

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO E AÇO**

**“ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETO
CONVENCIONAL E CONCRETO LEVE NO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO.”**

Rinaldo Martins Lemos

2017

AGRADECIMENTOS

“O senhor é meu pastor, nada me faltará.”

Com eterna gratidão, aos meus pais Cássio e Conrada, exemplos de trabalho e dedicação, sem eles nada seria possível.

A minha amada esposa Eduizia, por sempre estar ao meu lado, me incentivando e apoiando.

A minha filha Júlia pelos momentos de carinho e descontração, fonte de estímulo para que eu me torne uma pessoa melhor a cada dia.

Ao professor Gabriel de Oliveira Ribeiro, pelos ensinamentos e orientação. A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas, que representam a UFMG, agradeço pela formação profissional e acadêmica, pela atenção dispensada, pela palavra amiga, pelos recursos e condições oferecidas.

“Construímos muros demais e pontes de menos.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais, lajes e vigas, das estruturas de edifícios. Os pilares, porém, são sempre em concreto convencional. Ao final do dimensionamento, são feitas comparações do comportamento estrutural, do consumo de materiais e o custo final estimado para a construção da referida estrutura, edifício de 32 apartamentos e 32,25 m de altura. Para o concreto armado leve, adotou-se um peso específico de $1.789,66 \text{ kg/m}^3$, e uma resistência característica à compressão de 30 MPa. O software empregado nos processamentos foi o Eberick V10.

Em cada modelo estrutural adotado, os resultados obtidos indicaram redução no consumo de armadura nos elementos estruturais e as cargas na fundação foram significativamente menores nos edifícios com concreto leve.

Palavras Chave: Estruturas de edifícios, concreto convencional, concreto leve.

NOTAÇÕES

Nos capítulos deste trabalho, quando não for indicada, prevalecerá a seguinte notação:

A_s = área tracionada de aço na seção;

A'_s = área comprimida de aço na seção;

A_{sw} = área da seção transversal dos estribos;

b_w = largura da seção; d = altura útil da seção;

E_{cc} = módulo de elasticidade secante do concreto comum;

E_{cl} = módulo de elasticidade secante do concreto leve;

E_s = módulo de elasticidade do aço;.

$(EI)_{eq}$ = rigidez equivalente da peça (NBR-6118);

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{ct} = resistência do concreto à tração direta ;

f_{ctd} = resistência de cálculo do concreto à tração direta;

f_{cltm} = resistência média à tração do concreto leve;

f_{ctm} = resistência média à tração do concreto comum;

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço;

f_{ywk} = resistência característica ao escoamento do aço da armadura transversal;

F_d = valor de cálculo da combinação das ações;

F_{gk} = cargas permanentes diretas (peso próprio, revestimento e alvenarias);

F_{q2k} = ações provenientes da carga de vento;

h = altura total da seção;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto (NBR-6118);

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II (NBR-6118);

l = vão da laje ou viga para efeito da verificação da flecha limite;

l_{bcc} = comprimento de ancoragem reta à tração, no concreto comum;

l_{bcl} = comprimento de ancoragem reta à tração, no concreto leve;

M_a = momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas bi-apoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços;

M_f = momento de fissuração (NBR-6118);

R_{cc} = resultante de compressão do concreto;

R_{sc} = resultante de compressão no aço;

R_{st} = resultante de tração do aço;

s = espaçamento dos estribos;

x = posição da linha neutra;

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

α = inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal;

ϵ_c = deformação do concreto à compressão;

ϵ_s = deformação específica do aço;

ϕ = diâmetro da barra;

γ_c = coeficiente de minoração do concreto;

γ_s = coeficiente de minoração do aço;

ϕ_{cc} = coeficiente de fluência do concreto comum;

ϕ_{cl} = coeficiente de fluência do concreto leve;

ν = coeficiente de Poisson;

ρ_{cl} = massa específica do concreto leve;

ρ_{\min} = taxa mínima de armadura;

$\sigma_{Rd,\max}$ = tensão máxima na biela comprimida de concreto;

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	2
RESUMO	3
NOTAÇÕES	4
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2. INTRODUÇÃO	6
2.1 Concretos de baixa massa específica	7
2.2 Concreto de moderada resistência	7
2.3 Concreto estrutural leve.....	8
3. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	9
4. OBJETIVOS	11
5. DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS CAPÍTULOS.....	13
6. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL LEVE.....	14
7. CONCEITUAÇÃO DE CONCRETO ESTRUTURAL LEVE.....	16
8. MATERIAIS CONSTITUINTES E DOSAGEM DO CONCRETO ESTRUTURAL LEVE.....	17
9. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	21
9.1 Consistência.....	21
9.2 Massa Específica do Concreto Leve.....	21

9.3	Cura do Concreto Leve	22
10.	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	23
10.1	Resistência à Compressão	23
10.2	Resistência à Tração	25
10.3	Módulo de Elasticidade Estático Secante.....	26
10.4	Coefficiente de Poisson	29
10.5	Fluência.....	29
11.	ESTRUTURAS ESTUDADAS	33
11.1	Considerações Iniciais	33
11.2	Projeto Arquitetônico Escolhido	33
11.3	Estrutura PES	35
12.	CARGAS ADOTADAS.....	39
12.1	Carregamento Vertical.....	39
12.2	Carregamento Lateral.....	40
13.	MODELO ESTRUTURAL ADOTADO	41
13.1	Principais Considerações.....	41
14.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	42
14.1	Considerações iniciais.....	42
14.2	PROJETO PES CC - Resumo de Materiais.....	42
14.3	PROJETO PES CC - Resumo de Custos.....	45
14.4	PROJETO PES CL - Resumo de Materiais.....	47
14.5	PROJETO PES CL - Resumo de Custos.....	50

15.	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	52
16.	CARGAS NAS FUNDAÇÕES.	57
17.	PROJETO PES CC – DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA.....	59
18.	PROJETO PES CL – DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA.....	63
19.	COMPARAÇÃO FINAL.....	67
20.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	68
20.1	Considerações Iniciais	68
21.	CONCLUSÃO FINAL	69
22.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	70
	BIBLIOGRAFIAS E REFERÊNCIAS.....	71

1. Considerações Iniciais

Nestes últimos cinquenta anos, o concreto armado convencional, de densidade normal, tem sido o material estrutural mais utilizado no Brasil. A razão deste fato, de acordo com SÜSSEKIND (1980), está associada às grandes vantagens do material do qual se destacam:

- a) Economia, basicamente a mais importante dentre todas;
- b) Adaptação a qualquer tipo de forma e facilidade de execução, permitindo total liberdade à concepção arquitetônica;
- c) Excelente solução para se obter de modo direto, e sem necessidade de posteriores ligações, uma estrutura monolítica, hiperestática, apresentando, por esta razão, maiores reservas de segurança;
- d) Manutenção e conservação praticamente nulas, em associação à grande durabilidade; e
- e) Resistência a efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos.

Por outro lado, a grande desvantagem do concreto armado convencional, também segundo SÜSSEKIND (1980), é o seu elevado peso próprio. A utilização de concretos de menor densidade surge, portanto, como a solução natural para esse problema.

2. INTRODUÇÃO

O concreto feito com agregados leves é chamado de concreto leve. De acordo com NEVILLE (1997), os intervalos típicos de massa específica de concretos secos ao ar com agregados leves podem ser vistos na FIG.1.1

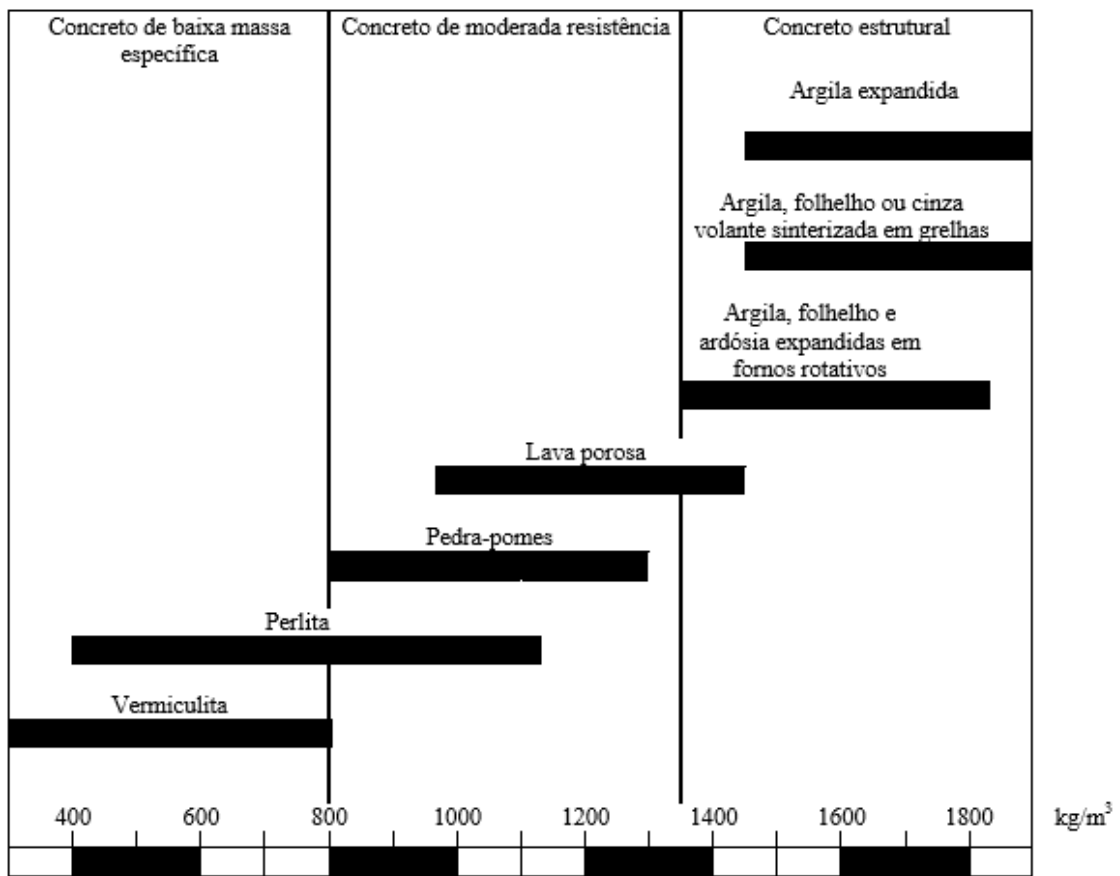


FIGURA 1.1 – Classificação dos concretos leves quanto à sua massa específica aproximada

Os concretos feitos com agregados leves, de acordo com a figura 1, são classificados em:

2.1 Concretos de baixa massa específica

Estes concretos leves pouco densos são utilizados, segundo SOBRAL (1987), principalmente para isolamento térmico, não sendo usados para fins estruturais. Tais concretos, com baixas massas específicas, raramente excedendo 800 kg/m^3 , possuem coeficientes de condutividade térmica baixos, que lhes conferem boas características de isolamento. Por outro lado, são baixos os valores da resistência à compressão, variando de 0,7 MPa a 7 MPa.

2.2 Concreto de moderada resistência

Segundo NEVILLE (1997), o concreto de moderada resistência, cuja resistência à compressão, em cilindros, varia de 7 MPa a 17 MPa, tem característica de isolamento térmica intermediária entre o de baixa massa específica e o estrutural, sendo normalmente usado para enchimento.

2.3 Concreto estrutural leve

São concretos tendo massa específica entre 1350 kg/m^3 e 1850 kg/m^3 , fabricados geralmente com argila expandida.

Neste estudo, o agregado leve adotado para a dosagem do concreto estrutural leve foi a argila expandida, produzida pela CINEXPAN – Indústria e Comércio Ltda, de Várzea Paulista, São Paulo. A argila expandida CINEXPAN é um agregado leve que se apresenta em forma de bolinhas de cerâmica leve e arredondada, com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida e resistente. As principais características da argila expandida CINEXPAN são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade, além de excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico.

3. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A grande desvantagem do emprego do concreto armado é seu elevado peso próprio. A fim de minorar esta desvantagem e, conseqüentemente, melhorar ainda mais as potencialidades do concreto armado no competitivo mercado da construção civil, o emprego do concreto estrutural leve se apresenta como a opção natural.

Além disso, a baixa condutividade térmica do concreto estrutural leve é um fato que merece destaque, já que ela proporciona um desempenho significativamente superior deste concreto em situação de incêndio. A baixa condutividade térmica dos concretos leves reduz o aumento da temperatura da armadura em caso de incêndio. A combinação de uma baixa condutividade térmica com um baixo coeficiente de dilatação térmica é benéfica no caso de exposição ao fogo, segundo NEVILLE (1997), pois o agregado feito de argila expandida é estável a temperaturas elevadas, uma vez que ele é fabricado a temperaturas acima de 1100°C.

Como a massa específica dos concretos de densidade normal varia entre 2200 kg/m³ e 2600 kg/m³, e a do concreto estrutural leve entre 1350 kg/m³ e 1850 kg/m³, o uso do concreto estrutural leve nas edificações pode representar uma significativa redução do peso próprio da estrutura, podendo essa redução chegar à faixa de 15% do peso total. Mesmo que o metro cúbico do concreto estrutural leve custe mais caro que o concreto de densidade normal, o custo final da estrutura poderá ser menor devido à redução do peso próprio da estrutura e do menor custo das fundações.

Foi baseado nestas premissas que diversas obras foram executadas com concreto estrutural leve, cuja opção foi devidamente estudada e adotada, por ser vantajosa. Dentre elas, pode-se citar:

- Tabuleiro da ponte São Francisco – Oakland nos EUA, que resultou na economia de três milhões de dólares em aço, MEHTA e MONTEIRO (1994);
- As lajes de piso do edifício Lake Point Tower, em Chicago, com 71 pavimentos, MEHTA e MONTEIRO (1994);
- O Australian Square, em Sidney, Austrália, uma torre circular de 50 pavimentos, onde o emprego do concreto estrutural leve proporcionou uma economia de 13% no custo da construção, MEHTA e MONTEIRO (1994);

- O edifício da Prudential Life, em Chicago - EUA, com 42 andares, onde foi adotado o concreto estrutural leve nas lajes de piso, SOBRAL (1987);
- O edifício do Hotel Staler, em Dallas - EUA, com 18 andares, onde foi adotado o concreto estrutural leve nas lajes de piso, SOBRAL (1987);
- Edifício Federal Post-Office, em Nova York EUA, onde foram usados cerca de 23000 m³ de concreto estrutural leve nas lajes, EVANGELISTA (1996).

O interesse no estudo do concreto estrutural leve tem aumentado muito no Brasil nos últimos anos, tendo sido produzidas algumas dissertações de mestrado na COPPE/ UFRJ, CASTRO (1971); LEVI (1974); CLÍMACO (1975); EVANGELISTA (1996) e na EE/UFMG, GOMES (2001). Os temas destas dissertações versam sobre os procedimentos de fabricação e as propriedades mecânicas do concreto estrutural leve, bem como do comportamento de lajes e vigas com ele fabricadas.

4. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa de estruturas de edifícios em concreto armado, empregando o concreto de densidade usual e o concreto estrutural leve. Em todos os casos a serem estudados, os pilares dos edifícios serão fabricados com concreto de densidade usual, enquanto as lajes e vigas serão ou em concreto estrutural leve ou em concreto convencional. Essa premissa deve-se ao fato de que a utilização do concreto estrutural leve tem sido mais vantajosa nas lajes e vigas, conforme consta na relação das edificações citadas anteriormente. No estudo comparativo, serão analisadas as diferenças entre os deslocamentos laterais e verticais obtidos, as cargas nas fundações, bem como os quantitativos de concreto, fôrma e aço empregados, e os custos envolvidos.

