



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM
CONCRETO LEVE

Cláudia Nunes Gomes Ferreira

São Carlos
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURA E CONSTRUÇÃO
CIVIL

“DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO
LEVE”

CLÁUDIA NUNES GOMES FERREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

São Carlos

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F383de Ferreira, Cláudia Nunes Gomes.
Dimensionamento de elementos estruturais em concreto
leve / Cláudia Nunes Gomes Ferreira. -- São Carlos :
UFSCar, 2015.
166 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2015.

1. Concreto. 2. Concreto leve. 3. Dimensionamento. 4.
Materiais - especificações. I. Título.

CDD: 624.1834 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Cláudia Nunes Gomes Ferreira, realizada em 22/04/2015:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Aris Parsekian', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
UFSCar

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. Rubens Migliore Junior', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Ângelo Rubens Migliore Junior
UNILINS

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. Carrazedo', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Ricardo Carrazedo
EESC/USP

À minha mãe Julita e ao meu pai Evaldo, com todo carinho.

Agradecimentos

Aos meus pais, Julita e Evaldo, por toda dedicação e esforço para que fosse possível eu me tornar tudo que sempre quis ser.

Aos meus irmãos, Flávia e Evaldo Filho, pelo apoio, companheirismo e incentivo.

Ao meu amor, Rodrigo Peterlevitz, pelo apoio, incentivo e compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, pela oportunidade concedida, pela demarcação do caminho e confiança em mim depositada.

À HM Engenharia e Construções S.A. pelo apoio.

Ao Prof. Dr. Ângelo Rubens Migliore Junior pela ajuda e apontamentos que foram de suma importância para a finalização deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para mais essa conquista.

(...) “Aos poucos percebeu que sua vida era fazer aquilo que havia fazendo há alguns dias, meses e anos. Traçando linhas e desenhando pensamentos com pontos de fuga para o infinito. Ela acreditava em anjo e, porque acreditava, eles existiam. ”

Clarice Lispector

RESUMO

O concreto leve com finalidade estrutural é um material que apresenta grande potencial de aplicação nas mais diversas áreas da construção civil. Sua principal característica é a reduzida massa específica em comparação ao concreto convencional. Tal característica torna-se uma grande vantagem, uma vez que uma das principais deficiências do concreto convencional é seu elevado peso próprio. Com isso há redução nas cargas na fundação e no peso de transporte, menor consumo de cimento e custo em algumas situações, melhoria do desempenho térmico e acústico. Entretanto, apesar do grande potencial de aplicação dos concretos leves, observa-se uma carência de estudos no que tange a critérios de dimensionamento de elementos feitos com esse material. Os concretos leves apresentam diferentes propriedades físicas e mecânicas quando comparados aos concretos convencionais, diante disso, exigem critérios especiais de dimensionamento. Como não existe norma brasileira específica para este fim, o dimensionamento segue princípios similares ao dimensionamento de concreto convencional. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo fazer um levantamento sobre a utilização de concreto leves, suas propriedades e critérios para dimensionamento à compressão, cisalhamento e flexão disponíveis em normalização nacional e internacional e em literatura técnica específica. O estudo inclui tanto a análise dos critérios para dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) quanto para verificação no Estado Limite de Serviço (ELS). Por fim, são comparados casos de dimensionamento de vigas, lajes e paredes em quatro diferentes tipos de concreto leve, levando em conta fatores como consumo de materiais, custo, peso e consumo de cimento.

Palavras-chave: concreto leve, dimensionamento, especificação

ABSTRACT

The lightweight concrete for structural purposes is a material that has great potential for application in various construction areas. Its main feature is the reduced density compared to conventional concrete. This characteristic is a great advantage, since one of the main shortcomings of conventional concrete is its heavy weight. Thus there is a reduction in foundation loads, reduction in moving cost due to smaller weight, low consumption cost of cement and, in some cases, improved thermal and acoustic performance. However, despite the great potential application of lightweight concrete, there is a lack of studies regarding the design criteria of elements made of this material type. The lightweight concretes have different strength properties when compared to conventional concrete, thus require special design criteria. As there is no specific Brazilian standard, the design is taken to be similar to the design principles of conventional concrete. In this context, the present study aims to evaluate design criteria for lightweight concrete elements in compression, shear and bending available in national and international standardization and specific technical literature. The study includes both the analysis of the design criteria for the Ultimate Limit State (ULS) and for checking the Limit State Service (LLS). Finally, cases are compared assessing beams, slabs and walls on four different types of lightweight concrete, taking into account factors such as material consumption, cost, weight and cement consumption.

keywords: lightweight concrete, design, specification.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Formas básicas do concreto leve..... | 22 |
| Figura 2: Panteão Figura 3: Coliseu | 24 |
| Figura 4: Classificação dos concretos celulares | 27 |
| Figura 5: Tipos de concreto celular espumoso | 28 |
| Figura 6: Intervalos típicos de valores de massa específica de concretos com agregados leves..... | 29 |
| Figura 7: Classificação dos agregados leves segundo sua origem. | 30 |
| Figura 8: Torre de Picasso em Madri. | 33 |
| Figura 9:Pavilhão de Portugal. | 34 |
| Figura 10: Estádio St. James' Park | 35 |
| Figura 11: New Eidsvoll Bridge..... | 36 |
| Figura 12: Retração no concreto celular..... | 40 |
| Figura 13: Resistência ao fogo de concretos celulares espumosos de diferentes espessuras em função da massa específica seca. | 44 |
| Figura 14: Comparativo da fluência entre concreto leve e concreto convencional..... | 49 |
| Figura 15: Variação da condutividade térmica..... | 50 |
| Figura 16: Relação entre resistência x temperatura para 3 tipos de agregados. | 52 |
| Figura 17: Relação entre porosidade e resistência do concreto..... | 54 |
| Figura 18: Relação teor de cimento/ resistência à compressão | 55 |
| Figura 19: Esquema da linha de ruptura nos concretos leve e convencional | 56 |
| Figura 20: Influência da hidratação na resistência à tração do concreto leve. | 57 |
| Figura 21: Diagramas tensão x deformação medidos para um concreto convencional com $f_{ck}=25\text{MPa}$ e massa específica 2150 kg/m^3 e para um concreto leve com agregado de argila expandida de mesmo f_{ck} e massa específica 1300 kg/m^3 | 60 |
| Figura 22: Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves. | 61 |
| Figura 23: Relação tensão-deformação para concretos leve e convencional. | 62 |
| Figura 24: Curva tensão-deformação para concretos leves com ar incorporado..... | 63 |
| Figura 25: Curva tensão-deformação dos concretos estudados..... | 64 |
| Figura 26: Diagrama parábola-retângulo para concreto à compressão. | 78 |
| Figura 27: Trelíça clássica de Morsch..... | 79 |
| Figura 28: Área de região de envolvimento. | 87 |
| Figura 29: Comprimento equivalente (l_e) | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 30: Distribuição de tensão retangular..... | 99 |
| Figura 31: Distribuição de tensões para o concreto celular..... | 100 |
| Figura 32: Parede casa térrea estudada..... | 138 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Valores de referência da massa específica de concretos leves. | 23 |
| Tabela 2: Principais propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado..... | 30 |
| Tabela 3: Variação da massa específica aparente (γ_a) e da resistência à compressão com um dia de idade..... | 37 |
| Tabela 4: Deformação de retração por secagem dos concretos celulares..... | 40 |
| Tabela 5: Comparação da transmissão térmica do concreto celular com outros materiais..... | 43 |
| Tabela 6: Algumas propriedades de concretos | 51 |
| Tabela 7: Relação entre resistência à compressão e à tração dos concretos leves. | 57 |
| Tabela 8: Composição da mistura dos concretos (kg materiais/ m ³ mistura)..... | 64 |
| Tabela 9: Valores de módulo de deformação. | 65 |
| Tabela 10: Valores de módulo de deformação. | 65 |
| Tabela 11: Traço da matriz de alto desempenho para 1m ³ | 70 |
| Tabela 12: Proporções matriz de alto desempenho/ espuma x massa unitária concreto celular espumoso de alto desempenho..... | 70 |
| Tabela 13: Teor e volumes de espumas adicionadas a matriz | 70 |
| Tabela 14: Resultados das propriedades dos concretos ensaiados | 71 |
| Tabela 15: Resultados das propriedades dos concretos ensaiados | 71 |
| Tabela 16: Valores típicos de propriedades do concreto celular | 72 |
| Tabela 17: Exigências para concreto estrutural com agregados leves..... | 73 |
| Tabela 18: Composição dos traços T-1, T-2, T-3..... | 74 |
| Tabela 19: Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e massa específica do concreto leve com argila expandida..... | 74 |
| Tabela 20: Propriedades dos concretos | 75 |
| Tabela 21: Característica dos concretos das paredes..... | 76 |
| Tabela 22: Classes de agressividade ambiental..... | 85 |
| Tabela 23: Cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm | 86 |
| Tabela 24: Limites para deslocamentos..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 25: Fatores de multiplicação para relação vão/ altura útil | 91 |
| Tabela 26: Classes de agressividade ambiental | 95 |
| Tabela 27: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ | 96 |
| Tabela 28: Propriedades dos concretos estudados..... | 97 |
| Tabela 29: Altura inicial das lajes estudadas..... | 103 |
| Tabela 30: Momento fletor atuante nas lajes..... | 104 |
| Tabela 31: Valores da altura útil mínima para as lajes estudadas. | 106 |
| Tabela 32: Posição da linha neutra das lajes estudadas..... | 107 |
| Tabela 33: Domínio das lajes estudadas..... | 108 |
| Tabela 34: Armaduras principal e secundária para as lajes estudadas. | 109 |
| Tabela 35: Momento de fissuração para as lajes estudadas..... | 110 |
| Tabela 36: Características geométricas das lajes..... | 111 |
| Tabela 37: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações..... | 112 |
| Tabela 38: Flecha devido à carga acidental nas lajes estudadas..... | 114 |
| Tabela 39: Altura e flecha devido à carga acidental para as lajes estudadas..... | 115 |
| Tabela 40: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações..... | 116 |
| Tabela 41: Flecha total no tempo infinito..... | 119 |
| Tabela 42: Momento fletor atuante nas vigas..... | 121 |
| Tabela 43: Valores da altura mínima para as vigas estudadas | 122 |
| Tabela 44: Posição da linha neutra das vigas estudadas..... | 123 |
| Tabela 45: Domínio das vigas estudadas..... | 124 |
| Tabela 46: Armadura longitudinal para as vigas estudadas. | 125 |
| Tabela 47: Armaduras mínima e máxima para as vigas estudadas. | 126 |
| Tabela 48: τ_{wd} e τ_u para as vigas estudadas..... | 127 |
| Tabela 49: Armadura de cisalhamento para as vigas estudadas..... | 128 |
| Tabela 50: Armadura de cisalhamento mínima..... | 129 |
| Tabela 51: Momento de fissuração..... | 130 |
| Tabela 52: Posição da linha neutra e inércia no estágio II. | 131 |
| Tabela 53: Inércia equivalente e flecha. | 132 |
| Tabela 54: Flecha devido à carga acidental..... | 134 |
| Tabela 55: Flecha total no tempo infinito..... | 135 |
| Tabela 56: Altura e flecha final para as vigas. | 136 |
| Tabela 57: Característica dos concretos das paredes..... | 138 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 58: Características das paredes estudadas..... | 139 |
| Tabela 59: Resistência de cálculo das paredes. | 140 |
| Tabela 60: Armadura mínima das paredes estudadas..... | 141 |
| Tabela 61: Custo por metro cúbico de concreto..... | 141 |
| Tabela 62: Custo das lajes com vão $L=2,00m$ | 145 |
| Tabela 63: Custo das lajes com vão $L=3,00m$ | 145 |
| Tabela 64: Custo das lajes com vão $L=4,00m$ | 146 |
| Tabela 65: Custo das vigas com vão $L=2,00m$ | 146 |
| Tabela 66: Custo das vigas com vão $L=4,00m$ | 147 |
| Tabela 67: Custo das vigas com vão $L=6,00m$ | 148 |
| Tabela 68: Custo das paredes | 148 |
| Tabela 69: Resumo do dimensionamento e custo das lajes..... | 151 |
| Tabela 70: Resumo do dimensionamento e custo das vigas..... | 153 |
| Tabela 71: Resumo das paredes estudadas. | 154 |
| Tabela 72: Índices quantitativos para as lajes estudadas. | 155 |
| Tabela 73: Índices quantitativos para as vigas estudadas..... | 156 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|--|
| α | ângulo entre os estribos e o eixo da viga |
| α_{lct} | coeficiente recomendado |
| γ | massa específica |
| γ_c | coeficiente de ponderação para o concreto |
| Δc | tolerância de execução no cobrimento |
| η_i | coeficiente de conformação superficial da armadura considerada |
| ξ_r | taxa de armadura |
| ρ | limite superior da massa específica do concreto |
| ρ_{cl} | massa específica do concreto leve |
| ρ_{oc} | massa específica do concreto convencional |
| ρ_{ri} | taxa de armadura passiva em relação à área da região de envolvimento |
| σ_{lc} | tensão de compressão para concretos leves |
| $\sigma_{Rd,max}$ | tensão máxima de cisalhamento |
| σ_s | resistência do aço em MPa |
| σ_{si} | tensão de tração no centroide da armadura considerada |
| ν_{cl} | fator de redução da força de cisalhamento |
| τ | tensão de cisalhamento |
| ϕ | diâmetro da barra |
| φ | coeficiente de fluência |
| ϕ_i | diâmetro da barra que protege a região de envolvimento considerada |
| A | área total de armadura |
| A_{sw} | área da seção transversal dos estribos |
| b_w | largura da alma da viga |
| C | espessura do cobrimento da armadura em mm |
| C_{nom} | cobrimento nominal |
| d | altura útil da seção transversal |
| E_{lc} | módulo de deformação para concretos leves |
| E_{si} | módulo de deformação do aço da barra considerada |
| f_{bd} | tensão de aderência |
| f_{cd} | resistência de cálculo à compressão |
| f_{cil} | resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos |
| f_{ck} | resistência característica do concreto |

