 foram gerados tendo como *input* a estrutura padrão deste trabalho; porém, inverteu-se a relação apresentada na abcissa do gráfico. A figura 84 é análoga à figura 28; a figura 85 é análoga à figura 16; a figura 86 é análoga à figura 40; a figura 87 é análoga à figura 52.

Figura 84 – Gráfico da variação dos comprimentos das peças estruturais para a padrão deste trabalho, mas apresentando na abcissa relação L_v/L_p pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



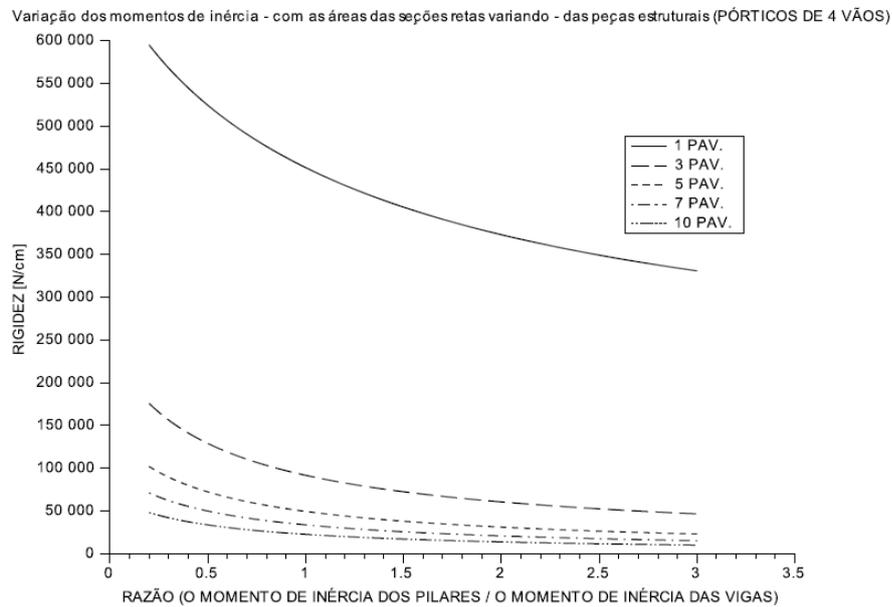
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 85 – Gráfico da variação das áreas de seção bruta das peças estruturais – sem variar os momentos de inércia – apresentando na abcissa a relação A_p/A_v para pórticos de 4 vãos, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



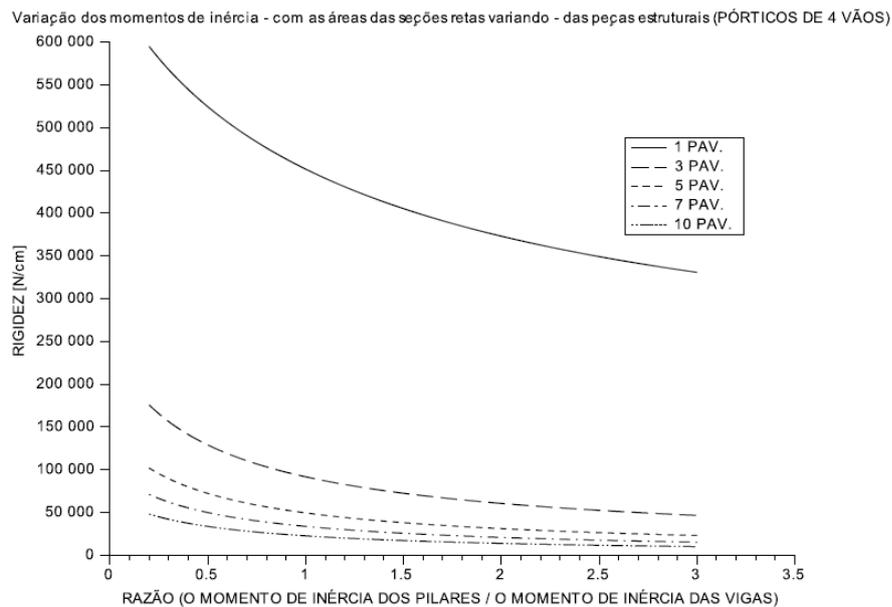
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 86 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – com a variação coerente das áreas de seção bruta – apresentando na abcissa a relação I_p/I_v para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 87 – Gráfico da variação dos momentos de inércia das peças estruturais – sem a variação coerente das áreas de seção bruta – apresentando na abcissa a relação I_p/I_v para pórticos de 1 vão, de 1 a 10 pavimentos, na estrutura padrão