Neste estudo, os seguintes aspectos também serão abordados:

a) Primeiramente será desenvolvida a dosagem do concreto convencional e leve, segundo NEVILLE e J.J. Brooks, (2013) e Tartuce, (1989).

b) As composições de preço unitário para cada tipo de concreto, tanto o concreto convencional, quanto o concreto leve, foram desenvolvidas, com base nos preços da Tabela Sinapi, emitida pela Caixa Econômica Federal, em julho de 2017, como referência para precificação dos insumos envolvidos, tais como materiais, mão de obra e equipamentos. Quando houve necessidade, composições auxiliares foram desenvolvidas.

c) O projeto arquitetônico de um edifício residencial foi desenvolvido e a sua escolha se deu com base em um estudo de viabilidade realizado a partir da ABNT NBR 12.721: 2006 (Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios de edifícios). O referido estudo analisou a publicação CUB/m² realizada em dez/2015 pelo Sinduscon/MG, que serviu como base para uma estimativa de custos para modelos de edificações denominados projetos-padrões, e por fim identificação do modelo que demonstrou ser o mais viável economicamente, quando confrontado com o preço de venda, cujos dados foram obtidos junto ao IPEAD, publicação de outubro/2015, intitulada Pesquisa de Mercado imobiliário de Belo Horizonte: construção e comercialização. Ao longo da análise foram escolhidos 3 modelos de projetos-padrão, sendo todos multifamiliares, residenciais. Para cada modelo estimamos os custos do empreendimento, a velocidade de vendas, o valor da venda e do aluguel. Foram calculados a Taxa Interna de Retorno e/ou VPL

para cada um dos modelos. O projeto-padrão escolhido consiste em um edifício residencial com dois níveis de garagem e oito pavimentos-tipo. Garagem 2: Escada, elevadores, 32 vagas de garagem cobertas. Garagem 1: 32 vagas de garagem, Escada, elevadores, hall de entrada, banheiro, central de gás e guarita. Pavimento-tipo: Hall de circulação, escada, elevadores e quatro apartamentos por andar, com dois dormitórios, sendo ambos com suíte, sala estar/jantar, banheiro social, cozinha, área de serviço e varanda.

d) O dimensionamento da estrutura de concreto armado, foi desenvolvida através do programa Eberick V10 para a referida edificação, utilizando primeiramente o concreto armado convencional, denominado projeto PES CC e para qual definiu-se o peso específico de $2.360,26 \text{ kg/m}^3$, através da dosagem experimental. Num segundo momento, desenvolveu-se o dimensionamento da mesma estrutura, porém utilizando concreto leve para todos os elementos horizontais, como lajes e vigas, denominado projeto PES CL, cujo peso específico adotado para o concreto leve foi de $1.789,66 \text{ kg/m}^3$. Os custos para o concreto, forma e aço levantados, conforme mencionado no item b, introduzidos no sistema Eberick, que gerou a estimativa de custos para os dois modelos ao final do dimensionamento, bem como o consumo de materiais, cargas nas fundações e deslocamentos dados pela Análise de Estabilidade Global.

5. DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS CAPÍTULOS

O capítulo 7 apresenta as notas históricas relacionadas ao uso do concreto estrutural leve, bem como a sua caracterização, contendo os materiais constituintes, dosagem, massa específica, resistência à compressão e à tração. Contém também os comentários sobre o módulo de elasticidade do concreto leve, coeficiente de Poisson e fluência.

O capítulo 8 descreve o projeto arquitetônico escolhido, as estruturas analisadas com as devidas cargas aplicadas e as combinações das ações.

O modelo estrutural adotado está descrito no capítulo 9.

No capítulo 10 estão apresentados os resultados dos processamentos das estruturas estudadas, bem como as análises comparativas desses resultados.

As conclusões e recomendações oriundas deste trabalho e as sugestões para pesquisas futuras estão apresentadas no capítulo 11.

6. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

As primeiras aplicações do concreto leve armado foram durante a 1ª Guerra Mundial, na construção de navios e barcos pela Emergency Fleet Building Corp [ACI 213 (1999)]. Esse concreto, empregando argila expandida como agregado, possuía uma resistência de 34,5 MPa e uma massa específica de 1760 kg/m³.

Durante a década de 20, dois importantes edifícios foram construídos com concreto leve armado. O Park Plaza Hotel em St. Louis (EUA) e o edifício Southwestern Bell Telephone Building, em Kansas City (EUA) [ACI 213 (1999)].

No começo da década de 30, o concreto leve foi usado na pista superior da ponte “São Francisco – Oakland”, como uma solução econômica para o projeto da ponte. Durante a 2ª Guerra Mundial, a história se repetiu com a construção de 105 navios em concreto leve, com o uso de placas de aço em algumas partes consideradas essenciais [ACI 213 (1999)].

Imediatamente após a 2ª Guerra Mundial, vários estudos foram feitos, proporcionando um grande impulso na determinação das propriedades do concreto feito com diferentes tipos de agregados leves, visando a sua aplicação em peças estruturais, tais como tabuleiros de pontes e pré-moldados.

A Agência Nacional de Habitação dos Estados Unidos patrocinou vários estudos e pesquisas com o uso do concreto feito com agregados leves, e estudos paralelos foram realizados nos laboratórios da “National Bureau of Standards” e no “United States Bureau of Reclamation”, para determinação das propriedades do concreto feito com vários tipos de agregados para concreto leve. Estes estudos e o trabalho feito por Richard e Jansen, Washa e Wendt e outros, focaram sua atenção no uso da capacidade estrutural de alguns concretos leves, iniciando um renovado interesse por edifícios de andares múltiplos, pontes e produtos pré-fabricados, no começo da década de 50.

Em Cleveland, foi possível acrescentar 4 andares em um projeto de um edifício cujas fundações já tinham sido executadas, com o uso de concreto estrutural leve e consequente redução do peso da estrutura, não necessitando modificar as fundações.

Do mesmo modo, após o colapso da ponte de Tacoma Narrows, ela foi substituída por outra estrutura suspensa, projetada para incorporar as lajes da pista de rolamento, com o uso de concreto leve, sem necessidade de modificações nos pilares já existentes [ACI 213 (1999)].

Durante os anos 50, as superestruturas de muitos edifícios de vários andares foram projetadas, tirando vantagem do reduzido peso próprio do concreto leve. Como exemplo, podem ser citados os 42 andares do Prudencial Life, em Chicago, com as lajes de piso em concreto leve, e o Staler Hilton Hotel, em Dallas, com 18 andares, todo projetado em concreto estrutural leve [ACI 213 (1999)].

Tais aplicações em concreto leve, com funções estruturais, estimularam várias pesquisas sobre as propriedades do concreto leve por importantes organizações internacionais. Foi acelerada, nesta época, a construção de usinas que fabricam agregados leves. Hoje, a produção de agregados leves de alta qualidade é feita em vários países.

7. Conceituação de Concreto Estrutural Leve.

Segundo o ACI 211 (1990), o concreto estrutural leve é um concreto estrutural em todos os sentidos. Visando a redução do custo total, o concreto é feito com agregados leves, sendo seu peso específico aproximadamente igual a dois terços do peso específico do concreto feito com agregado normal. Desde que o objetivo primordial seja o baixo peso, as especificações limitam o peso específico máximo permissível do concreto, exigindo também uma resistência à compressão mínima aos 28 dias, para assegurar a qualidade estrutural do concreto leve.

Como base nessas premissas, o Guia de Concreto Estrutural com Agregado Leve do ACI 213 R-87 (1999) define como concreto estrutural leve aquele que tem resistência à compressão aos 28 dias de, no mínimo, 17 MPa, e massa específica, seca ao ar, também aos 28 dias, não superior a 1850 kg/m^3 .

8. Materiais Constituintes e Dosagem do Concreto Estrutural Leve.

O concreto estrutural leve, segundo o ACI 213 R-87 (1999), pode conter somente agregado leve, ou, por diversas razões, uma combinação de agregados leves e agregados normais. Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e outras propriedades, é frequente, na prática, usar areia comum como agregado miúdo e limitar o tamanho nominal máximo do agregado leve a 19 mm.

Segundo ROSSO (1973), os agregados leves para concreto estrutural, fabricado a partir de materiais naturais, são: vermiculita, ardósia e argila expandidas. A argila expandida é produzida por um tratamento térmico adequado que provoca um estado semiplástico, conhecido também como “ponto de vitrificação incipiente”. Elas se expandem, aumentando seu volume de 5 a 6 vezes, em consequência da formação de gases no interior da massa do material, formando, assim, uma estrutura altamente porosa ao resfriar-se. Para que o fenômeno ocorra, é necessário que as argilas contenham alguns componentes que produzam gases no momento em que o estado semiplástico é alcançado. As temperaturas necessárias para a expansão variam de 1100 a 1400°C e o pH deverá ser maior do que 5. As argilas expandidas podem ser produzidas como clínquer numa grelha móvel de sinterização, ou como agregado, de forma arredondada, em processo de pelotização, calcinação e expansão em forno rotativo. O segundo processo produz material de qualidades superiores.

A massa específica do agregado leve é a razão entre a massa de uma certa quantidade de material e o volume ocupado pelas partículas desta amostra. Neste volume são incluídos os vazios internos das partículas, mas não se incluem os vazios entre as partículas. O volume das partículas é determinado em função do volume que elas deslocam quando submersas na água. A penetração da água nas partículas durante o ensaio é evitada, segundo SOBRAL (1987), pela prévia saturação da massa do material.

A massa específica dos agregados leves varia com o tamanho das partículas: geralmente ela é maior para as partículas miúdas e menor para as partículas maiores, porque o teor de vazios dos grãos mais graúdos é maior do que os dos grãos menores.

A Norma da AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C 330 (1991) define que os agregados leves miúdos e graúdos não devem ter massa específica

no estado solto seco, maior que 1120 kg/m^3 e 880 kg/m^3 , respectivamente. Essa especificação contém ainda as exigências requeridas para os agregados com respeito a granulometria, às substâncias deletérias e às propriedades do agregado para a execução do concreto, tais como resistência, peso específico, retração por secagem e durabilidade do concreto contendo o agregado.

No Brasil, a fábrica “CINEXPAN” produz três tipos de agregado leve, à base de argila expandida: agregado esférico grosso e agregado fino, ambos com casca ou capeados; agregado moído, produzido pela britagem do material grudado. Tem-se, então, a produção dos seguintes tipos comerciais, denominados “PRODUTOS CINASITA”, próprios para uso em concreto estrutural:

- agregado graúdo com massa específica aparente (agregado no estado solto seco) entre 400 a 550 kg/m^3 , com tamanho do agregado entre 32 a 15 mm , equivalente à brita 2 e brita 1 respectivamente, para uso em concretos estruturais de qualquer natureza;
- agregado graúdo com massa específica aparente (agregado no estado solto seco) entre 600 a 700 kg/m^3 , com tamanho do agregado entre 15 a 6 mm , equivalente à brita 0, para uso em concretos estruturais de qualquer natureza;
- agregado miúdo com massa específica aparente (agregado no estado solto seco) entre 750 a 930 kg/m^3 , com tamanho do agregado abaixo de 5 mm , equivalente à areia grossa, para uso em composições com os demais tipos, nas diversas misturas do concreto.

A massa específica é uma das principais características do concreto leve. Como o concreto estrutural leve tem um grande volume de agregados, sua massa específica depende, principalmente, da massa específica dos grãos desses agregados. Uma curva granulométrica rica em partículas mais finas ou um diâmetro menor dos grãos dos agregados sempre conduzem, em ambos os casos, a uma maior massa específica e muitas vezes, a uma maior resistência à compressão do concreto. A substituição de agregados leves miúdos por areia natural, mais pesada, também aumenta a massa específica do concreto.

Segundo NEVILLE (1997), o concreto estrutural leve tem teores de cimento maiores do que os concretos normais, obviamente representando um custo adicional na fabricação do concreto. Porém, as reduções no custo da estrutura e das fundações, em função do menor peso

próprio e menor carga nas fundações, compensem este custo maior do material em comparação ao concreto convencional.

Neste sentido, o ACI 213 R-87 (1999) apresenta uma relação aproximada entre a resistência à compressão média e o teor de cimento. Essa relação pode ser vista na TAB. 2.1.

Tabela 2.1 – Relação aproximada entre a resistência à compressão média e o teor de cimento (ACI 213 R-87)

Resistência à compressão MPa	Cimento (kg/m ³)	
	Somente Agregado leve	Agregado leve e areia natural
17,2	240-305	240-305
20,7	260-335	250-335
27,6	320-395	290-395
34,5	375-450	360-450
41,4	440-500	420-500

NEVILLE (1997) destaca também que os agregados leves têm uma característica importante, não encontrada nos agregados normais, influenciando sobremaneira o aspecto da dosagem do concreto e as suas propriedades. É a capacidade de absorção de grandes quantidades de água e de permitir um ingresso da pasta de cimento fresco nos poros abertos da superfície das partículas. Por isso, é muito difícil determinar a parte da água que é absorvida diretamente pelo agregado e qual parte realmente participa da reação de hidratação do cimento. Daí a necessidade de se conhecer a capacidade e velocidade de absorção de água do agregado, bem como seu teor de água no momento da mistura. O conhecimento destes parâmetros, associado à consistência inicial da pasta de cimento e ao tempo entre a mistura e o lançamento, é importante na dosagem da água no concreto estrutural leve. É importante frisar que essa alta absorção de água, pelos agregados leves (10 a 20%), tem efeitos indesejáveis sobre a retração, fissuração superficial e a resistência à tração do concreto.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que a resistência à compressão de concretos com agregados leves está relacionada com o teor de cimento para um dado abatimento, e não com o fator água/cimento. Esses autores afirmam também que a resistência à compressão, para um dado teor de cimento e de água, pode ser aumentada reduzindo-se a dimensão máxima do agregado graúdo e/ou substituindo-se o agregado leve miúdo por areia natural.

Nos primeiros tempos do desenvolvimento do bombeamento de concreto, houve, segundo NEVILLE (1997), dificuldades com o uso de agregados leves. A pressão do bombeamento faz com que o ar contido nos poros interiores do agregado se contraia fazendo com que água da mistura penetre para o interior destes poros, ocasionando um rápido enrijecimento do concreto fresco. A solução encontrada foi fazer uma imersão prévia em água, por um mínimo de 24 horas, dos agregados leves.

Os concretos leves com agregados de uma mesma procedência têm, ainda, segundo NEVILLE (1997), grande uniformidade, sendo a dosagem, por esta razão, feita com grande confiabilidade, com um intervalo estreito de características.

No que tange a trabalhabilidade, deve-se fazer algumas observações importantes, pois no concreto leve, feito em misturas com alta fluidez, o agregado tende a segregar e flutuar na superfície. Para combater esse fenômeno, é necessário limitar o abatimento máximo na ordem de 50 a 70 mm.

Portanto, a especificação para o concreto estrutural leve deve conter, além da resistência à compressão mínima desejada, os valores máximos para a massa específica e o seu abatimento.

Na sua dissertação de mestrado, GOMES (2001) analisou o efeito do emprego do concreto estrutural leve em lajes mistas aço-concreto, com “steel deck”. A especificação do concreto exigia uma resistência característica à compressão de 20 MPa e uma massa específica máxima de 1800 kg/m³. Foram estudados traços para lançamento convencional (Traço I) e bombeamento (Traço III) do concreto. No caso de edifícios de andares múltiplos, esse último traço seria o utilizado, sendo, por este motivo, destacado e descrito a seguir.

Na composição do Traço III, foi usada a areia natural como agregado miúdo, e a argila expandida, usada como agregado graúdo, foi a Cinexpan 1000, da CINEXPAN, com tamanho máximo igual a 10 mm. O agregado foi mantido imerso em água por um período de 24 horas antes da mistura. A proporção em peso usada foi 1 : 2,34 : 0,99 (cimento, areia quartzosa e argila expandida), com consumo de cimento de 350 kg/m³ e relação água/cimento de 0,60. Optou-se por adotar um aditivo plastificante retardador (Chryso Bet 151), com a proporção de 0,35% em relação ao peso do cimento.

9. Propriedades no Estado Fresco

9.1 Consistência

Os concretos leves têm comportamento diferenciado dos concretos normais. Com um mesmo abatimento, em relação ao concreto normal, o concreto leve apresenta melhor trabalhabilidade. O fator de adensamento dos concretos leves subestima a trabalhabilidade, pois a força oriunda da gravidade que adensa o concreto é menor quando sua massa específica é menor.

A colocação de agregado miúdo normal (areia), substituindo parte do agregado leve, facilita sobremaneira o lançamento e o adensamento do concreto.

MEHTA e MONTEIRO (1994) indicam que, em geral, o lançamento, a compactação e o acabamento de concreto com agregado leve requerem esforço relativamente menor. Conseqüentemente, abatimentos de 50 a 70 mm podem ser suficientes para obter uma trabalhabilidade similar à do concreto normal, com abatimentos de 100 a 125 mm.

