



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAMPUS ALEGRETE

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO MARIOTTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONSUMO DE MATERIAIS
PARA DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso

Alegrete

2012

EDUARDO MARIOTTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONSUMO DE MATERIAIS
PARA DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte das atividades para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil na
Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Mr. André Lübeck

Co-orientador: Prof. Dr. Gihad Mohamad

Alegrete

2012

EDUARDO MARIOTTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONSUMO DE MATERIAIS
PARA DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte das atividades para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil na
Universidade Federal do Pampa.

Trabalho apresentado e aprovado em: 5 de Outubro de 2012.

Banca examinadora:

Prof. Mr. André Lübeck

Orientador

Engenharia Civil – UNIPAMPA

Prof. Dr. Gihad Mohamad

Co-orientador

Engenharia Civil – UFSM

Prof. Dr. José Mário Doleys Soares

Engenharia Civil – UFSM

RESUMO

Neste trabalho, realiza-se um estudo comparativo entre o consumo de materiais para diferentes sistemas estruturais em concreto armado. São analisados 17 pavimentos de um mesmo edifício, variando-se em cada um deles o sistema estrutural utilizado. Cada sistema foi lançado buscando seu melhor arranjo, visando um lançamento que possa aperfeiçoá-los em termos de consumo de material aço, concreto e fôrmas, respeitando ao mesmo tempo suas características. Em relação ao consumo de aço e concreto, o sistema mais econômico foi o com laje pré-fabricada tipo trilho, após o com laje pré-fabricada tipo treliça, e em seguida o com laje maciça. O sistema que apresentou o maior consumo de aço e concreto foi o sistema com laje nervurada com vigas de bordo e capitéis no interior, mas por outro lado esse sistema tem uma liberdade arquitetônica maior. Em relação ao consumo de fôrmas de madeira o mais econômico foi o sistema com laje nervurada, após o com laje pré-fabricada tipo trilho, em seguida o tipo treliça. O sistema com laje maciça apresentou o maior consumo de fôrmas em madeira.

Palavras-chave: Edificações, Consumo de Material, Estruturas de Concreto Armado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação de uma estrutura com laje maciça.....	22
Figura 2: Representação de uma estrutura com laje nervurada.	24
Figura 3: Representação de uma estrutura com laje nervurada lisa com capitéis.	25
Figura 4: Representação de uma estrutura com laje nervurada que utiliza fôrmas de polipropileno.....	26
Figura 5: Vigota tipo treliça.	29
Figura 6: Corte esquemático de uma laje com vigotas do tipo treliça.....	29
Figura 7: Vigota tipo trilho.....	30
Figura 8: Corte esquemático de uma laje com vigotas do tipo trilho.....	30
Figura 9: Bloco de EPS para laje unidirecional.....	31
Figura 10: Edifício Exemplo	34
Figura 11: Fôrma do Sistema com Laje Maciça.....	37
Figura 12: 3D do Sistema Estrutural com Laje Maciça.....	38
Figura 13: Fôrma do Sistema com Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho	39
Figura 14: : Fôrma do Sistema com Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça	40
Figura 15: Fôrma do Sistema com Laje Nervurada com vigas de bordo e capitéis.	41
Figura 16: 3D do Sistema Estrutural com laje nervurada.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise Estatística Linear - Laje Maciça.....	43
Tabela 2: Resumo de Materiais - Laje Maciça.....	43
Tabela 3: Análise Estatística Linear – Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho.....	44
Tabela 4: Resumo de Materiais – Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho.....	44
Tabela 5: Análise Estatística Linear – Laje Pré- Fabricada Tipo Treliça.....	44
Tabela 6: Resumo de Materiais – Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça.....	45
Tabela 7: Análise Estatística Linear – Laje Nervurada.....	45
Tabela 8: Resumo de Materiais – Laje Nervurada.....	45
Tabela 9: Cargas Verticais nas Fundações.....	46
Tabela 10: Deslocamentos Horizontais e Coeficientes Gama - Z.....	47
Tabela 11: Consumo de Aço + 10%.....	48
Tabela 12: Consumo de Concreto.....	50
Tabela 13: Consumo de Área de Fôrmas (m ²).....	54
Tabela 14: Resumo do Consumo Total dos Materiais.....	57
Tabela 15: Resumo do Consumo Total dos Materiais em Valores Unitários.....	57
Tabela 16: Índices de Consumo de Material.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	11
2	SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS	12
2.1	DIMENSIONAMENTO	12
3	PROJETO ESTRUTURAL	14
3.1	ECONOMIA	15
3.2	ETAPAS DO PROJETO ESTRUTURAL	16
3.2.1	Parâmetros de instabilidade.....	17
3.2.2	Índices de consumo de materiais.....	20
3.2.3	Recomendações para a Modelagem da Estrutura.....	20
4	SISTEMAS ESTRUTURAIS.....	22
4.1	SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE MACIÇA.....	22
4.1.1	Vantagens	23
4.1.2	Desvantagens.....	23
4.1.3	Processo Construtivo de Estrutura com Laje Maciça.....	23
4.2	SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE NERVURADA	24
4.2.1	Capitéis.....	25
4.2.2	Fôrmas de Polipropileno (formas plásticas ou cubetas).....	25
4.2.3	Vantagens	26
4.2.4	Desvantagens.....	26
4.2.5	Processo construtivo de estrutura com laje nervurada	27
4.3	SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE PRÉ-FABRICADA	27
4.3.1	Vigota tipo treliça (VT).....	28
4.3.2	Vigota Tipo Trilho (VC)	29
4.3.3	Materiais empregados	30
4.3.4	Vantagens	31
4.3.5	Desvantagens.....	32
4.3.6	Processo Construtivo de Estrutura com Lajes Pré-Fabricadas.....	32
5	METODOLOGIA.....	33
5.1	APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO EXEMPLO	33
5.2	AÇÕES CONSIDERADAS	34
5.3	PARÂMETROS ADOTADOS NO LANÇAMENTO DOS SISTEMAS	35

5.4	Sistemas Estruturais Analisados	36
5.4.1	Sistema Estrutural com Laje Maciça.....	37
5.4.2	Sistema Estrutural com Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho	38
5.4.3	Sistema Estrutural com Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça	39
5.4.4	Sistema Estrutural com Laje Nervurada.....	40
6	RESULTADOS	43
6.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	43
6.1.1	Sistema Estrutural com Laje Maciça.....	43
6.1.2	Sistema Estrutural com Laje Pré-fabricada Tipo Trilho	44
6.1.3	Sistema Estrutural com Laje Pré-fabricada Tipo Treliça	44
6.1.4	Sistema Estrutural com Laje Nervurada.....	45
6.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	45
6.2.1	Cargas Verticais na Fundação	46
6.2.2	Deslocamentos Horizontais e Coeficiente GamaZ.....	47
6.2.3	Consumo de Aço	47
6.2.4	Consumo de Concreto	50
6.2.5	Consumo de Fôrmas.....	53
6.2.6	Consumo Total dos Materiais	56
6.2.7	Índices de Consumo de Materiais	57
7	CONCLUSÃO	61
8	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia a construção civil está em alta, mesmo com a crise mundial que em 2008 derrubou as bolsas de valores no mundo todo. Em 2009 deu sinais de melhora desenhando um cenário de crescimento do mercado imobiliário no país. Pelo motivo do Brasil estar com um déficit habitacional muito grande, 5,5 milhões de moradias conforme dados da Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios (Pnad) de 2008, utilizada pelo Ministério das Cidades, é que o governo vem ano após ano investindo em habitações e facilitando o financiamento para solucionar esse problema, mantendo a construção civil em ritmo acelerado, impulsionada ainda mais pela copa do mundo de 2014 e por obras de infraestrutura, tão necessárias ao crescimento do país.

Há algumas décadas atrás, o engenheiro calculista de estruturas não poderia se dar o luxo de analisar um edifício fazendo seu lançamento estrutural de diferentes formas e utilizando diferentes sistemas, pois os cálculos eram feitos muitas vezes a mão, ou em ferramentas rudimentares de cálculo. Assim, cada alternativa demandava um período longo de cálculo e detalhamento. O engenheiro, então, buscava dispor seu tempo de maneira mais objetiva, analisando apenas uma ou outra alternativa para calcular e detalhar a estrutura.

Conforme Covas e Silva (apud SILVA, 2002) até a década de 70 os engenheiros utilizavam réguas de cálculo e diversas tabelas como ferramentas de trabalho, já na década de 80, tornou-se mais difundido o cálculo das lajes pelo método das linhas de ruptura, este método trazia alguns benefícios como gerar momentos negativos menores, acarretando lajes mais esbeltas. Na década de 90, os programas computacionais já se apresentavam mais desenvolvidos, disponibilizando cálculos de esforço solicitantes e o detalhamento de vigas, lajes, pilares e fundações. Além disso tornando-se possível a geração automatizada de modelos tridimensionais das estruturas, permitindo a análise das estabilidades global e a obtenção mais realista de esforços atuantes devido às ações horizontais. Atualmente, o uso de concretos de maiores resistências tem se difundido, variando em torno de 25 a 50 Mpa, contribuindo ainda mais para a diminuição da seção transversal dos elementos.

Uma enorme variedade de sistemas estruturais para pavimentos estão difundidos no mercado nacional atualmente, tais como, lajes pré-moldadas, treliçadas, nervuradas, lisas, cogumelo, protendidas e maciças. Estes estão a disposição do engenheiro estrutural, para que ele possa escolher a melhor solução para cada caso em específico, podendo esse, ainda, variar também o valor do f_{ck} e outros parâmetros dos materiais. Com determinados tipos de lajes pode-se abrir mão do vigamento transmitindo diretamente aos pilares o carregamento do

pavimento, ou com as lajes pré-fabricadas e nervuradas aumentar significativamente o vão em relação à maciça, ou até mesmo retirar os pilares internos com o uso de lajes protendidas.

As construtoras atualmente vêm buscando novas técnicas construtivas que propiciem atenuar as perdas e reduzir os custos das obras. Se tratando de lajes, essa economia pode ser muito significativa, pois a redução nos materiais se repete a cada pavimento (FARIA, 2010). Com projetos de qualidade, há uma evolução do processo de construção, e entre os projetos para a construção civil destaca-se o estrutural, pois este responde pela etapa de maior representatividade no custo total da construção, de 15% a 20% do custo total. Sendo assim, a escolha adequada do sistema estrutural a ser adotado é um requisito fundamental no projeto, pois uma redução de 10% no custo da estrutura pode representar uma diminuição de 2% no custo total da edificação (COSTA, 1997, apud ALBUQUERQUE, 1999). Por estes motivos, vem a ser de grande importância um estudo buscando a racionalização se tratando dos materiais: concreto, aço e formas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido ao avanço da tecnologia, o engenheiro de estruturas tem poupado seu precioso tempo ao usar softwares de cálculos e detalhamento. Desta forma, tem direcionado melhor seu tempo para a escolha da melhor alternativa de sistema estrutural a ser utilizada no projeto em desenvolvimento, observando suas peculiaridades e optando pelos melhores elementos estruturais em cada caso em específico.

Nota-se que há vários estudos referentes aos diferentes sistemas estruturais em concreto armado, como por exemplo, Flório (2004), e também alguns se tratando da comparação entre esses sistemas estruturais, Faria (2010) e Spohr (2008). No entanto, percebe-se a falta de estudos comparativos se tratando apenas de consumo de material (aço, concreto e fôrmas), nos sistemas estruturais mais utilizados atualmente.

Os sistemas estruturais mais utilizados pelas construtoras, por serem mais acessíveis, econômicos e disponíveis no cenário nacional são: sistema estrutural com laje maciça, com laje pré-fabricada de vigotas tipo trilho e de vigotas treliçadas, e com laje nervurada com capitéis e vigas de borda.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal buscar a racionalização estrutural e avaliar os quantitativos dos materiais aço, concreto e fôrmas, a partir de diferentes sistemas estruturais para edificações de grande altura.

Detalhando o objetivo principal do projeto, a lista a seguir complementa, com objetivos específicos, as metas do trabalho:

- Apresentar os sistemas estruturais utilizados normalmente em edificações no Brasil;
- Realizar uma revisão bibliográfica, descrevendo as características, vantagens e desvantagens das opções de lançamento estrutural adotadas;
- Lançar em um software de cálculo comercial os diferentes sistemas estruturais analisados, levando em consideração as diferentes características entre eles;
- Analisar via software as cargas verticais, os deslocamentos horizontais, o coeficiente gamaZ e a análise de segunda ordem de cada sistema estrutural adotado;
- Com os relatórios gerados pelo software de análise estrutural, comparar o consumo de material aço, concreto e formas e os índices espessura média, taxas de aço e taxa de fôrma, para os diferentes sistemas estruturais.

2 SISTEMAS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Para elaboração de um projeto estrutural de qualidade, deve-se primeiramente conhecer os elementos estruturais que fazem parte da estrutura. Uma estrutura de concreto armado consiste de uma série de “elementos” individuais que interagem para resistir às cargas impostas à estrutura (MACGREGOR, 1988 apud DUMÊT, 2008). O modo como são arrançados pode ser chamado de sistema estrutural.

Os principais elementos utilizados nas estruturas de concreto armado podem ser divididos em três tipos (DUMÊT, 2008):

- **Elementos lineares (1D):** vigas e pilares (elementos de barra);
- **Elementos laminares ou de superfície (2D):** lajes (elementos de placa), vigas-parede (elementos de chapa) e cascas;
- **Elementos de bloco ou volumétricos (3D):** blocos de fundação, sapatas flexíveis e consolo.

Na maioria das vezes estes elementos são considerados separadamente no cálculo, mas a interação entre eles deve ser verificada através de uma análise global da estrutura. Geralmente, a interpretação e a análise do comportamento real de uma estrutura são complexas e difíceis, e nem sempre possíveis (CARVALHO, 2004; DUMÊT, 2008).

Desta forma, a utilização dos programas sofisticados de cálculo estrutural permite este estudo global. Uma estrutura em concreto armado pode ser discretizada de diversas maneiras, entre elas: a laje de concreto suporta seu peso, os revestimentos e mais a carga acidental (água da chuva, pessoas etc.); as vigas recebem os esforços da laje (placa de concreto) e os transmitem, com seu próprio peso (mais peso de parede, se houver), para os pilares; estes recebem todas as cargas e as transmitem, também com seu peso, para as fundações (blocos e estacas). Pode-se então observar que para determinar o esforço que a fundação transmite ao solo, deve-se efetuar o cálculo na seguinte sequência: lajes, vigas, pilares (superestrutura) e fundações (infra-estrutura); nota-se que o cálculo é efetuado na sequência inversa da construção (CARVALHO, 2004).

2.1 DIMENSIONAMENTO

O item 14.2.1 da NBR 6118:2003, diz que o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura, com a finalidade de efetuar verificações de estados-

limites últimos e de serviço, permitindo estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos em uma parte ou em toda a estrutura.

Especificamente, o dimensionamento de uma estrutura consiste em comprovar que uma seção previamente conhecida é capaz de resistir às solicitações mais desfavoráveis que possam atuar, ou, dimensionar uma seção ainda não definida completamente, a fim de que suporte as solicitações máximas a que possa estar sujeita (CARVALHO, 2004).

Os métodos de cálculo das estruturas de concreto armado podem ser classificados em dois grupos: os métodos clássicos e os métodos de cálculo na ruptura (CARVALHO, 2004).

Métodos clássicos: são métodos determinísticos, nos quais se consideram fixos e não aleatórios os distintos valores numéricos que servem de partida para o cálculo (resistência dos materiais, valores das cargas etc). Nesses métodos são determinadas as solicitações (M, N e V), correspondentes às cargas máximas de serviço; calculam-se as tensões máximas correspondentes a essas solicitações supondo um comportamento completamente elástico dos materiais, e, dessa forma, a segurança da estrutura é garantida.

Método de cálculo na ruptura (ou estados-limites): garante-se a segurança fazendo com que as solicitações correspondentes às cargas majoradas sejam menores que as solicitações últimas, sendo estas as que levariam a estrutura à ruptura, se os materiais tivessem suas resistências reais (resistência características) minoradas por coeficientes de ponderação das resistências (resistências de cálculo).

Sales et al (1993) apud Dumêt (2008) consideram que a segurança de uma estrutura é a capacidade que ela apresenta de suportar as diversas ações que vierem a solicitá-la durante a sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite.

A NBR 6118 (2003) estabelece em seu item 12.5 que na verificação da segurança de estruturas de concreto devem ser atendidas as condições construtivas e as condições analíticas de segurança, ou seja, admite-se que a estrutura seja segura quando as solicitações de cálculo forem, no máximo, iguais aos valores que podem ser suportados pela estrutura no estado-limite considerado.

3 PROJETO ESTRUTURAL

Entre os critérios de um projeto estrutural é de grande importância a interação entre os projetos arquitetônico, estrutural, de instalações elétricas e hidráulicas, impermeabilização entre outros, tendo a construção que atender os requisitos básicos de funcionalidade, durabilidade e estética. O projeto estrutural deve ser claro, mostrando perfeitamente como a estrutura funciona, para que seja possível validar os resultados obtidos, qualquer que seja o processo de cálculo utilizado (SPOHR, 2008).

Conforme descrito por Spohr (2008), a concepção estrutural deverá considerar os seguintes itens:

- a) Limitações impostas pelo projeto arquitetônico;
- b) Adequação do sistema estrutural escolhido para cada pavimento;
- c) Análise da interface entre a estrutura e os projetos de instalações hidráulicas, elétricas, ar condicionado, etc;
- d) Adequação da interface da vedação interna e externa com a estrutura;
- e) Construtibilidade (facilidade de execução).

Começa-se o lançamento da estrutura de um edifício de vários andares pelo pavimento-tipo, fixando-se a posição das vigas e dos pilares neste pavimento, sendo este normalmente repetido várias vezes em um edifício de vários andares. Em seguida, verifica-se se a posição dos pilares pode ser mantida nos outros pavimentos. De preferência a estrutura dos demais pavimentos deve obedecer a uma projeção das lajes e vigas, podendo ser diferentes desde que conservem a posição dos pilares. Se a posição não puder ser mantida para os demais pavimentos, deve-se estudar novas posições que possam ser adequadas às plantas arquitetônicas, de modo, a não haver pilares não coincidentes com as paredes e que esses fiquem aparecendo nos compartimentos, ou atravessando portas e janelas. Para o andar térreo, deve-se buscar uma solução estética, enquanto que para a garagem é necessário verificar se os pilares projetados não prejudicam o trânsito e o estacionamento dos veículos (SPOHR, 2008).