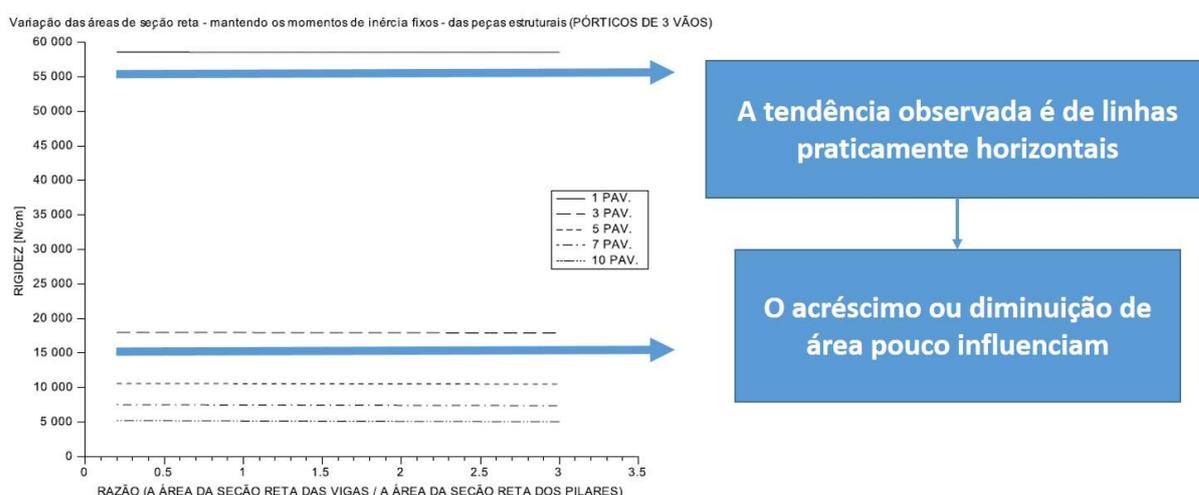
(fonte: elaborado pelo autor)

7 RELAÇÕES INTERESSANTES ENTRE AS VARIÁVEIS NO QUE DIZ RESPEITO À RIGIDEZ HORIZONTAL

Neste capítulo são expostas as interpretações dos dados gerados. Os gráficos por si só têm pouco valor, o importante é a informação que se pode extrair deles e em que tal informação pode auxiliar projetistas e alunos na hora de fazer um lançamento de estrutura ou de fazer modificações na estrutura já lançada. Embora já se tenha falado anteriormente, cabe salientar que os gráficos nesse trabalho foram elaborados a partir de uma estrutura padrão (com variações dela); dessa maneira, as observações apresentadas neste capítulo não são total e completamente abrangentes, não necessariamente satisfazem qualquer configuração estrutural.

A variação da área da seção reta das peças (analisada isoladamente) influencia muito pouco na rigidez dos pórticos. Embora em raríssimos casos a seção reta de uma viga ou pilar varie isoladamente, sem variar o momento de inércia junto, foi feita essa análise. Como se pode observar nos gráficos do item 6.1.1 deste trabalho, a variação da rigidez é bastante sutil. A figura 88 mostra o que foi citado acima; ela mostra um dos gráficos de variação da área, com o momento de inércia mantido fixo, acrescido de setas demonstrando a tendência das linhas.

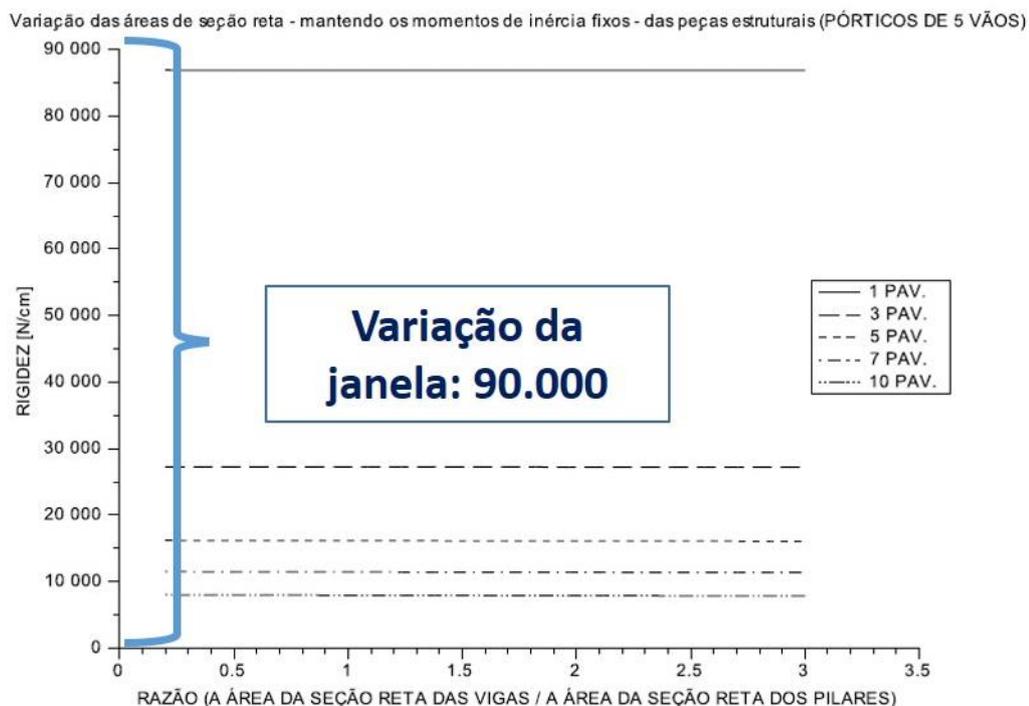
Figura 88 – Explicação referente à pouca influência da variação da área da seção das peças estruturais na no resultado da rigidez