Um abatimento elevado pode causar segregação, com as partículas graúdas flutuando na parte superior. Assim, deve-se evitar a vibração muito prolongada do concreto no instante da concretagem.

Segundo o ACI 213 R-87 (1999), o “slump” é o fator mais importante para que se tenha uma boa superfície acabada de uma peça com concreto leve, e geralmente é limitado a 100 mm.

9.2 Massa Específica do Concreto Leve

A massa específica é uma das principais características do concreto leve. Porém, seu valor varia ao longo do tempo: é maior no estado fresco diminuindo com o endurecimento e a

idade do concreto. A TAB. 2.2 apresenta os resultados de massa específica, obtidos por GOMES (2001), para um concreto leve com características de bombeamento (Traço III). Pode-se notar que houve uma redução da massa específica, em aproximadamente 7%, do estado fresco para a idade de 28 dias do concreto, devido à perda de água. O valor utilizado neste trabalho é o correspondente aos 28 dias de idade.

Tabela 2.2 – Massa específica para concreto leve - Resultados de GOMES

Idade (dias)	Massa específica (kg/m ³)
Fresco	1795
7	1701
28	1673
32	1664
43	1657

9.3 Cura do Concreto Leve

A cura é responsável pela manutenção da água necessária às reações químicas que ocorre no período de endurecimento do concreto, principalmente nas idades iniciais. Uma boa cura é fundamental para obtenção de um concreto de boa qualidade.

O concreto leve tem o seu próprio suprimento de água no interior do agregado, o que permite a hidratação contínua do material. Com agregados leves, o intercâmbio de água na zona de transição entre o agregado poroso e a argamassa resulta numa cura úmida interna. Este processo de cura interna é possível quando o teor de umidade do agregado leve na mistura é pelos menos igual ao do atingido em um dia de imersão em água.

O concreto estrutural leve pode ser significativamente beneficiado por este processo de cura interna, devido à troca de água entre o agregado leve úmido e a pasta de cimento, resultando numa pasta de cimento bem hidratada na zona de transição.

10. Propriedades no Estado Endurecido

10.1 Resistência à Compressão

No concreto estrutural leve, a resistência à compressão e a massa específica são as propriedades mais importantes e, portanto, mais comumente analisadas.

Para um determinado agregado leve, existe, segundo NEVILLE (1997), uma ampla relação entre o teor de cimento do concreto e a resistência à compressão. Como o cimento tem massa específica maior do que o agregado leve, para um dado agregado, a resistência à compressão do concreto aumenta com o aumento de sua massa específica. MEHTA e MONTEIRO (1994) indicam que a substituição do agregado miúdo leve por areia natural leva a um aumento da massa específica do concreto e, portanto, a um aumento da resistência à compressão do concreto.

Neste sentido, a maioria das normas e especificações apresenta relações entre a massa específica do concreto leve e sua resistência à compressão. Nos Estados Unidos, por exemplo, as exigências da norma ASTM C 330 (1991) para massa específica do concreto estrutural leve e para resistência à compressão e à tração estão mostradas na TAB. 2.3.

Tabela 2.3 – Exigências para concreto estrutural leve (ASTM C330)

Máxima massa específica seca ao ar aos 28 dias (kg/m ³)	Resistência à tração mínima no ensaio de compressão diametral aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão mínima aos 28 dias (MPa)
Todos os agregados leves		
1760	2,2	28
1680	2,1	21
1600	2,0	17
Combinação de areia natural com agregado leve		
1840	2,3	28
1760	2,1	21
1680	2,1	17

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através de sua especificação EB-230 (1969), estabelece, conforme mostra a TAB. 2.4, relações entre a máxima massa específica do concreto leve e sua resistência à compressão aos 28 dias.

Em seus estudos, GOMES (2001) obteve as relações entre massa específica e resistência à compressão de um concreto leve com características de bombeamento (Traço III), sendo os resultados mostrados na TAB.2.5.

Tabela 2.4 – Exigências para concreto estrutural leve (ABNT EB-230)

Máxima massa específica seca ao ar aos 28 dias	Resistência à compressão mínima aos 28 dias
(kg/m ³)	(MPa)
1840	28
1760	21
1680	14

Tabela 2.5 – Relação entre massa específica versus resistência à compressão
Resultados de GOMES

Idade (dias)	Massa específica (kg/m ³)	Resistência à compressão média (MPa)
7	1701	18,58
28	1673	23,70
32	1664	24,16
43	1657	24,86

Pode-se observar, da tabela acima, que os resultados de resistência à compressão e massa específica, aos 28 dias de idade, satisfazem as exigências da ASTM e ABNT, bem como do estudo pretendido, em que se estabeleceu uma massa específica máxima de 1800 kg/m³, e resistência característica à compressão de 20 MPa.

10.2 Resistência à Tração

A resistência à tração direta do concreto é difícil de ser determinada em laboratório, já que o ensaio é de execução complicada e qualquer descuido pode alterar significativamente os resultados. Por isso, a resistência à tração do concreto é geralmente determinada, segundo SOBRAL (1987), pelo ensaio de compressão diametral, também chamado Ensaio Brasileiro, pois foi desenvolvido por Lobo Carneiro e sua equipe. O valor obtido é, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), uma medida relativa conveniente da resistência à tração do concreto. Por isso, diversas normalizações preconizam o emprego deste ensaio. No Brasil, este ensaio é regido pela norma NBR 7222 da ABNT.

Os resultados de ensaios realizados por Hanson, sobre a resistência à tração por compressão diametral de concretos leves curados em câmara úmida, de acordo com SOBRAL (1987) e com o ACI 213 R-87 (1999), são iguais ou próximos dos valores obtidos para concreto de densidade usual de mesma resistência à compressão. Porém, os resultados desses ensaios mostraram que a resistência à tração do concreto leve é significativamente reduzida quando a cura é feita ao ar. A razão para este fato se deve à maior relação água/cimento usada em concretos leves e à maior rapidez de secagem das camadas mais externas, de peças feitas com concreto leve, secas ao ar.

MEHTA e MONTEIRO (1994) ressaltam que, como no concreto de densidade usual, a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão decresce de maneira significativa com o aumento da resistência do concreto leve. Prova disso são as exigências da norma ASTM C330, apresentadas na TAB. 2.3.

Tabela 2.3 – Exigências para concreto estrutural leve (ASTM C330)

Máxima massa específica seca ao ar aos 28 dias (kg/m ³)	Resistência à tração mínima no ensaio de compressão diametral aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão mínima aos 28 dias (MPa)
	Todos os agregados leves	
1760	2,2	28
1680	2,1	21
1600	2,0	17
	Combinação de areia natural com agregado leve	
1840	2,3	28
1760	2,1	21
1680	2,1	17

A resistência à tração é um importante elemento na avaliação da fissuração do concreto. Como o concreto é um material heterogêneo, sua composição afetará não só a tensão de tração que provoca a fissuração, como também o mecanismo do processo.

De acordo com SOBRAL (1987), a aparência das fissuras nos concretos leves é bem diferente da que apresentam os concretos convencionais. As fissuras são mais regulares e lineares, indicando que a superfície de fratura passa tanto pela matriz quanto pelos grãos do agregado leve.

10.3 Módulo de Elasticidade Estático Secante

O módulo de elasticidade tem grande importância para o concreto estrutural leve em face da sua influência sobre as deformações das peças sujeitas à flexão, sobre a distribuição das forças internas nas peças sujeitas à compressão e sobre a carga crítica no caso de peças com propensão à ruína, devido à estabilidade elástica.

Uma importante característica do agregado leve é sua boa aderência à pasta hidratada de cimento que o envolve. Este fenômeno é devido a vários fatores, entre os quais pode-se

destacar a textura áspera da superfície dos agregados leves, a hidratação continuada do cimento, pela disponibilidade da água absorvida pelo agregado durante a mistura.

NEVILLE (1997) ressalta que, nos concretos de densidade usual, o módulo de elasticidade da pasta de cimento é, geralmente, bem menor que o módulo dos agregados. Porém, no concreto estrutural leve, os valores do módulo de elasticidade das partículas do agregado leve e da pasta de cimento são bastante próximos resultando numa melhor aderência na zona de transição agregado-pasta.

Ensaio de laboratório comprovam que, para um mesmo nível de resistência à compressão, o valor do módulo de elasticidade estático do concreto leve é consideravelmente menor que o valor obtido para um concreto de densidade convencional. Essa diferença se deve ao menor valor do módulo de elasticidade do agregado leve em relação ao agregado convencional. Portanto, as deformações de uma estrutura fabricada com concreto leve serão maiores se comparadas a estruturas construídas com concreto de densidade usual.

Com base nesse fato, as normas de projeto especificam relações para o módulo de elasticidade do concreto estrutural leve em função da massa específica e da resistência à compressão do concreto. Para resistências características à compressão entre 12 e 80 MPa, o EUROCODE 2 (1999) adota a seguinte expressão para avaliação do módulo de elasticidade estático secante, do concreto estrutural leve:

$$E_{cl} = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{0,333} \times (\rho_{cl} / 2400)^2 \text{ em GPa}, \quad (2.1)$$

onde:

f_{ck} = a resistência característica à compressão do concreto (em MPa), medida em corpos de prova cilíndricos;

e ρ_{cl} = massa específica do concreto leve, em kg/m^3 .

Já a norma ACI-318 (1999) sugere, para concretos com massa específica entre 1440 kg/m^3

e 2480 kg/m^3 e resistências à compressão de até 41 MPa, a seguinte expressão para o módulo de elasticidade estático secante:

$$E_{cl} = 43 \times 10^{-3} \times (\rho_{cl})^{1,5} \times (f_c)^{0,5} \text{ em MPa}, \quad (2.2)$$

onde:

f_c = a resistência à compressão do concreto (em MPa), medida em corpos de prova cilíndricos; e

ρ_{cl} = massa específica do concreto, em kg/m^3 .

Os valores encontrados pelas expressões do EUROCODE 2 e do ACI-318 podem divergir dos valores obtidos, experimentalmente, em até 20%.

Para concretos leves com resistências à compressão mais altas (≥ 50 MPa), a relação entre o módulo de elasticidade estático secante e a resistência à compressão é melhor representada, segundo EVANGELISTA (1996), pela expressão proposta por Zhang e Gjörv dada por:

$$E_{cl} = 9,5 \times (f_c)^{0,3} \times (\rho_{cl} / 2400)^{1,5} \text{ em GPa}, \quad (2.3)$$

onde:

f_c = a resistência à compressão do concreto (em MPa), medida em corpos de prova cilíndricos; e

ρ_{cl} = massa específica do concreto leve, em kg/m^3 .

Em sua pesquisa, GOMES (2001) realizou um estudo comparativo entre um concreto convencional com brita e um concreto estrutural leve, com características de bombeamento, porém de mesma resistência à compressão. Os resultados obtidos estão apresentados na TAB. 2.6.

Tabela 2.6 – Resultados obtidos por GOMES

Tipo de concreto	Massa específica no estado fresco	Massa específica aos 28 dias	Idade do concreto na data dos ensaios	f_c (MPa)	E_c (MPa)
Concreto convencional	2292 kg/m^3	-	28 dias	23,00	23514
Concreto leve (TRAÇO III)	1795 kg/m^3	1673 kg/m^3	28 dias	23,70	14423

Pode-se observar, na análise dos resultados acima, que o módulo de deformação do concreto leve obtido no ensaio (14423 MPa) foi de 61,3% do valor medido para o concreto convencional (23514 MPa). Geralmente, os resultados do módulo de elasticidade do concreto leve variam entre 50 e 67% do valor correspondente ao concreto convencional de mesma resistência à compressão.

Empregando-se as expressões do EUROCODE 2 e do ACI-318, os valores do módulo de deformação para o concreto leve (TRAÇO III) foram iguais respectivamente a 13260 MPa e 14324 MPa. O valor medido foi 9 % maior que o prescrito pelo EUROCODE 2, e praticamente igual ao previsto pelo ACI-318. Portanto, pode-se observar que os resultados encontrados estão dentro da margem de 20%, permitida pelo EUROCODE e pelo ACI.

10.4 Coeficiente de Poisson

Resultados de ensaios, usando o método da ressonância, para determinação do coeficiente de Poisson, segundo o ACI 213 R-87 (1999), mostraram valores variando entre 0,16 e 0,25 com uma média de 0,21. Empregando-se o método estático os valores obtidos foram entre 0,15 e 0,25, com uma média de 0,20.

Como o coeficiente de Poisson variou pouco com a idade, com as condições do teste, com a resistência do concreto e com o agregado utilizado, o ACI 213 R-87 (1999) recomenda o valor de 0,20 para uso em projetos utilizando concreto estrutural leve.

10.5 Fluência

A fluência é definida como sendo o aumento da deformação sob uma tensão mantida constante. Como esse aumento pode ser bem maior do que a deformação no momento do carregamento, a fluência tem considerável importância no comportamento das estruturas.

Para estruturas de concreto, deve ser notado que é a pasta de cimento hidratado que apresenta a fluência, sendo o papel do agregado basicamente de contenção. Portanto, a fluência do concreto é uma função do teor em volume da pasta de cimento na mistura, mas a dependência não é linear.

Algumas propriedades físicas do agregado podem influenciar a fluência do concreto. O módulo de elasticidade é o fator mais importante. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior o efeito de contenção oferecido pelo agregado à fluência potencial das pastas de cimento hidratado. A porosidade do agregado e a sua condição de absorção desempenham uma função direta nas trocas de umidade no interior do concreto; essas trocas de umidade podem ser associadas com a fluência, criando condições para a fluência por secagem. Isso explica a elevada fluência inicial que ocorre em concretos fabricados com agregados leves, usados secos no instante da mistura.

Um dos fatores externos mais importantes que atuam sobre a fluência é a umidade relativa do ar que envolve o concreto. Em linhas gerais, pode-se dizer que, para um mesmo concreto, quanto menor a umidade relativa, maior a fluência. A secagem da peça, enquanto carregada, aumenta a fluência, isto é, induz a fluência adicional por secagem. A influência da umidade relativa é muito menor, ou nenhuma, nos casos de elementos que tenham atingido equilíbrio higroscópico com o meio antes da aplicação da carga.

A resistência do concreto tem uma considerável influência sobre a fluência, uma vez que quanto maior a resistência do concreto no momento da aplicação da carga menor será o efeito da fluência. Portanto, pode-se concluir que a fluência é inversamente proporcional à resistência do concreto.

Segundo NEVILLE (1997), não existe uma diferença fundamental entre agregados leves e agregados normais no que diz respeito à fluência, e a fluência maior do concreto com agregados leves é apenas um reflexo do menor módulo de elasticidade desses agregados. Em concreto com agregados leves, a velocidade da fluência diminui com o tempo menos lentamente do que no caso dos agregados normais. Como regra geral, pode-se afirmar que a fluência de um concreto leve com qualidade estrutural é aproximadamente igual à dos concretos com agregado normal. Em qualquer comparação, é importante que não difiram muito os teores de agregados de concretos leves ou normais. Além disso, como a deformação elástica de concreto com agregados leves é geralmente maior do que a dos concretos normais,

a relação entre a fluência e a deformação elástica é menor no caso dos concretos com agregados leves.

O coeficiente de fluência ϕ para estruturas com concreto leve, segundo o EUROCODE 2 (1999), pode ser assumido como o valor adotado do concreto comum multiplicado pelo fator $(\rho_{cl} / 2400)^2$, para concreto leve com massa específica maior que 1800 kg/m^3 ; para concretos leves com massa específica menor que 1500 kg/m^3 , deve-se multiplicar o coeficiente de fluência do concreto comum por $1,3 \times (\rho_{cl} / 2400)^2$. Para valores intermediários de massa específica entre 1500 kg/m^3 e 1800 kg/m^3 deve-se interpolar.

Ainda, segundo o Eurocode 2 (1999), as deformações oriundas da fluência devem ser multiplicadas por um fator $\eta = 1,3$ para concretos leves com uma resistência inferior a 20 MPa e $\eta = 1,0$ para concreto com resistência à compressão superior a 20 MPa.