3.1 ECONOMIA

Segundo Silva (2002), um dos fatores que se deve levar em consideração na hora de conceber uma estrutura, é o custo. Fator este que muitas vezes determina o sistema em que será lançada a estrutura.

Em um projeto estrutural, deve-se preocupar principalmente com dois requisitos em paralelo: com a eficiência das funções que o projeto se destina a desempenhar e o máximo de economia. Segundo Dumêt (2008), os requisitos se resumem em:

- a) Análise dos materiais;
- b) Análise das tecnologias possíveis de serem utilizadas;
- c) Comparação de custos de matéria-prima, distâncias de transporte, consumo de material e mão-de-obra, tempo de execução, etc.;
- d) Otimização do sistema estrutural: equilíbrio entre consumo de material e mão-de-obra.

Costa (apud ALBUQUERQUE, 1999, p.1), diz que:

“a evolução do processo construtivo começa pela qualidade dos projetos, e entre os projetos elaborados para a construção civil, destaca-se o estrutural. O projeto estrutural, individualmente, responde pela etapa de maior representatividade do custo total da construção (15% a 20% do custo total). Justifica-se então um estudo prévio para escolha do sistema estrutural a ser adotado, pois se sabe que uma redução de 10% no custo da estrutura pode representar, no custo total, uma diminuição de 2%. Em termos práticos, 2% do custo total corresponde à execução de toda etapa de pintura ou a todos os serviços de movimento de terra, soleiras, rodapés, peitoris e cobertura juntos.”

No entanto, os fatores que mais influenciam no custo da estrutura de uma edificação são o volume de concreto, o peso de aço e a área de fôrmas, sendo então, estes materiais os fatores mais importantes se tratando de uma análise em busca da economia estrutural de uma edificação.

A padronização é um requisito básico para que se obtenham menores custos, alta produtividade e melhor qualidade na construção civil. A padronização das fôrmas representam em média 30% do custo da estrutura, e gera grande produtividade, diminuindo mão-de-obra e tempo de execução, além de possibilitar um maior reaproveitamento das mesmas (SILVA, 2002). Segundo Albuquerque (1999), as variações nas dimensões do pilar nos diversos pavimentos dificultam a fôrma, podendo às vezes ocasionar em um aumento no consumo de aço. Portanto, para um projeto estrutural ser econômico é necessário também uma padronização do método construtivo, evitando ao máximo o desperdício de insumos.

3.2 ETAPAS DO PROJETO ESTRUTURAL

É de grande importância uma sistematização na hora da elaboração do projeto estrutural, para que seja possível desenvolvê-lo passo-a-passo em uma ordem que facilite a modelagem da estrutura e economize tempo do engenheiro de estruturas. Além disso, tem a importância de se obedecer a regras de padronização das dimensões dos elementos estruturais (vigas, pilares e lajes), para evitar descontinuidades e facilitar a montagem das fôrmas. E também há a necessidade de fixar parâmetros que sirvam para fazer comparações entre os sistemas estruturais.

As dificuldades na hora da concepção estrutural são várias, mas segundo Corrêa (1991), o problema tem como característica fundamental a complexidade, por causa do número de variáveis presentes e da multiplicidade de soluções possíveis.

Na elaboração de um edifício, tudo parte do projeto arquitetônico, e a etapa do projeto estrutural para efetuar o lançamento da estrutura em cada pavimento, e é essencial para que a obra seja finalizada conforme foi planejada. Este processo é constituído por: planta de localização, planta de situação, planta baixa, cortes, fachadas e detalhes arquitetônicos.

No projeto estrutural serão analisadas várias soluções estruturais por uma equipe multidisciplinar para adotar a melhor entre elas. Nesta sistematização de elaboração do edifício, o arquiteto apresenta as restrições para manter a funcionalidade e a estética do seu projeto, o engenheiro de instalações posiciona toda a tubulação necessária, o construtor indica os recursos técnicos disponíveis e o incorporador estabelece a viabilidade econômica do empreendimento. Todos estes diversos fatores irão balizar o projetista estrutural na elaboração de seu respectivo projeto. Esta fase é de grande importância, e se chama compatibilização de projetos (DUMÊT, 2008; ALBUQUERQUE, 1999).

Se houver uma interação entre os diferentes projetistas, a chance de o projeto final encaixar é maior. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE):

“algumas reuniões entre o arquiteto e o engenheiro calculista trazem benefícios imensos, pois é através dessa interação que algumas dificuldades, normalmente encontradas entre a arquitetura e a estrutura, podem ser rapidamente solucionadas, gerando economia e ótimos resultados para toda a construção.”

A funcionalidade da estrutura dependerá da forma que ela for elaborada, da quantidade e das dimensões dos elementos estruturais, tais como pilares e vigas. Sendo assim, a estrutura

segue alguns critérios. Normalmente, inicia-se pela locação dos pilares no pavimento-tipo, que segue a seguinte ordem: pilares de canto, pilares nas áreas comuns a todos os pavimentos (região da escada e dos elevadores), pilares de extremidade (situados no contorno do pavimento) e finalmente pilares internos (ALBUQUERQUE, 1999, p. 9).

Depois de realizar o carregamento da estrutura, vem o pré-dimensionamento dos elementos estruturais principais, que são eles: as lajes, vigas e pilares (DUMÊT, 2008; ALBUQUERQUE, 1999).

- **Lajes:** Uma vez que elas só serão dimensionadas para os carregamentos conhecidos (cargas verticais), deve-se calculá-las de início.
- **Vigas:** A fim de obterem-se seções iniciais de cálculo, pode-se também fazer um pré-dimensionamento para as vigas. Nas vigas que se sabe que vão observar maiores esforços do vento, deve-se procurar deixar certa folga entre elas. É importante lembrar que a situação ideal de projeto é o domínio 3.
- **Pilares:** Para o pré-dimensionamento de pilares, um dos procedimentos mais comuns é o Método das Áreas de Influência, que consiste em dividir o pavimento em áreas que serão apoiadas pelos pilares. Neste caso, também deve-se deixar uma reserva para os esforços do vento, uma vez que os edifícios de altura elevada os esforços de vento são bastante significativos.

3.2.1 Parâmetros de instabilidade

Após concluir o pré-dimensionamento, é feita a verificação dos parâmetros de instabilidade, processando-se o pórtico espacial e calculando-se os parâmetros “gamaZ” e “alfa”. Se os valores não forem aceitáveis, retorna-se para o processo anterior de concepção e pré-dimensionamento, aumentando a rigidez do edifício. Para isso, pode-se refazer o posicionamento dos pilares ou aumentar as dimensões das vigas e dos pilares que formam os pórticos, e se não for suficiente pode-se então inserir núcleos rígidos ou pilares-parede (ALBUQUERQUE, 1999).

Antes de serem incluídos núcleos rígidos ou pilares-parede como solução mais rápida, deve-se fazer um estudo das demais alternativas, pois isso geralmente tende a levar a um maior consumo de concreto e de aço, além de dificuldades de execução adicionais (PRADO, 1995).

Para garantir o conforto e segurança para o usuário da edificação as estruturas devem ser projetadas atendendo aos requisitos básicos estabelecidos em norma. Sendo assim, o projeto deve assegurar o total equilíbrio da estrutura fazendo com que esta resista a ações tanto verticais quanto horizontais, sem sofrer rupturas, deformações ou deslocamento excessivos (GIONGO, 2007).

Os contraventamentos são peças que suportam os esforços horizontais, entre esses esforços os mais influentes são os causados pelo vento. Pode-se citar como exemplo de contraventamento em estruturas de concreto armado: pilares, pilares-parede e pórticos. Os pórticos são estruturas formadas pela união entre vigas e pilares, conectados de modo a permitir a interação de forças e momentos (CORRÊA, 1991).

A estrutura de contraventamento é analisada como um pórtico espacial, as lajes são consideradas como diafragmas rígidos e a rigidez de torção de vigas e pilares serão desprezadas, estando assim de acordo com a NBR 6118 (2003).

“A laje de um pavimento poderá ser considerada como uma chapa totalmente rígida em seu plano, desde que não apresente grandes aberturas e cujo lado maior do retângulo circunscrito ao pavimento em planta não supere em três vezes o lado menor. A rigidez de torção de vigas e pilares em geral pode ser desprezada ao se analisar a estrutura de contraventamento submetida a ações horizontais.” (NBR 6118, 2003)

Na prática costuma-se conceber estruturas que não precisam considerar os esforços de segunda ordem. Para isso a estrutura deve ser classificada como de nós fixos, (ALBUQUERQUE, 1999). Segundo a NBR 6118 (2003):

“as estruturas são consideradas, para efeito de cálculo, como de nós fixos, quando os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e, por decorrência, os efeitos globais de 2ª ordem são desprezíveis (inferiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem). Nessas estruturas, basta considerar os efeitos locais e localizados de 2ª ordem.”

Usualmente, são utilizados dois índices aproximados para classificar as estruturas de edifícios como sendo de nós fixos ou de nós móveis. Um deles é parâmetro de instabilidade α e o outro é o coeficiente γ_z . Tratando-se do parâmetro α , classifica-se uma estrutura como de nós fixos se:

$$\alpha = H_{tot} * \sqrt{\left(\frac{Nk}{EcIc}\right)} \leq \alpha_1$$

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1 * n \rightarrow n \leq 3$$

$$\alpha_1 = 0,6 \rightarrow n \geq 4$$

- **n:** número de andares;
- **Htot:** altura total da estrutura;
- **Nk:** somatório de todas as forças verticais;
- **EcIc:** módulo de rigidez equivalente

Deve-se contar com toda a estrutura de contraventamento do edifício na determinação do módulo de rigidez. O conjunto de elementos estruturais (pórticos e pilares) uma vez que estes apresentam uma elevada rigidez, ajudando absorver a maior parte das ações horizontais (GIONGO, 2007).

Conforme Giongo (2007), o coeficiente γ_z também é utilizado para avaliar a sensibilidade da estrutura de um edifício aos efeitos da não-linearidade geométrica, estimando a magnitude dos esforços de 2^a ordem em relação aos esforços de 1^a ordem.

O coeficiente γ_z classifica uma estrutura como de nós fixos se:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \leq 1,1$$

- $\Delta M_{tot,d}$: soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais dos respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1^a ordem;
- $M_{1,tot,d}$: momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura.

Tratando-se de estabilidade da estrutura, conforme o tipo de laje, vai se ter o comportamento das ações nas estruturas, por exemplo, a laje maciça distribui melhor os carregamento e torna a estrutura mais rígida, mas por outro lado vence vão pequenos, já a laje nervurada, vence grandes vão, mas torna a estrutura menos rígida, e a distribuição das cargas não é feita de maneira eficiente como as lajes maciças (CARVALHO, 2012).

Com as envoltórias obtidas, será detalhada as vigas e os pilares. Se algumas dimensões de viga ou pilar não satisfazem as solicitações, volta-se para o pré-dimensionamento e continua-se o processo de cálculo.

3.2.2 Índices de consumo de materiais

Conforme diz Albuquerque (1999), como parâmetros de avaliação de uma estrutura pode-se utilizar os quantitativos: volume de concreto, peso de aço e área de fôrmas; e os índices: espessura média, taxa de aço I, taxa de aço II e taxa de fôrma. Tais quantitativos serão descritos a seguir.

- **Espessura média**

É a relação entre o consumo total de concreto e a área estrutural (somatório das áreas das plantas de forma) do edifício.

$$\text{Espessura média} = \frac{V(m^3)}{A(m^2)}$$

- **Taxa de aço I**

É a relação entre o consumo total de aço e o consumo total de concreto.

$$\text{Taxa de aço} = \frac{P(Kg)}{V(m^3)}$$

- **Taxa de aço II**

É a relação entre o consumo total de aço e a área estrutural do edifício.

$$\text{Taxa de aço II} = \frac{P(Kg)}{A(m^2)}$$

- **Taxa de fôrma**

É a relação entre o consumo total de fôrma e a área estrutural do edifício.

$$\text{Taxa de forma} = \frac{F(m^2)}{A(m^2)}$$

3.2.3 Recomendações para a Modelagem da Estrutura

A padronização das fôrmas é muito importante para a economia das mesmas em uma edificação, por esse motivo é cada vez mais comum os projetistas de estruturas se preocuparem com esse parâmetro. Portanto vem sendo elaborado critérios para padronizar as

dimensões dos elementos estruturais dentro de uma construção com o intuito de otimizar o consumo de fôrmas.

Segundo a construtora ENCOL apud Santos (2011), pode-se classificar como bom o uso de duas espessuras por pavimentos, ótimo o uso de apenas uma espessura e mais de duas espessuras considera-se desaconselhado.

Para vigas, a NBR 6118 (2003), adota como largura mínima 12 cm, e em casos especiais de concretagem admite-se 10 cm. Se necessário, aumenta-se a largura em múltiplos de 5cm. Uma altura aconselhável é de 60 cm, pois não interfere na arquitetura e resiste consideravelmente bem aos esforços, e, se necessário, também se aumenta em múltiplos de 5cm.

Conforme a ENCOL apud Santos (2011), um número de duas seções de vigas por pavimento seria considerado ótimo, três seria bom e mais que 3 desaconselhado.

Conforme NBR 6118 (2003), a seção transversal de pilares, qualquer que seja a sua forma, não deve apresentar dimensão menor que 19 cm. Em casos especiais, permite-se considerar dimensões entre 19 cm e 12 cm, desde que se multipliquem as ações a ser consideradas no dimensionamento por um coeficiente adicional γ_n . Sempre que possível é bom manter a menor dimensão do pilar igual a espessura da parede, para que o mesmo não fique saliente e atrapalhe o uso do compartimento. Para melhor utilização das fôrmas é aconselhável variar o mínimo possível a dimensão dos pilares ao longo dos pavimentos, para que possa ser aproveitada a mesma fôrma no mínimo 5 vezes. Além disso, devem-se evitar pilares com seções diferentes da retangular ou quadrada, porque suas fôrmas são de difícil execução, e resultam em um grande desperdício de material na sua confecção.

4 SISTEMAS ESTRUTURAIS

Existem várias opções de sistemas estruturais para edifícios. Neste capítulo é descrito alguns conceitos e características dos sistemas que serão utilizados neste trabalho.

4.1 SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE MACIÇA

As lajes maciças não são adequadas para vencer grandes vãos, recomenda-se como prática usual adotar-se como vão médio econômico valores entre 3,5 e 5m (SPOHR, 2008).

De acordo com Araújo (2003, p.2):

“São placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou por alvenarias, sendo este tipo de laje predominante nos edifícios residenciais onde os vãos são relativamente pequenos.”

As lajes maciças exigem um grande volume de concreto, levando assim a um maior peso-próprio, o que gera um aumento nas dimensões dos outros elementos estruturais, e com isso aumenta os custos da edificação. Além disso, ela necessita de um grande número de escoras e fôrmas, gerando um custo adicional (CARVALHO, 2012). No entanto, permitem as mais variadas espessuras e formas o que torna seu uso prático.

Na Figura 1, esta representada uma laje maciça.

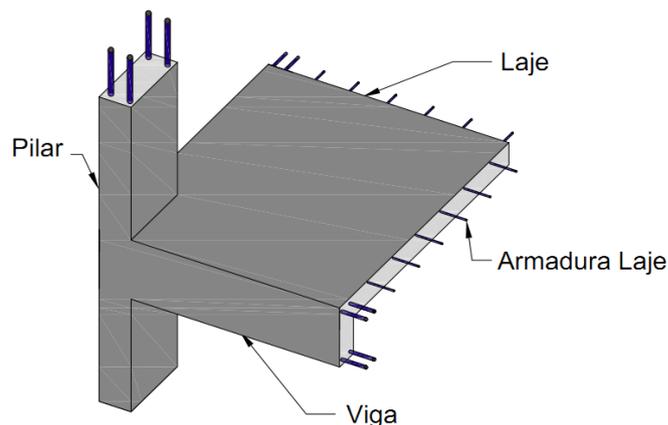


Figura 1: Representação de uma estrutura com laje maciça.

Fonte: Spohr (2008, p. 30).

Segundo a NBR 6118 (2003), as lajes maciças devem respeitar os seguintes limites mínimos para espessura:

- a) 5 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- b) 7 cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;

- c) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- d) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.

De acordo com Vizotto e Sartoti (2010), as principais vantagens e desvantagens do uso de lajes maciças são:

4.1.1 Vantagens

- Oferece funções de placa e membrana;
- Pode ser considerada uni ou bidirecional;
- Bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços;
- Apropriada a situações de singularidade estrutural (ex: Um, dois ou três bordos livres).

4.1.2 Desvantagens

- Elevado consumo de fôrmas, escoras, concreto e aço;
- Elevado peso próprio implicando em maiores reações nos apoios (vigas, pilares e fundações);
- Elevado consumo de mão-de-obra referentes às atividades dos profissionais carpinteiro, armador, pedreiro e servente;
- Grande capacidade de propagação de ruídos entre pavimentos;
- Limitação quanto a sua aplicação a grandes vãos por conta da demanda de espessura média de concreto exigida para esta situação;
- Posicionamento de armaduras por meio de espaçadores;
- Custo relativamente elevado.

4.1.3 Processo Construtivo de Estrutura com Laje Maciça

Têm-se os seguintes passos para a execução de uma estrutura com laje maciça:

- Montagem das fôrmas e armaduras dos pilares;
- Concretagem dos pilares;
- Montagem das fôrmas de vigas e lajes;
- Montagem da armadura de vigas e lajes;
- Concretagem de vigas e lajes;

- Desfôrma.

4.2 SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE NERVURADA

As lajes nervuradas são mais utilizadas para vencerem vãos maiores pois alcança-se uma elevada rigidez sem grandes acréscimos de peso-próprio. Em função da necessidade do uso de formas plásticas (cubetas) ou elementos de enchimento, o uso de vigas ligando os pilares pode tornar-se uma dificuldade, assim, pode-se optar por usar lajes sem vigas, apenas com capitéis.

De acordo com Pinheiro e Razent (2003), as lajes nervuradas podem ser moldadas no local, onde todas as etapas de execução são realizadas *in loco*, sendo necessário o uso de fôrmas, escoramentos e material de enchimento.

A laje nervurada é uma solução cada vez mais empregada para reduzir o peso próprio da estrutura quando se trata de vão grandes de lajes, isso porque elas necessitam de menos massa de concreto que as lajes maciças para vencer um mesmo vão, pois as nervuras dão altura mas os vazios garantem o baixo peso, (ARAÚJO, 2003). Devido a evoluções arquitetônicas, que forçaram o aumento dos vãos, e o alto custo das fôrmas, as lajes nervuradas tornaram-se uma das alternativas mais empregadas, (PINHEIRO e RAZENT, 2003).

Pode-se ver um exemplo de laje nervurada na Figura 2.