(fonte: elaborado pelo autor)

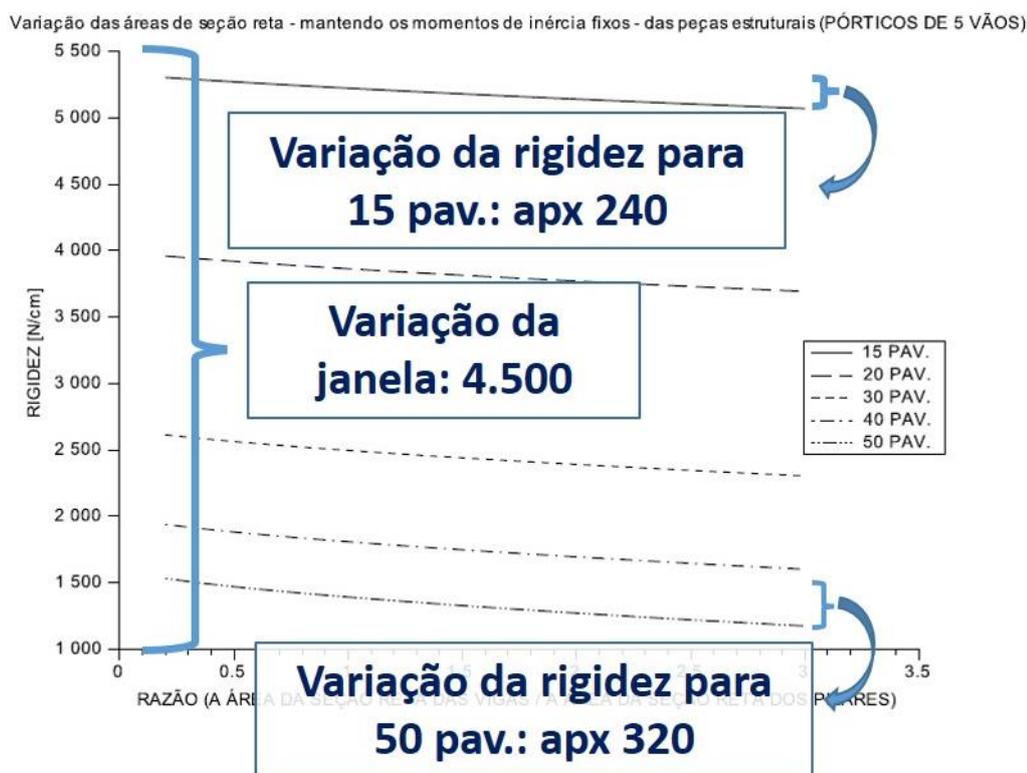
Pórticos com maior número de pavimentos são mais sensíveis à variação da área bruta da seção reta das peças (analisada isoladamente). Como dito anteriormente, a variação da área influencia pouco, mas em pórticos de poucos pavimentos, ela influencia menos ainda. Há que se observar que, um olhar desatento nos gráficos do item 6.1.1 pode levar a crer que quanto maior o número de pavimentos, muito mais sensível é o pórtico em relação à variação da área da seção reta, pois os gráficos com mais de 10 pavimentos apresentam variações visivelmente maiores que os de 1 a 10 pavimentos; no entanto, a escala vertical é diferente. Embora a diferença não seja tão grande como pode parecer à primeira vista, ela existe e os pórticos com 50 pavimentos apresentaram maior sensibilidade à essa mudança que os de 40, que por sua vez apresentaram mais sensibilidade que os de 30 e assim por diante. A comparação das figuras 89 e 90 torna claro que há uma escala diferente da ordenada dos gráficos (trata-se das figuras 18 e 19, respectivamente, mas com a adição de detalhes gráficos). Na figura 90 é possível observar que na linha de cima, indicando o valor da rigidez para 15 pavimentos, a rigidez varia aproximadamente 240 N/cm, enquanto que na linha de baixo, que indica a rigidez para 50 pavimentos, a variação da rigidez é de aproximadamente 320 N/cm.