LEONHARDT e MÖNNING (1979) citam que o valor do coeficiente de fluência para uma mesma resistência à compressão é, no concreto leve, um pouco menor e até igual do que para o concreto normal, ou seja, não é nunca maior que a razão inversa dos módulos de elasticidade (E_{cc}/E_{cl}). Isso significa que os coeficientes de deformação lenta para o concreto leve são menores do que para o concreto normal, e estão aproximadamente na proporção direta entre os módulos de elasticidade. Deve-se adotar, segundo LEONHARDT e MÖNNING, um coeficiente de deformação lenta ϕ , dado pela expressão abaixo:

$$\phi_{cl} = k (E_{cl}/E_{cc})\phi_{cc} \quad , \quad (2.4)$$

sendo:

ϕ_{cl} = coeficiente de fluência do concreto leve;

ϕ_{cc} = coeficiente de fluência do concreto comum;

E_{cl} = módulo de elasticidade do concreto leve;

E_{cc} = módulo de elasticidade do concreto comum; e

k = coeficiente que varia de 0,7 a 1,0.

Pode-se observar que a expressão de LEONHARDT e MÖNNING se aproxima bastante da recomendação do EUROCODE 2, confirmando também a afirmação de NEVILLE, constatando que a fluência é apenas um reflexo do módulo de elasticidade dos

dois concretos, e que a fluência de concretos leves com qualidade estrutural é aproximadamente igual à do concreto comum.

11.Estruturas Estudadas

11.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as características da estrutura a ser analisada no estudo comparativo entre o concreto convencional e o concreto estrutural leve. Os deslocamentos verificados e as estimativas de custos e consumo de materiais, são também apresentados.

11.2 Projeto Arquitetônico Escolhido

O edifício escolhido é um prédio residencial de 8 pavimentos, 2 níveis de garagem e 32 unidades.

Detalhes do projeto arquitetônico do edifício estão apresentados nas figuras 12.1 e 12.2. Pode-se ver que o prédio possui quatro apartamentos por andar, tendo cada um aproximadamente 69 m² de área.

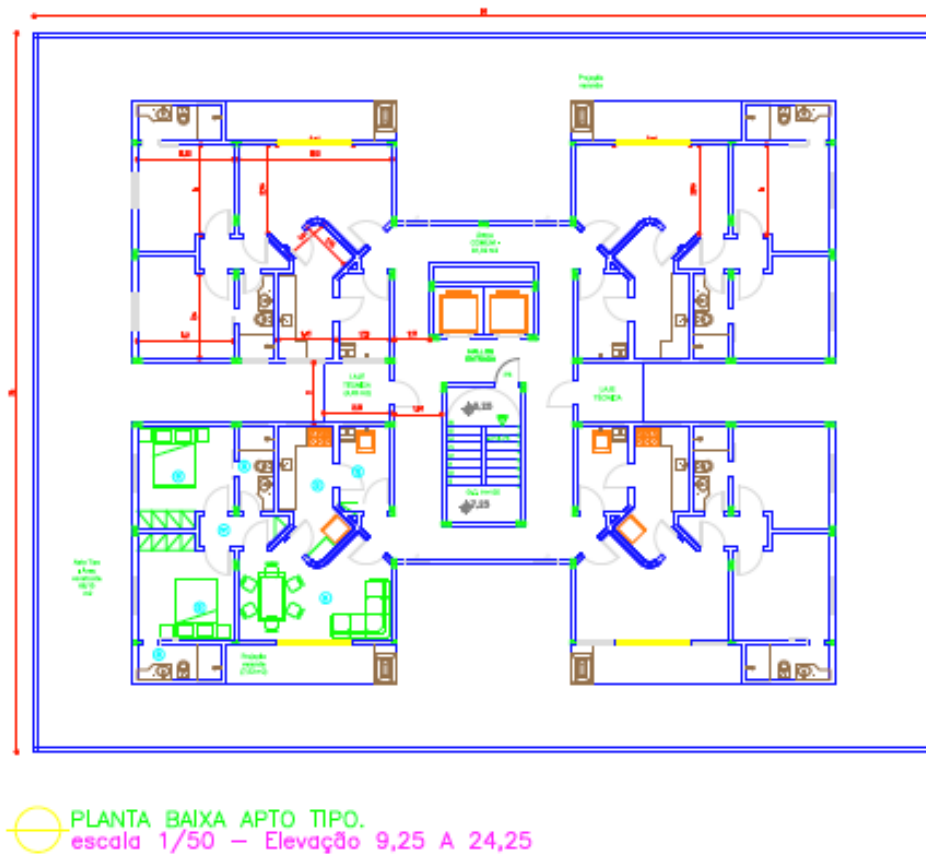


FIGURA 12.1 – Planta do Pavimento Tipo

O edifício escolhido consiste em dois níveis de garagem e oito pavimentos-tipo. Garagem 2: Escada, elevadores, 32 vagas de garagem cobertas. Garagem 1: Escada, elevadores, hall de entrada, banheiro, central de gás e guarita. Pavimento-tipo: Hall de circulação, escada, elevadores e quatro apartamentos por andar, com dois dormitórios, sendo ambos suíte, sala estar/jantar, banheiro social, cozinha, área de serviço e varanda.

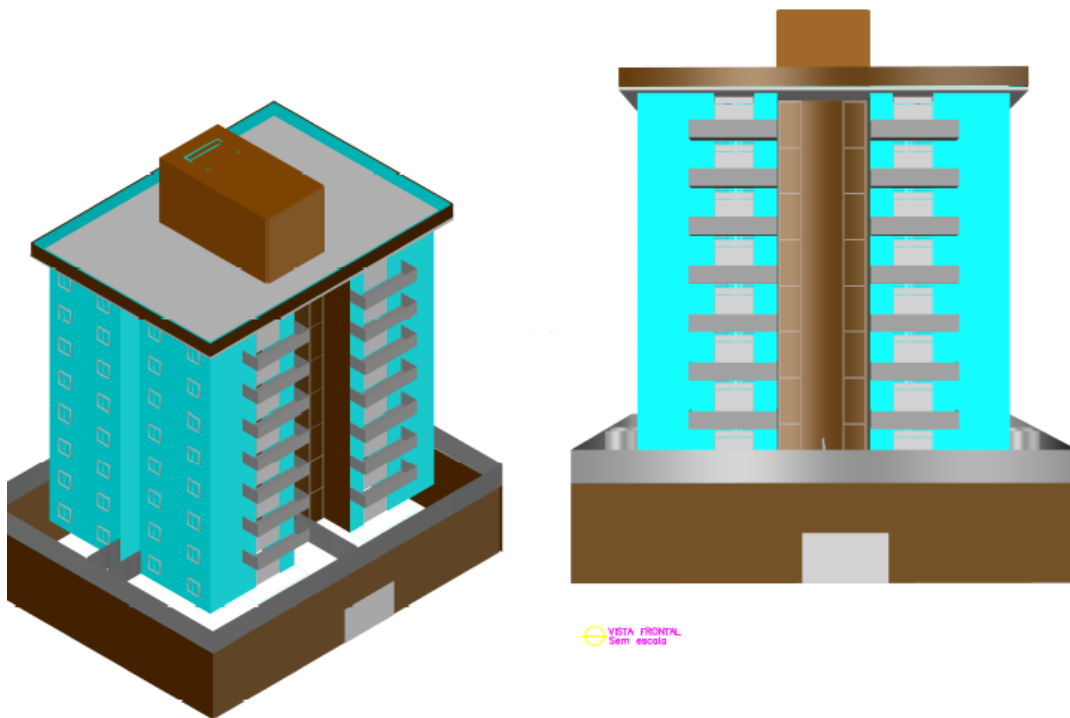


FIGURA 12.2 – Perspectiva do edifício.

11.3 Estrutura PES

Para o edifício em estudo, optou-se por um sistema estrutural com pórticos em concreto armado, constituído de lajes, vigas e pilares. A partir do projeto arquitetônico do pavimento tipo (Fig. 12.1), foi feito o lançamento de uma estrutura apresentada na Fig. 12.3, doravante denominada Estrutura PES.

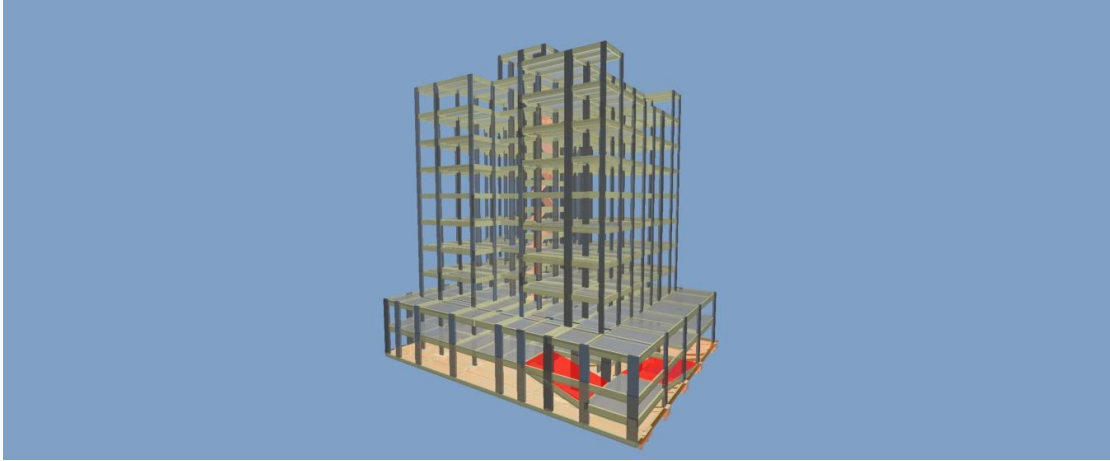


FIGURA 12.3 – Estrutura PES em 3D e corte esquemático.

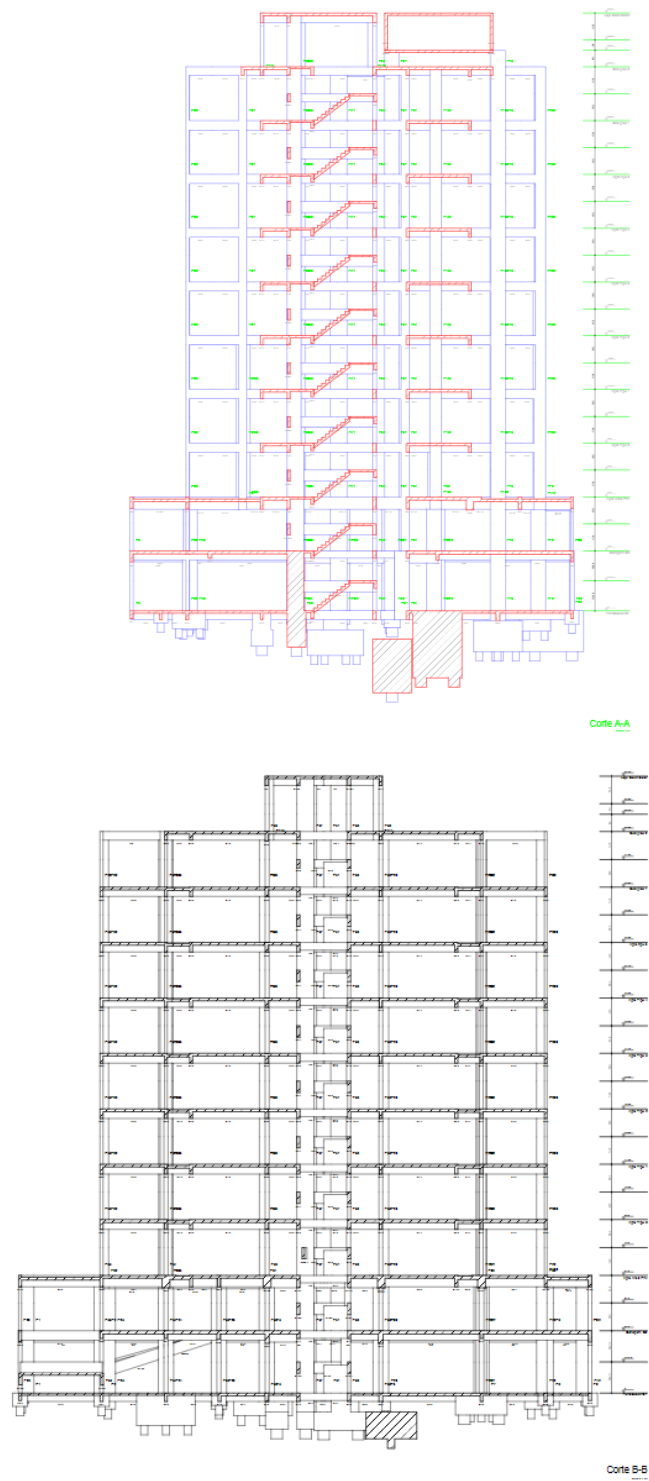
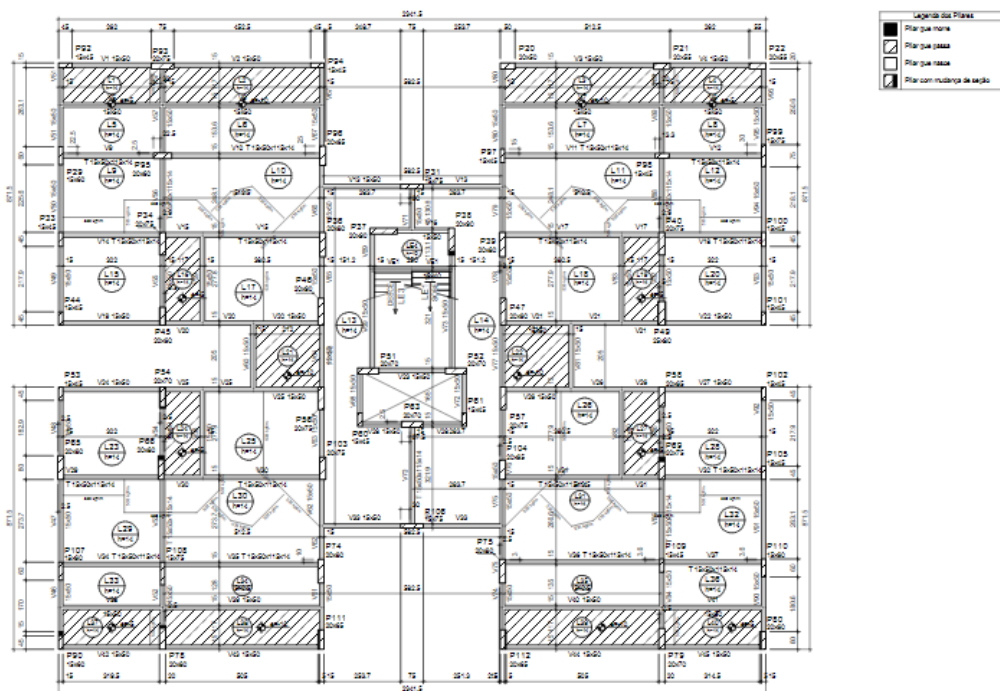


FIGURA 12.4 – Estrutura PES em corte esquemático.

Para o estudo comparativo entre o concreto convencional e o concreto estrutural leve, a seguinte subdivisão será feita:

- Estrutura PES CC: as lajes, as vigas e os pilares são constituídos de concreto armado convencional. Com base na análise desta estrutura para as combinações de carregamento prescritas na NBR 6118 (2003), serão determinados os deslocamentos verticais e laterais, a distribuição de esforços em algumas vigas e pilares escolhidos, bem como as cargas na fundação. Serão também calculados os quantitativos dos materiais gastos em termos de área de fôrmas, volume de concreto e peso de armação, objetivando estimar o custo total da Estrutura PES CC.
- Estrutura PES CL: as lajes e as vigas são de concreto estrutural leve armado, enquanto que os pilares permanecem em concreto armado convencional. As dimensões desses elementos serão as mesmas utilizadas na Estrutura PES CC. Novamente serão determinados deslocamentos, distribuição de esforços e quantitativos dos materiais gastos.



Forma do pavimento Apto Tipo 0 (Nível 905)

FIGURA 12.5 – Forma do pavimento apartamento tipo.

12.Cargas Adotadas

As cargas atuantes em uma edificação residencial podem ser divididas em dois grupos distintos: cargas verticais e cargas laterais (horizontais).