Figura 2: Representação de uma estrutura com laje nervurada.

Fonte: ALBUQUERQUE (1999, p. 34).

4.2.1 Capitéis

Os capitéis são os elementos estruturais que transferem as cargas da laje diretamente para os pilares, nada mais que um maciço de concreto armado localizado na região da laje que fica perto do pilar, quando esse maciço é da mesma espessura da laje, o sistema se chama laje lisa, quando a espessura é maior que a da laje é chamado de laje cogumelo.

Conforme a NBR 6118/03, item 14.7.8, “Lajes cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são as apoiadas nos pilares sem capitéis”.

Na Figura 3 abaixo se pode observar um exemplo de laje nervurada que utiliza capitéis.



Figura 3: Representação de uma estrutura com laje nervurada lisa com capitéis.

Fonte: catálogo ATEX, apud SILVA (2002, p. 31).

4.2.2 Fôrmas de Polipropileno (formas plásticas ou cubetas)

As fôrmas de polipropileno são muito utilizadas hoje em dia em lajes nervuradas, sua vantagem em relação aos blocos de enchimento é que são reutilizáveis por varias vezes, tornando-se em muitos casos mais viáveis economicamente. Elas cumprem a mesma função estrutural que os blocos de enchimento, que é modelar a região das nervuras e evitar o uso de concreto na região em que não é necessária a presença do mesmo.

Na Figura 4 pode-se visualizar-se as fôrmas de polipropileno.



Figura 4: Representação de uma estrutura com laje nervurada que utiliza fôrmas de polipropileno.
Fonte: SPOHR (2008, p. 38).

Segundo Vizotto e Sartoti (2010); Albuquerque (1999) e Sporh (2008), as principais vantagens e desvantagens do uso de lajes nervuradas são:

4.2.3 Vantagens

- Oferece funções de placa e membrana;
- Deve ser considerada bidirecional;
- Bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços;
- Possibilita o aumento dos vãos entre pilares, facilitando os projetos e criando maior área de manobras nos estacionamentos;
- Devido à sua capacidade de vencer grandes vãos, um pavimento pode ser definido com poucas lajes;
- Facilidade na execução, em decorrência da fôrma possuir poucas vigas, ou seja, é pouco recortada;
- O consumo de concreto da laje nervurada é muito baixo;

4.2.4 Desvantagens

- Elevado consumo de cubas plásticas, fôrmas e escoras;

- Elevado consumo de mão-de-obra referente às atividades dos profissionais: carpinteiro, armador, pedreiro e servente;
- Significativo consumo de concreto e aço, com peso próprio elevado, cabendo otimização;
- Dificuldade na instalação de tubulações, devendo optar por sistemas que eliminem ou minimizem este tipo de ação;
- Exige maior cuidado durante a concretagem.

4.2.5 Processo construtivo de estrutura com laje nervurada

Segundo Faria (2010), o processo construtivo de um sistema estrutural com lajes nervuradas é muito semelhante ao processo construtivo com lajes maciças convencionais, o que muda basicamente é na montagem das fôrmas e armaduras e concretagem das lajes, as demais etapas são praticamente idênticas.

4.3 SISTEMA ESTRUTURAL COM LAJE PRÉ-FABRICADA

As lajes pré-fabricadas foram importantíssimas no avanço da industrialização do processo construtivo. A pré-fabricação é um método industrial de construção no qual os elementos fabricados em série, por sistemas de produção em massa, são posteriormente montados em obra, tendo como principais vantagens a redução do tempo de construção, do peso da estrutura e, conseqüentemente, do custo final da obra (KONCZ, apud BORGES, 1997). Tendo também como grande vantagem a ausência de formas nas lajes.

Vigotas pré-fabricadas são definidas pela NBR 14859-1 (2002):

“Como elementos constituídos por concreto estrutural, executados industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura, ou mesmo em canteiros de obra, sob rigorosas condições de controle de qualidade. Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando parcialmente a seção de concreto da nervura longitudinal.”

Segundo Flório (2004, p. 18),

“As lajes com vigotas pré-fabricadas, como o nome já caracteriza, são sistemas formados por nervuras cujas vigotas (parte da nervura) são pré-moldadas de concreto armado (trilho ou treliça) espaçadas de maneira uniforme por lajotas (normalmente cerâmicas ou de outros materiais como o EPS) e cobertas por uma capa de concreto moldada no local, cuja função é garantir a distribuição dos esforços atuantes no elemento, aumentar a sua resistência à flexão e nivelar o piso. Desse modo a função da vigota, quando da execução da concretagem da capa, é resistir a ação do seu peso próprio, das lajotas cerâmicas ou materiais de enchimento, do

concreto da capa e dos equipamentos utilizados para a concretagem (carrinhos ou gericas).”

Os chamados elementos leves associados às lajes pré-fabricadas têm por finalidade substituir parte do concreto da zona tracionada. Para isso, devem apresentar as seguintes características (GASPAR, 1997):

- Resistência mínima a carga de trabalho durante a montagem da laje;
- Resistência mínima ao lançamento do concreto fresco;
- Boa aderência às argamassas de revestimento;
- Boa isolamento termo-acústica.

Podem-se classificar as lajes pré-fabricadas pelo tipo de vigotas que utiliza, sendo estas de três tipos deferentes: as vigotas em treliça, trilho e trilho protendido. Em seguida, são apresentadas as vigotas tipo treliça e tipo trilho.

4.3.1 Vigota tipo treliça (VT)

A vigota treliçada é formada por uma placa (sapata) de concreto que envolve parcialmente ou totalmente a armadura treliçada (NBR 14862, 2002), e quando for necessário pode ser complementada com armadura passiva inferior de tração que ficaria totalmente envolvida pelo concreto da nervura (FLÓRIO, 2004).

A respeito das características geométricas das vigotas treliçadas, por possuírem nervuras transversais faz-se com que as lajes possam ser armadas em duas direções, com isso consegue-se que a laje tenha função tanto de placa com de chapa, possibilitando a otimização da estabilidade global da estrutura (GASPAR, 1997).

Devido a facilidade de execução e ao bom comportamento estrutural as lajes pré-fabricadas tipo treliça vem ganhando maior espaço tanto em construções residenciais de pequeno porte como em edificações de baixa altura (BASTOS, 2006).

Observa-se na Figura 5 um exemplo de vigota treliçada.

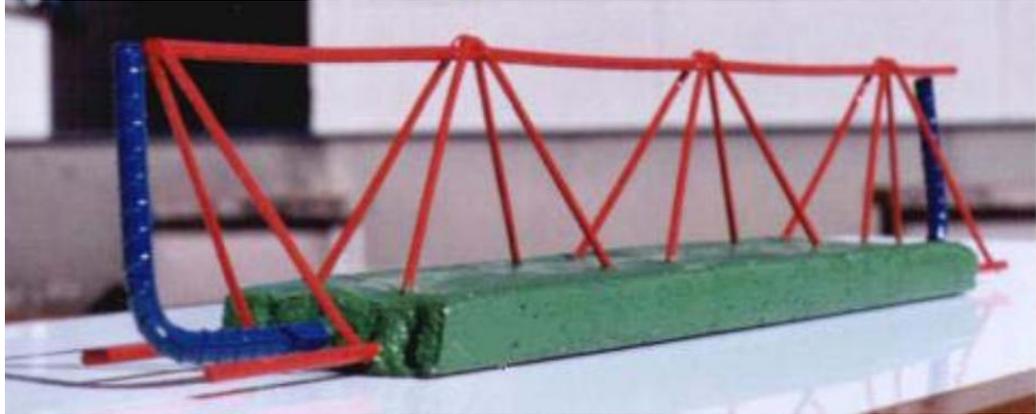


Figura 5: Vigota tipo treliça.
 Fonte: www.puma.com.br

Na Figura 6 mostra-se um corte de uma laje com vigotas treliçadas, podendo-se observar o elemento de enchimento, a vigota e a capa de concreto.

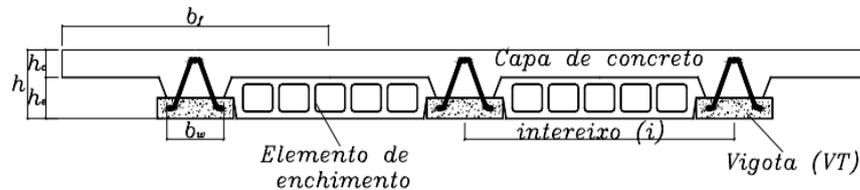


Figura 6: Corte esquemático de uma laje com vigotas do tipo treliça.
 Fonte: FLÓRIO (2004, p. 19).

As lajes pré-fabricadas tipo treliça, são compostas por vigotas pré-fabricadas espaçadas uniformemente, colocado entre as vigotas material inerte (blocos ou EPS), por cima deste conjunto coloca-se a capa de concreto (CARVALHO, 2012), o conjunto completo pode ser visualizado na Figura 6, a vigota é composta por 5 barras de aço, três barras retas, duas inferiores e uma superior, unidas por duas barras sinusoidais, solidarizadas por uma mesa de concreto.

4.3.2 Vigota Tipo Trilho (VC)

É uma vigota de concreto armado com seção usualmente no formato de um “T” invertido com armadura passiva totalmente envolvida pelo concreto, utilizada para compor as lajes de concreto armado (LC). Os parâmetros utilizados para definir a laje confeccionada com vigotas tipo trilho são os mesmos parâmetros utilizados na confecção das lajes tipo treliça (FLÓRIO, 2004, p. 20). Na Figura 7 pode-se observar um exemplo de vigota tipo trilho.

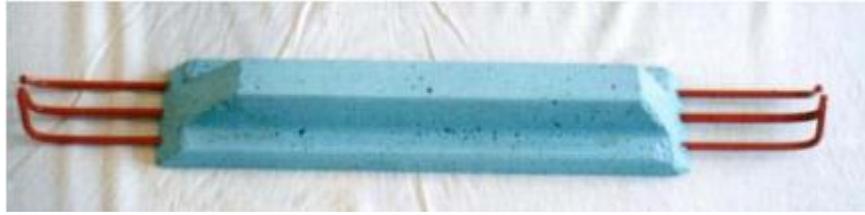


Figura 7: Vigota tipo trilho.

Fonte: www.puma.com.br

Na Figura 8 mostra-se um corte de uma laje pré-fabricada com vigotas tipo trilho.

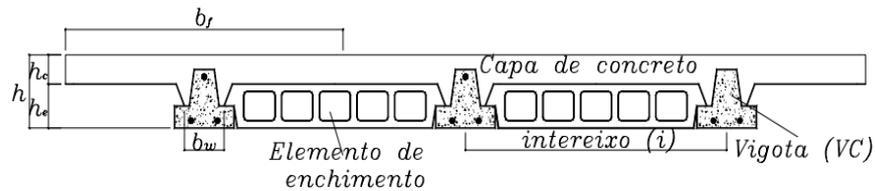


Figura 8: Corte esquemático de uma laje com vigotas do tipo trilho.

Fonte: FLÓRIO (2004, p. 19).

4.3.3 Materiais empregados

Os elementos que constituem uma laje pré-fabricada são quatro: a vigota, o material de enchimento inerte, o concreto lançado in-loco, e a armadura complementar.

Segundo Flório (2004), as lajotas cerâmicas foram por muito tempo o material mais utilizado para enchimento, mas atualmente o EPS está se popularizando devido ao seu baixo peso e a facilidade de recorte adaptando-se facilmente a qualquer geometria dos vazios.

Qualquer material inerte pode ser utilizado com material de enchimento nas lajes pré-fabricadas, esse material que na maioria das vezes fica incorporado na laje pode ser bloco cerâmicos, blocos de concreto comum ou de concreto celular, ou ainda blocos de EPS, os mais utilizados são o cerâmico e o de EPS (BARBOZA, 2008). Esse material não tem função estrutural alguma, só tem que ser de boa qualidade para resistir ao peso da capa de concreto durante a concretagem, e resistir as cargas de operários e equipamentos durante o período de construção da laje.

Na Figura 9 pode-se observar um bloco de EPS para laje unidirecional.

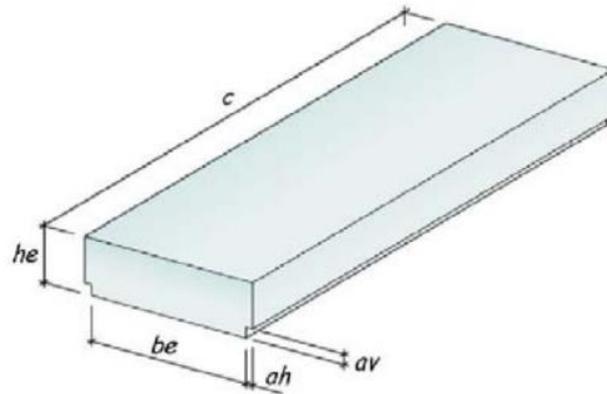


Figura 9: Bloco de EPS para laje unidirecional.

Fonte: FLÓRIO (2004, p. 28)

4.3.4 Vantagens

Segundo Flório (2004); Gaspar (1997) e Barboza (2008) o sistema com lajes pré-fabricadas de vigotas apresenta varias vantagens em relação a os outros sistemas. Vantagens essas relatadas a seguir:

- Redução do consumo de concreto, com a consequente diminuição dos esforços nas peças estruturais, e nas fundações;
- Facilidade de execução, por serem de fácil manuseio e montagem, podendo ser executada por mão-de-obra pouco preparada;
- Menor tempo de execução e maior economia no custo da construção, devido a grande quantidade de materiais industrializados (nervuras, elementos de enchimento e até mesmo o concreto) empregados neste sistema;
- Versatilidade, pois possibilitam uma ampla variedade de aplicações, como por exemplo em fabricas, edifícios de apartamentos entre outros;
- Diminuição de escoramentos, devido a quantidade de escoras ser menor, pois as nervuras pré-fabricadas têm rigidez que permite vencer vãos de 1 m a 2 m e o peso próprio desse sistema é menor que o das lajes maciças;
- Eliminação de fôrmas, pois os blocos de enchimento apoiados sobre as vigotas formão um plano que serve de fôrmas para a concretagem da capa, dispensando as fôrmas das lajes.

4.3.5 Desvantagens

Como desvantagens, se destacam a dificuldade na execução das instalações prediais nas lajes com nervuras tipo trilho, e os valores dos deslocamentos transversais, que são bem maiores que os apresentados pelas lajes maciças. Além do carregamento em apenas uma direção, no caso de unidirecional, nas vigas de contorno (FLÓRIO , 2004).

4.3.6 Processo Construtivo de Estrutura com Lajes Pré-Fabricadas

Define-se o processo construtivo, começando pelo transporte e colocação das nervuras, após coloca-se os elementos de enchimento e as escoras, e, então, faz-se a montagem das armaduras de distribuição e negativas, limpa-se a interface entre a vigota e os blocos com a capa de concreto a ser lançada e, então, concretiza-se a capa e por fim retira-se o escoramento.

5 METODOLOGIA

Este capítulo descreverá a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, será apresentado o edifício exemplo e suas peculiaridades, em seguida serão apresentadas as ações consideradas na edificação e os parâmetros adotados no lançamento dos sistemas. Após, serão descritos os sistemas estruturais de uma forma isolada e suas características.

5.1 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO EXEMPLO

O edifício-exemplo trata-se do edifício residencial executado no litoral de Santa Catarina. É um edifício residencial, com dois apartamentos por pavimento (cada um com área útil de 122m²), a partir da arquitetura do pavimento-tipo, foram feitas pequenas modificações, com o intuito de deixar os apartamentos simétricos, como pode ser observado na Figura 10. Será considerado para o estudo, hipoteticamente, uma altura de 17 pavimentos, todos iguais ao tipo, e com uma distância de piso a piso igual a 3,15m, resultando em uma edificação com altura total de 53,55m. As dimensões dos lados em planta são de 18,50m e 16,30m.

Embora de grande relevância na concepção estrutural, não foi considerada a existência de outros pavimentos como: térreo, garagem, tipo diferenciado e cobertura. Esses pavimentos são considerados importantes por influenciarem na posição dos pilares que atravessam todos os pavimentos, e definem a disposição das vagas de garagem, do hall de entrada, do salão de festas e da caixa-d'água. No entanto, por ser um trabalho acadêmico que busca a influência da tipologia de lajes sobre o consumo de materiais, entendem-se estas simplificações como justificadas.

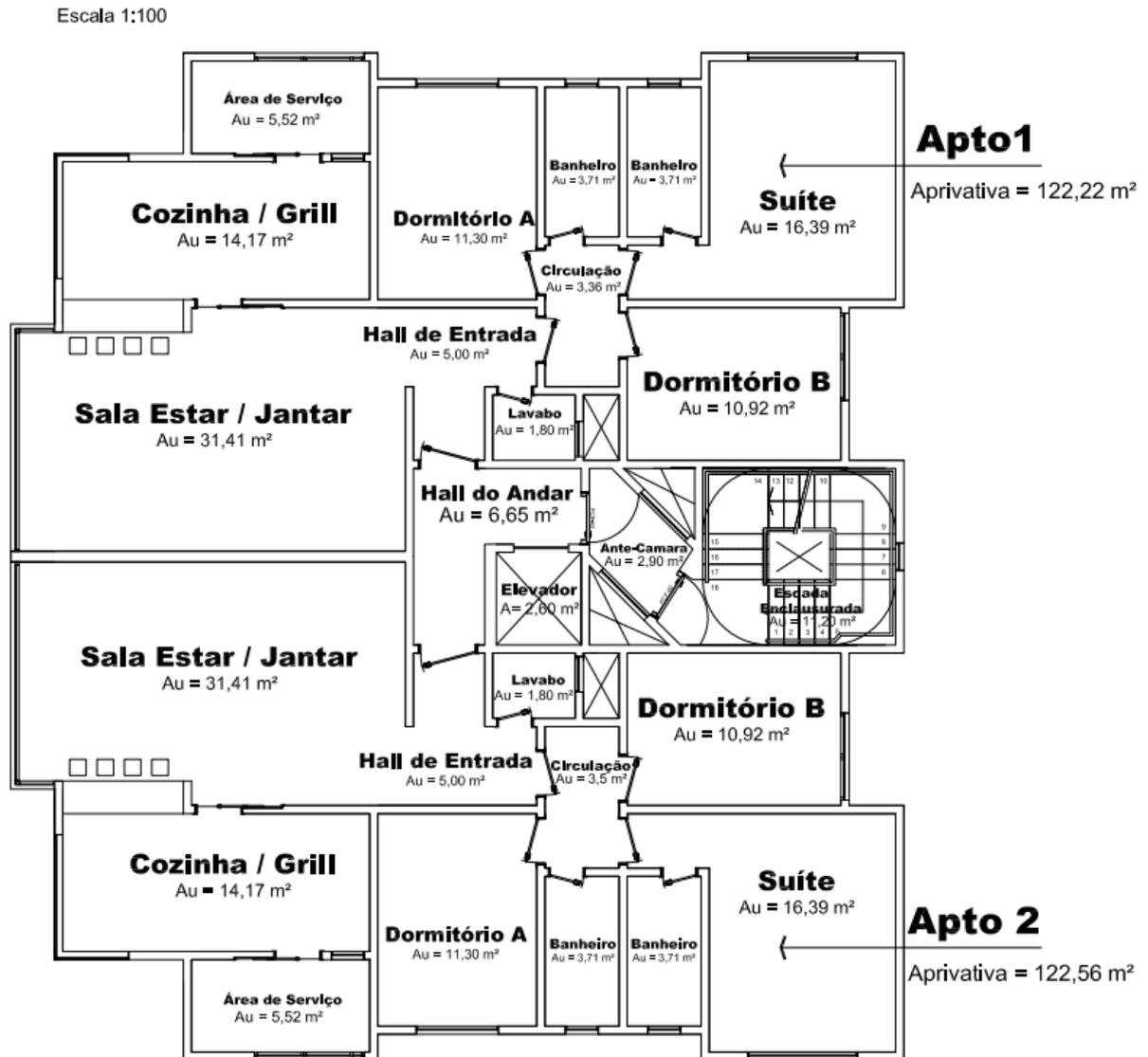


Figura 10: Edifício Exemplo

5.2 AÇÕES CONSIDERADAS

Os carregamentos permanentes e acidentais foram obtidos a partir da NBR 6120 (1980), Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações.