Figura 89 – Variação na ordenada de gráfico



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 90 – Variação da ordenada no gráfico e variação da rigidez em duas linhas diferentes

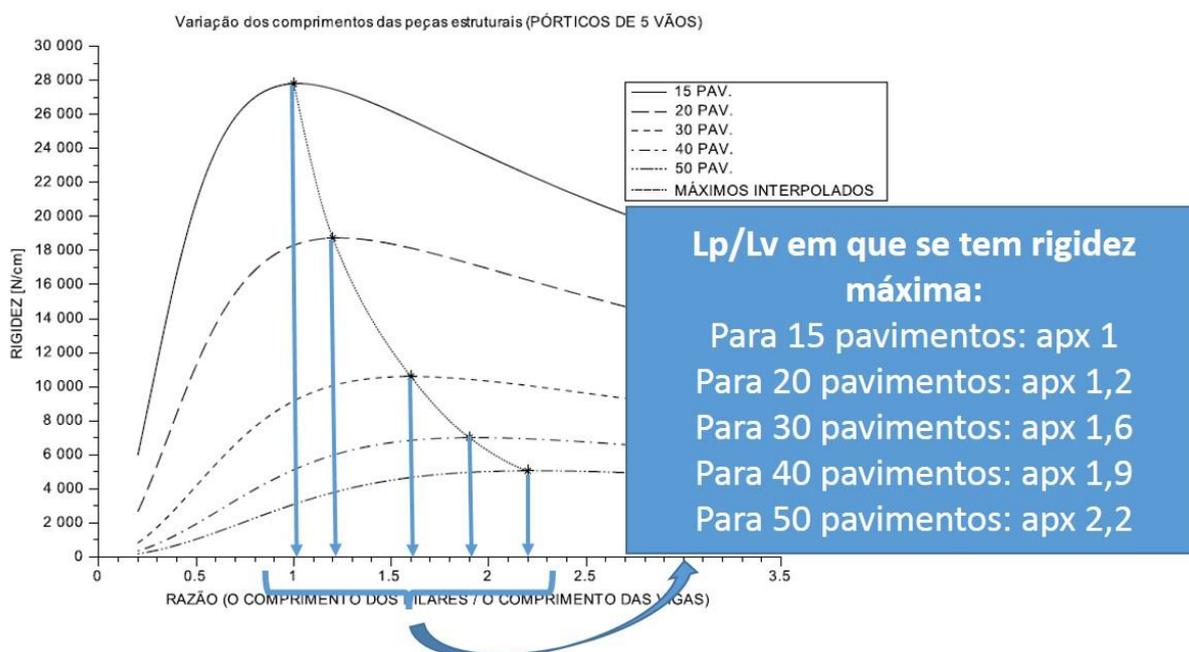


(fonte: elaborado pelo autor)

Quando se observa a variação da rigidez em função da variação do comprimento das peças, há um ponto de rigidez máxima. Como pode ser observado nos gráficos do item 6.1.2, existe uma relação L_p/L_v em que a rigidez é a maior, antes ou depois disso a rigidez decai.

O ponto de relação L_p/L_v em que se observa um valor máximo de rigidez cresce de forma diretamente proporcional com o número de pavimentos. Este fenômeno pode facilmente ser percebido quando se observa a linha de máximos interpolados. A figura 91 evidencia o que foi falado acima, salientando no gráfico e informando valores de L_p/L_v máximos para curvas de diferentes números de pavimentos.

Figura 91 – Valores de pontos de L_p/L_v de rigidez máxima para diferentes números de pavimentos

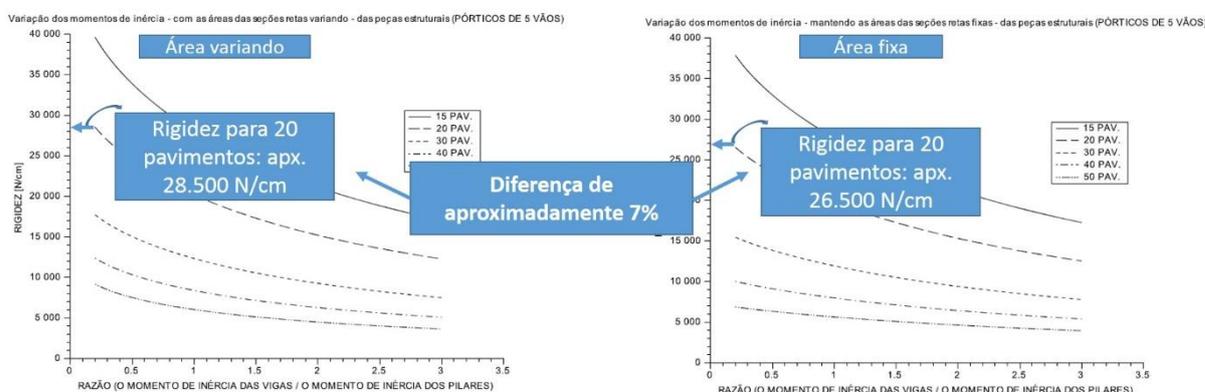


(fonte: elaborado pelo autor)

Somente há um ponto de rigidez máxima, entre as relações feitas neste trabalho, no caso da variação L_p/L_v , para a ordem de grandeza abordada neste trabalho. A figura 83 apresenta um gráfico análogo ao apresentado na figura 28. Nessa dupla de gráficos é possível observar claramente que a análise feita com L_v/L_p não apresenta ponto de máximo enquanto L_p/L_v apresenta; no entanto, não aparece ponto de máximo nos gráficos feitos com I_p/I_v , nem nos feitos com I_v/I_p ; o mesmo vale para a variação da área.