12.1 Carregamento Vertical

O carregamento vertical é composto de cargas permanentes e de cargas acidentais (sobrecargas). As cargas permanentes, consideradas na edificação em estudo, são constituídas pelo peso próprio dos elementos estruturais e das alvenarias, bem como pelo revestimento das lajes.

Para o concreto armado convencional, adotou-se o peso específico de $23,60 \text{ kN/m}^3$; para o concreto estrutural leve armado, este valor foi de $17,89 \text{ kN/m}^3$. O peso específico considerado para as alvenarias foi de 13 kN/m^3 , enquanto que a carga correspondente ao revestimento em todas as lajes foi de $1,0 \text{ kN/m}^2$.

As sobrecargas utilizadas correspondem aos valores prescritos pela NBR 6120 (1980), de onde se pode destacar:

- banho, sala, quarto: sobrecarga = $1,5 \text{ kN/m}^2$;
- área de serviço, cozinha e varanda: sobrecarga = $2,0 \text{ kN/m}^2$; e
- escada: sobrecarga = $2,5 \text{ kN/m}^2$.

12.2 Carregamento Lateral

O carregamento lateral ou horizontal na edificação é constituído pelas cargas provenientes da ação do vento nas fachadas. Portanto, têm-se duas situações de carga: carregamento na direção X (perpendicular à menor dimensão em planta da estrutura) e o carregamento na direção Y (perpendicular à maior dimensão em planta da estrutura).

A ação do vento nas edificações é regulamentada pela NBR 6123 (1988). A força de arrasto a ser aplicada é função da velocidade básica do vento V_0 , que varia de região para região do país. Para Belo Horizonte, esta velocidade é de 30 m/s, de acordo com o mapa de isopletas constante na NBR 6123.

13.Modelo Estrutural Adotado

13.1 Principais Considerações

Para análise das Estrutura, será adotado o Modelo de Pórtico Espacial, visto ser este modelo o que mais se aproxima do funcionamento real da estrutura. Nesse modelo, as lajes são consideradas diafragmas rígidos em seu próprio plano, e os pilares engastados nos elementos da fundação. Desprezam-se os recalques diferenciais dos pilares, em um mesmo pavimento, já que as tensões normais médias nos diversos pilares em um mesmo pavimento não apresentam diferenças significativas. Estas considerações são comumente adotadas nas análises estruturais de edifícios. O software empregado é o Eberick V10 . Nas fundações adotamos estacas pré-fabricadas de concreto com blocos de coroamento.

14. Apresentação e Análise Comparativa dos Resultados

14.1 Considerações iniciais

A partir dos resultados dos processamentos das Estruturas PES CC e PES CL, foram obtidos, então, os quantitativos dos materiais, considerando as lajes, vigas, pilares e escadas de toda a edificação, excetuando-se os quantitativos referentes às fundações. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 15.1

14.2 PROJETO PES CC - Resumo de Materiais.

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m ³)	Área de forma (m ²)	Consumo de aço (kg/m ³)	Peso treliças (kg)
Laje Colet Solar	Vigas	354.9	3.3	48.4	107.0	
	Pilares	534.0	4.7	61.5	113.9	
	Lajes	176.5	4.6	33.1	38.1	
	Escadas	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	4681.5	15.4	161.7	303.4	
	Total	5746.9	28.1	304.7	204.7	0.0
Cob piso 2	Vigas	2061.3	23.9	368.4	86.3	
	Pilares	2209.4	15.4	223.6	143.7	
	Lajes	1139.2	39.0	278.2	29.2	
	Escadas	55.5	1.6	19.1	34.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5465.4	79.8	889.3	68.4	0.0
Cob piso 1	Vigas	2457.7	28.7	409.3	85.5	
	Pilares	1842.1	17.2	253.8	107.0	
	Lajes	1051.7	44.7	319.1	23.5	
	Escadas	55.5	1.6	19.1	34.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5407.0	92.3	1001.3	58.6	0.0
Apto tipo 5	Vigas	2507.7	28.7	409.3	87.2	
	Pilares	1583.7	17.3	254.3	91.8	
	Lajes	1051.6	44.7	319.2	23.5	

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)	Peso treliças (kg)
	Escadas	54.8	1.6	19.1	33.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5197.8	92.3	1001.9	56.3	0.0
Apto Tipo 4	Vigas	2546.9	28.7	409.3	88.6	
	Pilares	1757.7	17.4	255.5	100.9	
	Lajes	1051.8	44.7	319.2	23.5	
	Escadas	54.8	1.6	19.1	33.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5411.2	92.5	1003.1	58.5	0.0
Apto Tipo 3	Vigas	2633.3	28.8	409.7	91.5	
	Pilares	1926.5	17.8	258.4	108.4	
	Lajes	1051.7	44.7	319.3	23.5	
	Escadas	54.8	1.6	19.1	33.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5666.2	92.9	1006.5	61.0	0.0
Apto Tipo 2	Vigas	2779.0	28.9	410.9	96.3	
	Pilares	1987.5	18.7	266.8	106.4	
	Lajes	1047.0	44.7	319.4	23.4	
	Escadas	54.8	1.6	19.1	33.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5868.2	93.9	1016.3	62.5	0.0
Apto Tipo 1	Vigas	2858.4	28.9	411.1	99.0	
	Pilares	2103.3	19.1	269.7	109.9	
	Lajes	1047.0	44.7	319.4	23.4	
	Escadas	54.8	1.6	19.1	33.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	6063.5	94.3	1019.3	64.3	0.0
Apto Tipo 0	Vigas	3109.9	28.9	417.5	107.6	
	Pilares	3310.4	20.1	275.5	165.1	
	Lajes	1046.3	44.7	319.5	23.4	
	Escadas	55.5	1.6	19.1	34.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	7522.0	95.3	1031.6	78.9	0.0
Apto Area Priv	Vigas	12869.0	88.5	903.3	145.3	
	Pilares	5054.0	31.1	380.5	162.6	
	Lajes	1961.8	95.3	594.4	20.6	
	Escadas	58.3	1.6	19.0	36.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	19943.1	216.6	1897.2	92.1	0.0
Garagem G2	Vigas	5158.9	42.8	593.3	120.6	
	Pilares	4878.6	40.4	445.9	120.8	
	Lajes	3368.0	103.5	665.2	32.5	

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)	Peso treliças (kg)
	Escadas	65.3	1.7	19.5	39.4	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	13470.7	188.4	1723.9	71.5	0.0
Fundacoes G1	Vigas	5984.0	42.6	578.3	140.5	
	Pilares	3314.1	39.9	223.3	83.0	
	Lajes	93.2	4.1	34.6	22.5	
	Escadas	6.0	0.3	3.0	20.0	
	Fundações	30723.8	294.7	425.7	453.5	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	40121.1	381.6	1264.8	105.1	0.0

Aço	Diâmetro (mm)	Peso + 10 % (kg)						
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Reservatórios	Total
CA50	6.3		197.1	10412.1	105.0	350.1	126.9	11191.2
CA50	8.0	18319.0		2611.2	256.6	21237.8	434.7	42859.3
CA50	10.0	8086.7	9768.7	720.9	95.3	1183.3	938.3	20793.2
CA50	12.5	6569.5	8196.3	42.7		4366.9	861.9	20037.2
CA50	16.0	6743.6	3154.2			2722.8	2079.4	14699.9
CA50	20.0	3985.4	995.8					4981.2
CA50	25.0	1327.3	1356.1					2683.4
CA50	32.0	165.5						165.5
CA60	5.0	124.0	6833.0	298.9	113.1	862.8	240.4	8472.2

		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Reservatórios	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	45196.9	23668.2	13786.9	456.9	29861.0	4441.1	117411.0
	CA60	124.0	6833.0	298.9	113.1	862.8	240.4	8472.2
	Total	45320.9	30501.2	14085.8	570.0	30723.8	4681.5	125883.1
Volume concreto (m³)	C-30	402.7	259.0	559.5	16.6	294.7	15.4	1548.0
Área de forma (m²)		5368.5	3168.8	3840.6	194.6	425.7	161.7	13159.9
Consumo de aço (kg/m³)		112.5	117.8	25.2	34.3	104.3	303.4	81.3

14.3 PROJETO PES CC - Resumo de Custos.

Pavimento	Elemento	Aço	Concreto	Forma	Laje pré-fabricada	Bloco de enchimento	Total
Laje Colet Solar	Vigas	2076.10	1382.71	1489.62	-	-	4948.44
	Pilares	3124.01	1954.81	1393.88	-	-	6472.71
	Lajes	1032.46	1930.68	1360.66	0.00	0.00	4323.81
	Escadas	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	27386.89	6430.18	4981.42	-	-	38798.48
	Total	33619.47	11698.39	9225.58	0.00	0.00	54543.44
Cob piso 2	Vigas	12058.53	9956.79	11345.31	-	-	33360.63
	Pilares	12924.80	6408.62	5064.31	-	-	24397.73
	Lajes	6664.51	16233.41	11440.60	0.00	0.00	34338.53
	Escadas	324.49	678.38	631.32	-	-	1634.19
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	31972.32	33277.21	28481.54	0.00	0.00	93731.08
Cob piso 1	Vigas	14377.76	11979.80	12605.02	-	-	38962.58
	Pilares	10776.17	7173.06	5747.44	-	-	23696.67
	Lajes	6152.54	18620.95	13123.23	0.00	0.00	37896.72
	Escadas	324.49	678.62	631.50	-	-	1634.61
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	31630.96	38452.43	32107.19	0.00	0.00	102190.58
Apto tipo 5	Vigas	14669.91	11979.81	12605.03	-	-	39254.74
	Pilares	9264.60	7191.19	5760.57	-	-	22216.37
	Lajes	6151.95	18622.73	13124.49	0.00	0.00	37899.17
	Escadas	320.51	678.60	631.49	-	-	1630.61
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	30406.97	38472.34	32121.58	0.00	0.00	101000.89
Apto Tipo 4	Vigas	14899.45	11981.37	12606.80	-	-	39487.62
	Pilares	10282.30	7260.69	5786.85	-	-	23329.84
	Lajes	6153.18	18624.05	13125.42	0.00	0.00	37902.64
	Escadas	320.51	678.60	631.49	-	-	1630.61
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	31655.44	38544.71	32150.55	0.00	0.00	102350.70
Apto Tipo 3	Vigas	15404.56	11993.87	12620.09	-	-	40018.51
	Pilares	11270.05	7408.74	5852.53	-	-	24531.33
	Lajes	6152.27	18627.52	13127.86	0.00	0.00	37907.65
	Escadas	320.51	678.62	631.50	-	-	1630.63
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	33147.39	38708.74	32231.99	0.00	0.00	104088.13
Apto Tipo 2	Vigas	16257.16	12025.12	12655.51	-	-	40937.80
	Pilares	11626.59	7782.08	6043.94	-	-	25452.61
	Lajes	6124.88	18635.67	13133.61	0.00	0.00	37894.17
	Escadas	320.51	678.62	631.50	-	-	1630.63
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	34329.14	39121.50	32464.56	0.00	0.00	105915.21
Apto Tipo 1	Vigas	16721.70	12029.81	12660.39	-	-	41411.90
	Pilares	12304.45	7973.76	6108.70	-	-	26386.92
	Lajes	6124.98	18637.58	13134.96	0.00	0.00	37897.52
	Escadas	320.51	678.62	631.50	-	-	1630.63
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	35471.64	39319.78	32535.56	0.00	0.00	107326.98

Pavimento	Elemento	Aço	Concreto	Forma	Laje pré-fabricada	Bloco de enchimento	Total
Apto Tipo 0	Vigas	18192.71	12045.31	12857.85	-	-	43095.87
	Pilares	19365.67	8357.50	6240.07	-	-	33963.24
	Lajes	6120.85	18643.18	13138.90	0.00	0.00	37902.93
	Escadas	324.49	679.07	631.86	-	-	1635.42
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	44003.71	39725.06	32868.69	0.00	0.00	116597.47
Apto Area Priv	Vigas	75283.38	36899.63	27822.55	-	-	140005.56
	Pilares	29566.15	12953.21	8617.87	-	-	51137.23
	Lajes	11476.38	39736.56	24440.29	0.00	0.00	75653.23
	Escadas	341.18	673.39	627.36	-	-	1641.93
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	116667.08	90262.80	61508.08	0.00	0.00	268437.96
Garagem G2	Vigas	30179.43	17823.68	18272.43	-	-	66275.54
	Pilares	28539.65	16832.68	10099.64	-	-	55471.96
	Lajes	19702.63	43153.08	27352.46	0.00	0.00	90208.17
	Escadas	381.87	691.14	644.58	-	-	1717.59
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	78803.59	78500.58	56369.11	0.00	0.00	213673.27
Fundacoes G1	Vigas	35006.62	17748.52	17810.44	-	-	70565.58
	Pilares	19387.45	16630.81	5058.20	-	-	41076.45
	Lajes	545.19	1728.22	1420.97	0.00	0.00	3694.38
	Escadas	35.33	126.15	99.92	-	-	261.40
	Fundações	179734.09	122814.60	14051.46	-	-	316600.15
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	234708.68	159048.30	38440.99	0.00	0.00	432197.96
Custo total do projeto							1802053.67

Tabela 15.1A – Estrutura PES CC - Quantitativos de materiais e Estimativa de Custos.

14.4 PROJETO PES CL - Resumo de Materiais.

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)	Peso treliças (kg)
Laje Colet Solar	Vigas	290.0	3.3	48.4	87.4	
	Pilares	487.6	4.7	61.5	104.0	
	Lajes	172.5	4.6	33.1	37.2	
	Escadas	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	4616.6	15.4	161.7	299.2	
	Total	5566.7	28.1	304.7	198.3	0.0
Cob piso 2	Vigas	1607.3	23.8	368.2	67.5	
	Pilares	1976.1	15.4	223.6	128.5	
	Lajes	1105.5	39.0	278.3	28.4	
	Escadas	46.0	1.6	19.1	28.3	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	4734.9	79.8	889.2	59.4	0.0
Cob piso 1	Vigas	2052.5	28.7	409.3	71.4	
	Pilares	1674.5	17.2	253.8	97.3	
	Lajes	1065.8	44.7	319.1	23.9	
	Escadas	47.2	1.6	19.1	29.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	4840.0	92.3	1001.3	52.5	0.0
Apto tipo 5	Vigas	2075.4	28.7	409.3	72.2	
	Pilares	1463.8	17.3	254.3	84.8	
	Lajes	1065.8	44.7	319.2	23.9	
	Escadas	47.4	1.6	19.1	29.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	4652.4	92.3	1001.9	50.4	0.0
Apto Tipo 4	Vigas	2136.5	28.7	409.3	74.3	
	Pilares	1564.5	17.4	255.5	89.8	
	Lajes	1065.8	44.7	319.2	23.8	
	Escadas	47.4	1.6	19.1	29.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	4814.1	92.5	1003.1	52.1	0.0
Apto Tipo 3	Vigas	2213.5	28.8	409.7	76.9	
	Pilares	1738.5	17.7	258.1	98.3	
	Lajes	1065.8	44.7	319.3	23.8	
	Escadas	47.4	1.6	19.1	29.1	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5065.1	92.8	1006.2	54.6	0.0

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)	Peso treliças (kg)
Apto Tipo 2	Vigas	2336.0	28.8	410.8	81.0	
	Pilares	1828.9	18.5	266.3	98.9	
	Lajes	1065.2	44.7	319.4	23.8	
	Escadas	47.2	1.6	19.1	29.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5277.4	93.7	1015.6	56.3	0.0
Apto Tipo 1	Vigas	2474.0	28.9	410.9	85.7	
	Pilares	1960.9	19.0	269.1	103.5	
	Lajes	1064.2	44.7	319.4	23.8	
	Escadas	47.2	1.6	19.1	29.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	5546.3	94.2	1018.6	58.9	0.0
Apto Tipo 0	Vigas	2614.7	28.9	417.4	90.5	
	Pilares	2844.6	19.9	275.2	142.7	
	Lajes	1067.2	44.7	319.5	23.9	
	Escadas	47.2	1.6	19.1	29.0	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	6573.8	95.2	1031.3	69.1	0.0
Apto Area Priv	Vigas	11439.3	86.7	899.0	131.9	
	Pilares	4300.7	30.7	379.3	139.9	
	Lajes	2005.5	95.4	595.0	21.0	
	Escadas	44.6	1.6	19.0	27.6	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	17790.1	214.5	1892.4	82.9	0.0
Garagem G2	Vigas	4332.5	42.7	592.2	101.4	
	Pilares	4191.3	40.0	444.6	104.9	
	Lajes	3043.3	103.6	665.3	29.4	
	Escadas	58.4	1.7	19.5	35.2	
	Fundações	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	11625.5	187.9	1721.6	61.9	0.0
Fundacoes G1	Vigas	5350.3	42.1	573.0	127.1	
	Pilares	2967.4	36.2	205.7	81.9	
	Lajes	93.1	4.1	34.4	22.6	
	Escadas	6.3	0.3	3.0	21.0	
	Fundações	22119.7	280.9	384.1	311.4	
	Reservatórios	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Total	30536.8	363.6	1200.2	84.0	0.0