As ações do vento foram avaliadas de acordo com a NBR 6123 (1988), Forças Devidas ao Vento em Edificações. Para o cálculo da velocidade característica do vento (V_k), adotou-se:

- Velocidade básica $V_0 = 45$ m/s;
- Fator topográfico $S_1 = 1,0$, considerando-se que o terreno seja plano ou fracamente acidentado;

- Rugosidade do terreno, função das dimensões da edificação e altura sobre o terreno:
 $S_2 = 1,02$; em se tratando do centro de uma cidade do interior, classifica-se como categoria IV, e como classe C porque é uma edificação na qual a maior dimensão excede 50m;
- Fator estatístico $S_3=1,0$; grupo 2: edificações para hotéis e residências;
- E para o cálculo dos coeficientes de arrasto, a altura da edificação $H = 53,55\text{m}$ (17 andares com pé direito de 3,15m), e medida dos lados em planta $l_1=18,50\text{m}$ e $l_2=16,30\text{m}$; Os coeficientes de arrasto são: $C_a=1,30$ (direção X) e $C_a=1,25$ (direção Y).

5.3 PARÂMETROS ADOTADOS NO LANÇAMENTO DOS SISTEMAS

Os sistemas foram processados com auxílio do software comercial Eberick V6 Gold, produzido pela empresa AltoQi. Este programa permite analisar as estruturas através de pórtico espacial. Todos os quatro sistemas estruturais analisados seguiram uma padronização dos parâmetros utilizados para haver um mínimo de desvio nos resultados apresentados para comparações.

A modelagem dos sistemas seguiu a normatização brasileira vigente no momento, sendo utilizadas neste trabalho as seguintes:

- NBR 6118 (2003): Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- NBR 6120 (1980): Cargas para cálculo de estruturas de edificações – Procedimentos;
- NBR 8681 (2003): Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos;
- NBR 14931 (2003): Execução de estruturas de concreto – Procedimentos.

A classe de agressividade ambiental foi adotada segundo a NBR 6118 (2003). Adotou-se a classe CAA II. Sendo assim, o cobrimento interno para vigas e pilares foi de 2,5 cm e o externo de 3cm, para as lajes usou-se 2,5 cm, e o f_{ck} utilizado para todos os elementos foi de 25MPa.

Também seguiu-se a norma NBR 7480 (1996), a qual define os tipos, as características e outros itens sobre as barras e os fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Ela define que todo material em barras, caso do CA-25 e CA-50, deve ser obrigatoriamente

fabricado por laminação a quente, e que todos os fios, característicos do CA-60 devem ser fabricados por trefilação ou processo equivalente, como estiramento ou laminação a frio. Os fios têm diâmetro nominal inferior a 10 mm.

O aço CA-60 de diâmetro 5,0mm é empregado como armadura de lajes e estribos de vigas e pilares. E o aço CA-50 de diâmetros 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0 e 25,0 mm são empregados como armaduras longitudinais de lajes, vigas e pilares, e os de 6,3; 8,0 mm também são empregados como estribos de vigas e pilares e armaduras de lajes.

5.4 SISTEMAS ESTRUTURAIS ANALISADOS

Foram feitas quatro modelagens distintas, uma para cada sistema estrutural, sendo eles: sistema estrutural com laje maciça, com laje pré-fabricada de vigotas tipo trilho, com laje pré-fabricada de vigotas treliçadas, e com laje nervurada com vigas apenas nas bordas e capitéis no interior.

O primeiro sistema estrutural modelado foi o convencional com laje maciça. O segundo e terceiro sistemas lançados foram com lajes pré-fabricadas, um utilizando laje de vigotas tipo trilho, e o outro utilizando laje de vigotas tipo treliça. Os dois sistemas partiram do princípio que as lajes descarregam suas cargas em apenas uma direção, sendo assim lajes unidirecionais. E por último foi lançado o sistema estrutural com laje nervurada moldada *in-loco*, descarregando esta nas duas direções (bidirecional), para melhor aproveitar suas características foi utilizado vigas de borda e capitéis no seu interior. As lajes pré-fabricadas utilizaram como material de enchimento o EPS, por ser atualmente o mais empregado, devido às vantagens já descritas anteriormente, e na laje nervurada utilizou-se fôrmas de polipropileno (cubetas) por serem mais adequadas para esse sistema. Todos os sistemas estruturais citados já tiveram suas características descritas no referencial teórico.

Os sistemas estruturais analisados foram lançados buscando seu melhor arranjo, visando um lançamento que possa aperfeiçoá-los em termos de consumo de material e respeitando em cada sistema suas características (características estas, já descritas no referencial teórico), se tratando de vão a vencer, espessura da laje entre outras limitantes. Considerou-se também as cargas verticais, os deslocamentos horizontais, o coeficiente gamaZ e as análises de segunda ordem no lançamento de cada sistema.

5.4.1 Sistema Estrutural com Laje Maciça

Neste sistema foram utilizadas duas espessuras diferentes de lajes dentro de cada pavimento, a distribuição dos elementos (vigas, pilares e lajes) está mostrada na planta de fôrmas da Figura 11. Na Figura 12 tem-se a visão espacial do pórtico formado deste sistema.

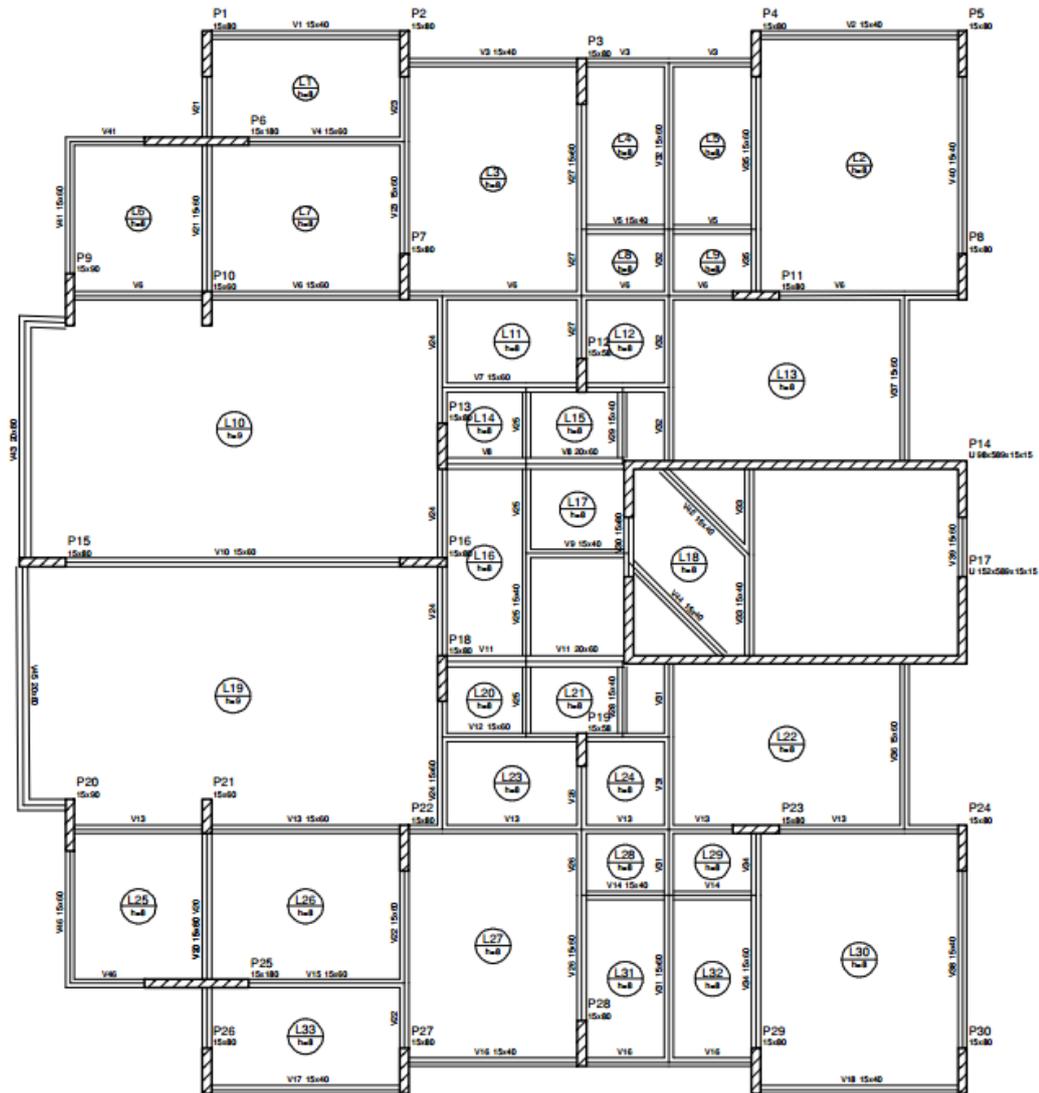


Figura 11: Fôrma do Sistema com Laje Maciça

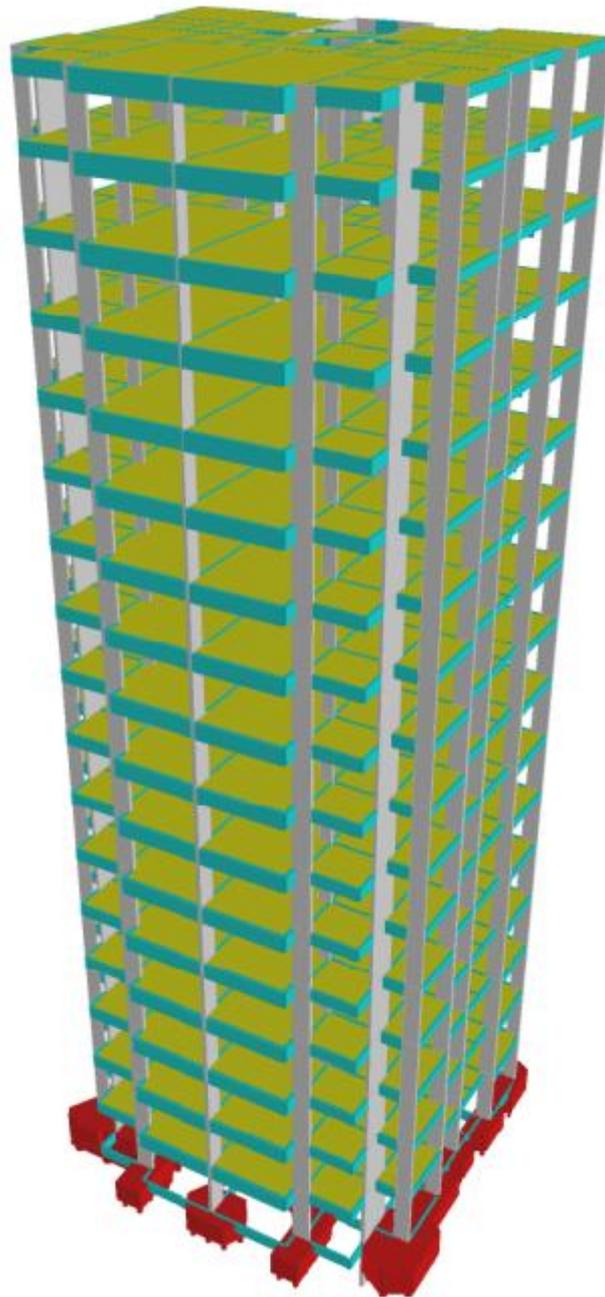


Figura 12: 3D do Sistema Estrutural com Laje Maciça

5.4.2 Sistema Estrutural com Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho

No sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo trilho também foram utilizadas duas espessuras diferentes de lajes dentro de cada pavimento, a distribuição dos elementos (vigas, pilares e lajes) está mostrada na planta de fôrmas da Figura 13. Nesta laje usou-se blocos de enchimento de EPS com dimensões de 40x40cm e altura de 12cm ou 8cm.

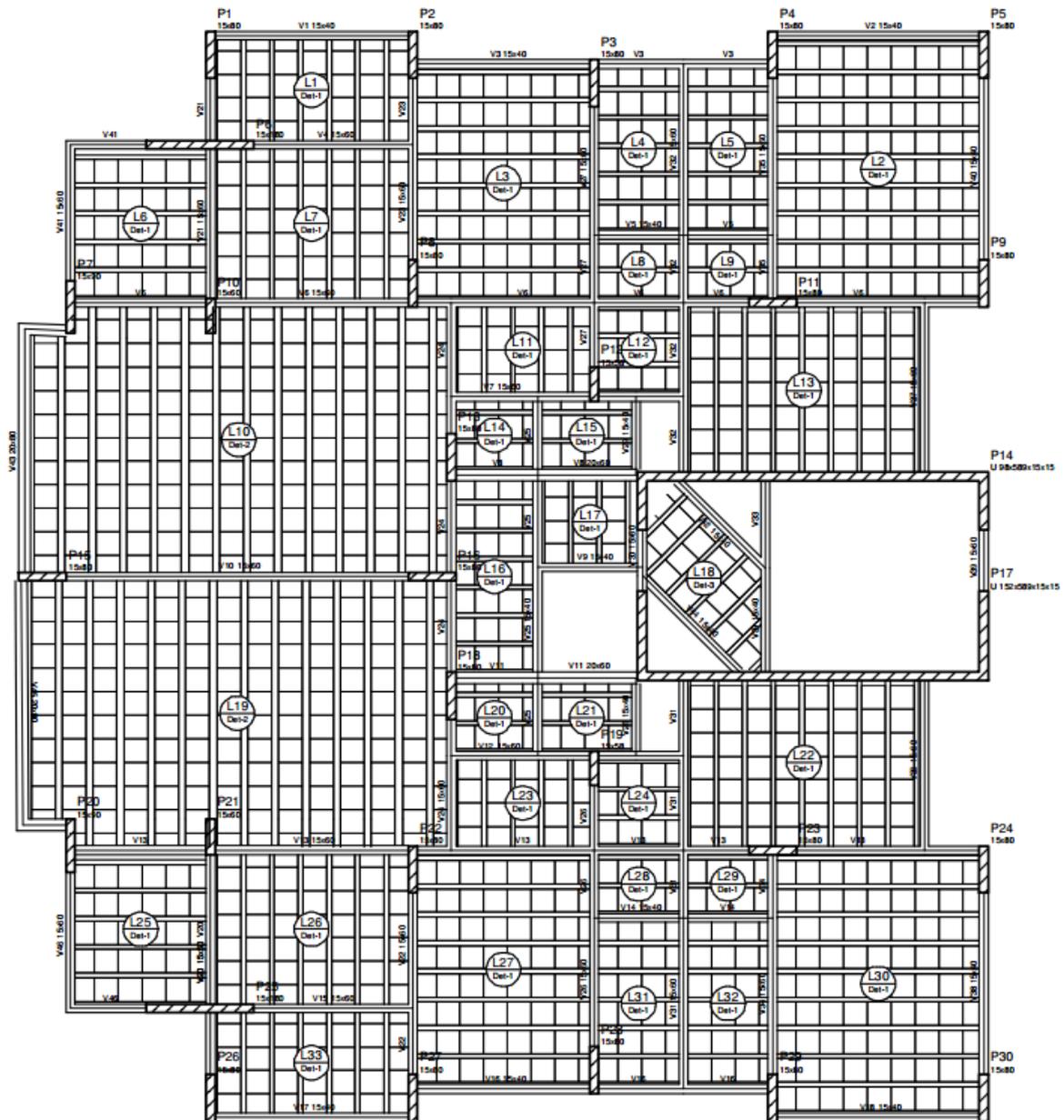


Figura 13: Fôrma do Sistema com Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho

5.4.3 Sistema Estrutural com Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça

Para vencer os esforços solicitantes neste sistema também foi utilizado duas espessuras de laje por pavimento, a distribuição dos elementos (vigas, pilares e lajes) está mostrada na planta de fôrmas da Figura 14. Também se usou blocos de EPS de 40x40cm com altura de 10cm ou 8cm.