A área da seção reta das peças estruturais contribui muito pouco para a rigidez de pórticos. Esta afirmação já foi feita, em outros termos, mais acima, quando foram feitas observações sobre os gráficos de variação das áreas. Pode-se chegar à esta conclusão observando os as figuras dos itens 6.1.3 e 6.1.4. As diferenças entre elas é que em um grupo foi considerado a variação da área de forma coerente, com a devida variação do momento de inércia e em outro não. Há diferenças nos valores, porém sutis. Na figura 92 é possível observar uma comparação entre dois gráficos, onde se destaca o valor de rigidez em dois gráficos análogos. Como a rigidez nos dois gráficos foi avaliada no mesmo ponto de razão L_v/L_p e com o mesmo número de pavimentos, é possível observar a variação relativa, que é de aproximadamente 7%.

Figura 92 – Comparação entre dois gráficos gerados com a mesma estrutura padrão e o mesmo número de vãos, em ambos há variação do momento de inércia, mas em um a área varia e em outro não

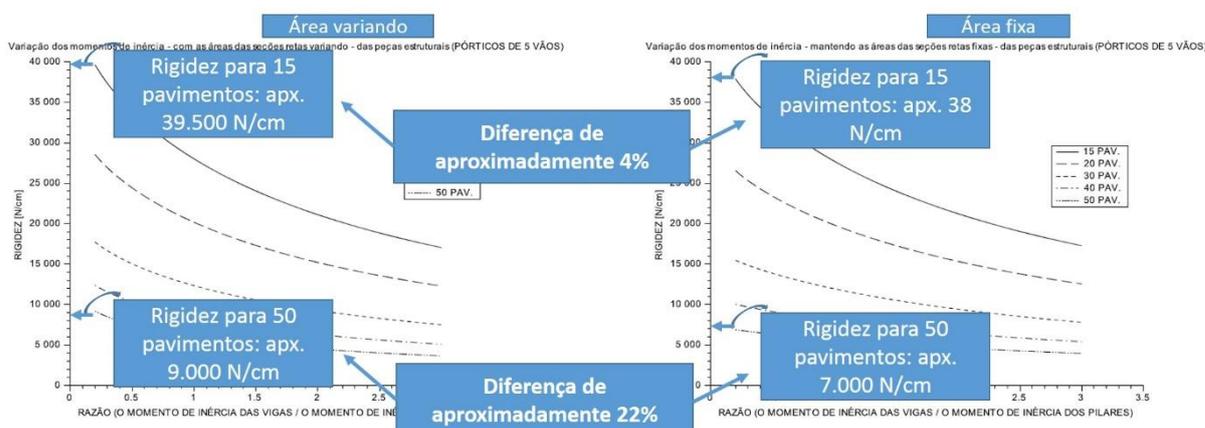


(fonte: elaborado pelo autor)

A área da seção reta das peças estruturais é mais significativa para a rigidez horizontal nos pórticos com maior número de pavimentos. Esta afirmação também já foi feita, em outros termos, mais acima, quando se fez observações sobre os gráficos de variação das áreas. Porém, comparando gráficos análogos (elaborados com a mesma estrutura padrão, para o mesmo número de vãos, mas tendo a diferença que um varia a área de forma coerente e outro não), observa-se claramente que a diferença pode ser razoável. Na figura 93 é possível observar uma comparação, semelhante à da figura 92, mas com números distintos de pavimento, nesta comparação fica evidente que pórticos com maior número de pavimentos (no caso: 50 pavimentos) são mais impactados pela área de seção bruta do que pórticos com poucos pavimentos (no caso: 15 pavimentos). A diferença entre a análise não considerando e a outra considerando a variação coerente da área foi de 4% e 15 pavimentos enquanto que e 50 foi em torno de 22%. Isso acontece por que o deslocamento do pórtico, quando submetido à uma carga horizontal, se dá por dois fenômenos, o primeiro é a flexão das barras (vigas e pilares) e o segundo fenômeno é a flexão global da estrutura (neste caso: a flexão global do pórtico). Na flexão de cada uma das barras, a rigidez é dada pelo produto do módulo de elasticidade pelo momento de inércia; já na flexão global da estrutura, o pórtico todo flexiona, provocando (principalmente nos pilares de extremidade) acréscimo significativo no esforço normal solicitante. A rigidez de uma barra submetida a esforço normal é dada pelo produto do módulo de elasticidade pela área. Como em pórticos de muitos pavimentos o segundo fenômeno é mais significativo que em pórticos de poucos pavimentos (ou seja: um pórtico de 50 pavimentos

apresenta mais flexão global que um de 15 pavimentos) a área das peças estruturais é mais significativa para a rigidez em pórticos de número grande de pavimentos.