| | |
|------------|---|
| f_{ct} | tensão de tração |
| f_{ctm} | resistência à tração simples |
| f_{cub} | Resistência à compressão em corpos de prova cúbicos |
| f_{lctd} | resistência à compressão para concretos leves |
| f_{lctm} | resistência à tração na flexão para concretos leves |
| f_{yd} | resistência de projeto do aço |
| f_{ywk} | resistência característica ao escoamento do aço de armadura transversal |
| h | altura da seção transversal |
| l_i | distância entre pontos de momento igual a zero |
| S | espaçamento da armadura |
| | S_{c-1ano} = retração em um ano |
| | $S_{c-90dias}$ = retração aos 90 dias |
| λ | esbeltez da parede |
| γ | massa específica do concreto |
| s | espaçamentos dos estribos |
| V | força de cisalhamento |
| W_{lim} | abertura limite da fissura |
| W_{max} | abertura máxima da fissura |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | OBJETIVO | 19 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 19 |
| 1.3 | METODOLOGIA | 20 |
| 1.3.1 | Revisão bibliográfica | 21 |
| 1.3.2 | Levantamento de normas e critérios | 21 |
| 1.3.3 | Crítérios de dimensionamento de concretos leves | 21 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 | CONCRETOS LEVES | 22 |
| 2.1.1 | Breve Histórico | 23 |
| 2.2 | TIPOS DE CONCRETO LEVE | 25 |
| 2.2.1 | Concreto Celular | 25 |
| 2.2.2 | Concreto com Agregados Leves | 28 |
| 2.2.2.1 | Agregados Leves | 29 |
| 2.3 | APLICAÇÕES DO CONCRETO LEVE | 32 |
| 2.3.1 | Edifícios de grande altura | 32 |
| 2.3.2 | Elementos pré-fabricados | 34 |
| 2.3.3 | Pontes | 35 |
| 2.4 | PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS LEVES | 36 |
| 2.4.1 | Características e propriedades do concreto celular | 36 |
| 2.4.2 | Características e propriedades do concreto com agregados leves | 45 |
| 2.5 | PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS LEVES | 53 |
| 2.5.1 | Resistência à Compressão | 54 |
| 2.5.2 | Resistência à Tração | 56 |
| 2.5.3 | Módulo de deformação | 59 |
| 2.6 | RESUMO | 67 |
| 3 | PROPRIEDADES DOS CONCRETOS LEVES ESTUDADOS | 69 |
| 3.1 | CONCRETO CELULAR | 69 |
| 3.2 | CONCRETO COM AGREGADOS LEVES | 73 |
| 3.3 | RESUMO | 75 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL..... | 77 |
| 4.1 | DIMENSIONAMENTO NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) | 77 |
| 4.1.2 | Elementos Sujeitos à Flexão Simples | 77 |
| 4.1.3 | Elementos Sujeitos à Força Cortante – Cisalhamento | 79 |
| 4.1.4 | Ancoragem por aderência..... | 82 |
| 4.2 | VERIFICAÇÃO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)..... | 84 |
| 4.2.1 | Estado limite de abertura de fissuras (ELS-W)..... | 85 |
| 4.2.2 | Estado limite de deformação excessiva (ELS-DEF) | 88 |
| 4.3 | DIMENSIONAMENTO DE PAREDES EM CONCRETO CELULAR..... | 92 |
| 4.3.1 | Resistência de cálculo sob normal de compressão..... | 93 |
| 4.3.2 | Armadura mínima..... | 94 |
| 4.3.3 | Dimensionamento ao cisalhamento..... | 94 |
| 4.3.4 | Cobrimento | 95 |
| 5 | APLICAÇÃO DO CONCRETO LEVE EM LAJES, VIGAS E PAREDES MOLDADAS NO LOCAL..... | 97 |
| 5.1 | DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO | 97 |
| 5.1.1 | Concreto com agregados leves..... | 97 |
| 5.1.2 | Concreto celular..... | 100 |
| 5.2 | APLICAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES EM LAJES..... | 101 |
| 5.2.1 | Determinação da altura inicial da laje..... | 102 |
| 5.2.2 | Cálculos dos momentos fletores atuantes nas lajes | 104 |
| 5.2.3 | Determinação da altura útil mínima..... | 105 |
| 5.2.4 | Verificação do domínio | 106 |
| 5.2.5 | Cálculo das armaduras principall e secundária | 108 |
| 5.2.6 | Cálculo do momento de fissuração..... | 109 |
| 5.2.7 | Verificação dos deslocamentos para diversas combinações | 110 |
| 5.2.8 | Verificação do efeito da fluência | 117 |
| 5.3 | APLICAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES EM VIGAS. | 119 |
| 5.3.1 | Geometria da seção..... | 120 |
| 5.3.2 | Cálculos dos momentos fletores atuantes nas vigas..... | 120 |
| 5.3.3 | Cálculo da altura mínima | 121 |
| 5.3.4 | Verificação do domínio | 122 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.3.5 | Cálculo da armadura longitudinal..... | 124 |
| 5.3.6 | Dimensionamento ao cisalhamento..... | 126 |
| 5.3.6.1 | Cálculo da armadura transversal | 127 |
| 5.3.7 | Cálculo do momento de fissuração..... | 130 |
| 5.3.8 | Verificação dos deslocamentos | 130 |
| 5.3.9 | Verificação do efeito da fluência | 135 |
| 5.4 | APLICAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES EM PAREDES MOLDADAS NO LOCAL. | 137 |
| 5.4.1 | Resistência de cálculo sob normal de compressão..... | 139 |
| 5.4.2 | Armadura mínima..... | 141 |
| 5.5 | COMPARATIVO DE CUSTO | 141 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 151 |
| 6.1.1 | Lajes..... | 151 |
| 6.1.2 | Vigas..... | 152 |
| 6.1.3 | Paredes..... | 154 |
| 6.1.4 | Índices..... | 155 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 158 |
| 8 | REFERÊNCIAS | 160 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil. Trata-se de uma mistura de cimento Portland, agregados e água. Segundo Pinheiro et al. (2004), estima-se que seu consumo anual seja da ordem de uma tonelada por habitante. Entre os materiais utilizados pelo homem, o concreto perde apenas para a água.

De acordo com Sussekind (1980), a razão de o concreto ser o material mais utilizado pelo homem, se dá pelo fato de apresentar grandes vantagens, por exemplo: resistência a efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos, adaptação a qualquer tipo de forma e facilidade de execução, permitindo assim total liberdade à concepção arquitetônica, além de grande durabilidade.

Segundo Tezuka (1989), os concretos convencionais de cimento Portland e agregados são excelentes materiais de construção, pois são duráveis, apresentam adequada resistência à compressão e rigidez, e têm custo relativamente baixo. Contudo, apresentam algumas limitações tais como: peso próprio elevado, baixa resistência à tração (da ordem de 10% da resistência à compressão) e baixa resistência ao ataque de agentes químicos.

Nesse contexto, tendo em vista que uma das deficiências do concreto é o seu elevado peso próprio, que influencia no seu custo e velocidade de execução, tornou-se necessário reduzi-lo.

Diante disto, foram desenvolvidos os concretos leves, que apresentam massa específica reduzida quando comparados aos concretos convencionais.

A definição usual de concreto leve identifica concretos com menor massa específica do que os concretos com agregados convencionais. Segundo Mehta e Monteiro (2006) o termo concreto leve é usado para concretos que apresentam massa específica menor que 1800 kg/m³. Leonhardt e Mönning (1978) definem concreto leve como sendo aquele que apresenta massa específica até 2000 kg/m³.

A diminuição da massa específica ocorre pela substituição de componentes sólidos da mistura por ar, que pode ser obtida pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, pela incorporação de ar, no caso dos concretos celulares, ou pela retirada dos finos (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

Conforme Neville (1997), a redução da massa específica do concreto pode ser obtida pela substituição de parte dos materiais sólidos por ar. Há três possibilidades de localização desse ar: nas partículas do agregado, conhecidos como agregados leves; na pasta de cimento,

sendo o concreto resultante conhecido como concreto celular; e entre as partículas de agregado graúdo, deixando-se de usar o agregado miúdo, dando origem no denominado concreto sem finos.

Os concretos leves para fins estruturais e de vedação têm sido utilizados desde o início do século passado, apresentando excelentes resultados. A partir de 1980, foram realizadas rigorosas pesquisas sobre os concretos leves em todo o mundo, demonstrando o grande potencial de uso desse material nas mais diversas áreas da construção civil (ROSSIGNOLO, 2003).

Para Lopez (2005) as principais vantagens na utilização do concreto com agregados leves são:

- redução do peso próprio das estruturas, o que resulta em fundações menores;
- desenvolvimento de uma tecnologia de pré-moldados, como resultado da redução do peso próprio que facilita o transporte e a montagem de elementos estruturais;
- redução nas forças sísmicas que são proporcionais à massa da estrutura;
- aumento de isolamento térmico;
- aumento da resistência ao fogo;
- aumento da compatibilidade elástica entre pasta de cimento e agregado, que minimiza as microfissuras na zona de transição interfacial;
- redução na suscetibilidade à microfissuras induzidas pela temperatura.

Ainda, de acordo com o mesmo autor, as principais desvantagens no uso deste material são:

- diminuição da resistência para uma mesmo teor de cimento e relação água/cimento;
- redução no módulo de deformação para um mesmo nível de resistência;
- aumento da retração e fluência para um mesmo nível de resistência.

Apesar do grande potencial de aplicação dos concretos leves, observa-se uma carência de estudos no que tange a critérios de dimensionamento de elementos feitos com esse material. Atualmente no Brasil, existem projetos de normas da ABNT como o projeto CEE 185 – Parede e laje de concreto celular estrutural moldadas no local para a construção de edificações e o Projeto 18:307.02-002/01- Concreto leve — Preparo, controle e recebimento para execução de elementos de construção, tipo lajes e paredes — Parte 1: Requisitos,

específicas para este fim. Esses projetos tratam da normatização de dimensionamento de paredes e lajes de concreto leve. Entretanto, como se tratam, por enquanto, de normas em estudo, o dimensionamento de peças em concreto leve segue princípios similares ao dimensionamento de concreto convencional.

O presente trabalho busca avançar no conhecimento de concretos leves com finalidade estrutural em relação às suas propriedades físicas e mecânicas e no comportamento de elementos de parede, laje e viga, buscando estabelecer critérios confiáveis de utilização.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é identificar propriedades de concretos leves e avaliar e comparar critérios para dimensionamento desses concretos.

Dentro desse objetivo destacam-se os pontos abaixo:

- Identificação dos tipos de concretos leves atualmente disponíveis;
- Revisão das propriedades físicas e mecânicas usuais para concretos leves disponibilizadas na literatura e compilação dos resultados;
- Revisão de critérios para dimensionamento à compressão, cisalhamento e flexão disponíveis em normatização nacional e internacional e em literatura técnica específica e compilação de resultados;
- Análises comparativas de dimensionamentos de vigas de até 6 metros de vão, paredes de edificações térreas e de sobrados e lajes de até 4 metros de vão, em concreto leve, identificando aspectos relevantes no comportamento de cada tipo de concreto leve e suas vantagens e desvantagens.

1.2 Justificativa

O concreto leve é utilizado em diversas áreas da construção civil, por exemplo, tabuleiros de pontes, plataformas marítimas, edifícios de múltiplos andares moldados no local, casas térreas, painéis pré-fabricados de vedação, dentre outros.

O uso do concreto leve apresenta inúmeras vantagens além da redução do peso próprio. Sua aplicação em edifícios de múltiplos pavimentos proporciona uma redução nas cargas na fundação, sua baixa condutividade térmica proporciona um desempenho significativamente superior em situações de incêndio, visto que reduz o aumento da

temperatura da armadura durante o incêndio. Quando utilizado na produção de elementos pré-fabricados, apresenta como vantagem menores custos de manuseio, transporte e montagem. Em estruturas marítimas, o concreto leve apresenta melhoria das características de flutuação durante o transporte e a utilização.

Diante do exposto, a presente pesquisa mostra-se de extrema relevância, posto que o concreto leve, apesar de suas inúmeras vantagens e grande potencial de aplicação, ainda tem seu uso bastante modesto no Brasil. Além disso, há muito pouco ou quase nada sobre critérios de dimensionamento de elementos estruturais feitos com este material.