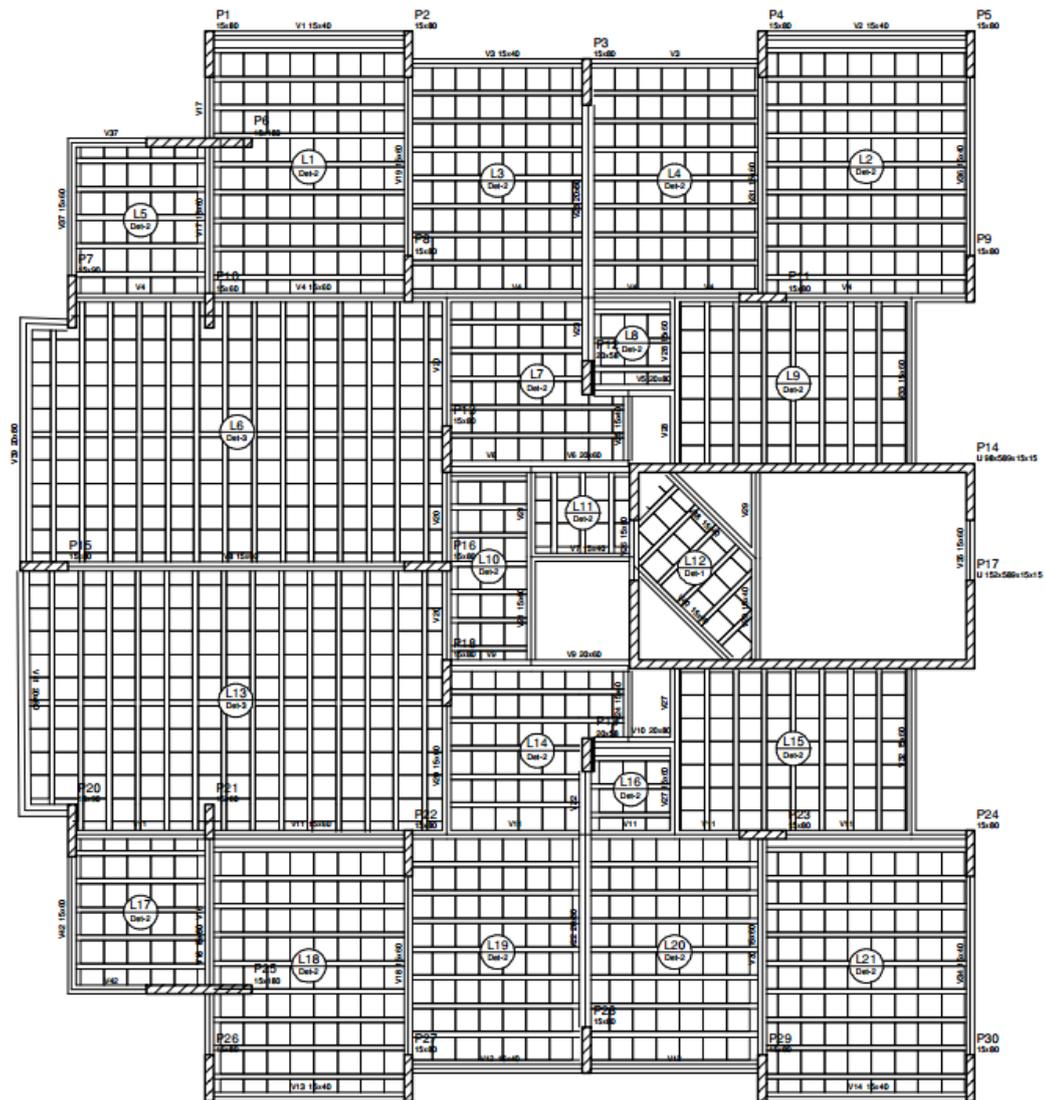


Figura 14: : Fôrma do Sistema com Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça

5.4.4 Sistema Estrutural com Laje Nervurada

Como não há vigas na parte interna deste sistema, então ele foi lançado com apenas duas lajes, tendo elas a mesma espessura, a maior delas abrange a maior parte do andar, e a segunda só foi necessária para preencher o vão do corredor da escada coletiva. Na Figura 15 mostra-se a planta de fôrmas deste sistema, com a distribuição dos elementos estruturais (vigas, pilares, capitéis e lajes). Usaram-se fôrmas de polipropileno de dimensões 25x80x80cm neste sistema.

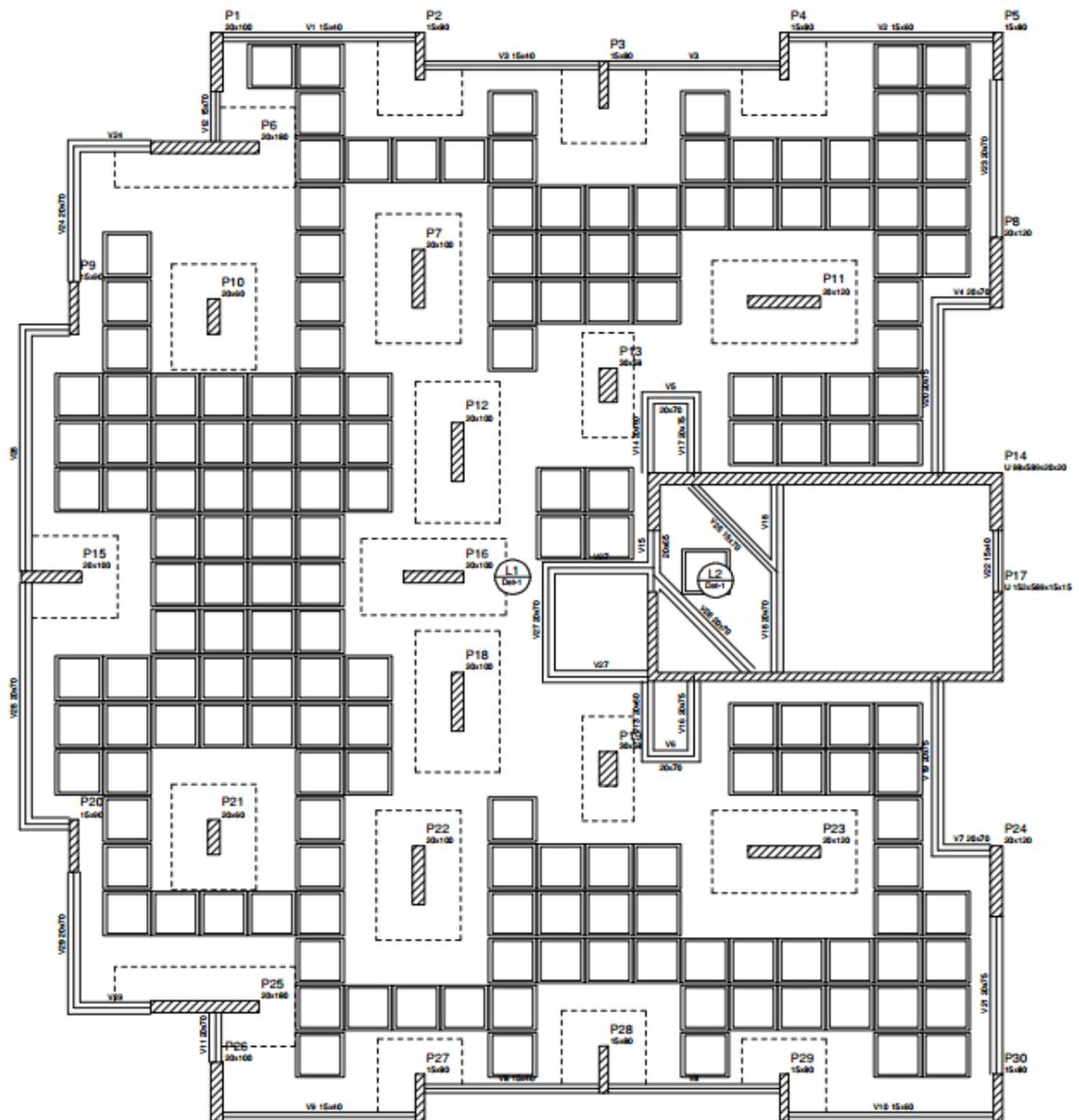


Figura 15: Fôrma do Sistema com Laje Nervurada com vigas de bordo e capitéis.

A figura 16 apresenta o pórtico espacial 3D do sistema estrutural com laje nervurada.

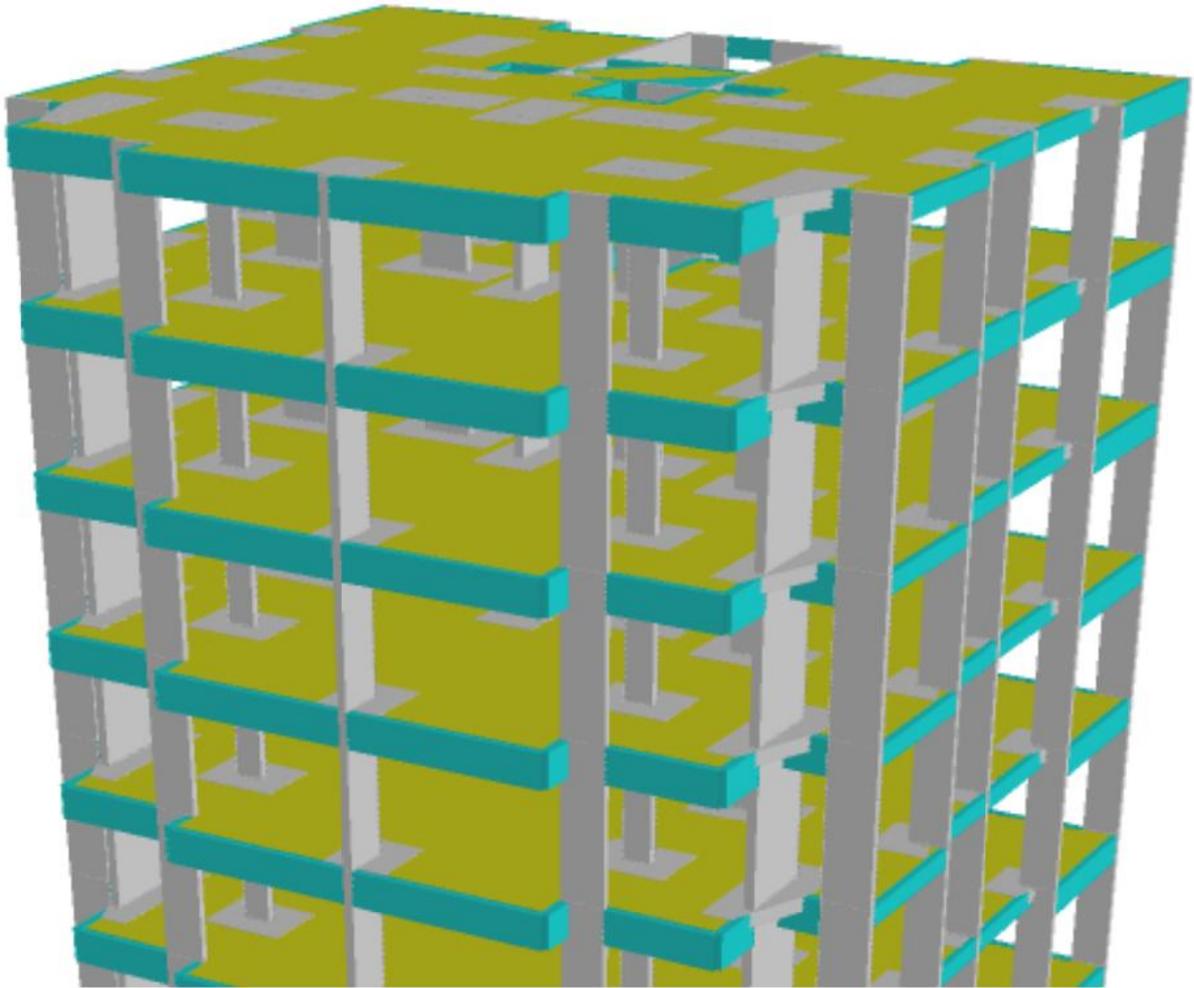


Figura 16: 3D do Sistema Estrutural com laje nervurada.

6 RESULTADOS

Este capítulo será dividido em apresentação dos resultados e análise dos mesmos. Os resultados que foram obtidos através do lançamento de cada sistema são: deslocamentos horizontais, o gamaZ, cargas nas fundações e os consumos de materiais. Na análise dos resultados será apresentada uma comparação entre os sistemas referente às cargas na fundação, ao consumo de material e aos índices de consumo.

6.1 Apresentação dos Resultados

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados de cada sistema estrutural analisado neste trabalho.

6.1.1 Sistema Estrutural com Laje Maciça

Na Tabela 1 apresenta-se um relatório gerado pelo software estrutural que traz as cargas verticais, o deslocamento horizontal, e o coeficiente gamaZ.

Tabela 1: Análise Estatística Linear - Laje Maciça

Cargas Verticais		Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z	
Peso Próprio	2797,88 tf	Direção x	1,13cm (limite 3,31)	Direção X	1,07 (limite 1,10)
Adicional	2265,73 tf	Direção Y	2,38cm(limite 3,31)	Direção Y	1,09 (limite 1,10)
Acidental	640,31 tf				
Total	5703,92 tf				
Área Aproximada	4202,89m ²				
Relação	1357,14kgf/m ²				

E a Tabela 2 apresenta o consumo dos materiais, aço, concreto e fôrmas.

Tabela 2: Resumo de Materiais - Laje Maciça

Material	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Total Aço + 10(%) (kgf)	27589,6	55206,0	18539,8	101335,3
Volume concreto (m ³)	337,6	458,8	316,7	1113,0
Área de forma (m ²)	4912,6	5097,1	3825,1	13834,7
Consumo de aço (kgf/m ³)	81,7	120,3	58,5	91,0

6.1.2 Sistema Estrutural com Laje Pré-fabricada Tipo Trilho

Observa-se na Tabela 3, o relatório que traz as cargas verticais o deslocamento horizontal, e o coeficiente gamaZ.

Tabela 3: Análise Estatística Linear – Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho

Cargas Verticais		Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z	
Peso Próprio	2381,23tf	Direção X	1,22cm (limite 3,31)	Direção X	1,06 (limite 1,10)
Adicional	2271,39tf	Direção Y	2,40cm(limite 3,31)	Direção Y	1,09 (limite 1,10)
Acidental	641,46 tf				
Total	5294,09 tf				
Área Aproximada	4203,07 m ²				
Relação	1259,58 kgf/m ²				

Em seguida, na Tabela 4 apresenta-se o consumo dos materiais, aço, concreto e fôrmas.

Tabela 4: Resumo de Materiais – Laje Pré-Fabricada Tipo Trilho

Material	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Total Aço + 10% (kgf)	26596,1	50966,8	6484,1	84047,0
Volume concreto(m ³)	335,9	427,9	125,4	889,3
Área de forma (m ²)	4906,9	5094,6	-	10001,4
Consumo de aço (kgf/m ³)	79,2	119,1	0,0	94,5

6.1.3 Sistema Estrutural com Laje Pré-fabricada Tipo Treliça

A Tabela 5 apresenta um relatório que traz as cargas verticais o deslocamento horizontal, e o coeficiente gamaZ.

Tabela 5: Análise Estatística Linear – Laje Pré- Fabricada Tipo Treliça

Cargas Verticais		Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z	
Peso Próprio	2374,72tf	Direção x	1,20cm (limite 3,34)	Direção X	1,06 (limite 1,10)
Adicional	2303,78tf	Direção Y	2,44cm(limite 3,34)	Direção Y	1,09 (limite 1,10)
Acidental	656,19tf				
Total	5334,69tf				
Área Aproximada	4198,61m ²				
Relação	1270,58 kgf/m ²				

A Tabela 6 apresenta o consumo dos materiais, aço, concreto e fôrmas do sistema com laje pré-fabricada tipo treliça.

Tabela 6: Resumo de Materiais – Laje Pré-Fabricada Tipo Treliça

Material	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Total Aço + 10% (kgf)	24496,2	54683,4	6428,7	85608,3
Volume concreto(m ³)	306,5	459,2	168,3	933,9
Área de forma (m ²)	4380,4	5112,7	-	9493,1
Consumo de aço (kgf/m ³)	79,9	119,1	1,5	91,7

6.1.4 Sistema Estrutural com Laje Nervurada

Abaixo esta a Tabela 7 que apresenta um relatório que traz as cargas verticais o deslocamento horizontal, e o coeficiente gamaZ, do sistema com laje nervurada com vigas de bordo e capitéis.

Tabela 7: Análise Estatística Linear – Laje Nervurada

Cargas Verticais		Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z	
Peso Próprio	3562,60tf	Direção x	1,78cm (limite 3,34)	Direção X	1,07 (limite 1,10)
Adicional	2034,19tf	Direção Y	4,10cm(limite 3,34)	Direção Y	1,15 (limite 1,10)
Acidental	586,71tf				
Total	6183,50tf				
Área Aproximada	4197,23m ²				
Relação	1473,23 kgf/m ²				

E por fim a Tabela 8 apresenta o consumo dos materiais, aço, concreto e fôrmas do mesmo.

Tabela 8: Resumo de Materiais – Laje Nervurada

Material	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Total Aço + 10% (kgf)	18086,9	59851,9	29768,3	107707,0
Volume concreto(m ³)	209,7	568,3	691,4	1469,4
Área de forma (m ²)	2589,3	5851,4	-	8440,7
Consumo de aço (kgf/m ³)	86,2	105,3	43,1	73,3

6.2 Comparação dos Resultados

Primeiramente será apresenta a comparação entre as cargas verticais, após os deslocamentos horizontais e o coeficiente Gama Z. Em seguida, os consumos de materiais

aço, concreto e fôrmas, e por fim os índices de consumo de material, espessura média, taxa de aço I, taxa de aço II e taxa de fôrmas.

6.2.1 Cargas Verticais na Fundação

Através da Tabela 9 podem-se observar as cargas verticais totais na fundação. Ali aparecem o peso próprio, a carga acidental e a carga total para os quatro sistemas analisados, trazendo os valores reais em (tf), e os valores relativos, dados pela razão entre o valor da carga para o sistema de laje maciça e os demais.

Tabela 9: Cargas Verticais nas Fundações

Sistemas Analisados	Valores Reais			Valores Relativos		
	Peso Próprio	Acidental	Total	Peso Próprio	Acidental	Total
Sis. Est. Com Laje Maciça	5063,61 tf	640,31 tf	5703,92 tf	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	4652,62 tf	641,46 tf	5294,09 tf	0,92	1,00	0,93
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Treliça	4678,50 tf	656,19 tf	5334,69 tf	0,92	1,02	0,94
Sis. Est. Com Laje Nervurada	5596,79 tf	586,71 tf	6183,50 tf	1,11	0,92	1,08

Observa-se aqui que os sistemas com lajes pré-fabricadas, tanto o tipo trilho quanto o tipo treliça, são mais leves que o sistema com laje maciça. O mais pesado é o sistema com laje nervurada. Isso ocorre porque os sistemas com lajes pré-fabricadas utilizam elementos de enchimento em EPS. As lajes pré-fabricadas apresentaram-se 8% mais leves que o sistema com laje maciça. Já o sistema com laje nervurada se torna mais pesado porque em função do não emprego de vigas, há a necessidade de usar capitéis de combate à punção, resultando em um volume elevado de concreto, tornando todo o conjunto mais pesado. A relação entre o peso próprio da laje nervurada e da maciça ficou em 1,11.

Outro item que se destaca é que a laje nervurada tem a carga acidental menor que as demais. Credita-se este fato a menor área de laje disponível no pavimento em função da presença dos capitéis. Como as cargas do pavimento são lançadas no programa sobre as lajes, a razão da menor carga seria essa.