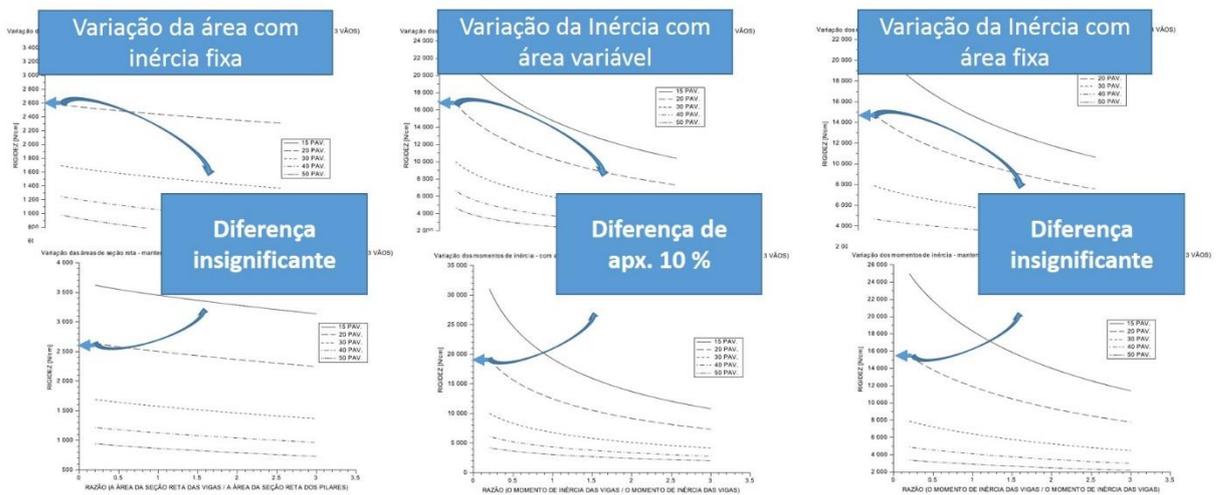
Figura 93 – Comparação entre dois gráficos gerados com a mesma estrutura padrão e o mesmo número de vãos, em ambos há variação do momento de inércia, mas em um a área varia e em outro não



(fonte: elaborado pelo autor)

Em nem todos os gráficos refeitos com o comprimento das peças no ponto de L_p/L_v na relação ideal se observou grandes acréscimos no valor da rigidez. Na figura 94 pode-se observar a comparação para os três grupos de gráficos apresentados no item 6.2.1; a figura mostra gráficos para pórticos de 3 vãos, de 15 a 50 pavimentos, comparados com os gráficos análogos a eles, apresentados no item 6.1 (em outras palavras: a comparação de gráficos construídos na relação L_p/L_v ideal com os seus semelhantes, que não estão na referida relação). De todos, o que apresentou diferença mais significativa foi aquele em que a área e o momento de inércia variam juntos (o mais importante). O fato de alguns apresentarem acréscimos significativos na rigidez enquanto outros não se deve uma soma do efeito citado acima (de da influência da área variando juntamente com a inércia). Em alguns gráficos a diferença do L_p/L_v ideal se faz notar e em outros ela aparece obscurecida pelo efeito da variação das áreas.