Assim, o problema central da presente pesquisa reside no seguinte: de um lado há o concreto leve para fins estruturais, que se trata de um material vantajoso do ponto de vista técnico e até mesmo econômico, visto que seu uso pode representar uma redução no custo total da estrutura e da fundação. De outro, há uma insuficiência de normas relativas a critérios de dimensionamento de elementos feitos de concreto leve, o que gera insegurança a médio e longo prazo em relação ao seu uso.

Desse modo, se faz necessário um estudo mais aprofundado dos concretos leves no que tange às suas propriedades físicas e mecânicas, bem como critérios e normas vigentes nacionais e internacionais de dimensionamento e comportamento de elementos de concreto leve.

Dessa maneira, ficam claros quais são os motivos que autorizam a presente pesquisa, quais sejam a necessidade de se avançar no estudo dos concretos leves e suas propriedades, bem como a relevância em abordar os critérios e normas de dimensionamento.

A presente pesquisa apresentará contribuição para o setor da construção civil brasileira, uma vez que indicará métodos de dimensionamento que podem se mostrar mais adequados ao uso dos concretos leves.

1.3 Metodologia

No desenvolvimento do estudo foi realizada revisão bibliográfica, levantamento de normas e critérios relativos ao tema, bem como dimensionamento de elementos de paredes, vigas e lajes em concreto leve.

1.3.1 Revisão bibliográfica

Procedeu-se à busca na bibliografia mais recente e relevante sobre o tema. Foram selecionadas e analisadas obras impressas e digitais que embasaram as discussões suscitadas a partir de referida pesquisa bibliográfica

Na busca de obras impressas foram consideradas obras dos principais autores no tema.

Para a busca de obras digitais foram consultados artigos de revistas e base de dados em métodos de construção civil, concreto leve, paredes de concreto, paredes de concreto moldadas no local, dentre outras.

1.3.2 Levantamento de normas e critérios

Para esta etapa, foram realizadas buscas e análises de normas técnicas nacionais e internacionais em bases de dados pré-selecionadas, a qual ocorreu em etapa única.

1.3.3 Critérios de dimensionamento de concretos leves

Foram elaborados exemplos comparativos de dimensionamento de elementos de concreto convencional e concreto leve. Os elementos foram dimensionados no Estado Limite Último e verificados Estado Limite de Serviço.

Os cálculos foram baseados em normas do *American Concrete Institute (ACI)*, *EUROCODE*, no texto base do *Comité Euro-International du Béton and Fédération International de La Précontrainte (CEB-FIP) Manual of Lightweight Aggregate Concrete Design* e também nas normas brasileiras em vigor e em desenvolvimento, além de critérios e propriedades identificados na literatura técnica mundial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

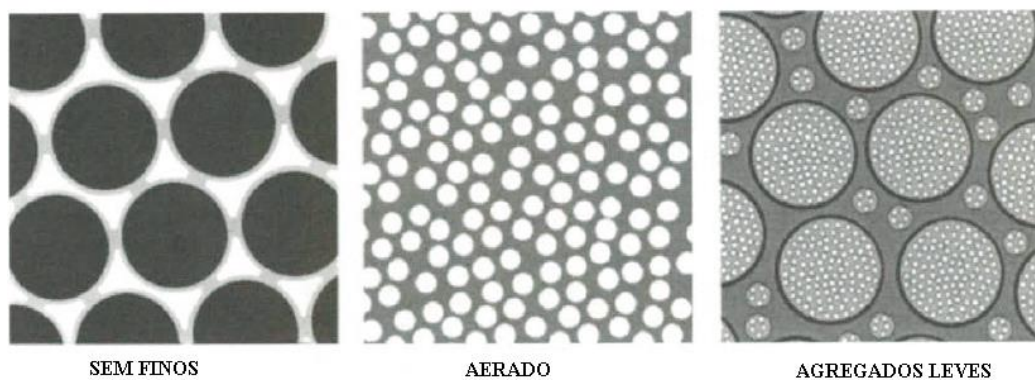
Neste capítulo são apresentadas algumas definições sobre concretos leves, seu desenvolvimento histórico, tipos, aplicações, além de suas propriedades físicas e mecânicas.

2.1 Concretos leves

O concreto leve é definido como sendo um concreto que apresenta menor massa específica quando comparado aos concretos com agregados convencionais.

De acordo com Rossignolo e Agnesini (2005), essa diminuição da massa específica ocorre pela substituição de componentes sólidos da mistura por ar, que pode ser obtida pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, pela incorporação de ar, no caso dos concretos celulares, ou pela retirada dos finos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Formas básicas do concreto leve



Fonte: (NEWMAN e OWENS, 2003).

A Tabela 1 apresenta os valores de referência usuais da massa específica para concreto leve segundo normas internacionais.

Tabela 1: Valores de referência da massa específica de concretos leves.

| Referência | Massa Específica (kg/m³) |
|--------------------|--|
| UNI 7548 -1 | até 1850 |
| ACI 213 R03 (2003) | 1120 < γ < 1920 |
| EUROCODE 2 (1999) | 900 < γ < 2000 |
| prEN 206 (2000) | 800 < γ < 2000 |
| CEB/FIP (1977) | até 2000 |
| ABNT/ CEE 185 | até 2000 |
| ABNT/ CB-18 | < 2000 |

Fonte: Elaborada pela autora (ACI 213 R03, 2003; CEB/FIP, 1977, EUROCODE, 1999; EUROLIGHTCON, 1998; ABNT/ CEE 185, 2013; ABNT/CB-18, 2014).

Os concretos leves são classificados em: concreto com agregados leves, concreto leve celular e concreto sem finos.

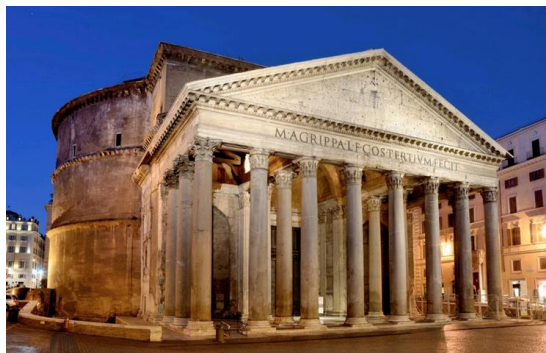
Dentre esses três tipos, o concreto celular e o concreto com agregados leves são os mais comumente empregados para fins estruturais, desse modo são discutidas as características dos mesmos.

2.1.1 Breve Histórico

O concreto leve é conhecido desde tempos remotos, sendo fácil encontrar exemplos de suas aplicações na arquitetura de vários países situados em regiões vulcânicas. Essas aplicações surgiram como uma forma conveniente de utilização da matéria-prima local, visto que materiais de origem vulcânica apresentam propriedades que propiciam o isolamento térmico e reduzem a carga permanente.

O primeiro registro conhecido do uso na construção de uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas volantes e cal, remonta à época pré-colombiana (1100 A.C.), na atual cidade de El Tajin, no México (SILVA, 2007).

As aplicações históricas mais conhecidas dos concretos leves foram construídas pelos romanos, durante a República Romana, Império Romano e Império Bizantino, com destaque para o Porto de Casa, a cobertura do Panteão (Figura 2) e o Coliseu de Roma (Figura 3) (ACI 213, 2003).

Figura 2: Panteão**Figura 3: Coliseu**

Fonte: (CLICKECOLAR, 2014).

O Porto de Casa foi construído em 273 a.C. utilizando concreto leve feito a partir de materiais vulcânicos naturais. Este porto, na costa oeste da Itália, perdurou por mais de dois mil anos sofrendo apenas abrasão na superfície. Tornou-se obsoleto devido ao assoreamento. Na cobertura do Panteão, construtores romanos utilizaram concreto leve para construir uma cúpula cujo diâmetro de 43,3m não foi ultrapassado por quase dois milênios. A estrutura encontra-se atualmente em excelente estado e é utilizada para fins religiosos (ACI 213, 2003).

Depois da queda do Império Romano, o uso do concreto leve foi limitado até o século XX, quando um novo tipo de agregado leve, o xisto expandido, tornou-se disponível para uso comercial.

A descoberta da argila expandida data de 1855, entretanto, apenas em 1918 o americano S. J. Hayade fabricou agregado de argila expandida e o empregou como agregado para concreto. Atualmente, 70% da produção de agregado leve são de argila expandida (SILVA, 2007).

Já no século XX, as primeiras aplicações foram durante a Primeira Guerra Mundial, quando a *American Emergency Fleet Building Corporation* construiu embarcações com concreto leve. Durante esse período, o aço se tornou escasso e a utilização do concreto leve na fabricação de embarcações se tornou uma alternativa, visto que o casco feito com esse material necessitava de apenas um terço do aço necessário para uma embarcação feita com concreto convencional (SILVA, 2007).

Simultaneamente a esse uso, pesquisas para aplicação desse material na construção civil foram iniciadas nos Estados Unidos. Em 1922, ocorreu a primeira aplicação estrutural de concreto leve em edificações, no ginásio da *Westport High School*, em *Kansas City*. Já a primeira aplicação de concreto leve estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu

em 1929, também *Kansas City*, na expansão do edifício de escritórios da *Southwestern Bell Telephone Company* (ROSSIGNOLO, 2009).

No início da década de 30, o concreto leve foi utilizado para construção da pista superior da ponte na baía de *San Francisco-Oakland* (EUA) (ROSSIGNOLO, 2009).

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 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 (ROSSIGNOLO, 2009).

Tais aplicações em concreto leve com funções estruturais estimularam o desenvolvimento de várias pesquisas sobre as propriedades do concreto leve por importantes organizações.

2.2 Tipos de concreto leve

Os concretos leves podem ser classificados em: concretos com agregados leves, que apresentam maior aplicação estrutural; concretos celulares, que se baseiam na introdução de grandes vazios no interior da massa de concreto; e concreto sem finos, que consistem simplesmente em omitir o agregado miúdo do concreto, formando uma grande quantidade de vazios intersticiais (CATOIA, 2012).

2.2.1 Concreto Celular

O concreto celular é um material composto por agregados convencionais, cimento portland, água e pequenas bolhas de ar distribuídas uniformemente em sua massa. Como tal,

adquire propriedade de material leve, com massa específica menor que a dos concretos convencionais (GETHAL, 2006).

O concreto celular é obtido por meio da introdução de vazios estáveis no interior da pasta de cimento ou da argamassa endurecidas. Esses vazios podem ser gerados por ar ou gás, como o ar é introduzido por um agente formador de espuma, usa-se também a expressão concreto de espuma. No caso do gás, sua introdução é usualmente feita pela adição de alumínio em pó bem fino, a razão de 0,2% da massa de cimento. A reação do alumínio com o hidróxido de cálcio do cimento libera bolhas de hidrogênio que expandem a pasta de cimento (NEVILLE, 1997).

O Projeto de norma ABNT/ CEE 185 (2013) define concreto celular estrutural como sendo um concreto de cimento Portland, em que o aditivo espumígeno incorpora, por agitação mecânica, bolhas de ar de dimensões milimétricas, incomunicáveis, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, e indeformáveis até o final do processo de lançamento e cura, mantendo inalterada a alcanilidade do concreto base, com massa específica aparente no estado seco não superior a 2.000kg/m³.

Ferreira (1987), afirma que concreto celular é um concreto leve que resultou da pega de uma mistura composta de aglomerantes e agregados classificados na categoria de finos, com massa específica aparente seca inferior a 1850kg/m³ e superior a 400kg/m³. Essa mistura sofre tratamento mecânico, físico e/ou químico, destinado a criar em sua massa uma alta porcentagem de poros esféricos de dimensões regulares e milimétricas, uniformemente distribuídos, que permanecem estáveis, incomunicáveis e indeformáveis durante todo o processo.

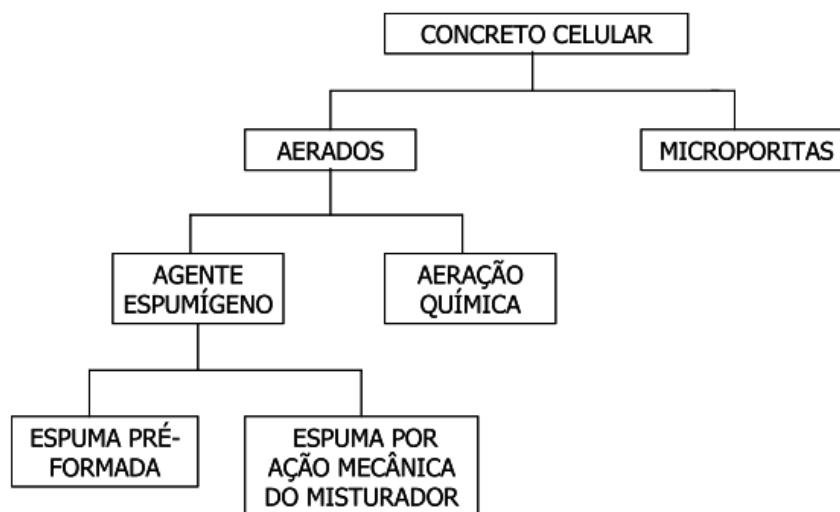
Segundo Lucas (1986), designa-se por concreto celular, os concretos leves que apresentam uma estrutura alveolar uniforme, cujo diâmetro dos alvéolos (ou células) é da ordem do milímetro e o volume por eles ocupado não será nunca inferior a 50% do volume total do concreto.