Aço	Diâmetro (mm)	Peso + 10 % (kg)						
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Reservatórios	Total
CA50	6.3	2141.7	131.5	11136.0	282.2	2240.9	266.6	16198.9
CA50	8.0	7638.7		2111.3	16.3	11031.4	456.2	21253.9
CA50	10.0	8230.1	10716.1	342.5		1373.0	691.2	21352.9
CA50	12.5	7218.3	5794.9	69.1		2699.2	861.9	16643.4
CA50	16.0	4108.8	2062.3			3807.5	2100.3	12078.9
CA50	20.0	3610.4	1076.2					4686.5
CA50	25.0	1147.8	442.0					1589.8
CA50	32.0	597.8						597.8
CA60	5.0	4228.5	6775.8	220.9	187.7	967.6	240.4	12621.0

		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações	Reservatórios	Total
Peso total + 10% (kg)	CA50	34693.5	20222.9	13658.9	298.5	21152.0	4376.1	94402.1
	CA60	4228.5	6775.8	220.9	187.7	967.6	240.4	12621.0
	Total	38922.1	26998.7	13879.8	486.2	22119.7	4616.6	107023.1
Volume concreto (m³)	C-30		253.9			280.9	15.4	550.2
	CL-30	400.3		559.7	16.6			976.5
	Total	400.3	253.9	559.7	16.6	280.9	15.4	1526.8
Área de forma (m²)		5357.4	3147.0	3841.2	194.6	384.1	161.7	13086.1
Consumo de aço (kg/m³)		97.2	106.3	24.8	29.3	78.8	299.2	70.1

14.5 PROJETO PES CL - Resumo de Custos.

Pavimento	Elemento	Aço	Concreto	Forma	Laje pré-fabricada	Bloco de enchimento	Total
Laje Colet Solar	Vigas	1696.50	1846.11	1489.62	-	-	5032.23
	Pilares	2852.71	1954.81	1393.88	-	-	6201.40
	Lajes	1009.37	2577.72	1360.66	0.00	0.00	4947.75
	Escadas	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	27006.89	6430.18	4981.42	-	-	38418.48
	Total	32565.47	12808.82	9225.58	0.00	0.00	54599.87
Cob piso 2	Vigas	9402.62	13248.57	11339.76	-	-	33990.96
	Pilares	11560.20	6408.62	5064.31	-	-	23033.13
	Lajes	6467.44	21680.84	11444.33	0.00	0.00	39592.61
	Escadas	269.04	905.73	631.32	-	-	1806.09
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	27699.31	42243.76	28479.73	0.00	0.00	98422.80
Cob piso 1	Vigas	12007.30	15994.63	12605.02	-	-	40606.94
	Pilares	9795.57	7173.06	5747.44	-	-	22716.07
	Lajes	6235.14	24861.44	13123.23	0.00	0.00	44219.81
	Escadas	276.19	906.05	631.50	-	-	1813.74
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	28314.19	48935.18	32107.19	0.00	0.00	109356.56
Apto tipo 5	Vigas	12141.38	15994.64	12605.03	-	-	40741.04
	Pilares	8563.16	7191.19	5760.57	-	-	21514.92
	Lajes	6234.70	24863.83	13124.49	0.00	0.00	44223.02
	Escadas	277.12	906.03	631.49	-	-	1814.64
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	27216.36	48955.69	32121.58	0.00	0.00	108293.62
Apto Tipo 4	Vigas	12498.73	15996.73	12606.80	-	-	41102.25
	Pilares	9152.06	7260.69	5786.85	-	-	22199.59
	Lajes	6234.86	24865.58	13125.42	0.00	0.00	44225.86
	Escadas	277.12	906.03	631.49	-	-	1814.64
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	28162.77	49029.02	32150.55	0.00	0.00	109342.34
Apto Tipo 3	Vigas	12948.70	16011.32	12618.75	-	-	41578.77
	Pilares	10170.15	7372.48	5845.97	-	-	23388.60
	Lajes	6234.98	24870.21	13127.86	0.00	0.00	44233.05
	Escadas	277.12	906.05	631.50	-	-	1814.67
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	29630.95	49160.06	32224.08	0.00	0.00	111015.09
Apto Tipo 2	Vigas	13665.75	16050.97	12651.97	-	-	42368.68
	Pilares	10699.12	7703.10	6030.80	-	-	24433.02
	Lajes	6231.61	24881.10	13133.61	0.00	0.00	44246.32
	Escadas	276.19	906.05	631.50	-	-	1813.74
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	30872.66	49541.21	32447.89	0.00	0.00	112861.76
Apto Tipo 1	Vigas	14472.69	16057.23	12656.85	-	-	43186.76
	Pilares	11471.40	7898.23	6095.57	-	-	25465.20
	Lajes	6225.58	24883.65	13134.96	0.00	0.00	44244.18
	Escadas	276.19	906.05	631.50	-	-	1813.74
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00

Pavimento	Elemento	Aço	Concreto	Forma	Laje pré-fabricada	Bloco de enchimento	Total
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	32445.85	49745.15	32518.88	0.00	0.00	114709.88
Apto Tipo 0	Vigas	15296.26	16080.01	12856.07	-	-	44232.35
	Pilares	16640.82	8309.15	6233.51	-	-	31183.48
	Lajes	6243.38	24891.13	13138.90	0.00	0.00	44273.41
	Escadas	276.19	906.65	631.86	-	-	1814.70
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	38456.65	50186.94	32860.35	0.00	0.00	121503.94
Apto Area Priv	Vigas	66919.99	48242.97	27690.01	-	-	142852.97
	Pilares	25159.03	12808.18	8591.60	-	-	46558.81
	Lajes	11731.97	53110.37	24466.51	0.00	0.00	89308.85
	Escadas	260.84	899.07	627.36	-	-	1787.27
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	104071.84	115060.58	61375.48	0.00	0.00	280507.90
Garagem G2	Vigas	25344.92	23766.16	18239.86	-	-	67350.94
	Pilares	24519.24	16649.82	10070.19	-	-	51239.25
	Lajes	17803.34	57627.59	27357.23	0.00	0.00	102788.16
	Escadas	341.40	922.76	644.58	-	-	1908.75
	Fundações	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	68008.89	98966.34	56311.86	0.00	0.00	223287.10
Fundacoes G1	Vigas	31299.24	23422.03	17648.22	-	-	72369.49
	Pilares	17359.02	15103.75	4658.20	-	-	37120.96
	Lajes	544.74	2297.70	1414.99	0.00	0.00	4257.44
	Escadas	37.12	168.43	99.92	-	-	305.46
	Fundações	129400.02	117058.73	12680.56	-	-	259139.31
	Reservatórios	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	Total	178640.13	158050.64	36501.90	0.00	0.00	373192.67
Custo total do projeto							1817093.53

Tabela 15.1B – Estrutura PES CL - Quantitativos de materiais e Estimativa de Custos.

15. Análise Comparativa dos Resultados.

A análise dos resultados indica que, na estrutura em concreto leve (PES CL), houve uma redução de 18.860,00 kg de armadura, significando 15,00% de economia na armação da estrutura. Já no volume de concreto utilizado, a redução verificada foi de apenas 21,20 m³, correspondendo a redução de 1,4% de concreto em toda a estrutura, desconsiderando as fundações. Ver tabela 16.2.

		Total PES CC	Total PES CL	Diferença	%
Peso total	CA50	117.411,00	94.402,10	23.008,90	-20%
+ 10% (kg)	CA60	8.472,20	12.621,00	- 4.148,80	49%
	Total	125.883,10	107.023,10	18.860,00	-15%
Volume concreto (m ³)	C-30	1.548,00	550,20		
	CL-30	-	976,50		
	Total	1.548,00	1.526,80	21,20	-1%
Área de forma (m ²)		13.159,90	13.086,10	73,80	-1%
Consumo de aço (kg/m ³)		81,30	70,10	11,20	-14%

Tabela 16.2 – Comparativo dos Quantitativos de materiais.

A Estrutura PES CL, contendo concreto leve, considerando também a execução das fundações profundas, apresentou custo estimado de R\$1.894.774,55, contra R\$1.883.151,57 estimados para a Estrutura PES CC, contendo concreto convencional, elevação de R\$11.622,98, o que representa um acréscimo de 0,6%.

Este fato revela que apesar dos ganhos econômicos obtidos através do emprego do concreto estrutural leve, cujo menor peso específico resultou em uma estrutura mais leve e como consequência houve redução no consumo geral de aço e concreto, e diminuição das

cargas nas fundações, tais ganhos porém foram anulados em função do alto custo de produção do concreto leve estrutural, o que podemos analisar detalhadamente, logo abaixo.

Massa específica do concreto leve fresco (kg/m³)	
	$\rho = 10 \cdot Y_s \cdot (100 - A) + C \cdot (1 - (Y_s / Y_c)) - W \cdot (Y_s - 1)$
	$\rho = 1.815,67 \text{ kg/m}^3 \quad 76\%$
Legenda:	
$\rho =$	massa específica do concreto fresco
$Y_s =$	1,73 média ponderada das massas específicas (SSS) do agregado miúdo graúdo combinado, determinado por ens
$A =$	0,5 teor de ar (%)
$C =$	372 consumo de cimento (kg/m ³)
$Y_c =$	3,15 massa específica do cimento (em geral 3,15 g/cm ³)
$W =$	105,3 quantidade de água de amassamento, kg/m ³

Tabela 16.3a – Massa específica adotada para o concreto leve estrutura.

Massa específica do concreto convencional fresco (kg/m³)	
	$\rho = 10 \cdot Y_s \cdot (100 - A) + C \cdot (1 - (Y_s / Y_c)) - W \cdot (Y_s - 1)$
	$\rho = 2.360,26 \text{ kg/m}^3 \quad 98\%$
Legenda:	
$\rho =$	massa específica do concreto fresco
$Y_s =$	2,61 média ponderada das massas específicas (SSS) do agregado miúdo graúdo combinado, determinado por ensaios.
$A =$	3 teor de ar (%)
$C =$	399 consumo de cimento (kg/m ³)
$Y_c =$	3,15 massa específica do cimento (em geral 3,15 g/cm ³)
$W =$	147,7 quantidade de água de amassamento, kg/m ³

Tabela 16.3b – Massa específica adotada para o concreto convencional.

A composição de custo unitário para o concreto convencional, elaborada a partir de da dosagem experimental do traço de concreto indicado nas tabelas 10.4 e 10.5, respectivamente para concreto convencional e concreto leve, demonstram que o custo de produção de 1 m³ de concreto convencional é de R\$416,76, contra R\$556,43 para produzirmos 1 m³ de concreto leve. Essa diferença a maior, de R\$139,67 representa um acréscimo de 33,51%.

O concreto leve possui massa específica menor do que o concreto convencional cerca de 23%. O alto custo de aquisição do agregado graúdo leve para a produção de 1 m³ de concreto leve, no caso a argila expandida empregada no traço em estudo, cujo custo foi de R\$200,23, elevou sobremaneira o custo de produção do concreto leve estrutural, superando até mesmo o custo do cimento utilizado e que usualmente é o insumo mais caro na composição do concreto, cujo valor final foi de R\$137,72. Ver tabela 16.6.

Composição de custos para Concreto Convencional (R\$416,76 / m3)

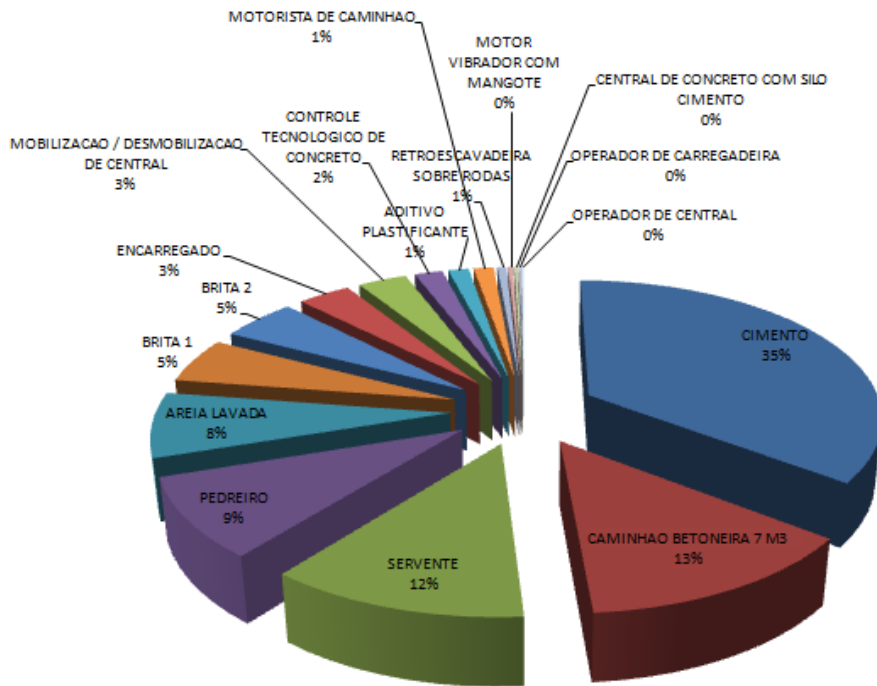


Gráfico 16.1 – Insumos utilizados na produção do Concreto convencional.

Fck (kg/cm ²)	300		Controle rigoroso				
TRAÇO EM PESO			fc28 = 36,600 Mpa				
Agregados graúdos							
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2	Brita 3	Água
	1	1,550	0,000	1,496	1,496	0,000	0,448
Ajustado umidade	399	649	0	597	597	0	148
sem ajuste	399	618	0	597	597	0	179

Tabela 16.4 – Traço experimental adotado para Concreto convencional.

Composição de custos para Concreto Leve (R\$556,43/ m3)

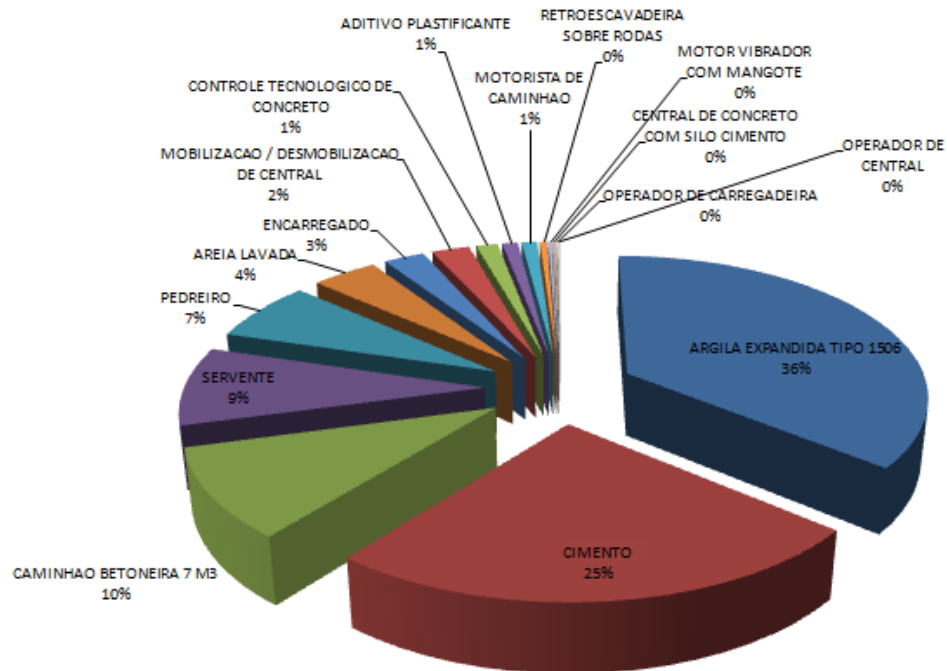


Gráfico 16.2 Insumos utilizados na produção do concreto leve estrutural.