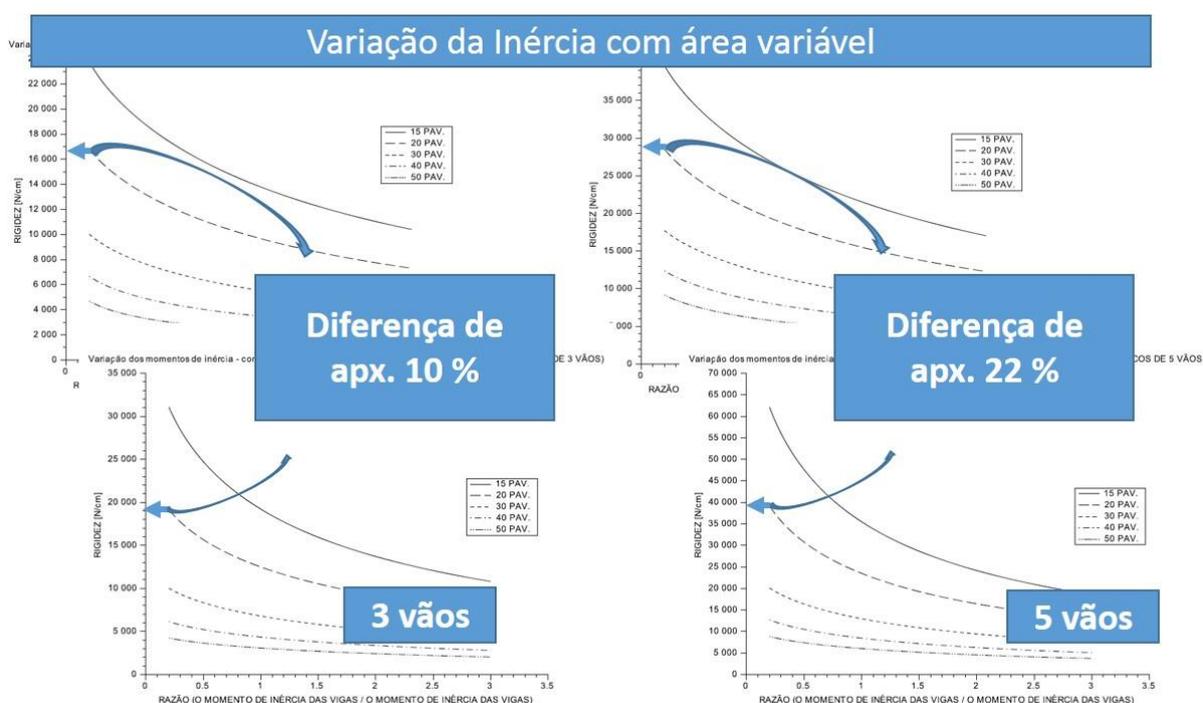
Figura 94 – Comparação entre três pares de gráficos análogos (três elaborados com a estrutura padrão e três com modificações para se encaixar na relação L_p/L_v ideal), todos com o mesmo número de vãos



(fonte: elaborado pelo autor)

Quanto maior o número de vãos, mais vantajoso é construir pórticos na relação ideal entre o comprimento das peças. Isso mostra que, embora seja interessante saber que existe um ponto de L_p/L_v ideal, nem sempre o aumento real de rigidez no pórtico construído nesta relação, se comparado com outro, é significativo (além disso, é claro, existem questões arquitetônicas que fazem que, nem sempre seja possível que a configuração seja tal que fique no ponto de L_p/L_v ideal). A figura 95 expõe uma comparação entre dois pares de gráficos; a comparação de um gráfico gerado com a estrutura padrão para três vãos com o seu análogo, gerado com modificações para atender a relação L_p/L_v ideal; o mesmo é apresentado para cinco pavimentos. É possível perceber que no caso de cinco vãos, a diferença é maior.

Figura 95 – Comparação entre dois pares de gráficos análogos (cada par tem um gráfico elaborado com a estrutura padrão e o seu análogo com modificações para se encaixar na relação L_p/L_v ideal); um par para cinco vãos e outro para três

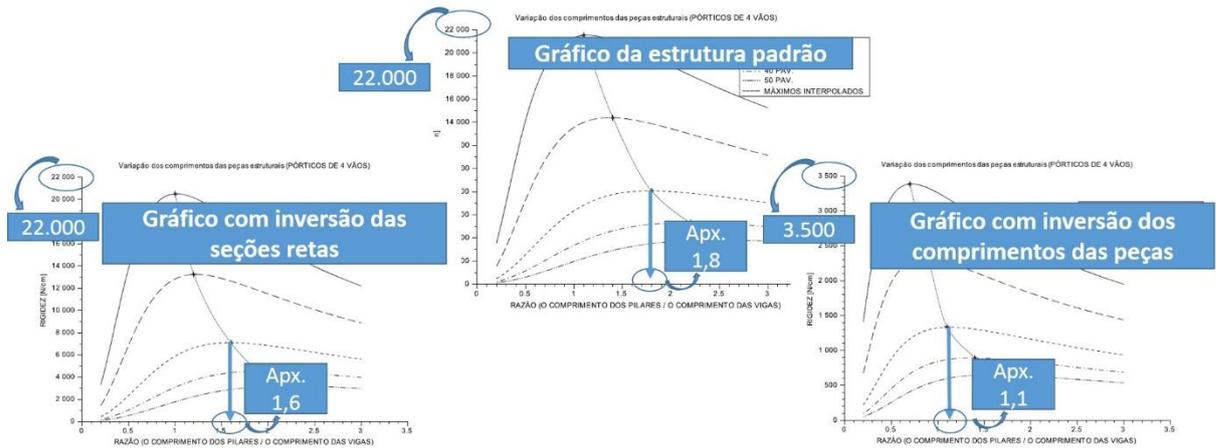


(fonte: elaborado pelo autor)