O concreto leve celular é constituído de cimento Portland, areia, brita, água, espuma ou agentes incorporadores de ar. As bolhas de ar incorporadas na matriz de cimento ocasionam a redução da massa específica do concreto para valores entre 1200 e 2000 kg/m³. Entretanto, o ar incorporado à matriz aumenta significativamente a permeabilidade do concreto, assim como reduz sua resistência mecânica. Esse tipo de concreto apresenta valores de resistência à compressão abaixo de 6MPa e baixa durabilidade devido ao rápido ataque à armadura interna do concreto por ação, por exemplo, de íons de cloreto e da carbonatação,

devido à alta permeabilidade do concreto. O concreto celular quando aplicado no sistema construtivo exige cuidados adicionais para garantir a durabilidade das vedações, como a impermeabilização e barrados protetores (SACHT, 2008).

De acordo com o tipo de processo de geração e forma dos poros, os concretos celulares podem ser classificados em dois grupos básicos, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Classificação dos concretos celulares



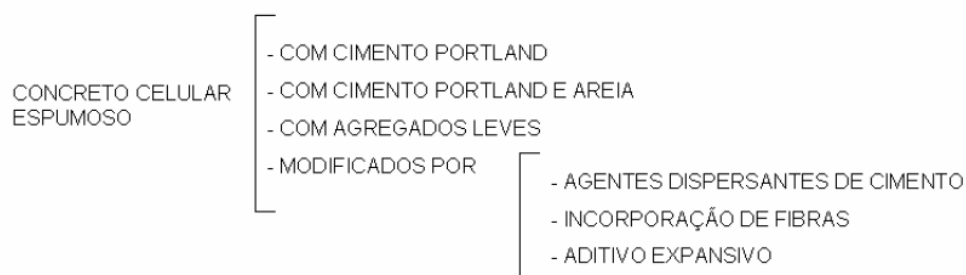
Fonte: (TEIXEIRA FILHO, 1992)

Segundo Teixeira Filho (1992), a diferença entre os aerados e os microporitas está basicamente no processo de formação dos poros e no tamanho destes. Os microporitas apresentam uma estrutura capilar uniforme que resulta da excessiva quantidade de água adicionada. Sua cura pode ser ao ar livre, a vapor ou em autoclave.

Nos concretos celulares aerados com agente espumígenos, as bolhas de ar são produzidas por espuma pré-formada adicionada na betoneira juntamente com o cimento e o agregado miúdo (NEVILLE, 1997).

De acordo com Teixeira Filho (1992), existem diversos tipos de concretos celulares espumosos, que são classificados em função de seus materiais constituintes, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5: Tipos de concreto celular espumoso



Fonte: (TEIXERA FILHO, 1992).

Para a produção de concretos celulares com massa específica abaixo de 800kg/m^3 , utiliza-se apenas cimento, mas para se obter massas específicas superiores a este valor, é recomendado a colocação de areia na mistura.

A adição de agregados leves à mistura é feita para melhorar a relação massa específica x resistência mecânica. O mesmo acontece quando se adiciona agentes dispersantes de cimento ao concreto celular.

A modificação resultante da utilização de fibras de vidro e dos aditivos expansores, visa minimizar os efeitos da elevada retração por secagem que o concreto celular apresenta (TEIXEIRA FILHO, 1992).

2.2.2 Concreto com Agregados Leves

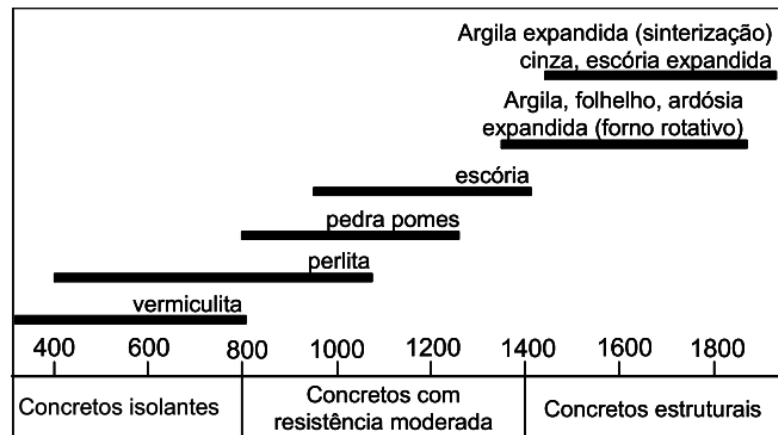
O concreto com agregados leves caracteriza-se pela substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por agregados leves e pelo valor de sua massa específica, que deve ser inferior a 2000 kg/m^3 (ABNT, 2014).

Este concreto é também denominado concreto leve estrutural e é amplamente utilizado na construção de pontes, plataformas marítimas e elementos pré-fabricados (ROSSIGNOLO E AGNESINI, 2005).

O concreto leve estrutural se apresenta como uma alternativa ao concreto celular na produção de habitações que utilizam o sistema de paredes de concreto moldadas no local, pois possui massa específica e isolamento térmico e acústico compatível com o obtido em concretos celulares, além de resistência mecânica e durabilidade semelhante às dos concretos tradicionais, para as mesmas características de dosagem (SACHT, 2008).

A Figura 6 apresenta intervalos típicos de valores de massa específica de concretos com agregados leves.

Figura 6: Intervalos típicos de valores de massa específica de concretos com agregados leves.



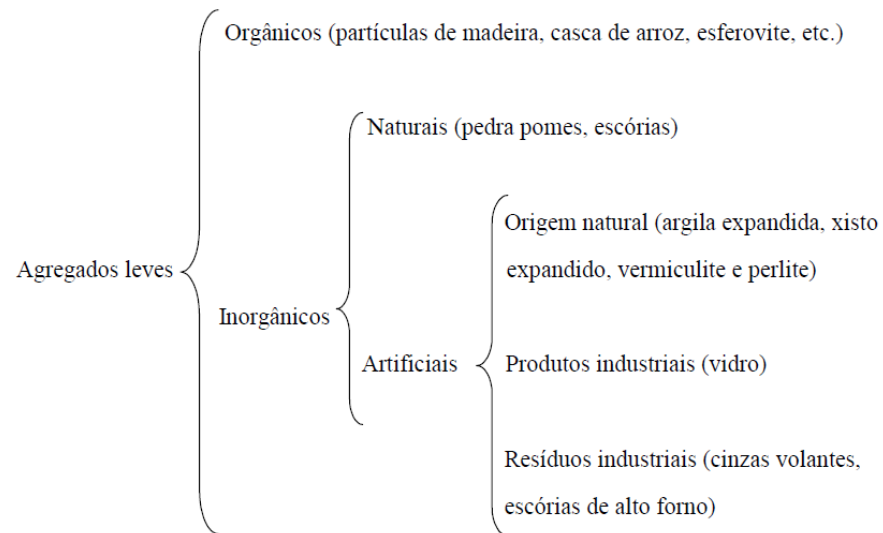
Fonte: (ROSSIGNOLO E AGNESINI, 2005).

2.2.2.1 Agregados Leves

São chamados agregados leves, segundo Mehta e Monteiro (2006), aqueles que apresentam massa específica menor que 1120 kg/m³.

Os agregados leves apresentam como principal característica uma elevada porosidade, que resulta uma baixa massa específica aparente (NEVILLE, 1997).

Segundo Silva (2007), os agregados leves utilizados na produção do concreto leve podem ser classificados em agregados orgânicos e inorgânicos, de acordo com sua natureza. Os inorgânicos dividem-se em naturais e artificiais. Os artificiais podem ser de origem natural ou artificial. A Figura 7 apresenta um organograma onde é possível observar a classificação dos agregados leves de acordo com sua origem.

Figura 7: Classificação dos agregados leves segundo sua origem.

Fonte: (SILVA, 2007).

Com a substituição dos agregados tradicionais por agregados leves na produção de concretos, além da massa específica, outras propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração, fluência, dentre outras são influenciadas. Por esse motivo, é importante o conhecimento dos agregados leves utilizados, suas características e processo de fabricação. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades do concreto que são afetadas pelas propriedades dos agregados.

Tabela 2: Principais propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado.

| CONCRETO | AGREGADO |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Trabalhabilidade | Forma da partícula |
| | Textura da superfície |
| | Classificação |
| | Absorção de água |
| Resistência | Resistência |
| | Módulo de deformação |
| | Textura da superfície |
| | Forma da partícula |
| | Dimensão máxima e classificação |
| Massa específica | Massa específica das partículas |
| | Classificação das partículas |
| | Massa específica das partículas |
| Módulo de deformação | Módulo de deformação |
| | Classificação das partículas |

Tabela 2: Principais propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado (continuação)

| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Retração e deformação | Módulo de deformação |
| | Forma da partícula |
| | Classificação |
| Retração e deformação | Dimensões máximas |
| | Poros |
| | Grau de saturação |
| Condutividade térmica | Condutividade térmica |
| | Grau de saturação |
| Resistência ao fogo | Coefficiente de expansão térmica |
| | Módulo de deformação |
| | Dimensões |
| | Condutividade térmica |

Fonte: (CEB/FIP, 1977).

2.2.2.1.1 Agregados naturais

Os agregados leves naturais são obtidos por meio da extração direta em jazidas. Esse tipo de agregado, entre os quais está a pedra pomes, tem pouca utilização na produção de concretos leves estruturais em decorrência da variação de suas propriedades (SACHT, 2008).

Os principais agregados nessa categoria são a diatomita, a pedra pomes, a escória, as cinzas vulcânicas e os tufos, com exceção da diatomita, todos os demais são de origem vulcânica. Como esses agregados são encontrados apenas em algumas partes do mundo, não são usados extensivamente na produção de concreto leve (NEVILLE, 1997).

2.2.2.1.2 Agregados artificiais

Os agregados leves artificiais são obtidos industrialmente e, em geral, são classificados em função da matéria-prima utilizada e do processo de fabricação. Como exemplo tem-se as argilas, folhelhos e escórias expandidas (ROSSIGNOLO, 2003).

Na fabricação de agregados leves, os principais sub-produtos industriais utilizados são cinza volante e escória de alto forno. A cinza volante bem fina é umedecida, pelotizada e sinterizada em um forno apropriado. Os nódulos sinterizados constituem um agregado arredondado, com massa específica aproximada de 1000 kg/m³ (NEVILLE, 1997).

Na Alemanha e Noruega os agregados mais frequentemente utilizados são as argilas expandidas. Já em Portugal e Espanha, utilizam-se somente argilas expandidas com uma gama de resistência restrita. Na Holanda, a produção de agregados leves artificiais é feita a

partir de cinzas volantes, assim como no Reino Unido. Nos Estados Unidos os xistos são utilizados com mais frequência (FARIAS, 2009).

A produção dos agregados leves artificiais pode ser feita por dois processos diferentes, sinterização e forno rotativo. Na sinterização a matéria-prima é misturada a certa quantidade de combustível e em seguida é submetida a altas temperaturas que causam a sua expansão devido à formação de gases (GOMES NETO, 1998).

Os agregados produzidos em forno rotativo caracterizam-se por uma massa esponjosa micro-celular, envolta por uma camada vitrificada, que confere baixa permeabilidade, o que possibilita boa trabalhabilidade, com baixas relações água/cimento. Geralmente tem granulometria variada, mas seu formato é regular e arredondado, possuindo maior facilidade de segregação do que os produzidos por sinterização (CEB/FIP, 1977).

2.3 Aplicações do Concreto Leve

Apesar de o concreto leve estrutural apresentar aplicações nos mais diversos setores da construção civil, sua viabilidade técnica e econômica é maior nas situações em que o peso próprio apresenta uma grande parcela da carga total sobre a estrutura, como em pontes e edificações de múltiplos pavimentos, em construções que envolvem transporte de componentes, caso dos sistemas construtivos pré-fabricados, e em plataformas marítimas (ROSSIGNOLO, 2009).

2.3.1 Edifícios de grande altura

O uso do concreto leve em edifícios de múltiplos pavimentos deve-se não só a redução do peso próprio, que permite soluções para diversas propostas arquitetônicas, como também à redução nas cargas de fundação. Além disso, a boa capacidade de isolamento térmico e de resistência ao fogo também justificam o seu uso (SILVA, 2007).

Um exemplo de uso de concreto leve em edifícios de grande altura é a Torre de Picasso em Madri (Figura 8). A torre foi inaugurada em 1988, com projeto de autoria do arquiteto Minoru Yamazaki, o mesmo que projetou as torres gêmeas do World Trade Center em Nova Iorque. O edifício possui 45 andares e sua construção utilizou cerca de 10.000 m³ de concreto com agregados leves do tipo Arlita F7 em lajes mistas com 11 cm de espessura. Outro exemplo de aplicação são as Marina City Towers, construídas em Chicago (EUA) em

1962. Foram utilizados 19.000 m³ de concreto de agregados leves LC 25/28 com massa específica de 1680 kg/m³ e 25 MPa de resistência em lajes de espessura 12,7 cm e com vãos de 2,44 m a 6,5 m. Essa edificação possui 64 andares.

Figura 8: Torre de Picasso em Madri.



Fonte: (WIKIPEDIA, 2014).