Por fim, com relação à carga total (peso próprio + acidental) os sistemas com lajes pré-fabricadas resultaram em carga sobre a fundação entre 6 e 7% menor que o sistema de lajes maciças, e o sistema com laje nervurada resultou em carga 8% maior sobre as fundações.

6.2.2 Deslocamentos Horizontais e Coeficiente GamaZ

Os deslocamentos horizontais e o coeficiente gamaZ seguem um padrão entre os sistemas com laje maciça, pré-fabricado tipo trilho e treliçada, como pode ser observado na tabela 10. Já no sistema com laje nervurada o deslocamento na direção y é maior que os demais, mas o coeficiente gamaZ não varia significativamente. Isso ocorre porque o coeficiente gamaZ é uma relação entre todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo pelos deslocamentos horizontais dos respectivos pontos de aplicação (momentos de desaprumo), obtidos da análise de 1ª ordem, e a soma dos momentos de todas as forças horizontais, com seus valores de cálculo em relação à base da estrutura (momento de desaprumo). Isso significa que há um equilíbrio entre essas duas grandezas, mesmo sendo maior o deslocamento, o peso vertical da estrutura também aumenta, e ela continua no mesmo padrão das demais se tratando de estabilidade global. A estrutura com laje nervurada é a única que não se classifica como de nós fixos, pois o coeficiente gamaZ ultrapassou 1,1, indicando uma estrutura de nós deslocáveis.

Tabela 10: Deslocamentos Horizontais e Coeficientes Gama - Z

Sistemas Analisados	Valores Reais				Valores Relativos			
	Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z		Deslocamento Horizontal		Coeficiente Gama-Z	
	Direção X	Direção Y	Direção X	Direção Y	Direção X	Direção Y	Direção X	Direção Y
Sis. Est. Com Laje Maciça	1,13	2,38	1,07	1,09	1,00	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	1,22	2,40	1,06	1,09	1,08	1,01	0,99	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Treliça	1,20	2,44	1,06	1,09	1,06	1,03	0,99	1,00
Sis. Est. Com Laje Nervurada	1,78	4,10	1,07	1,15	1,58	1,72	1,00	1,06

6.2.3 Consumo de Aço

Para o consumo de aço, que atualmente é um dos insumos mais caros de uma construção, foram feitas comparações em tabela e gráficos. A Tabela 11 traz à esquerda os valores de consumo de aço em (Kg), para cada sistema apresenta-se o consumo de aço nas

vigas, nos pilares, nas lajes e o valor total, já na direita apresenta-se os valores relativos dos mesmos, levando como base o sistema com laje maciça.

Salienta-se que os valores da Tabela 11 possuem um acréscimo de 10%, devido à perda de material em obra com corte e dobragem.

Tabela 11: Consumo de Aço + 10%

Sistemas Analisados	Valores Reais (Kg)				Valores Relativos			
	Vigas	Pilares	Lajes	Total	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Sis. Est. Com Laje Maciça	27589,6	55206,0	18539,8	101335,3	1,00	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	26596,1	50966,8	6484,1	84047,0	0,96	0,92	0,35	0,83
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelça	24496,2	54683,4	6428,7	85608,3	0,89	0,99	0,35	0,84
Sis. Est. Com Laje Nervurada	18086,9	59851,9	29768,3	107707,0	0,66	1,08	1,61	1,06

Se tratando das vigas, nota-se que o sistema com laje nervurada tem menos consumo de aço que os demais, isso deve-se ao fato de o sistema ter sido lançado apenas com vigas no contorno. Havendo menos vigas, espera-se que se consuma menos aço, como de fato aconteceu.

O sistema com laje pré-fabricada tipo trelça também consome menos aço nas vigas do que a tipo trilho. Isso devido a este sistema vencer vãos maiores, o que possibilitou a retirada de algumas vigas, fazendo com que a carga de algumas paredes descarrega-se direto nas lajes. Havendo menos vigas, há menor consumo de aço nas vigas. O sistema com laje pré-fabricada tipo trilho consome 4% menos aço nas vigas que o sistema com laje maciça, sendo que os dois sistemas tem a mesma distribuição de vigas na fôrma, isso acontece porque a estrutura deste sistema é mais leve que a estrutura da laje maciça gerando elementos estruturais menos armados.

Os pilares tiveram um consumo de aço mais equilibrado, havendo maiores variações nos sistemas com lajes pré-fabricadas tipo trilho e laje nervurada. As lajes nervuradas tiveram um consumo maior nos pilares, pois foi necessário aumentar as dimensões desses elementos para enrijecer a estrutura, pois não formam-se pórticos resistentes entre os pilares e as vigas. Já o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho, em função da leveza mas contando com a existência de vigas que enrijecem a estrutura, acabou tornando-se o sistema mais econômico em se tratando de consumo de aço nos pilares. Os sistemas com lajes maciça e pré-fabricada tipo trelça, ficaram com valores de consumo de aço muito próximo nos pilares.

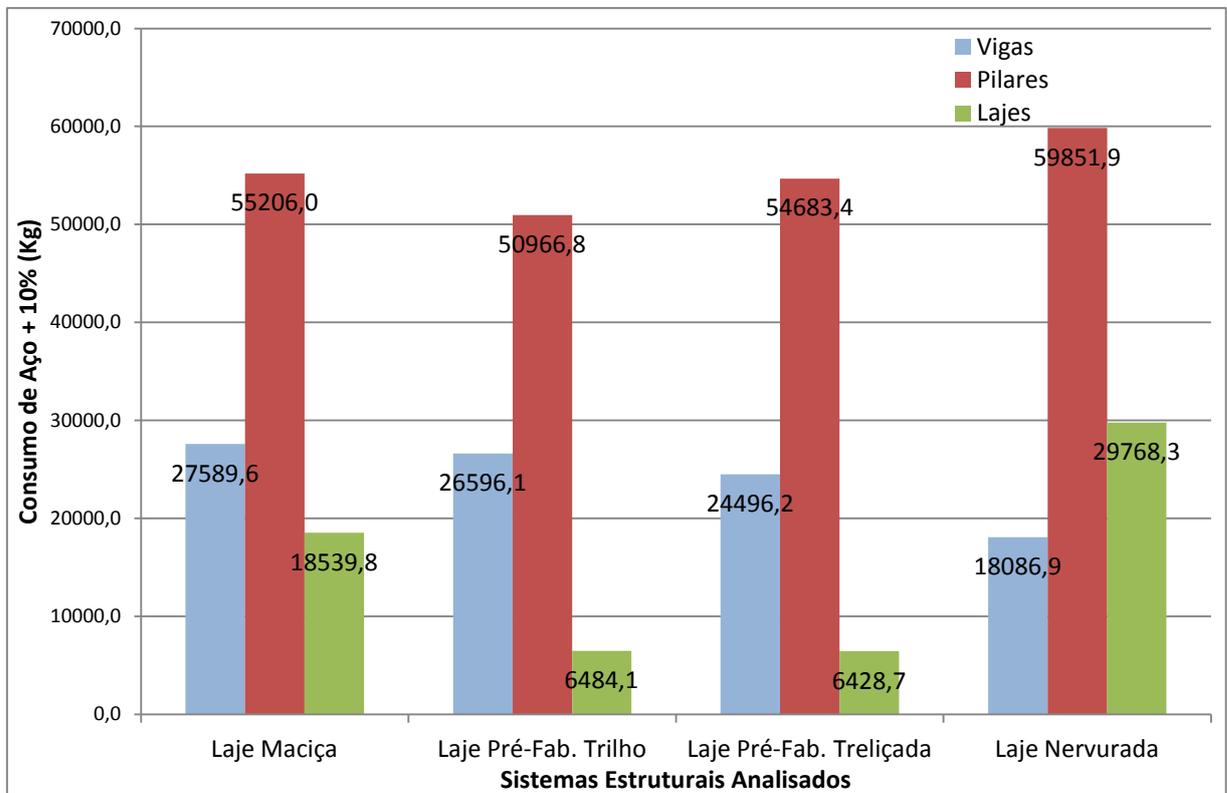
Mas nas lajes é onde se tem a grande diferença nos valores de consumo de aço, os sistemas com lajes pré-fabricadas tipo trilho e tipo trelça foram 65% mais econômicos que o sistema com laje maciça, isso se deve ao fato das lajes dos sistemas com lajes pré-fabricadas

serem mais leves que a laje do sistema com laje maciça, necessitando assim menos armaduras.

A laje nervurada por sua vez teve um consumo de aço de 61% maior que a maciça, isso se deve em grande parte porque o sistema com laje nervurada não utilizou vigas internas, mas sim capitéis inclusos nas lajes. Para combater à punção é necessário adotar elevadas taxas de aço, resultando no maior consumo de aço das lajes.

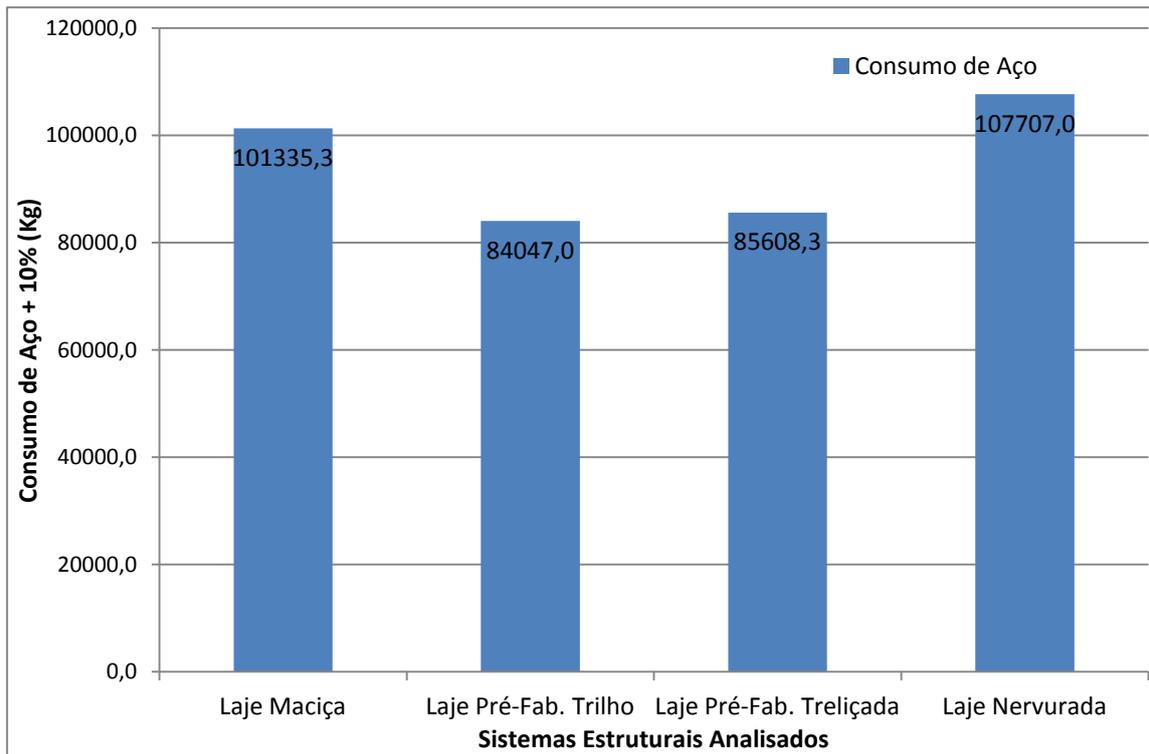
No Gráfico 1 abaixo mostra-se o consumo de aço pelo sistema estrutural analisado em cada elemento estrutural isolado, primeiro as vigas, após os pilares e por último as lajes.

Gráfico 1: Consumo de aço nos sistemas por elemento estrutural



Ao observar o consumo final de aço (Gráfico 2), nota-se que o sistema com laje nervurada consome apenas 6% a mais que a laje maciça, ou seja, o consumo de aço acentuado nas lajes é devido à existência de capitéis no seu interior e compensado devido a não existência de vigas internas. Os sistemas pré-fabricados tanto tipo treliça quanto tipo trilho, foram de 16% a 17% mais econômicos em se tratando de consumo de aço que o sistema com laje maciça.

Gráfico 2: Consumo total de aço por sistema estrutura analisado



6.2.4 Consumo de Concreto

Os resultados aqui apresentados são os gerados pelo programa usado, que gera apenas o consumo de concreto moldado *in loco*, ou seja, ele não informa o concreto das vigotas dos dois sistemas pré-fabricados. A Tabela 12 traz do lado direito os valores reais em (m³) do volume de concreto consumido pelos quatro diferentes sistemas e do lado esquerdo os valores relativos deste mesmo consumo, levando como base os valores do sistema com laje maciça.

Tabela 12: Consumo de Concreto

Sistemas Analisados	Valores Reais (m ³)				Valores Relativos			
	Vigas	Pilares	Lajes	Total	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Sis. Est. Com Laje Maciça	337,6	458,8	316,7	1113,0	1,00	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	335,9	427,9	125,4	889,3	0,99	0,93	0,40	0,80
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelaçada	306,5	459,2	168,3	933,9	0,91	1,00	0,53	0,84
Sis. Est. Com Laje Nervurada	209,7	568,3	691,4	1469,4	0,62	1,24	2,18	1,32

Observando o consumo de concreto nas vigas, nota-se que os sistemas com laje maciça e com laje pré-fabricada tipo trilho tiveram praticamente o mesmo consumo de

concreto nas vigas, isso porque a planta de forma desses dois sistemas são praticamente iguais. Já o sistema com laje pré-fabricada tipo treliça vence vãos maiores, podendo assim ser retirada algumas vigas, tornando o consumo de concreto neste elemento menor neste sistema. Já o sistema com laje nervurada por não ter vigas internas teve um volume de concreto das vigas 38% menor.

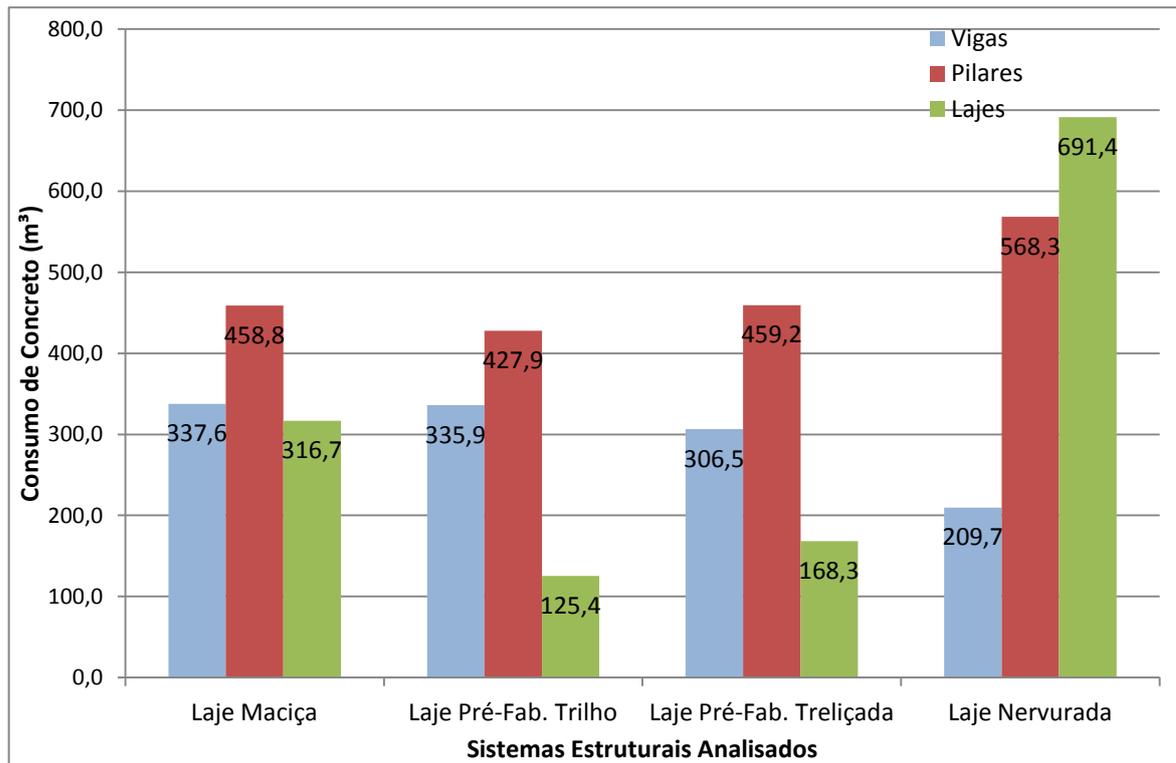
Nos pilares o sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo trilho foi 7% mais econômico em se tratando do consumo de concreto do que o sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo treliça e maciça. Semelhantemente ao consumo de aço, o menor consumo deve-se ao menor peso da estrutura. Na laje tipo treliça teve-se que aumentar as dimensões dos pilares para resistir a essas ações e evitar deformações acentuadas. E o sistema com laje nervurada teve um consumo de concreto 24% maior que o sistema com laje maciça nos pilares.

A grande diferença entre os consumos de concreto está nas lajes, onde o sistema pré-fabricado tipo trilho foi 60% mais econômico em volume de concreto que o sistema com laje maciça. E o sistema pré-fabricado tipo treliça foi 47% mais econômico nas lajes que o de maciça. Destaca-se que o consumo de concreto das vigotas e treliças não é computado. Assim há uma distorção nesta comparação.

Entre os sistemas com laje pré-fabricada, o tipo trilho foi mais econômico em consumo de concreto nas lajes, pois tem mais vigas que o tipo treliça, neste último por sua vez suas lajes precisam ser mais rígidas para vencer vãos maiores e receber as cargas mais elevadas. O sistema com laje nervurada teve um consumo de concreto nas lajes 118% maior que o sistema com laje maciça, isso deve-se a questão do sistema com laje nervurada ter utilizado capitéis, para descarregar as ações direto nas laje, e não ter vigas internas, tendo assim regiões com grandes maciços de concreto. No entanto, comparando o consumo total o aumento do volume de concreto é apenas 32% maior quando comparado o sistema nervurado com o de laje maciça.

No Gráfico 3 observa-se o consumo de concreto por sistema estrutural analisado, separando os consumos por elemento estrutural, primeiramente têm-se as vigas, após os pilares e por último as lajes.