O comprimento das peças estruturais é o parâmetro para o qual os pórticos são mais sensíveis, no que diz respeito à rigidez horizontal. Foram elaborados gráficos em que se modificou a seção das peças (área e momento de inércia) em relação à estrutura padrão, ou seja: o que era a área dos pilares na estrutura padrão foi colocado como área das vigas neste novo gráfico e o que era área de seção das vigas foi colocado como área de pilar neste novo gráfico; o mesmo foi feito para o comprimento das peças estruturais. No gráfico com a inversão do comprimento das peças estruturais é que se notou mais diferença nos valores em relação à estrutura padrão. Na figura 96 é possível observar o gráfico elaborado com a inversão nas seções retas das peças e o gráfico elaborado com a inversão dos comprimentos das peças estruturais, ambos gráficos foram elaborados para 4 vãos e com 15 a 50 pavimentos e aparecem na figura em comparação com o seu análogo, elaborado na estrutura padrão. Se for comparada a figura 96 com a figura 97 será possível perceber, mais uma vez que as mudanças provocadas na seção

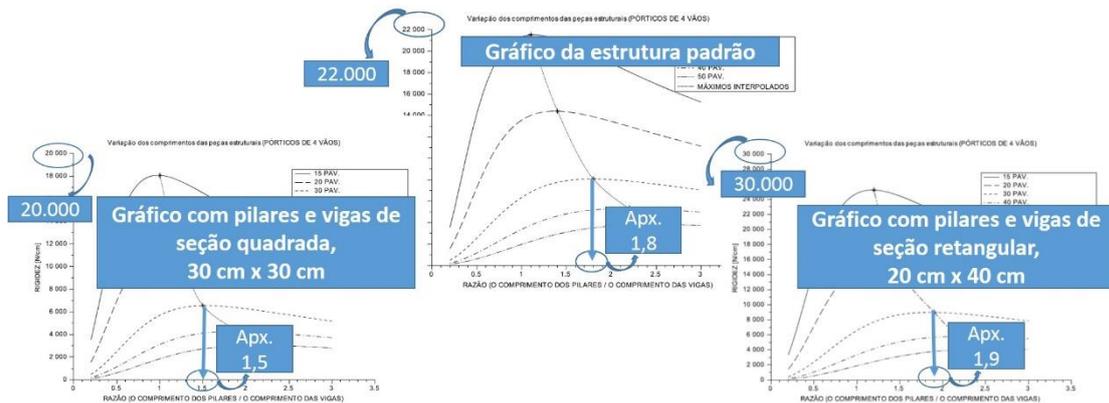
das peças surtem menos efeito do que aquelas provocadas no comprimento. Na figura 97 é exposta uma comparação entre dois gráficos elaborados para pórticos de seção reta de pilares e vigas idênticos com o seu análogo elaborado para a estrutura padrão.

Figura 96 – Comparação entre gráficos gerados com inversões de parâmetros geométricos em relação à estrutura padrão, com alguns valores destacados evidenciando as diferenças



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 97 – Comparação entre gráficos gerados com inversões de parâmetros geométricos em relação à estrutura padrão, com alguns valores destacados evidenciando as diferenças



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A rigidez horizontal de pórticos é mais sensível às variações nos comprimentos das peças estruturais do que à área da seção bruta e o momento de inércia. O momento de inércia das peças é bastante significativo no valor da rigidez, porém, em pórticos de muitos pavimentos, a área de seção bruta das peças passa a ser mais significativa, quanto maior o número de pavimentos, mas significativa a área de seção bruta é.

Evidentemente estruturas aporricadas são analisadas levando-se em conta diversos esforços, sob uma gama bastante grande de combinações. Em função disso, algum projetista que se depare com entraves no que diz respeito ao centro elástico em posição desfavorável, grandes torções ou algo do tipo, não poderá mudar completamente a estrutura para que ela tenha resultados, por assim dizer “perfeitos”, mas o entendimento de o quê influencia mais é bastante válido. É interessante que, no que diz respeito às cargas verticais, a área da seção reta das peças é uma das variáveis mais importantes, talvez a mais importante; no que diz respeito ao carregamento horizontal, ela não é tão relevante, uma vez a sua variação impacta muito pouco.

REFERÊNCIAS

BELLEI, I. H; PINHO, F, O; PINHO, M, O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo, Pini, 2008

ELLWANGER, R. J. A construção do conhecimento em análise de estruturas de edifícios. **Revista de Ensino de Engenharia**, 2005 Disponível em:
<<http://www.abenge.org.br/revista/index.php/abenge/article/view/21>

LEITE, M. **SCILAB**: uma abordagem prática e didática. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

RAMALHO, M. A; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1. ed. São Paulo, Pini, c 2003

SCHUELLER, W. **High-Rise Building Structures**. 2. ed. New York: Krieger, 1986.

SORIANO, H. L. **Análise de estruturas: formulação matricial e implementação computacional**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto: volume II**. 2. ed. Porto Alegre – Rio de Janeiro, Globo, 1985

TARANATH, B. S. **Structural Analysis and Design of Tall Buildings: steel and composite construction**. Boca Raton, USA: CRC, c2012.