Em Portugal, é de se destacar o uso do concreto leve com argila expandida na cobertura da entrada principal do Pavilhão de Portugal (Figura 9). Essa estrutura apresenta uma forma parabólica em 20 cm de espessura e 65x50 m² de área em planta. Foi idealizada pelo arquiteto Álvaro Siza Vieira e projetada pelo engenheiro Segadães Tavares. Os cabos de aço que suspendem essa estrutura são ancorados em ambos os lados em lajes de ancoragem. A curvatura da estrutura provoca grandes esforços horizontais na estrutura, desse modo a utilização do concreto leve permitiu reduzir as cargas permanentes da estrutura. O concreto utilizado foi feito com argila expandida LECA e tinha massa específica de 1850 kg/m³, 25 MPa de resistência e foi bombeado a uma distância de 60 metros (FARIAS, 2009).

Figura 9:Pavilhão de Portugal.



Fonte: (PORTAL DAS NAÇÕES, 2014).

2.3.2 Elementos pré-fabricados

Quando utilizado na produção de elementos pré-fabricados, o concreto leve apresenta como vantagem menores custos de manuseio, transporte e montagem.

Nos Estados Unidos é frequente o uso de elementos pré-fabricados de concreto com agregados leves de argila expandida na construção de parques de estacionamento com vãos compreendidos entre 15 a 20 metros. Na Inglaterra, destaca-se o estádio St. James' Park em Newcastle, que utilizou na sua cobertura vigas pré-fabricadas de concreto com agregados leves de extensão de 31,5 m (Figura 10) (SILVA, 2007).

Figura 10: Estádio St. James' Park



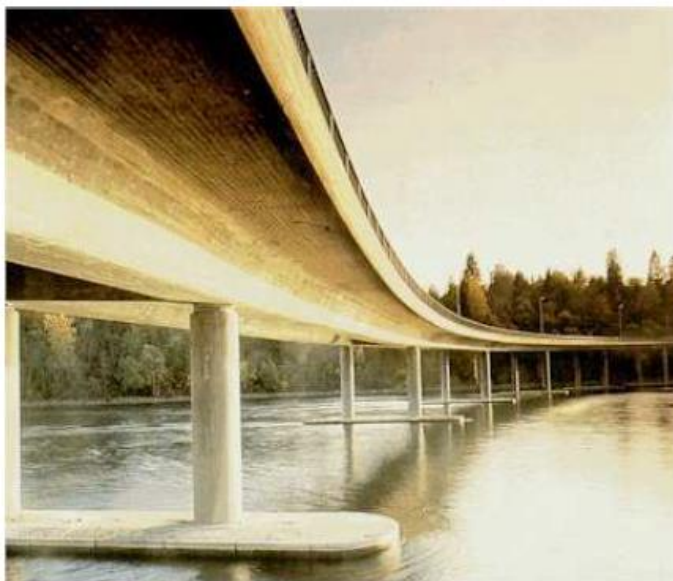
Fonte: (APIEDEPISTA, 2012)

2.3.3 Pontes

As pontes representam um dos principais campos de aplicação do concreto leve, devido principalmente à redução do peso próprio e consequente diminuição das cargas na fundação. Na Alemanha, Noruega e Holanda, é comum o uso desse material nesse tipo de estrutura.

Como exemplo pode-se citar a New Eidsvoll Bridge (Figura 11) na Noruega, construída entre 1991 e 1992. Essa ponte destaca-se por sua esbeltez, desenvolvendo-se totalmente numa curva de raio de 278m. Ela possui 320m de extensão divididos em vãos de 40m. Em sua construção foi utilizado um concreto com agregados leves de 62,2 MPa de resistência característica, 21100 MPa de módulo de deformação e massa específica de 1880 kg/m³. Como era necessário reduzir o peso próprio, de forma a aliviar as cargas nas fundações, optou-se por utilizar o concreto com agregados leves (SILVA, 2007).

Figura 11: New Eidsvoll Bridge



Fonte: (SILVA, 2007).

2.4 Propriedades Físicas dos Concretos Leves

Os concretos leves são diferenciados dos concretos convencionais por apresentarem massa específica reduzida e uma melhoria de suas propriedades térmicas. Contudo, essas não são as únicas características importantes. A adição de bolhas de ar ou a substituição de agregados convencionais por agregados leves à mistura do concreto ocasiona mudanças significativas em suas propriedades, como a resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência.

A seguir são apresentadas algumas propriedades físicas do concreto leve.

2.4.1 Características e propriedades do concreto celular

- **MICROESTRUTURA**

O concreto celular é caracterizado por apresentar uma sólida matriz de microporos e macroporos. Os macroporos são formados devido à expansão da massa e os microporos aparecem nas paredes entre os macroporos.

De acordo com Arreshvhina et al. (2006) o sistema de poros do concreto celular pode ser dividido em três partes. Uma delas consiste de poros de ar com raio entre 50 a 500 μm introduzidos por hidrogênio gasoso durante o processo de fabricação. Outra região é

caracterizada por micro-capilares de 50nm ou menos, que é o resultado dos produtos de hidratação desenvolvidos na parede entre os poros de ar. Além dessas duas regiões, existem ainda os chamados macro-capilares, que são poros com raio entre 50nm e 50 μm .

Segundo Narayanan et al. (2000), o método de formação dos poros (liberação de gás ou espuma) influencia na microestrutura do concreto e nas suas propriedades.

Sua estrutura porosa é resultado da excessiva quantidade de água adicionada à argamassa.

Algumas propriedades do concreto, tais como: permeabilidade, retração, fluência estão intimamente ligadas à porosidade e tamanho dos poros. Assim, a caracterização da estrutura dos poros é de extrema importância, ainda mais quando se trata de concreto celular, onde a porosidade pode chegar a 80% (N. NARAYANAN, K. RAMAMURTHY, 2000).

- MASSA ESPECÍFICA

Segundo Neville (1997), para concretos celulares sem agregados, é possível se obter massa específica da ordem de 200 a 300 kg/m^3 e, quando se utiliza agregado miúdo, leve ou normal, a massa específica no lançamento é de 800 a 2080 kg/m^3 . Ainda, de acordo com o referido autor, devem ser tomados cuidados com os valores da massa específica nesse tipo de concreto, pois eles são muito influenciados pela condição de umidade do concreto.

Nos concretos celulares, o tempo de mistura empregado na sua produção influencia na massa específica, uma vez que influencia na uniformidade e distribuição das células ou bolhas de ar na massa. Esse fato foi comprovado experimentalmente por Ferreira (1987). Utilizando espuma pré-formada (no mesmo gerador de espuma), cimento e areia nas proporções devidas para a obtenção de uma massa específica de 800 kg/m^3 , ele variou o tempo da mistura do concreto celular, em betoneira em 3, 5 e 10 minutos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Variação da massa específica aparente (γ_a) e da resistência à compressão com um dia de idade.

| Tempo de mistura (minutos) | Massa específica aparente (kg/m^3) | Resistência à compressão f_{c24h} (MPa) |
|---------------------------------------|---|---|
| 3 | 875 | 3,2 |
| 5 | 890 | 4,1 |
| 10 | 1050 | 5,9 |

Fonte: (FERREIRA, 1987).

Com o aumento do tempo da mistura, a formação das células de ar sofreu alterações consideráveis ocasionando a variação da massa específica e conseqüentemente variação da resistência à compressão. Ferreira (1987), explica que “as bolhas de ar começam a unir-se e subdividir-se” com o tempo excessivo de mistura, que transformaram as macrocélulas em micro-células, diminuindo, assim, a quantidade de ar incorporado e também o volume da mistura. O aumento da massa específica teve como consequência o aumento da resistência à compressão.

- POROSIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A porosidade total de um concreto é a soma dos vazios formados pelos poros capilares e os poros celulares. A porosidade efetiva representa apenas a quantidade de poros interconectados que possibilita a passagem de água, ou seja, permite a permeabilidade (CORTEPASSI, 2005).

O concreto celular apresenta alta porosidade, diante disto a absorção de água se torna um fator importante a ser considerado, pois é através dela que se determina o teor de umidade que influencia as demais propriedades do concreto.

Por se tratar de um material poroso, há uma forte interação entre água, vapor d'água e sistema de poros, existindo vários mecanismos de transporte de umidade. No estado seco, alguns poros estão vazios e a difusão do vapor d'água predomina enquanto outros poros estão cheios em regiões de umidade mais elevada. Os fenômenos de transporte de umidade em materiais porosos, absorver e transmitir água por capilaridade é explicado por uma propriedade chamada sorvidade, que se baseia na teoria de fluxo não saturado. Estudos mostraram que a propriedade de transmissão de água é melhor explicada por sorvidade do que por permeabilidade. O conceito de higroscopicidade capilar também emprega o mesmo princípio que a sorção (NARAYANAN E RAMAMURTHY, 2000).

De acordo com Ferreira (1987), absorção de água manifesta-se pela necessidade de equilíbrio higroscópico entre o material e o fluido circulante. No concreto celular, o sistema capilar comumente encontrado nos concretos, encontra-se intercortado por pequenas, numerosas e regulares bolhas de ar que não comunicam entre si. Desse modo, a absorção de água por capilaridade ocorre somente em pequenas quantidades na superfície do material.

O aumento da porosidade do concreto celular espumoso melhora suas propriedades de isolamento térmico e reduz seus valores de resistência mecânica (CORTEPASSI, 2005).

- RETRAÇÃO

A retração é uma manifestação física que é expressa pela variação dimensional das peças de cimento, argamassa ou concreto, que se verifica desde o final da compactação até ao estado limite de equilíbrio com o ambiente, a temperatura constante, e na ausência de qualquer tensão aplicada (FERREIRA, 1987).

A importância da retração nas estruturas é em grande parte relacionada à fissuração. A tendência de fissuração devido à retração depende não apenas do potencial de contração do material, mas também da sua capacidade de extensão e resistência. Geralmente a retração é classificada em: retração plástica, retração por secagem, retração autógena e química, de acordo com sua natureza e tempo de ocorrência (BABU, 2008).

A retração é bem significativa no concreto celular devido à sua alta porosidade. A diminuição dos tamanhos dos poros, juntamente com uma porcentagem mais elevada de poros menores é indicada para reduzir esse fenômeno (NARAYANAN E RAMAMURTHY, 2000).

Geralmente, para uma dada relação água/cimento a retração aumenta com o aumento do teor de cimento, pois isso resulta em um grande volume de pasta de cimento hidratado, que é suscetível de encolhimento. No caso do concreto celular para um dado volume de concreto, quanto maior o teor de ar incorporado menor o teor de cimento e conseqüentemente pode-se esperar uma retração menor. Deve notar-se que o comportamento geral de retração mais elevada com teores mais elevados de cimento só é verdadeiro no caso do concreto que contém materiais de enchimento (agregados) que apresentam maior módulo de deformação do que a pasta de cimento endurecida (BABU, 2008).

No concreto celular a deformação de retração varia, para concretos secos em estufas, entre 0,7‰ para massa específica igual a 1600 kg/m³ até 3000 x 10⁻⁶ (NEVILLE, 1997).

De acordo com Ferreira (1987), os concretos celulares curados ao ar, têm ainda outro fator que aumenta sua retração: o ataque do gás carbônico presente na atmosfera aos produtos do cimento. Neste caso, devido a sua estrutura porosa, o gás carbônico tem fácil acesso ao interior da massa provocando a carbonatação. A retração por carbonatação é conseqüência da reação do dióxido de carbono com o silicato de cálcio hidratado e trata-se de uma reação irreversível.

Segundo Tezuka (1989), o concreto celular curado ao ar tem uma retração por secagem grande. Quando o mesmo produto é curado em autoclave, a sua retração pode ser

reduzida em 1/4 ou 1/5 do valor que teria se fosse curada ao ar, conforme apresentado na Tabela 4.

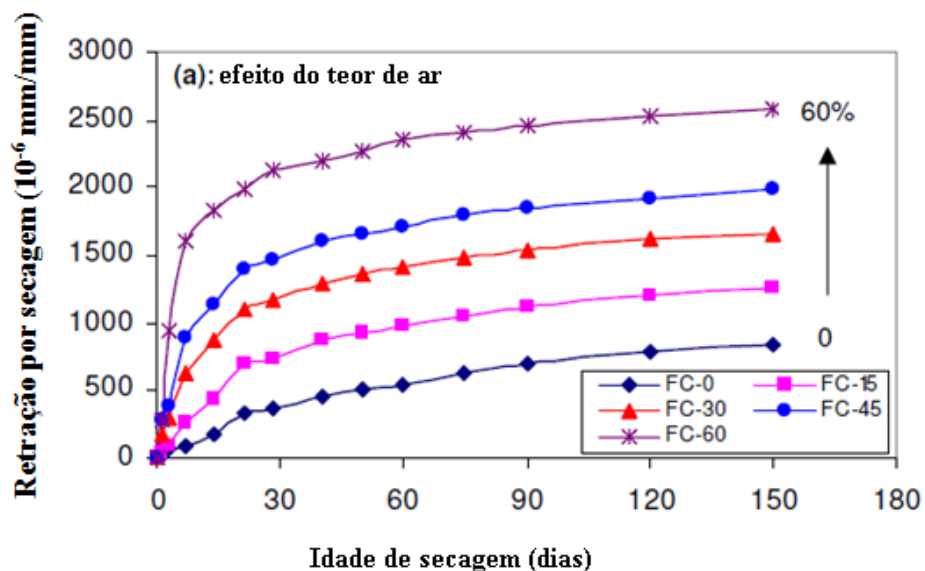
Tabela 4: Deformação de retração por secagem dos concretos celulares.

| IDADE (DIAS) | RETRAÇÃO POR SECAGEM (%) | | |
|--------------|--------------------------|--------|-------------|
| | Curado ao ar | | Autoclavado |
| | Espumoso | Aerado | Aerado |
| 7 | 0,022 | 0,020 | 0,023 |
| 28 | 0,038 | 0,032 | 0,031 |
| 90 | 0,058 | 0,046 | 0,035 |
| 180 | 0,066 | 0,058 | 0,040 |
| 360 | 0,085 | 0,072 | - |

Fonte: (TEZUKA, 1989).