	Fck (kgf/cm ²)	300		Controle rigoroso			
	TRAÇO EM PESO			fc28 =	36,600 Mpa		
	Argila expandida - tipos						
	Cimento	Areia	1506	0500	-	-	Água
	1	1,203	1,639	0,017	0,000	0,000	0,417
Ajustado umidade	372	479	629	6	0	0	105
sem ajuste	372	448	610	6	0	0	155

Tabela 16.5 – Traço experimental adotado para Concreto leve estrutural.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - ESCOLA DE ENGENHARIA				
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO				
ARMADO E AÇO				
Aluno Rinaldo Martins Lemos				
COMPOSIÇÃO DE PREÇOS UNITÁRIOS				
DESCRIÇÃO DO SERVIÇO:				UN:
CONCRETO LEVE ESTRUTURAL BOMBEÁVEL EM ESTRUTURA ELEVADA FCK => 30,0 MPA.				m3
A - MÃO-DE-OBRA	COEFICIENTE	UN	UNITÁRIO	TOTAL
ENCARREGADO	0,317109	H	R\$ 25,43	R\$ 8,06
OPERADOR DE CENTRAL	0,028571	H	R\$ 10,78	R\$ 0,31
PEDREIRO	1,7	H	R\$ 12,73	R\$ 21,63
SERVENTE	3,028571	H	R\$ 9,26	R\$ 28,06
OPERADOR DE CARREGADEIRA / RETROESCAVADEIRA	0,028571	H	R\$ 11,96	R\$ 0,34
MOTORISTA DE CAMINHAO	0,282857	H	R\$ 10,78	R\$ 3,05
SUB-TOTAL				R\$ 61,45
LEIS SOCIAIS	77%	%	61,45	R\$ 47,16
SOMA A				R\$ 108,61
B - MATERIAIS E SERVIÇOS	COEFICIENTE	UN	UNITÁRIO	TOTAL
AREIA LAVADA	0,40	M3	R\$ 58,33	R\$ 23,04
ARGILA EXPANDIDA TIPO 1506	1,02	M3	R\$ 195,48	R\$ 200,23
CIMENTO	372,21	KG	R\$ 0,37	R\$ 137,72
ADITIVO PLASTIFICANTE RETARDADOR DE PEGA E REDUTOR DE AGUA PARA CONCRETO	1,19	L	R\$ 4,62	R\$ 5,50
MOBILIZACAO / DESMOBILIZACAO DE CENTRAL	1	VB/M3	R\$ 13,20	R\$ 13,20
CONTROLE TECNOLÓGICO DE CONCRETO	1	M3	R\$ 7,56	R\$ 7,56
SOMAB				R\$ 387,25
C - EQUIPAMENTOS	COEFICIENTE	UN	UNITÁRIO	TOTAL
RETROESCAVADEIRA SOBRE RODAS	0,028571	H	R\$ 86,04	R\$ 2,46
CENTRAL DE CONCRETO COM SILO PARA CIMENTO	0,028571	H	R\$ 35,05	R\$ 1,00
MOTOR VIBRADOR COM MANGOTE	0,342857	H	R\$ 3,89	R\$ 1,33
CAMINHAO BETONEIRA 7 M3	0,282857	H	R\$ 197,19	R\$ 55,78
SOMAC				R\$ 60,57
D - COMP. AUXILIARES	COEFICIENTE	UN	UNITÁRIO	TOTAL
SOMAD				0,00
CUSTO DIRETO (A + B + C + D)			R\$	556,43
BDI (% SOBRE CUSTO DIRETO)			%	0,00%
CUSTO TOTAL (CUSTO DIRETO + BDI)			R\$	556,43
PREÇO A ADOTAR			R\$	556,43

Tabela 16.6 – CPU para o concreto estrutural leve.

16.Cargas nas fundações.

A Estrutura PES CL, contendo concreto leve, apresentou uma redução de 21% do peso próprio da estrutura, cerca de 687,61 tf. Entretanto quando analisamos todas as cargas nas fundações essa redução foi de apenas 10,35%. Totalizando 5.952,59 tf contra 6.640,20 tf para a Estrutura PES CC, utilizando concreto convencional.

Abaixo apresentamos tabela resumo 17.7, quantificando as fundações profundas dimensionadas para ambos os projetos. Podemos verificar que houve uma pequena redução na quantidade de estacas para o Projeto PES CL, resultando numa economia de apenas R\$3.416,88, ou seja cerca de 4,21%.

FUNDAÇÕES PROFUNDAS COM ESTACAS DE CONCRETO					
PROJETO	TIPO ESTACA	Quantidade de estacas	TOTAL (M)	CUSTO PARCIAL (R\$)	CUSTO TOTAL (R\$)
PES CC	380 X 80	85	425	R\$ 45.883,87	R\$ 81.097,90
	600 X 110	28	140	R\$ 35.214,03	
PES CL	380 X 80	81	405	R\$ 43.724,63	R\$ 77.681,02
	600 X 110	27	135	R\$ 33.956,39	
				Diferença	R\$ 3.416,88
				Percentual	4,21%

Tabela 17.7 – Fundações profundas com estacas de concreto.

A análise das fundações diretas, blocos e cintas para ambos os projetos PES CC e PES CL, verifica-se que houve uma redução nos quantitativos de aço na ordem de 28,0% na estrutura utilizando concreto leve, cerca de 8.709 kg e de 4,7% no volume de concreto, redução de 13,80 m³. Ver tabela 17.8 abaixo.

Comparativo entre Resumo de Materiais (Moldados in Loco)									
Projeto Pes CC									
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações (Blocose cintas)		Reservatórios	Total
Peso total	CA50	45.196,90	23.668,20	13.786,90	456,90	29.861,00		4.441,10	117.411,00
+ 10% (kg)	CA60	124,00	6.833,00	298,90	113,10	862,80		240,40	8.472,20
	Total	45.320,90	30.501,20	14.085,80	570,00	30.723,80		4.681,50	125.883,10
concreto	C-30	402,70	259,00	559,50	16,60	294,70		15,40	1.548,00
Área de forma (m ²)		5.368,50	3.168,80	3.840,60	194,60	425,70		161,70	13.159,90
Consumo de aço (kg/m ³)		112,50	117,80	25,20	34,30	104,30		303,40	81,30
Projeto Pes CL									
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações (Blocose cintas)		Reservatórios	Total
Peso total	CA50	34.693,50	20.222,90	13.658,90	298,50	21.152,00		4.376,10	94.402,10
+ 10% (kg)	CA60	4.228,50	6.775,80	220,90	187,70	967,60		240,40	12.621,00
	Total	38.922,10	26.998,70	13.879,80	486,20	22.119,70		4.616,60	107.023,10
Volume de concreto (m ³)	C-30		253,90			280,90		15,40	550,20
	CL-30	400,30		559,70	16,60				976,50
	Total	400,30	253,90	559,70	16,60	280,90		15,40	1.526,80
Área de forma (m ²)		5.357,40	3.147,00	3.841,20	194,60	384,10		161,70	13.086,10
Consumo de aço (kg/m ³)		97,20	106,30	24,80	29,30	78,80		299,20	70,10
Diferenças verificadas									
		Vigas	Pilares	Lajes	Escadas	Fundações (Blocose cintas)		Reservatórios	Total
Peso total	CA50	10.503,40	3.445,30	128,00	158,40	8.709,00	29,2%	65,00	23.008,90
+ 10% (kg)	CA60	- 4.104,50	57,20	78,00	- 74,60	- 104,80	-12,1%	-	- 4.148,80
	Total	6.398,80	3.502,50	206,00	83,80	8.604,10	28,0%	64,90	18.860,00
Volume de concreto (m ³)	Total	2,40	5,10	- 0,20	-	13,80	4,7%	-	21,20
Área de forma (m ²)		11,10	21,80	- 0,60	-	41,60	9,8%	-	73,80
Consumo de aço (kg/m ³)		15,30	11,50	0,40	5,00	25,50	24,4%	4,20	11,20

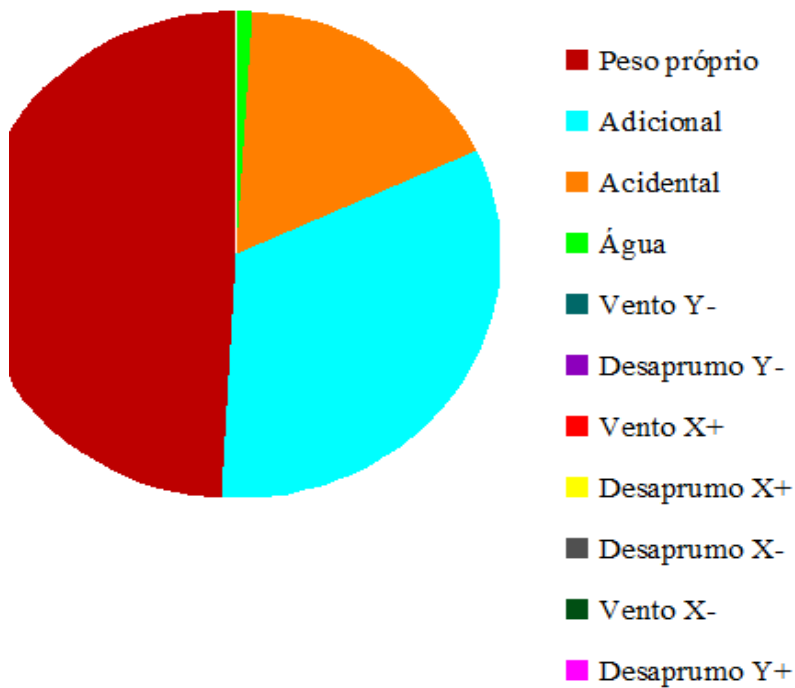
Tabela 17.8 – Comparativo Fundações diretas – blocos e cintas.

17.PROJETO PES CC – DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA.

Diagnóstico da estrutura

Distribuição das cargas verticais

Ação	Carregamentos (tf)	Percentual (%)
Peso próprio	3260.03	49.1%
Adicional	2185.21	32.9%
Acidental	1134.19	17.1%
Água	60.76	0.9%
Vento X+	0.07	0.0%
Vento X-	-0.07	0.0%
Vento Y+	-0.31	0.0%
Vento Y-	0.31	0.0%
Desaprumo X+	0.03	0.0%
Desaprumo X-	-0.03	0.0%
Desaprumo Y+	-0.11	0.0%
Desaprumo Y-	0.11	0.0%
TOTAL	6640.20	100.0%



Relação de carga por área

Pavimento	Carregamentos (tf)	Área (m ²)	Carga/área (kgf/m ²)
Laje Colet Solar	176.84	104.71	1688.78
Cob piso 2	467.47	323.19	1446.42
Cob piso 1	515.43	373.10	1381.48
Apto tipo 5	515.42	373.11	1381.40
Apto Tipo 4	515.76	373.11	1382.32
Apto Tipo 3	516.17	373.11	1383.41
Apto Tipo 2	517.29	373.11	1386.43
Apto Tipo 1	518.21	373.11	1388.87
Apto Tipo 0	520.28	373.11	1394.44
Apto Area Priv	968.81	711.50	1361.64
Garagem G2	756.20	732.90	1031.80
Fundacoes G1	652.33	681.31	957.48
TOTAL	6640.20	5165.37	1285.52

Forças devido ao vento

Pavimento	Força X (tf)	Força Y (tf)
Laje Colet Solar	1.43	0.57
Cob piso 2	2.94	2.88
Cob piso 1	3.49	4.45
Apto tipo 5	3.39	4.32
Apto Tipo 4	3.28	4.18
Apto Tipo 3	3.16	4.02
Apto Tipo 2	3.02	3.85
Apto Tipo 1	2.86	3.64
Apto Tipo 0	2.66	3.39
Apto Area Priv	2.62	3.46
Garagem G2	2.54	3.41
Fundacoes G1	0.29	0.39
TOTAL	31.68	38.56

Estabilidade global**

Parâmetro	x	y
Gama-Z	1.08 (lim 1.10)	1.06 (lim 1.10)
Deslocamento horizontal (cm)	0.29 (lim 2.09)	0.15 (lim 2.09)
Deslocamento máximo dos pilares (cm)*	0.70	0.45
Deslocamento médio dos pilares (cm)*	0.47	0.36
Deslocamento máximo dos pilares* / Htotal	1/5104	1/7966
Deslocamento médio dos pilares* / Htotal	1/7593	1/9739

* Deslocamento dos pilares do último pavimento

**Deslocamentos considerando somente o modelo elástico

Processo P-Delta - Deslocamento no topo da edificação

Carregamento	Inicial	Final	Variação
Acidental	0.03	0.03	+6.87%
Água	0.04	0.04	+3.56%
Vento X+	0.97	1.08	+11.31%
Vento X-	0.97	1.08	+11.31%
Vento Y+	0.51	0.54	+4.97%
Vento Y-	0.51	0.54	+4.97%
Desaprumo X+	0.36	0.40	+11.60%
Desaprumo X-	0.36	0.40	+11.60%
Desaprumo Y+	0.17	0.18	+5.00%
Desaprumo Y-	0.17	0.18	+5.00%

Índices de consumo de materiais

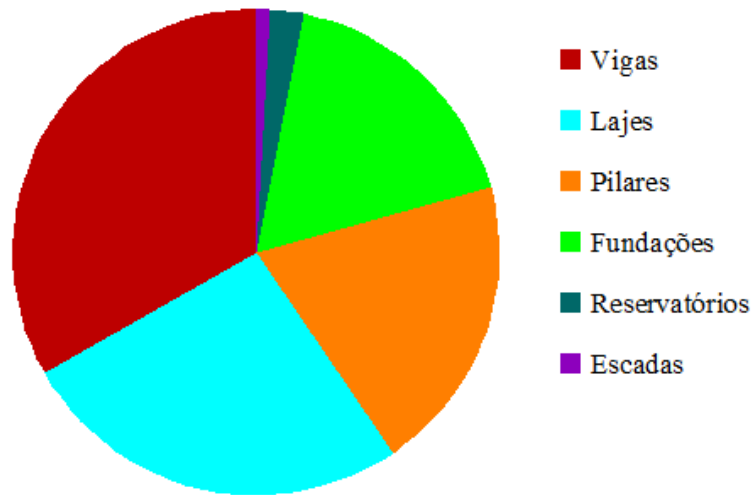
Elemento	Consumo por área			Consumo por volume de concreto	
	Concreto (m ³ /m ²)	Forma (m ² /m ²)	Aço (kg/m ²)	Forma (m ² /m ³)	Aço (kg/m ³)
Vigas	0.08	1.04	8.77	13.33	112.53
Pilares	0.05	0.61	5.90	12.24	117.78
Lajes	0.11	0.74	2.73	6.86	25.17
Escadas	0.00	0.04	0.11	11.72	34.33
Fundações	0.06	0.08	5.95	1.44	104.26
Reservatórios	0.00	0.03	0.91	10.48	303.42
TOTAL	0.30	2.55	24.37	8.50	81.32

Espessura média do projeto 30.0 cm

Resumo de custos

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	454437.89	281978.08	736415.98
Concreto	477006.86	168124.99	645131.85
Formas	120783.72	299721.70	420505.42
TOTAL	1052228.48	749824.77	1802053.25

Distribuição do custo por elemento

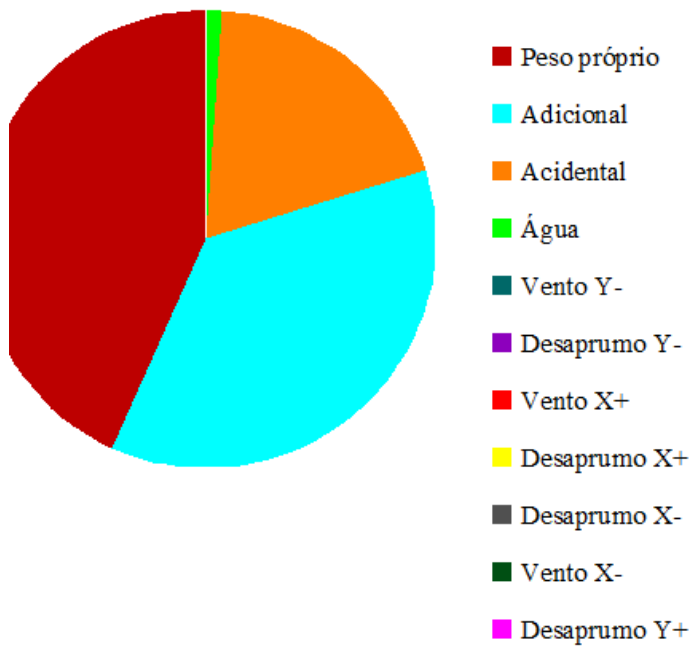


18.PROJETO PES CL – DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA.