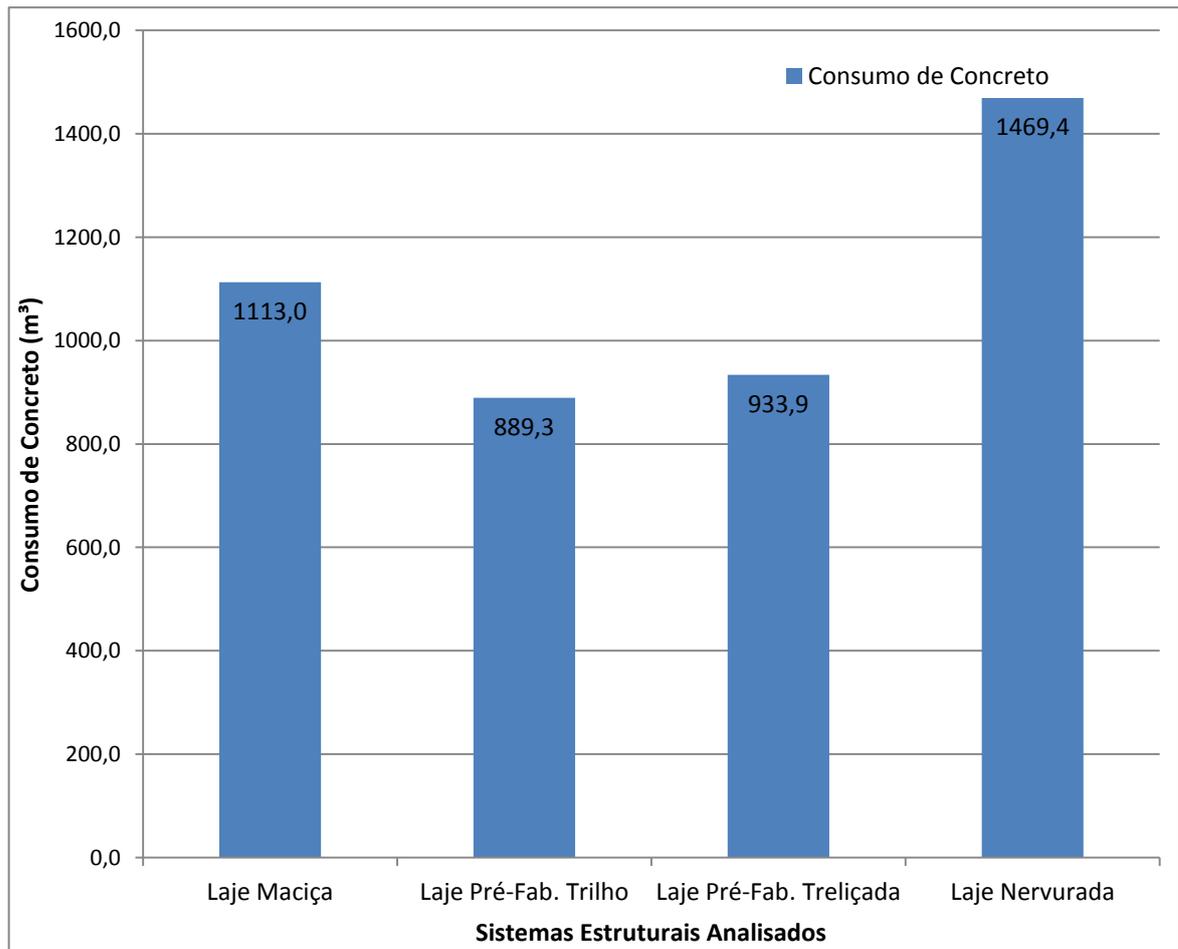
Gráfico 3: Consumo de concreto por elemento estrutural nos sistema analisados



Na análise do consumo total de concreto (Gráfico 4), pode-se observar que a diferença entre um sistema e outro é bem menor que nos elementos estruturais isolados, isso porque quando um dos elementos tem menos consumo de material, tornando-se menos rígido, outro elemento vai ter que compensar essa falta de rigidez, e na maioria das vezes a solução é aumentar a dimensão do elemento compensador.

O sistema com laje pré-fabricada tipo trilho teve um consumo de concreto 20% menor que o sistema com laje maciça, e o sistema com laje pré-fabricada tipo treliça teve o consumo de concreto 16% menor que o com laje maciça, isso se deu devido a estes dois sistemas serem mais leves e terem em suas lajes materiais inertes. O tipo trilho foi mais econômico em consumo de concreto que o tipo treliça porque seus vãos foram menores e a estrutura ficou mais enxuta. Já o sistema estrutural com laje nervurada teve um consumo de concreto 32% maior que o com laje maciça, isso se deve na maior parte por possuir grandes maciços de concreto na laje para transferir os esforços diretos das lajes para os pilares.

Gráfico 4: Consumo total de concreto nos sistema estruturais analisados



Mais uma vez destaca-se que o consumo de concreto das vigotas e treliças não foi computado na análise.

6.2.5 Consumo de Fôrmas

O consumo de fôrmas é muito importante na hora de se analisar a viabilidade de um sistema estrutural, pois atualmente a madeira é um material caro, e mais cara ainda é a mão de obra para executar as fôrmas.

A Tabela 13 traz o consumo de área de fôrma dos sistemas estruturais analisados, do lado direito os valores reais em (m²) de área de fôrmas, e a esquerda apresenta-se os valores relativos das mesmas, tendo como base o sistema estrutural com laje maciça.

Tabela 13: Consumo de Área de Fôrmas (m²)

Sistemas Analisados	Valores Reais					Valores Relativos				
	Vigas	Pilares	Vigas+ Pilares	Lajes	Total	Vigas	Pilares	Vigas+ pilares	Lajes	Total
Sis. Est. Com Laje Maciça	4912,6	5097,1	10009,7	3825,1	13834,7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	4906,9	5094,6	10001,5	0	10001,4	1,00	1,00	1,00	-	0,72
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelça	4380,4	5112,7	9493,1	0	9493,1	0,89	1,00	0,95	-	0,69
Sis. Est. Com Laje Nervurada	2589,3	5851,4	8440,7	0	8440,7	0,53	1,15	0,84	-	0,61

Se tratando de consumo de área de fôrma, nas vigas nota-se que o sistema com laje maciça e o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho possuem praticamente a mesma área de fôrmas, isso porque a disposição das vigas nos pavimento é igual para esses dois sistemas. Já o sistema com laje pré-fabricada tipo trelça possui uma área de fôrma menor para as vigas se comparado com os sistemas anteriores, isso porque esse sistema tem menos vigas, conforme já descrito. O consumo de fôrmas nas vigas do sistema com lajes nervuradas é 47% menor, isso porque esse sistema não tem as vigas internas.

O consumo de fôrmas nos pilares é muito semelhante nos quatro sistemas, sendo que os sistemas com laje maciça, com laje pré-fabricada tipo trilho e tipo trelça tem um consumo de fôrmas igual. O único que difere um pouco é o sistema com laje nervurada, que por não ter vigas internas, teve que ter pilares de dimensões maiores para dar à estrutura a rigidez adequada.

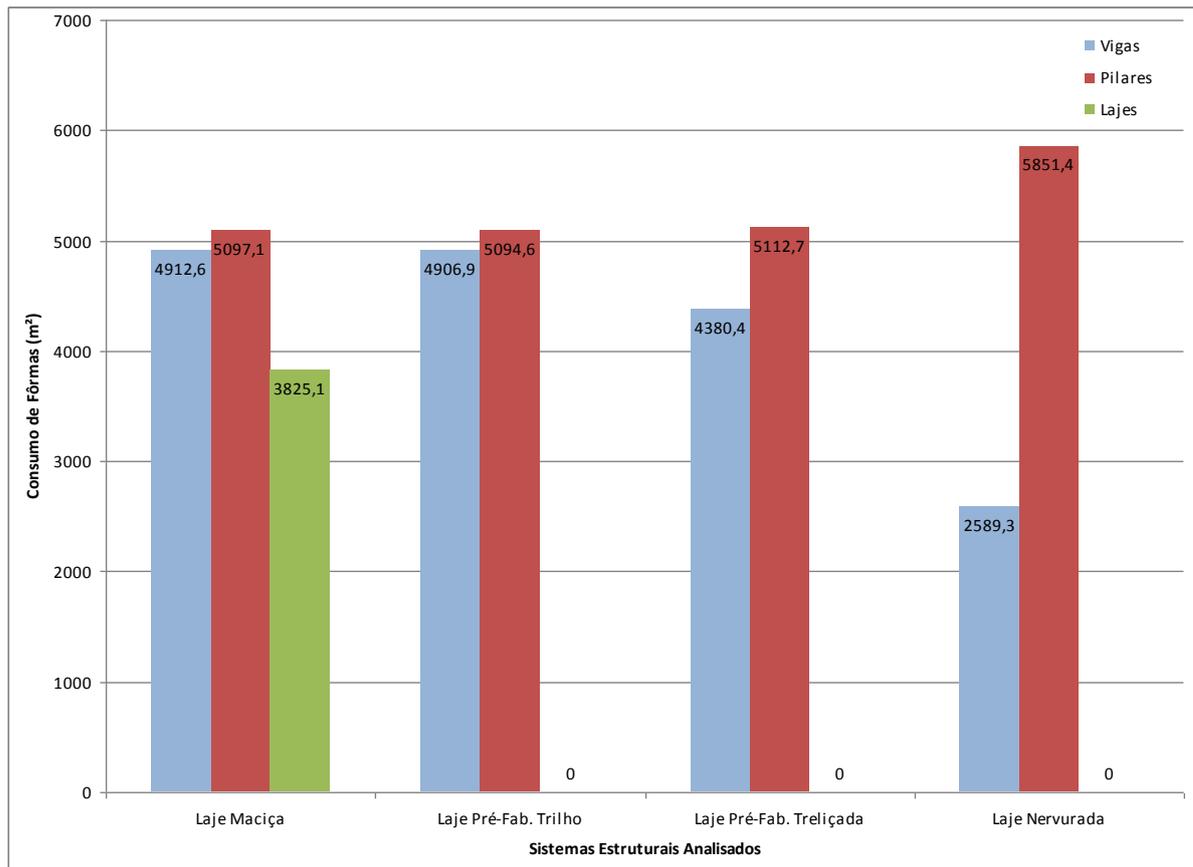
Se analisar a coluna que traz o consumo de fôrmas das vigas e pilares somados, pode-se observar que a variação entre os sistemas é menor do que quando analisa-se os elementos separados, isso porque o sistema estrutural precisa se equilibrar e um menor consumo de um elemento resulta em aumento do outro, ou seja, se o sistema tem menos vigas como é o caso do sistema com laje nervurada, os seus pilares tendem a ser de dimensões maiores, para dar a rigidez adequada ao pórtico espacial.

Nas lajes é que há uma grande diferença entre os sistemas no consumo de formas, as lajes pré-fabricadas, tanto a tipo trilho quando a tipo trelça não necessitam de fôrma na execução das lajes, por mais que use-se escoramentos, estes não foram computados. Já o sistema com lajes nervuradas utiliza fôrmas de polipropileno e escoramentos, que também não foram computados, ainda, as fôrmas que são necessárias para executar os capitéis também não foram computadas. As lajes maciças têm uma área de formas de 222,97 m² por pavimento, as nervuradas de 238,43 m², as pré-fabricadas tipo trilho de 221,45 m² e a tipo trelça de 226,26

m². Os sistemas com lajes pré-fabricadas levam vantagem em comparação com o de laje maciça e nervurada, pois eles não precisam de fôrmas nas lajes.

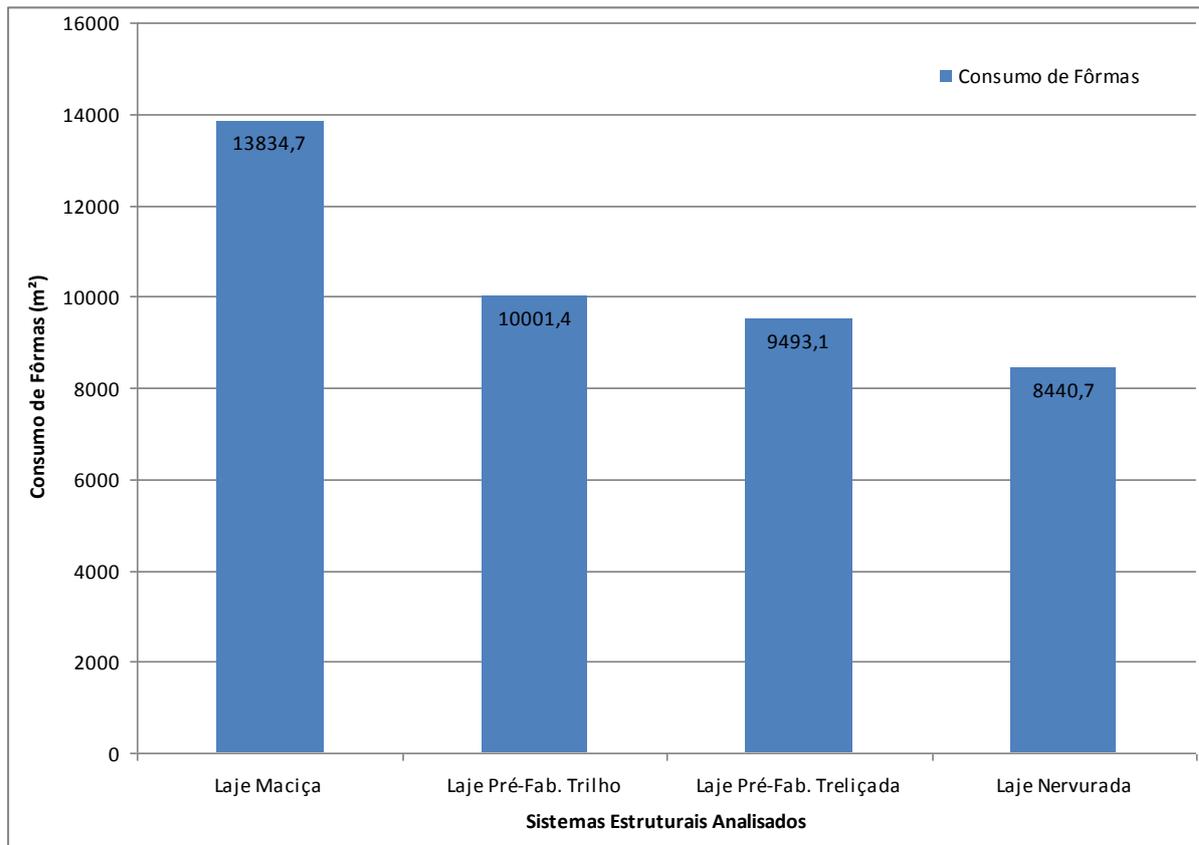
No Gráfico 5, pode-se observar o consumo de área de fôrmas dos sistemas analisados, dividindo esse consumo por cada elemento estrutural, sendo eles vigas, pilares e lajes.

Gráfico 5: Consumo total de concreto nos sistema estruturais analisados



No consumo total (Gráfico 6) de fôrmas dentro dos quatro sistemas analisados ocorre uma grande variação. O sistema com laje pré-fabricada tipo trilho tem um consumo de fôrmas de 28% menor em relação ao sistema com laje maciça, isso porque o tipo trilho não necessita de fôrmas nas lajes. O sistema com laje pré-fabricada tipo treliça, tem um consumo de 31% menor que o com laje maciça, isso devido a esse sistema também não precisar de fôrmas nas lajes e possuir menos vigas que o com laje maciça. E o sistema com laje nervurada tem um consumo de 39% a menos que o com laje maciça, isso devido a esse sistema não ter as vigas internas, e utilizar as fôrmas de polipropileno, as quais não são avaliadas neste estudo.

Gráfico 6: consumo total de fôrmas nos sistema estruturais analisados



6.2.6 Consumo Total dos Materiais

Nas Tabela 14 e Tabela 15 mostradas abaixo nota-se que o sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo trilho foi o que teve menor consumo de aço e concreto, seguido pelo sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo treliça, pelo sistema estrutural com laje maciça e, por fim, o sistema estrutural com laje nervurada que foi o que apresentou o maior consumo desses materiais. Em se tratando de fôrmas de madeira, o sistema com laje nervurada foi o mais econômico, mas vale salientar que neste sistema as fôrmas das lajes não foram computadas, e também não foram computadas as áreas de formas dos capitéis, que são regiões maciças de concreto. Em seguida vem o sistema pré-fabricado com laje treliçada, pois não necessita de fôrmas nas lajes e tem menos vigas. Na sequencia o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho que não tem fôrmas nas lajes. E por último, com o maior consumo de fôrmas, o de laje maciça.

Tabela 14: Resumo do Consumo Total dos Materiais

Sistemas analisados	Aço (Kg)	Concreto (m ³)	Fôrmas (m ²)
Sis. Est. Com Laje Maciça	101335,3	1113,0	13834,7
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	84047,0	889,3	10001,4
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelça	85608,3	933,9	9493,1
Sis. Est. Com Laje Nervurada	107707,0	1469,4	8440,7

Na Tabela 15 mostra-se os coeficientes relativos dos consumos de material analisados, que podem ser utilizados na elaboração de orçamentos por engenheiros na hora de escolher a melhor alternativa estrutural. Nota-se que todos os coeficientes levam em conta como base o sistema com laje maciça.