Babu (2008) estudou a retração em concretos celulares com diferentes quantidades de ar incorporado à mistura. Os testes de retração foram feitos em prismas de 100x 100x 400mm. Os resultados por ele obtidos são apresentados na figura 12.

Figura 12: Retração no concreto celular



Fonte: (BABU, 2008)

Na figura acima FC significa *foamed concrete* e o número a frente corresponde a quantidade de ar incorporado na mistura. Pode-se observar que a retração aumenta com o

aumento da quantidade de ar incorporado, isso se deve ao aumento da porosidade e diminuição da rigidez do concreto celular. Quando o teor de ar incorporado é de 60% a retração atinge valores próximos a 2500×10^{-6} mm/mm ao passo que quando não há ar incorporado há uma redução na retração da ordem de 5 vezes.

Baseado nos resultados de seus testes, Babu (2008) sugere o seguinte modelo para prever a retração do concreto celular em um ano:

$$S_{c-1ano} = 1,025 \cdot S_{c-90dias} + 152$$

Onde:

S_{c-1ano} = retração em um ano;

$S_{c-90dias}$ = retração aos 90 dias.

- FLUÊNCIA

Fluência é uma deformação diferida, causada por uma força aplicada. Corresponde a um acréscimo de deformação com o tempo, se a carga permanecer aplicada (PINHEIRO, 2004).

A fluência pode ser dividida em duas categorias: fluência básica e fluência total. A fluência básica descreve uma deformação que ocorre sob uma carga constante sem alterações na quantidade de água da amostra. Já a fluência total descreve a deformação que ocorre sob uma carga constante quando é permitida a perda de água (BABU, 2008).

Estudos recentes sobre fluência em concretos leves, especialmente concreto celular, são escassos. Beres¹ (1968) apud Babu (2008) apresentou os resultados de ensaio de fluência feitos em peças de concreto celular. A fluência foi observada durante três anos em amostras carregadas em 17,8; 35,5 e 53,3% da resistência à compressão. A deformação durante esses anos variou de 700 a 4000×10^{-6} % para amostras de 100 x 100 x 400 mm com 80 – 100% de umidade relativa e 9,5 a 12,5°C. Os resultados mostraram que a fluência é proporcional à tensão aplicada quando não há grandes variações de tensão. Entretanto, diante de grandes mudanças no nível de tensão, a fluência não se mostrou proporcional.

¹ Beres, L., Shrinkage and creep of cellular concrete, *Concrete Building and Concrete Products*, 1968, pp. 139-146.

Babu (2008) estudou a fluência em concretos celulares. Em sua pesquisa ele utilizou amostras cilíndricas de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, submetidas à cura úmida. Para a determinação do comportamento à fluência do concreto estudado, ele fixou a tensão aplicada em 35% da resistência a compressão da amostra aos 7 dias de idade. O comportamento à fluência na forma de fluência específica e coeficiente de fluência apresentaram valores maiores com o aumento do teor de ar incorporado. O concreto celular com 30 e 45% de ar incorporado apresentou valores de fluência específica de 40% e 100% maiores do que o concreto que continha 15% de ar incorporado aos 150 dias de carregamento. O aumento de ar incorporado na mistura resulta em um aumento de volume de poros finos, que são responsáveis por retração e fluência.

- CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA AO FOGO

A condutividade térmica é uma propriedade que representa o fluxo de calor através do volume do material. A transferência de calor se dá por meio de três processos distintos, quais sejam: condução através do sólido, da água e do ar, convecção através dos movimentos dos gases e radiação entre as superfícies sólidas.

O concreto celular apresenta uma distribuição uniforme de células em sua massa, isso confere uma estrutura multicelular fechada que impossibilita a comunicação da estrutura interna da massa de ar, proporcionando notáveis características de isolamento térmico (CORTEPASSI, 2005).

A condutividade térmica depende da massa específica, teor de umidade e dos componentes de mistura. A quantidade de poros e a sua distribuição também são importantes fatores para o isolamento térmico, uma vez que quanto menor os poros, melhor o isolamento (NARAYANAN E RAMAMURTHY, 2000).

Tezuka (1989), afirma que os concretos convencionais apresentam coeficientes de condutibilidade térmica que variam entre 0,990 e 1,490 kcal/h.m.°C, bem superiores aos valores apresentados por concretos celulares espumosos. Essa característica de baixa condutibilidade térmica torna os concretos celulares espumosos um excelente material para ser usado como isolante térmico.

Aldana et. al (2011) em seus estudos realizaram uma comparação do isolamento do concreto celular com outros tipos de materiais. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Comparação da transmissão térmica do concreto celular com outros materiais

| Materiais | Massa específica (kg/m³) | Coefficiente de condutividade térmica | Espessura (em cm) para isolamento equivalente |
|-------------------|--|--|--|
| Concreto celular | 300 | 0,08 | 5,00 |
| Concreto celular | 500 | 0,12 | 6,66 |
| Madeira | 900 | 0,17 | 14,15 |
| Gesso | 1200 | 0,39 | 32,30 |
| Tijolo furado | 1340 | 0,50 | 41,60 |
| Tijolo maciço | 1800 | 0,75 | 62,30 |
| Calcário | 2000 | 1,00 | 83,40 |
| Reboco de cimento | 2200 | 1,10 | 91,70 |
| Concreto armado | 2500 | 12,20 | 100 |

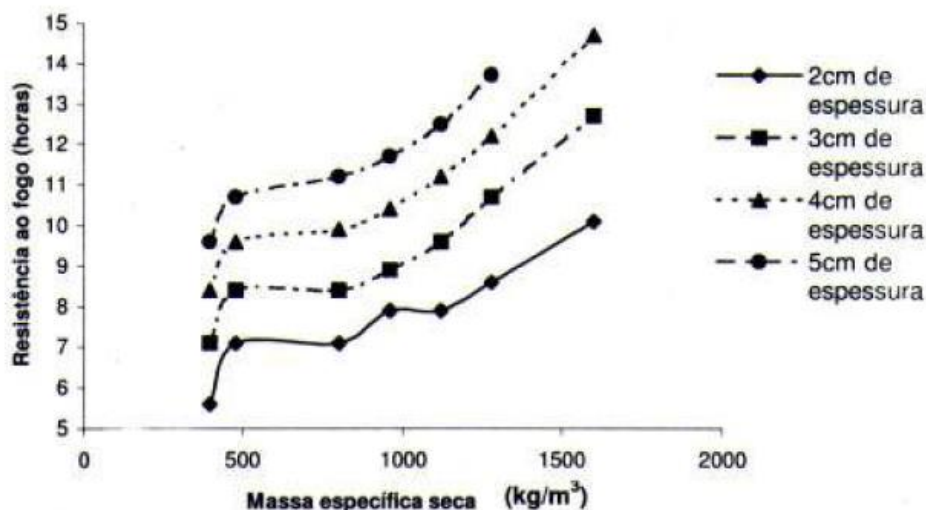
Fonte: (ALDANA, 2011).

A resistência ao fogo de uma estrutura está diretamente relacionada aos materiais empregados em sua produção. Esses materiais devem ser capazes de resistir a altas temperaturas e ainda manter a estabilidade da estrutura. De um modo geral, os concretos leves são mais resistentes ao fogo do que os concretos convencionais, devido a sua baixa condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica (CEB/FIP, 1977).

Os materiais constituintes do concreto, quando submetidos à ação do fogo, sofrem modificações intensas e graves. A água inicialmente livre dos capilares da pasta de cimento se evapora ao atingir 100° C. A quantidade de água contida nos poros retarda o processo de deterioração, desse modo, concretos altamente porosos, como o concreto celular, apresentam bom comportamento quanto à resistência ao fogo (CORTELASSI, 2005).

A Figura 13 mostra a resistência ao fogo para diferentes concretos celulares espumosos.

Figura 13: Resistência ao fogo de concretos celulares espumosos de diferentes espessuras em função da massa específica seca.



Fonte: (MEHTA, 2006)

As diferentes espessuras definem a transferência de calor por radiação como uma função inversa do número de interfaces ar-sólido atravessadas (CORTEPASSI, 2005).

- DURABILIDADE

A durabilidade pode ser definida como a capacidade do material de resistir a influências externas tais como: condições climáticas, fogo, ataques químicos e danos mecânicos (CEB/FIP, 1977).

No que tange às condições climáticas, o concreto celular apresenta boa resistência a ciclos de congelamento/ descongelamento, embora essa propriedade não seja aproveitada quando esse material é empregado no Brasil.

As células presentes nos concretos celulares funcionam como armazéns de gelo. A formação de micro-fissuras resulta na formação de fissuras que interligam as células entre si, distribuindo a água e dando espaço para o gelo que é formado, e desse modo impede a deterioração do concreto celular (FREITAS, 2004).

Quanto aos ataques químicos no concreto celular, verifica-se que estes acontecem quando o material está exposto à ação de meios agressivos. Segundo Ferreira (1987), essas ações podem ser divididas em três grandes grupos, a saber:

- ações dos gases e vapores corrosivos da atmosfera;

- ação corrosiva das águas de contato;
- ação de agentes biológicos.

A ação dos gases e vapores sobre o concreto pode ser desprezada, exceto em condições adversas como no caso de fábricas de produtos químicos, chaminés, centrais térmicas dentre outros (FERREIRA, 1987).

Os danos mecânicos são observados quando a peça é solicitada a cargas excessivas, para as quais não está preparada para resistir. No caso do concreto celular, segundo Ferreira (1987), as que mais afetam sua durabilidade são as tensões de corte, abrasão e flexão. Desse modo, é desejável evitar esse tipo de solicitação, não sendo possível, deve-se utilizar uma armadura suplementar que resista a esses esforços.

2.4.2 Características e propriedades do concreto com agregados leves

- MASSA ESPECÍFICA

A massa específica é uma das principais características do concreto leve, pois influencia a maior parte de suas propriedades, principalmente a resistência à compressão, que varia linearmente com a massa específica para um mesmo traço e consumo de cimento. Segundo o manual CEB/FIP (1977) com agregados leves adequados, pode-se conseguir um concreto leve com massa específica entre 25-40% mais baixa em relação ao concreto convencional, porém com a mesma resistência.

O concreto leve tem um grande volume de agregados, diante disso, 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. É comum substituir uma parte dos agregados leves finos por areia natural, isso aumenta a trabalhabilidade da mistura, permitindo uma diminuição no consumo de água necessária, obtendo-se assim um aumento da resistência do concreto (CEB/FIP, 1977).

Newman (1993) afirma que os seguintes fatores influenciam a massa específica do concreto leve:

- Cimento contido na mistura: um aumento de 100 kg/m^3 de cimento gera um aumento de aproximadamente 50 kg/m^3 na massa específica;
- Massa específica relativa dos agregados: uma substituição de agregados leves por agregados finos aumenta a massa específica em aproximadamente $150 - 200 \text{ kg/m}^3$;
- Ar incorporado;
- Condições do meio ambiente.

Segundo Neville (1997), quando se trata de concreto leve, as diferenças entre as massas específicas no estado fresco, seco ao ar e seco em estufa, devem ser consideradas, uma vez que são maiores e têm maior importância para o comportamento do concreto.

- PERMEABILIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

O agregado leve apresenta uma elevada capacidade de absorção que pode influenciar de forma adversa a resistência do concreto leve se isso não for considerado no momento da mistura. Ao se colocar certa quantidade de água na betoneira, a quantidade de água disponível para molhagem e hidratação do cimento dependerá da quantidade de água absorvida pelo agregado. Se o agregado utilizado estiver em condição seco em estufa e o concreto for adensado antes que se complete a absorção pelo agregado, surgirão vazios no concreto causados pela secagem (NEVILLE, 1997).

A permeabilidade é um dos principais fatores que influenciam a durabilidade do concreto com agregados leves. Embora o concreto leve seja mais poroso e absorvente que o concreto convencional, ele não é necessariamente mais permeável, uma vez que sua permeabilidade depende mais da natureza da matriz e menos da porosidade e massa específica do agregado (NEWMAN, 1993).

A baixa permeabilidade nos concretos leves se dá devido a vários fatores: a relação água/cimento é geralmente mais baixa nos concretos leves do que nos concretos convencionais para uma mesma resistência, a matriz apresenta menos poros capilares e é mais densa, a região da interface em torno do agregado apresenta melhor qualidade de modo que não se formam percursos mais fáceis em volta do agregado. (CEB/FIP 1977).