Diagnóstico da estrutura PROJETOS PES CL

Distribuição das cargas verticais

Ação	Carregamentos (tf)	Percentual (%)
Peso próprio	2572.42	43.2%
Adicional	2185.21	36.7%
Acidental	1134.19	19.1%
Água	60.76	1.0%
Vento X+	0.07	0.0%
Vento X-	-0.07	0.0%
Vento Y+	-0.31	0.0%
Vento Y-	0.31	0.0%
Desaprumo X+	0.03	0.0%
Desaprumo X-	-0.03	0.0%
Desaprumo Y+	-0.10	0.0%
Desaprumo Y-	0.10	0.0%
TOTAL	5952.59	100.0%



Relação de carga por área

Pavimento	Carregamentos (tf)	Área (m²)	Carga/área (kgf/m²)
Laje Colet Solar	171.35	104.71	1636.34
Cob piso 2	421.42	323.19	1303.95
Cob piso 1	461.43	373.10	1236.76
Apto tipo 5	461.43	373.11	1236.72
Apto Tipo 4	461.78	373.11	1237.65
Apto Tipo 3	462.21	373.11	1238.80
Apto Tipo 2	463.41	373.11	1242.00
Apto Tipo 1	464.34	373.11	1244.51
Apto Tipo 0	466.44	373.11	1250.14
Apto Area Priv	837.32	711.49	1176.86
Garagem G2	651.15	733.09	888.22
Fundacoes G1	630.32	681.31	925.16

Forças devido ao vento

Pavimento	Força X (tf)	Força Y (tf)
Laje Colet Solar	1.43	0.57
Cob piso 2	2.94	2.88
Cob piso 1	3.49	4.45
Apto tipo 5	3.39	4.32
Apto Tipo 4	3.28	4.18
Apto Tipo 3	3.16	4.02
Apto Tipo 2	3.02	3.85
Apto Tipo 1	2.86	3.64
Apto Tipo 0	2.66	3.39
Apto Area Priv	2.62	3.46
Garagem G2	2.54	3.41
Fundacoes G1	0.29	0.39
TOTAL	31.68	38.56

Estabilidade global**

Parâmetro	x	y
Gama-Z	1.07 (lim 1.10)	1.05 (lim 1.10)
Deslocamento horizontal (cm)	0.29 (lim 2.09)	0.15 (lim 2.09)
Deslocamento máximo dos pilares (cm)*	0.63	0.41
Deslocamento médio dos pilares (cm)*	0.45	0.34
Deslocamento máximo dos pilares* / Htotal	1/5608	1/8665
Deslocamento médio dos pilares* / Htotal	1/7977	1/10395

* Deslocamento dos pilares do último pavimento

**Deslocamentos considerando somente o modelo elástico

Processo P-Delta - Deslocamento no topo da edificação

Carregamento	Inicial	Final	Varição
Acidental	0.03	0.03	+6.15%
Água	0.04	0.04	+3.16%
Vento X+	0.97	1.07	+10.06%
Vento X-	0.97	1.07	+10.06%
Vento Y+	0.51	0.54	+4.44%
Vento Y-	0.51	0.54	+4.44%
Desaprumo X+	0.32	0.36	+10.30%
Desaprumo X-	0.32	0.36	+10.30%
Desaprumo Y+	0.15	0.16	+4.46%
Desaprumo Y-	0.15	0.16	+4.46%

Índices de consumo de materiais

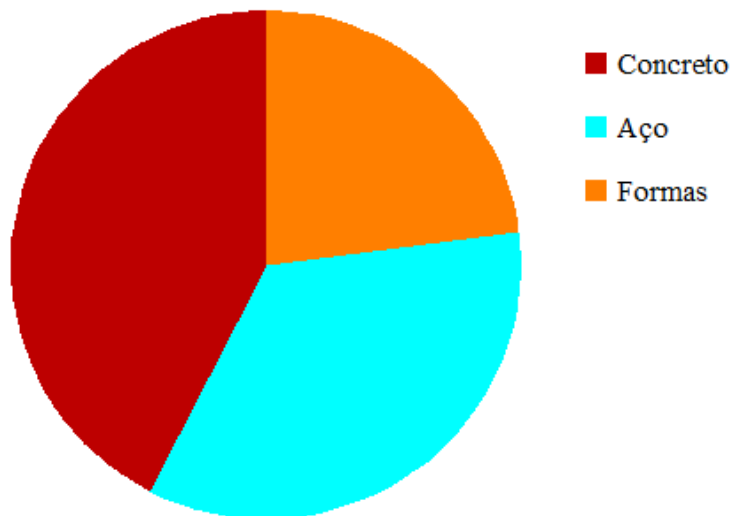
Elemento	Consumo por área			Consumo por volume de concreto	
	Concreto (m ³ /m ²)	Forma (m ² /m ²)	Aço (kg/m ²)	Forma (m ² /m ³)	Aço (kg/m ³)
Vigas	0.08	1.04	7.61	13.39	98.19
Pilares	0.05	0.61	5.23	12.39	106.32
Lajes	0.11	0.74	2.69	6.86	24.80
Escadas	0.00	0.04	0.09	11.72	29.28
Fundações	0.05	0.07	4.28	1.37	78.75
Reservatórios	0.00	0.03	0.89	10.48	299.21
TOTAL	0.30	2.53	20.79	8.57	70.35

Espessura média do projeto 29.6 cm

Resumo de custos

Relação custo por material (R\$)			
Elemento	Material	Execução	Total
Aço	387715.23	240576.77	628292.00
Concreto	606861.66	165821.73	772683.39
Formas	120376.11	297948.97	418325.08
TOTAL	1114952.99	704347.47	1819300.46

Distribuição do custo por origem



Relação custo por área (R\$/m²)			
Pavimento	Material	Execução	Total
Laje Colet Solar	308.10	213.33	521.43
Cob piso 2	182.65	121.89	304.54
Cob piso 1	176.49	116.61	293.10
Apto tipo 5	174.72	115.52	290.24
Apto Tipo 4	176.45	116.60	293.05
Apto Tipo 3	179.20	118.34	297.54
Apto Tipo 2	182.19	120.30	302.49
Apto Tipo 1	185.25	122.19	307.44
Apto Tipo 0	196.31	129.34	325.65
Apto Area Priv	245.92	150.76	396.67
Garagem G2	187.88	116.71	304.58
Fundacoes G1	347.69	200.79	548.48
TOTAL	215.84	136.35	352.20

ANÁLISE COMPARATIVA DO PROJETO PES								
PROJETO	CARGA FUNDAÇÃO (tf)	Direções	FORÇA VENTO (tf)	Gama Z	Deslocamento horizontal (cm)	Deslocamento máximo pilares (cm)	Espessura média do projeto (cm)	CUSTO TOTAL (R\$)
PES CC	6640,20	X	31,68	1,08	0,29	0,70	30,00	R\$ 1.883.151,57
		Y	38,56	1,06	0,15	0,45		
PES CL	5952,59	X	31,68	1,07	0,29	0,63	29,60	R\$ 1.896.981,48
		Y	38,56	1,05	0,15	0,41		
	-687,610							R\$ 13.829,91 0,73%

Tabela 19.9 – Análise comparativa do Projeto PES.

19.Comparação final

A análise comparativa dos dados obtidos ao final do dimensionamento estrutural do Projeto PES revelou que o Projeto PES CL, utilizando concreto estrutural leve obteve algumas vantagens competitivas nos seguintes quesitos: redução de -10,4% nas cargas nas fundações, sendo 6.640,20 tf contra 5.952,59 tf, Gama Z e deslocamento máximo dos pilares ligeiramente menores, espessura média do Projeto PES CL foi de 29,6 cm contra 30,00 cm para o Projeto PES CC. Em resumo, o Projeto PES CL mostrou-se competitivo do ponto de vista estrutural, apresentando algumas vantagens estruturais em relação ao Projeto PES CC, com concreto convencional, porém ao verificarmos os custos finais para cada projeto essa vantagem competitiva se desfaz, em função do aumento do custo final da ordem de 0,73%, totalizando R\$1.896.981,48 para o Projeto PES CL diante R\$1.883.151,57, conforme podemos ver na tabela 10.9.

20. Conclusões e Recomendações

20.1 Considerações Iniciais

O objetivo principal deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais, lajes e vigas, das estruturas de edifícios. Porém, em todos os casos, os pilares são em concreto convencional. Foram feitas comparações do comportamento estrutural, do consumo de materiais e de custos a partir dos resultados da análise e do dimensionamento realizados para dois modelos adotados para um mesmo edifício.

Em todas as análises dos edifícios, foi adotado um modelo de pórtico espacial, visto ser este modelo o que mais se aproxima do funcionamento real da estrutura. O software empregado nos processamentos foi o Eberick V10.

Uma caracterização do concreto estrutural leve também foi feita, dando ênfase aos materiais constituintes e às propriedades reológicas e mecânicas, com destaque especial à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade.

21. Conclusão final

Os resultados obtidos nas estruturas analisadas comprovaram que a utilização do concreto estrutural leve nas edificações pode ser viável, pois possibilita a redução de cargas nas fundações e reduz o consumo de aço na estrutura, desde que sejam observados alguns aspectos importantes.

No presente estudo, entretanto não obteve-se ganhos econômicos em função principalmente, dos altos custos envolvidos na produção do concreto estrutural leve, a partir da utilização da argila expandida.

Esse material apresenta excelente comportamento físico, porém o seu alto custo de aquisição em função do limitado número de fornecedores encontrados no Brasil. Sendo assim, recomenda-se que sejam estudadas outras alternativas mais baratas para o agregado graúdo leve, em substituição a argila expandida.

Outro aspecto importante que recomenda-se atenção, é quanto a utilização do concreto estrutural leve não apenas em vigas e lajes, como realizado neste nosso estudo. A análise a partir da comparação dos dados da Estrutura PES CC, dimensionada utilizando-se concreto convencional e da Estrutura PES CL, utilizando concreto leve estrutural demonstrou que o comportamento estrutural foi muito próximo para as duas estruturas e o consumo de materiais mostrou-se muito mais econômico para o Projeto PES CL, o que evidencia que o emprego do concreto estrutural leve em toda a super estrutura, pode potencializar os ganhos econômicos, em função da maior redução das cargas nas fundações e do menor consumo de aço em geral já mencionados de forma mais acentuada.

Entretanto, devem ser tomados os devidos cuidados na verificação dos deslocamentos laterais destas estruturas, usando-se inclusive, o recurso de enrijecer a estrutura.

22.Sugestões para Estudos Futuros

Para que se possa ampliar os conhecimentos obtidos neste trabalho, é necessário que se façam análises e dimensionamentos de outros edifícios com diferentes tipologias, utilizando-se o concreto estrutural leve em toda a super estrutura, englobando lajes, vigas e pilares, conforme pode-se encontrar em diversas publicações que citam exemplos de edifícios construídos com sucesso no Brasil e no exterior empregando concreto estrutural leve em toda sua super estrutura.

Mas para se alcançar o resultado esperado, obtenção de ganhos econômicos em função da estrutura mais leve, recomenda-se que a argila expandida seja substituída por outro agregado graúdo leve mais barato e que a dosagem do traço experimental do concreto leve, seja amplamente investigada, detalhando ao máximo suas propriedades físicas e o seu custo de produção.

BIBLIOGRAFIAS E REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, COMMITTEE 211 (1990), -Standard Practice for Selecting Proportions for Lightweight Concrete ACI 211.22, ACI Materials Journal, Vol. 87, Nº 4, Nov-Dec. P.638-651.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, COMMITTEE 213 (1999), -Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. ACI 213R-87 (reapproved 1999), Farmington Hills, EUA, 27p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, COMMITTEE 318 (1999), -Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-99. Detroit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C 330 (1991), - Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM Standards. Philadelphia.

ARAÚJO, J.M (2003) – Curso de Concreto Armado – Vol 2, Editora Dunas, Rio Grande – RS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1969) – ABNT. EB-230 - Agregados Leves para Concreto Estrutural – 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980) – ABNT. NBR 6120 - Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações – novembro, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980) – ABNT. NBR 6123 - Forças devidas ao vento em Edificações –Procedimento - novembro, 84p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1996) – ABNT. NBR 7480 - Barras e Fios de Aço Destinados a Armadura para Concreto Armado –Especificação, fevereiro,7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) – ABNT. NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento - março, 170p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) – ABNT. NBR 8681 - Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento - março, 15p.

CASTRO, N. (1971) – Resistência ao esforço Cortante no Concreto Leve – Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 110p.

CLÍMACO, J.C.T. (1975) – Resistências ao Esforço Cortante em Vigas Curtas de Concreto Leve sem Armadura Transversal – Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 84p.

EUROCODE 2 (1999) – Design of Concrete Structures, European Prestandard, Brussels, Belgium, Dezembro, 225p.

EVANGELISTA, A.C.J. (1996) – Produção e Propriedades de Concretos Leves de Alta Resistência – Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 141p.

GOMES, L.C. (2001) – Estudo do Sistema de Lajes Mistas com Fôrmas de Aço Incorporada Empregando Concreto Estrutural Leve – Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 165p.

HANSON, J.A. (1961) – Tensile Strength and Diagonal Tension Resistance of Structural Lightweight Concrete. Portland Cement Association-Research and Development Laboratories, Bulletin D50, 39p.

LEONHARDT, F. e MONNING, E. (1979) – Construções de Concreto, Volume 2, Editora Interciência, Cap 7: Concreto Leve para Estruturas.

LEVI, A.C. (1974) – Estudo da Flexão em Vigas de Concreto Leve Armado – Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 94p.

MAZZILLI, A.R.P. (1995) – Influência da Flexibilidade das Vigas e das Lajes nos Esforços das Estruturas em Concreto Armado – Escola Politécnica – USP, São Paulo.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. (1994) – Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, Editora PINI, Cap6: Agregados Leves, Cap11: Avanços em Tecnologia do Concreto.

NEVILLE, A.M. (1997) – Propriedades do Concreto, Editora PINI, 2ª Edição, Cap6: Concretos com propriedades Especiais.

BELLONI PEREZ, G. (1999) – Análise Comparativa de Modelos do Sistema Estrutural de um Edifício de Andares Múltiplos em Concreto Armado – Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 171p.

ROSSO, T. (1973) – Classificação e Características Gerais dos Concretos Leves e Aplicações na Construção Civil, IBRACON: Colóquio sobre Concretos Leves, São Paulo, 83p.

SOBRAL, H.S. (1987) – Concretos Leves: Tipos e Comportamento Estrutural, Estudo Técnico Nº 86, ABCP, São Paulo, 51p.

SÜSSEKIND, J.C. (1980) – Curso de Concreto – Vol I, Editora Globo, Porto Alegre.

TQS INFOMÁTICA (1998) – Cad/Formas e Cad/Vigas , Manuais de Referência, Rua Pinheiros, 706 – Pinheiros, São Paulo.

VASCONCELOS, A.C. (1973) – Cálculo Estrutural de Concretos Leves de Argila Expandida, IBRACON: Colóquio sobre Concretos Leves, São Paulo, 13p.

Silva, Márcio Dario (2003) - "ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A UTILIZAÇÃO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E LEVE NOS ELEMENTOS HORIZONTAIS DAS ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS" - Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas". Belo Horizonte, Minas Gerais, 165p.

NEVILLE, A.M. e J.J. Brooks, (2013) – Tecnologia do Concreto, Editora Bookman, Porto Alegre, 2ª Edição, 448 p.

Tartuce, Ronaldo, (1989) – Dosagem experimental do Concreto, Editora Pini Ibracon, São Paulo, 115 p.