Tabela 15: Resumo do Consumo Total dos Materiais em Valores Unitários

Sistemas analisados	Aço (Kg)	Concreto (m ³)	Fôrmas (m ²)
Sis. Est. Com Laje Maciça	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	0,83	0,80	0,72
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelça	0,84	0,84	0,69
Sis. Est. Com Laje Nervurada	1,06	1,32	0,61

6.2.7 Índices de Consumo de Materiais

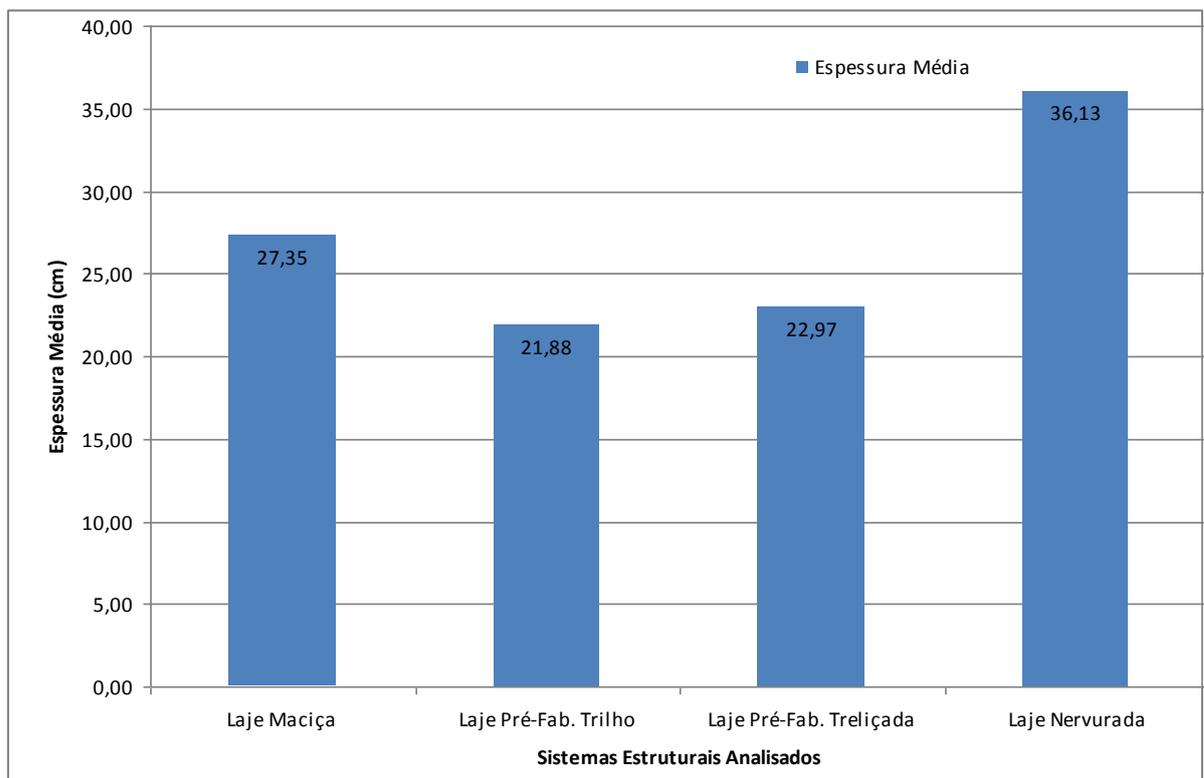
Neste subcapítulo são apresentados quadro índices de consumo de material, são eles: espessura média, taxa de aço I, taxa de aço II, e taxa de fôrmas. A Tabela 16 traz esses índices, onde a espessura média é uma espessura média de concreto que teria uma laje com área igual à da edificação, taxa de aço I é a quantidade de aço em (Kg), por volume de concreto em (m³), a taxa de aço II é a quantidade de aço em (Kg), por área construída de fôrma, e a taxa de fôrmas é a área de fôrmas por área construída da edificação.

Tabela 16: Índices de Consumo de Material

Sistemas Analisados	Valores Reais (m ²)				Valores Unitários			
	Espessura Média (cm)	Taxa de Aço I (Kg/m ³)	Taxa de Aço II (Kg/m ²)	Taxa de Fôrma (m ² /m ²)	Espessura Média	Taxa de Aço I	Taxa de Aço II	Taxa de Fôrma
Sis. Est. Com Laje Maciça	27,35	91,05	24,92	3,40	1,00	1,00	1,00	1,00
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trilho	21,88	94,51	20,67	2,46	0,80	1,04	0,83	0,72
Sis. Est. Com Laje Pré-Fab. Tipo Trelça	22,97	91,66	21,05	2,33	0,84	1,01	0,84	0,69
Sis. Est. Com Laje Nervurada	36,13	73,30	26,48	2,08	1,32	0,81	1,06	0,61

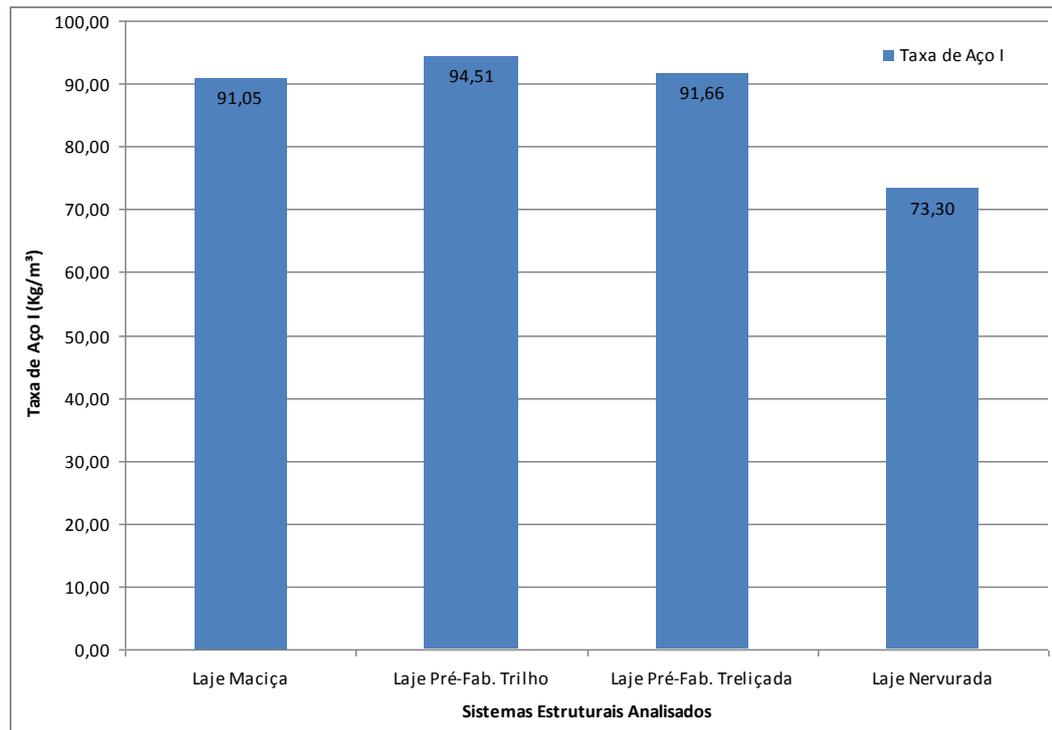
No Gráfico 7, observa-se que a espessura média dos sistemas com laje pré-fabricada tipo trilho e trelça são respectivamente 20% e 16% menores que a do sistema com laje maciça, e que o sistema com laje nervurada é 32% maior a espessura média que a com laje maciça.

Gráfico 7: Espessura média por sistema estrutural analisado



Na taxa de aço I (Gráfico 8), os sistemas com laje maciça e com lajes pré-fabricadas tipo trilho e trelça são semelhantes, havendo pouca variação entre eles, já o sistema com laje nervurada apresentou a taxa de aço I 19% menor que o sistema com laje maciça, isso significa que ele gastou menos aço por metro cúbico de concreto.

Gráfico 8: Taxa de aço I por sistema estrutural analisado



Analisando-se a taxa de aço II (Gráfico 9), foi observa-se que o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho foi 17% menor que a com laje maciça, e a tipo treliça 16% menor, ou seja, as lajes pré-fabricada tiveram um consumo de aço por área de fôrma construída menor que os demais. E o sistema com laje nervurada teve uma taxa de aço II semelhante a com laje maciça, sendo apenas 6% maior.

Por último no Gráfico 10 observa-se a taxa de fôrma, como esperado o sistema que teve a maior taxa de fôrma foi o com laje maciça. Em seguida vieram os sistemas com lajes pré-fabricadas, tipo trilho e após a tipo treliça com respectivamente 28% e 31% menores que a primeira. O sistema que apresentou a menor taxa de fôrmas foi o sistema com laje nervurada, pelos motivos já citados anteriormente.

Gráfico 9: Taxa de aço II por sistema estrutural analisado

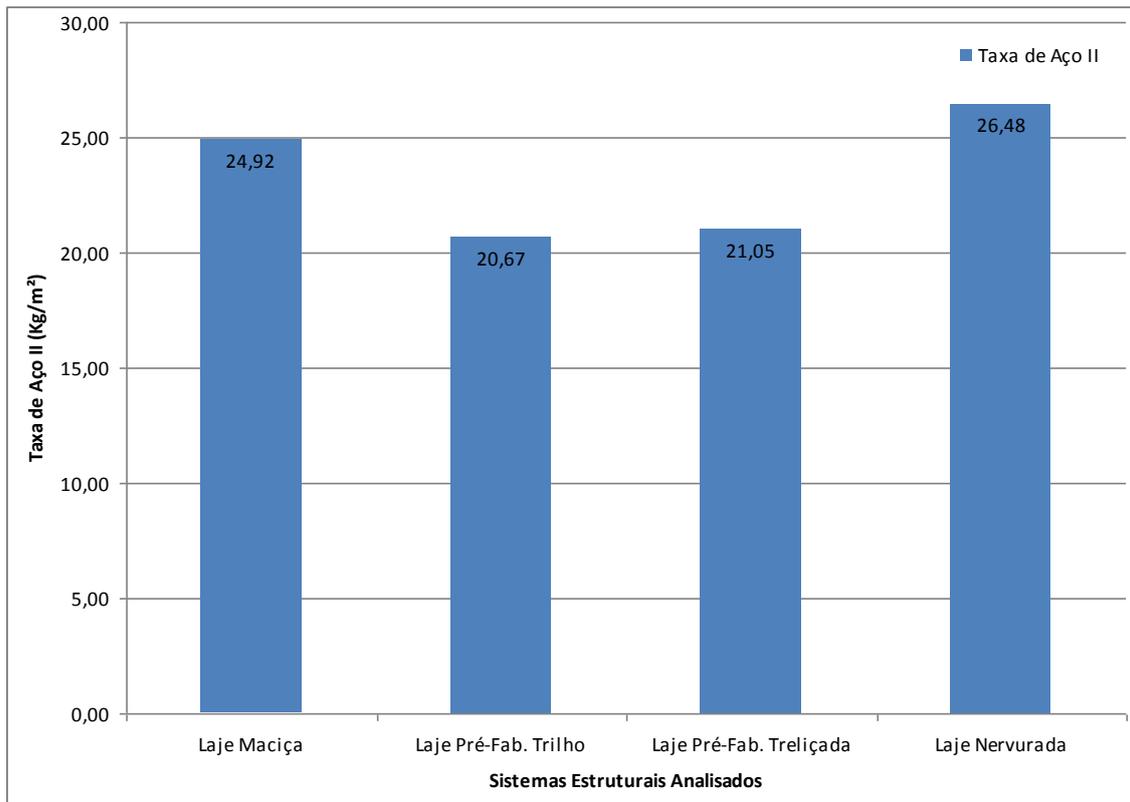
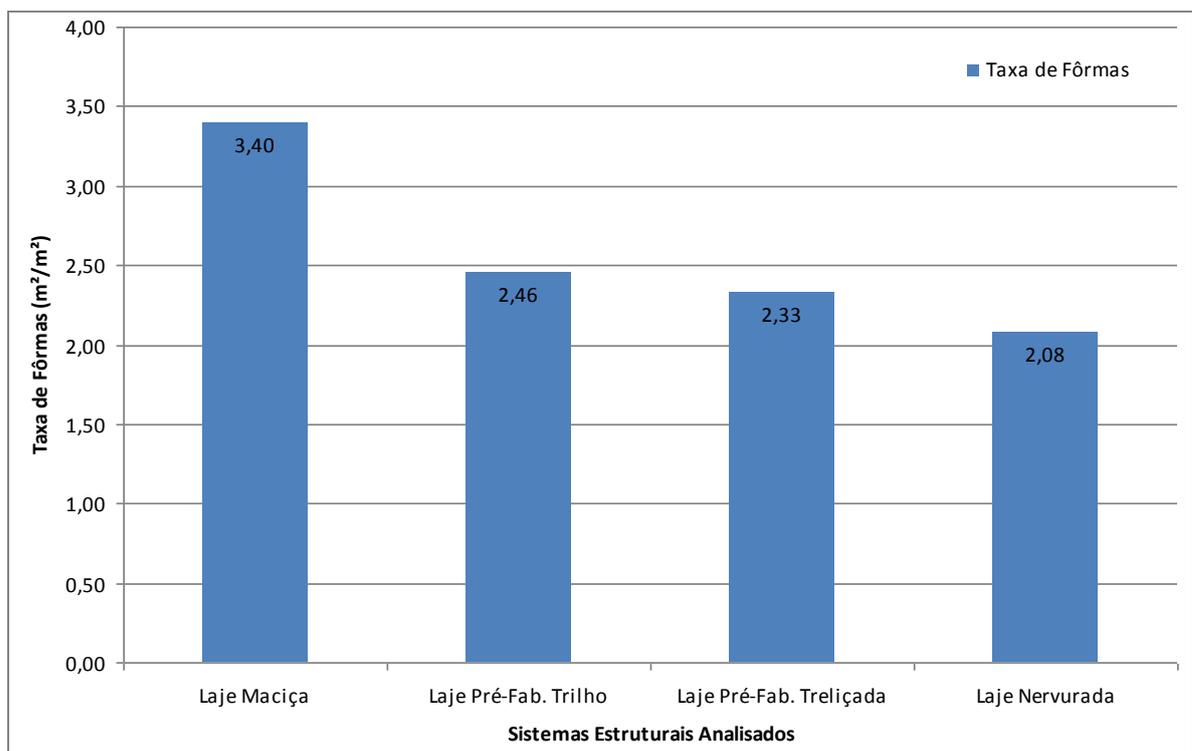


Gráfico 10: Taxa de fôrmas por sistema estrutural analisado



7 CONCLUSÕES

Analisando-se todas as etapas desenvolvidas neste trabalho, pode-se notar que elas foram realizadas com sucesso, e que foram alcançados os objetivos propostos. Na análise dos consumos de materiais, com as tabelas e gráficos gerados, chegou-se a conclusão que se tratando do consumo de aço, o sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo trilho foi o mais econômico, tendo este um consumo de aço 17% menor que o sistema estrutural com laje maciça que foi tomado como base para as análises. O sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo treliça vem logo atrás, sendo 16% menor o consumo de aço que o com laje maciça, e o sistema que mais consumiu aço foi o com laje nervurada com vigas de bordo e capitéis no interior (laje lisa), tendo um consumo de aço 6% maior que o com laje maciça.

No consumo de concreto, o sistema mais econômico também foi o com laje pré-fabricada tipo trilho, tendo um consumo desse material 20% menor que o sistema com laje maciça. Após, também vem o sistema estrutural com laje pré-fabricada tipo treliça, tendo um consumo de concreto 16% menor que o com laje maciça, e o sistema que mais consumiu aço, foi o com laje nervurada com vigas de bordo e capitéis no interior, tendo ele um consumo 32% maior que o com laje maciça. No entanto cabe destacar que nos sistemas com laje pré-fabricada não foi computado o consumo de concreto das vigotas.

O sistema com laje nervurada com vigas de bordo e capitéis no interior apresentou um consumo de aço e concreto maior que os demais, mas pode ser viável quando a construção exige uma flexibilidade grande dentro do pavimento, ou em edificações onde há uma variação grande entre a disposição das peças de andar para andar, como hospitais e empresas, sem falar que arquitetonicamente dá uma liberdade maior as construções, por não haver as vigas internas.

A análise do consumo das fôrmas apresentou grande variação de um sistema para o outro, o sistema que teve um menor consumo de fôrmas de madeira foi o com laje nervurada, mas em compensação ele precisa de fôrmas de polipropileno para as lajes, que não foram analisadas neste trabalho. O sistema com laje pré-fabricada tipo treliça foi o segundo mais econômico em se tratando de fôrmas, pois além de não precisar das mesmas na laje, teve menos vigas que o com laje tipo trilho e o com laje maciça. O sistema com laje pré-fabricada tipo trilho por sua vez foi 28% mais econômico que o com laje maciça, pois ele não utiliza fôrmas nas lajes. E como se esperava o sistema que mais consumiu área de fôrmas foi o com laje maciça.

Os índices apresentados trouxeram informações importantes para as comparações. O que teve menor espessura média foi o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho ($21,88 \text{ m}^3/\text{m}^2$), a menor taxa de aço I foi do sistema com laje nervurada ($73,3 \text{ kg}/\text{m}^3$), a menor taxa de aço II foi o sistema com laje pré-fabricada tipo trilho ($20,67 \text{ kg}/\text{m}^2$) e a menor taxa de fôrmas foi do sistema com laje nervurada ($2,08 \text{ m}^2/\text{m}^2$).

O estudo do consumo de material em uma edificação de grande altura é de grande utilidade para que os engenheiros projetistas e calculistas deste tipo de estruturas possam analisar o consumo de materiais necessários para cada sistema através de um projeto inicial. Entretanto, podem utilizá-lo também no estudo da melhor opção estrutural a ser adotada, podendo utilizar os coeficientes comparativos descritos neste trabalho (Tabela 15) para compor os seus orçamentos, e decidir pela opção mais adequada para a região em que estão atuando.

8 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. T. Análise de alternativas para edifícios em concreto armado. 1998. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.
- ARAÚJO, J. M. Curso de Concreto Armado. Ed. Dunas. 2ª ed. Vol. 4. Rio Grande, RS: 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - procedimentos. Rio De Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio De Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - Procedimento. Rio De Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações - procedimentos. Rio De Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado - especificações. Rio De Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - procedimentos. Rio De Janeiro, 2003.
- BASTOS, P. S. S. Fundamentos do Concreto Armado. Material Didático. 2006. Disponível em:< <http://www.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2012.
- BORGES, J. U. A. Critérios de projeto de lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas. 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CARVALHO, M. C. Análise Comparativa Estrutural e Econômica Entre as Lajes Maciça, Nervurada Treliçada e Nervurada com Cuba Plástica em um Edifício de Pavimentos. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Feira de Santana. 2012.
- CARVALHO, R. C. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. 3. Ed, São Carlos, SP: Editora da UFSCAR, 2004.
- CORRÊA, M. R. S. Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de edifícios. 1991. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Carlos, São Carlos.
- DUMÊT, T. B. Estruturas de Concreto I – Fundamentos do Concreto Armado. Material Didático. Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica. Salvador.
- FARIA, M. P. Estruturas para edifícios em concreto armado: análise comparativa de soluções com lajes convencionais, lisas e nervuradas. 2010. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FLÓRIO, M. C. Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado. 2004. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- GIONGO, J. S. Concreto Armado: Projeto Estrutural de Edifícios. USP. São Paulo. 2007.

- PNAD. Deficit habitacional no Brasil é de 5,5 milhões de moradias. Disponível em:<
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/>>.
Acesso em: 30 ago. 2012.
- PRADO, J.F.A. Estruturas de edifícios em concreto armado submetidos a ações verticais e horizontais. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - EESC - USP. 1995.
- SANTOS, K. A. Proposta De Critérios Para Escolha De Sistemas Estruturais Através De Uma Análise De Custo. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2011.
- SILVA, A. R. Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado. 2002. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte.
- SPOHR, V. H. Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas. 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- VIZOTTO, I.; SARTORTI, A. L. Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas: análise comparativa. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.15, p.19-28, abr, 2010. Disponível em:<www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art3_N15.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2012.