- RETRAÇÃO

De um modo geral os concretos com agregados leves apresentam uma retração inicial de 5% a 40% maior do que os concretos convencionais, sendo que em alguns casos a retração total pode ser ainda maior. Considerando-se a resistência à tração relativamente baixa nesse tipo de material, há um risco de fissuração por retração, embora exista alguma compensação devido ao módulo de deformação menor do agregado (NEVILLE, 1997).

De acordo com Newman (1993), embora a retração seja geralmente maior nos concretos feitos com agregados finos leves do que nos concretos convencionais, ela é similar quando se utiliza agregados leves mais densos. Os concretos feitos com argila e xisto expandidos e com escória expandida são os que apresentam menor retração.

Segundo o manual da CEB/FIP (1977), os valores superiores de retração nos concretos leves ocorrem devido ao agregado leve oferecer baixa restrição à retração da pasta de cimento, em função dos baixos valores do módulo de deformação em comparação aos agregados tradicionais. A retração nos concretos leves é afetada principalmente por:

- quantidade de pasta de cimento no concreto;
- qualidade da pasta de cimento;
- tipo de agregado utilizado.

O tipo de agregado afeta a qualidade da pasta de cimento. Partículas de forma, textura e classificação inadequadas, tendem a aumentar a retração devido a uma maior absorção de água, aumentando o consumo de cimento para poder se obter trabalhabilidade.

A retração por secagem do concreto com agregados leves é limitada a 1‰ pela NM 35/95 para misturas de referência preparadas na proporção de 1:6, sendo 1 parte de cimento e 6 de agregados leves em volume.

- FLUÊNCIA

A fluência e a retração por secagem são fenômenos intimamente relacionados e afetados por vários fatores, tais como: tipo de agregado, tipo de cimento, classificação do agregado, água contida na mistura, método de cura, magnitude da força aplicada, umidade relativa do ar, dentre outros (ACI 213R, 2003).

A fluência nos concretos com agregados leves é geralmente mais elevada do que a de concretos convencionais com uma resistência semelhante. Este fato é atribuído ao menor módulo de deformação de agregados leves em comparação aos agregados com peso normal. O baixo módulo de deformação reduz a restrição imposta pelo agregado à deformação que ocorre na pasta, desse modo a fluência deverá ser maior (LOPEZ, 2005).

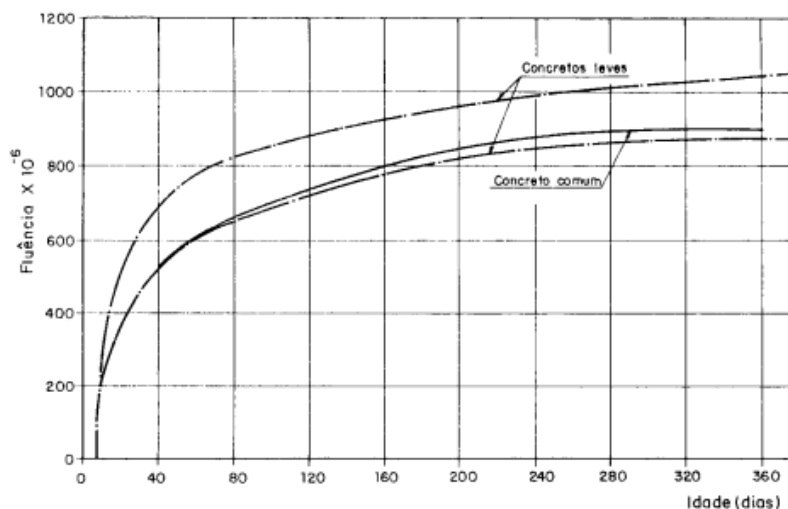
Segundo Oliveira (2006), os agregados leves e os normais não apresentam diferenças significativas quanto à fluência. Nos concretos com agregados leves ela é maior devido apenas ao baixo módulo de deformação. A velocidade de fluência de concretos com agregados leves se reduz com o passar do tempo em menor escala que o concreto executado com agregados convencionais.

Algumas pesquisas têm mostrado que a taxa de fluência em concretos convencionais e leves pode variar de maneira diferente. O concreto com agregado leve pode apresentar uma deformação menor que o concreto convencional no primeiro ano de idade, porém em idades posteriores a taxa de fluência maior dos concretos leves levará a um valor de fluência final superior (LOPEZ, 2005).

Leonhardt e Mönning (1978) ressaltam que a fluência no concreto leve, em especial em ensaios onde a aplicação da carga é feita logo no início, é grande. Diante disso, sugerem que quando as deformações devido à fluência forem prejudiciais, o concreto leve só deve ser exposto à cargas de longa duração quando o grau de maturidade for alto.

A Figura 14 apresenta um comparativo entre a variação da fluência no concreto leve e no concreto convencional em função da idade.

Figura 14: Comparativo da fluência entre concreto leve e concreto convencional.



Fonte: SOBRAL²(1987 apud OLIVEIRA, 2006).

Segundo o EUROCODE 2 (1999), o coeficiente de fluência (ϕ) para estrutura de concreto leve pode ser considerado o mesmo adotado para estrutura de concreto convencional multiplicado pelo fator:

- $(\rho_{cl}/2400)^2$ para concretos leves com massa específica maior que 1800kg/m³;
- $1,3 \times (\rho_{cl}/2400)^2$ para concretos leves com massa específica menor que 1500kg/m³.

Para valores intermediários deve-se interpolar.

O EUROCODE 2 (1999) recomenda também que as deformações advindas da fluência sejam multiplicadas por um fator $\eta = 1,3$ para concretos leves com resistência inferior a 20MPa e $\eta=1,0$ para concretos com resistência superior a 20MPa.

• CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA AO FOGO

A condutividade térmica do concreto depende principalmente da massa específica e do teor de umidade, mas também sofre influência do tamanho e distribuição dos poros, da composição química dos sólidos constituintes e da temperatura. A condutividade térmica aumenta com a massa específica, teor de umidade e temperatura. Os concretos leves

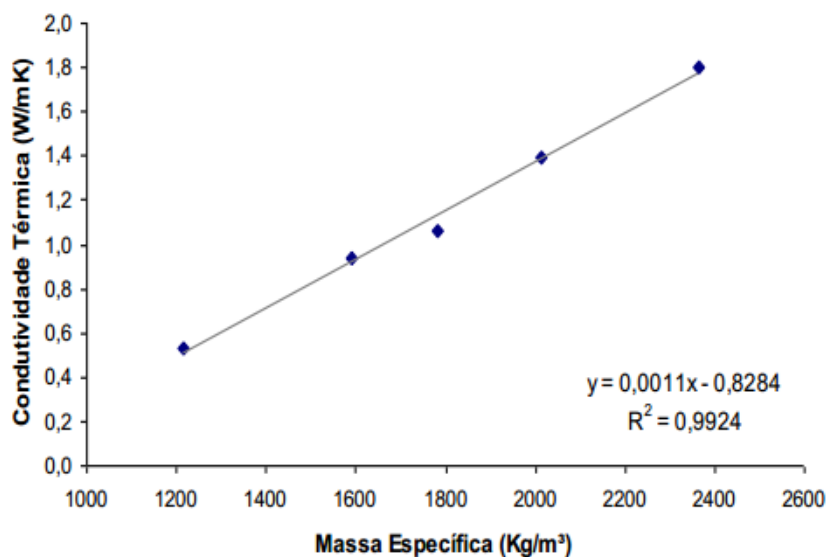
² SOBRAL, HERNANI SÁVIO. Concretos leves e comportamento estrutural. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1987. 46p

apresentam uma condutividade térmica mais baixa do que os concretos convencionais, e assim, proporcionam uma melhor proteção contra aumentos de temperatura excessivos. (CEB/FIP, 1977).

Diante disso, a espessura da camada de concreto pode ser reduzida caso não seja necessário levar em conta outras considerações tais como proteção contra corrosão de armaduras e risco de fissuras na zona de ancoragem.

Sacht et al (2010) estudaram a condutividade térmica de corpos de prova prismáticos feitos com concreto com agregados leves de argila expandida. Eles realizaram os ensaios utilizando o método do fio quente paralelo e concluíram, ao final da pesquisa, que com a diminuição dos valores da massa específica do concreto há um decréscimo da condutividade térmica, que é explicado pelo ar retido na estrutura celular dos agregados leves, fazendo com que a transferência e absorção de calor sejam reduzidas. A Figura 15 mostra a variação da condutividade térmica com o aumento da massa específica.

Figura 15: Variação da condutividade térmica



Fonte: (SACHT et al, 2010)

Pela Figura observa-se que os valores da condutividade térmica são influenciados pela massa específica do concreto.

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre os valores de condutividade térmica, expansão térmica, difusão térmica e calor específico entre o concreto leve e o concreto convencional.

Tabela 6: Algumas propriedades de concretos

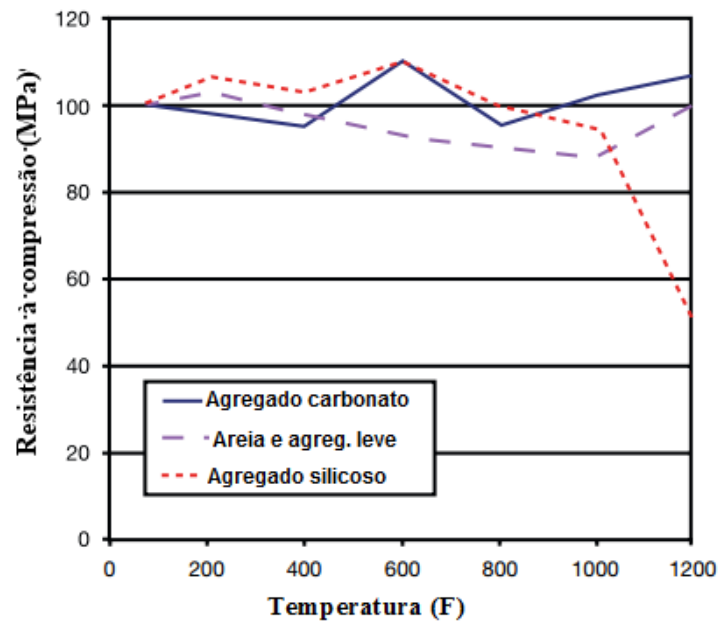
| Propriedades | Concreto Leve | Concreto Convencional |
|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Massa específica (kg/m ³) | 1850 | 2400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 20 - 50 | 20 - 70 |
| Calor específico (cal/g°C) | 0,23 | 0,22 |
| Condutividade térmica (W/mK) | 0,58 – 0,86 | 1,4 – 2,9 |
| Difusão térmica (m ² /h) | 0,0015 | 0,0025 – 0,0079 |
| Expansão térmica | 9x10 ⁻⁶ | 11 x10 ⁻⁶ |

Fonte: (HOLM e BREMNER, 2000)

Em caso de incêndio, a baixa condutividade térmica dos concretos leves torna-se vantajosa, uma vez que diminui a temperatura da armadura.

O agregado pode representar de 60% a 80% do volume do concreto, desse modo, a escolha do tipo de agregado está diretamente relacionada ao desempenho do concreto em situações de fogo. A Figura 16 mostra a relação entre a resistência e o aumento de temperatura para 3 tipos de agregados.

Figura 16: Relação entre resistência x temperatura para 3 tipos de agregados.



Fonte: (ASHLEY, 2007).

Pela Figura pode-se observar que enquanto os agregados silicosos tiveram sua resistência reduzida quase que pela metade a uma temperatura de 1200° F ($\approx 649^{\circ}\text{C}$), os outros dois a mantiveram próxima de 100%.

- DURABILIDADE

A durabilidade do concreto com agregados leves está relacionada à resistência química, resistência à abrasão, congelamento e descongelamento, absorção de água, permeabilidade, carbonatação e corrosão da armadura (CEB/ FIP, 1977).

A resistência a ataques químicos depende principalmente da natureza e qualidade do cimento empregado na mistura. Em ambientes muito agressivos, a escolha do cimento e do tipo de agregado é de suma importância. Se as partículas do agregado apresentam uma superfície permeável com poros interconectados, a resistência contra penetração de materiais agressivos ou prejudiciais é mais baixa. Por outro lado, a pasta de cimento endurecida do concreto leve tende a ser mais forte e densa do que a do concreto convencional. De um modo geral, os concretos leves são mais resistentes a ataques químicos do que os concretos convencionais (CEB/ FIP, 1977).

Assim como nos concretos convencionais, a resistência à abrasão dos concretos leve aumenta com a resistência à compressão (NEWMAN, 1993). De acordo com o Manual CEB/FIP (1977), ela depende da dureza e resistência da pasta de cimento endurecida, dos agregados e da aderência entre ambos.

O comportamento em situações de congelamento/ descongelamento do concreto com agregados leves, depende principalmente da proporção da mistura, tipo de agregado, unidade e nível de ar incorporado. Testes feitos em laboratórios mostraram que a maioria dos agregados pré-saturados e sem ar incorporado são potencialmente mais duráveis em condições de congelamento/ descongelamento do que um concreto convencional com resistência equivalente (NEWMAN, 1993).

A carbonatação é uma reação entre o dióxido de carbono presente na atmosfera, umidade e os minerais presentes na pasta de cimento. Essa reação reduz a alcalinidade do concreto e pode levar à retração, além de promover o processo de corrosão em caso de contato com a armadura. As partículas de agregados leves, de um modo geral, são mais porosas e penetráveis do que as de agregados convencionais, isso pode permitir uma maior difusão de gases como o dióxido de carbono. Entretanto, se as partículas de agregados leves forem bem distribuídas e a matriz for de boa qualidade, a taxa de carbonatação deverá ser similar à do concreto convencional (NEWMAN, 1993).

Quanto ao risco de corrosão, maior consumo de cimento observado nos concretos com agregados leves proporciona um ambiente altamente alcalino inibidor da corrosão da armadura. Esse fato, juntamente com a probabilidade de se alcançar uma boa compactação, reduz o risco de corrosão (NEWMAN, 1993).

A absorção de água e a permeabilidade também são fatores que influenciam a durabilidade do concreto com agregados leves e foram discutidas nos tópicos anteriores.

2.5 Propriedades Mecânicas dos Concretos Leves

Neste item são apresentadas algumas características dos concretos leves, tais como: resistência à compressão, resistência à tração, resistência ao cisalhamento e módulo de deformação.

2.5.1 Resistência à Compressão

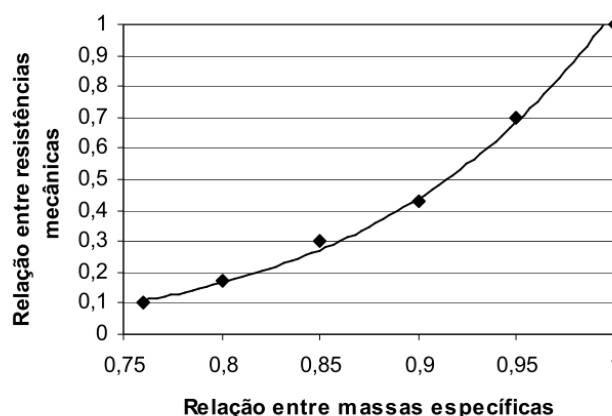
A resistência de um material é definida como a habilidade que este apresenta para resistir às tensões (TEIXEIRA FILHO, ET. AL., 1992). Trata-se de uma das principais e mais significativas propriedades do concreto, pois através de seus resultados é possível avaliar, qualitativamente, outras propriedades como a resistência à tração e o módulo de deformação.

De acordo com Leonhardt e Mönning (1978), no concreto leve a argamassa endurecida é mais rígida do que o agregado, e no concreto convencional os grãos de agregado são mais rígidos do que a argamassa. Diante disso, os esforços de compressão no concreto convencional transmitem-se preferencialmente de partícula a partícula e no concreto leve, por meio da argamassa, desviando-se dos grãos do agregado. Sendo assim, as resistências do concreto leve dependem da resistência da argamassa e de sua estrutura interna entre os agregados.

Segundo Narayanan et al. (2000), a resistência à compressão varia linearmente com a massa específica, ou seja, tende a aumentar quando a massa específica aumenta.

Teixeira Filho (1992), afirma que a porosidade da pasta é um dos principais parâmetros que limitam a resistência nos concretos. A Figura 17 mostra que um volume de poros de 5% (0,95 na relação de massa específica) resulta numa redução de 30% da resistência mecânica.

Figura 17: Relação entre porosidade e resistência do concreto.



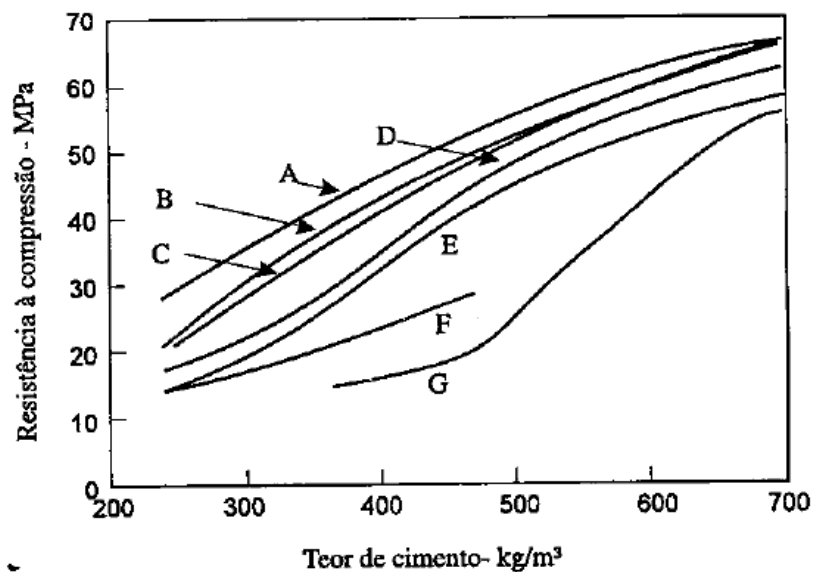
Fonte: (TEIXEIRA FILHO, 1992).

Outro fator que influencia a resistência à compressão do concreto leve é a relação água/cimento. De acordo com Sobral³ (1987) apud Oliveira (2006) as curvas de correlação

resistência à compressão/ relação água /cimento comumente observadas em várias bibliografias para concretos convencionais, não se aplicam aos concretos leves, pois cada tipo de agregado leve determina uma correlação diferente.

Segundo Neville (1997), para cada tipo de agregado existe uma relação entre o teor de cimento do concreto e a resistência à compressão, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18: Relação teor de cimento/ resistência à compressão



Fonte: (NEVILLE, 1997).

Na Figura 18, Neville (1997) define:

A = agregado graúdo de cinzas volantes e sinterizada e agregado miúdo normal;

B = agregado graúdo de escória de alto forno pelotizada e agregado miúdo normal;

C = agregado de cinza volante sinterizada;

D = xisto carbonoso sinterizado;

E = ardósia expandida e areia;

F = argila expandida e areia;

G = escória expandida.

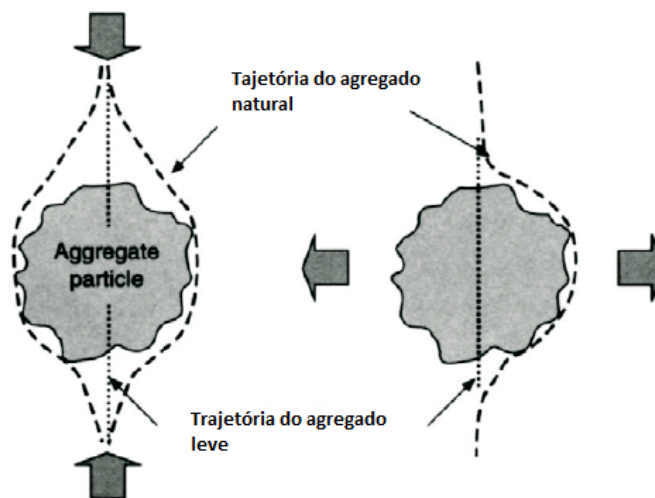
Neville (1997) ressalta que para uma mesma resistência de concreto, o teor de cimento em concretos leves é maior do que em concretos convencionais, podendo chegar a 50% de aumento em situações de altas resistências.

2.5.2 Resistência à Tração

Os concretos leves apresentam valores de resistência à tração consideravelmente inferiores aos obtidos em concretos de massa específica normal para o mesmo nível de resistência à compressão. A resistência à tração de um concreto é influenciada pelos agregados, pela quantidade de água e pela aderência entre os agregados e a pasta de cimento (FARIAS, 2009).

Outro fator a ser considerado na resistência à tração é a linha de ruptura dos concretos leves. Segundo Farias (2009), nos concretos convencionais a linha de ruptura contorna os agregados, enquanto nos concretos leves, ela os atravessa (Figura 19), prejudicando a resistência à tração. Essa diferença se explica pelo fato dos agregados leves apresentarem uma elevada porcentagem de vazio, o que lhes confere uma menor resistência à tração face à da pasta.

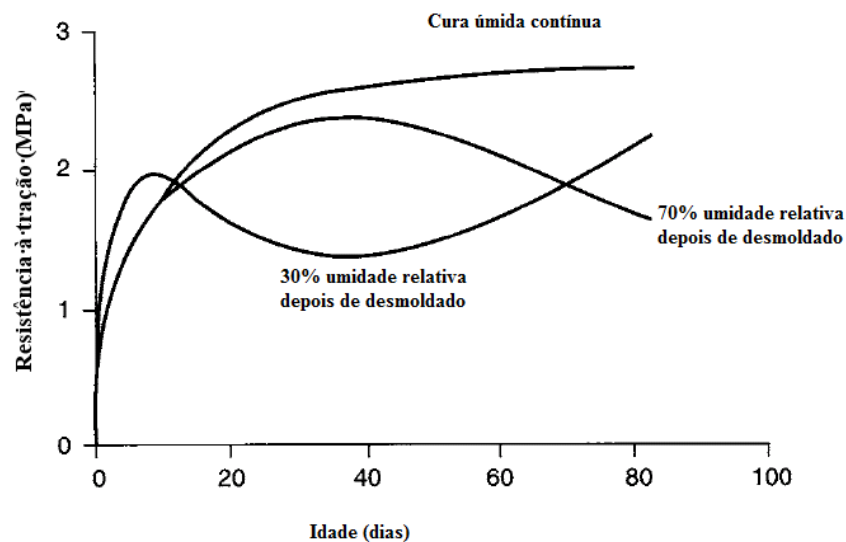
Figura 19: Esquema da linha de ruptura nos concretos leve e convencional



Fonte: (NEWMAN e OWENS, 2003)

O teor de água contido nos concretos leves é maior em relação ao concreto convencional. Isso se dá devido à absorção de água pelos agregados leves, afetando significativamente a resistência à tração. Esse efeito pode ser amenizado melhorando a hidratação do concreto como mostrado na Figura 20 (NEWMAN e OWENS, 2003).

Figura 20: Influência da hidratação na resistência à tração do concreto leve.



Fonte: (NEWMAN e OWENS, 2003)

A resistência à tração do concreto leve pode ser determinada através do ensaio de compressão diametral ou pelo ensaio de tração na flexão.

De acordo com Fouad (2006), a resistência à tração do concreto celular tem uma relação semelhante à resistência à compressão do concreto convencional. A resistência à tração é geralmente 10-15% da resistência de compressão. Devido à baixa massa específica os concretos celulares têm resistência à tração muito baixa e a adição de fibra é benéfica para aumentá-la.

A Tabela 7 apresenta algumas relações para estimar a resistência à compressão e à tração.

Tabela 7: Relação entre resistência à compressão e à tração dos concretos leves.

| Referência | Resistência à tração (MPa) | | Observações |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | Compressão Diametral | Flexão | |
| ACI 318 (1995) | $0,42 \cdot f_{cil}^{0,5}$ | $0,46 \cdot f_{cil}^{0,5}$ | Agregado leve |
| ACI 318 (1995) | $0,48 \cdot f_{cil}^{0,5}$ | $0,53 \cdot f_{cil}^{0,5}$ | Areia e agregado leve |
| CEB-FIP (1977) | $0,23 \cdot f_{cub}^{0,67}$ | $0,46 \cdot f_{cub}^{0,67}$ | - |

f_{cil} = Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa)

f_{cub} = Resistência à compressão em corpos de prova cúbicos (MPa)

Fonte: (ROSSIGNOLO E AGNESINI, 2005).

O manual CEB/FIP (1977) propõe a seguinte relação para o cálculo da resistência à tração do concreto leve:

$$f_{ct} = 0,23\sqrt[3]{f_{cu}^2} \quad (1)$$

Onde:

f_{ct} = tensão de tração em MPa

f_{cu} = tensão de compressão em MPa

Estabelece também, como alternativa ao cálculo das tensões de tração:

$$f_{ct} = 0,375 \left(0,3 + 0,7 \frac{\rho_{lc}}{\rho_{oc}} \sqrt{f_{cu}} \right) \quad (2)$$

Onde:

f_{ct} = tensão de tração em MPa;

f_{cu} = tensão de compressão em corpos de prova cúbicos em MPa;

ρ_{lc} = massa específica do concreto leve;

ρ_{oc} = massa específica do concreto convencional.

O EUROCODE 2 (1999) apresenta a seguinte equação que permite calcular o valor da resistência à tração por flexão em relação à resistência a compressão:

$$f_{lctm} = f_{ctm} \times \eta_1, \text{ em MPa} \quad (3)$$

Onde:

f_{lctm} é a resistência à tração por flexão;

f_{ctm} é a resistência à tração simples, dado por $0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$;

η_1 é um coeficiente dado pela seguinte expressão:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60\rho / 220 \quad (4)$$

Sendo ρ o limite superior da massa específica do concreto, da classe utilizada, de acordo com a Tabela 11.1 do EUROCODE2 (1999).

2.5.3 Módulo de deformação

O módulo de deformação do concreto mede a deformação que o material sofre quando submetido a cargas de curta duração. Ele depende da relação entre pasta e agregado, e do módulo de cada constituinte. No concreto, há um material bem mais rígido, o agregado, e outro bem mais poroso e flexível, a pasta. Desse modo, o módulo de deformação do conjunto é um valor intermediário entre o módulo de deformação do agregado e o da pasta de cimento que o constitui (SACH, 2008).

Os concretos convencionais apresentam um módulo de deformação maior do que os concretos leves, isso se dá devido aos agregados convencionais como areia e brita possuírem um módulo de deformação maior do que o dos agregados leves (ACI 213; 2003).

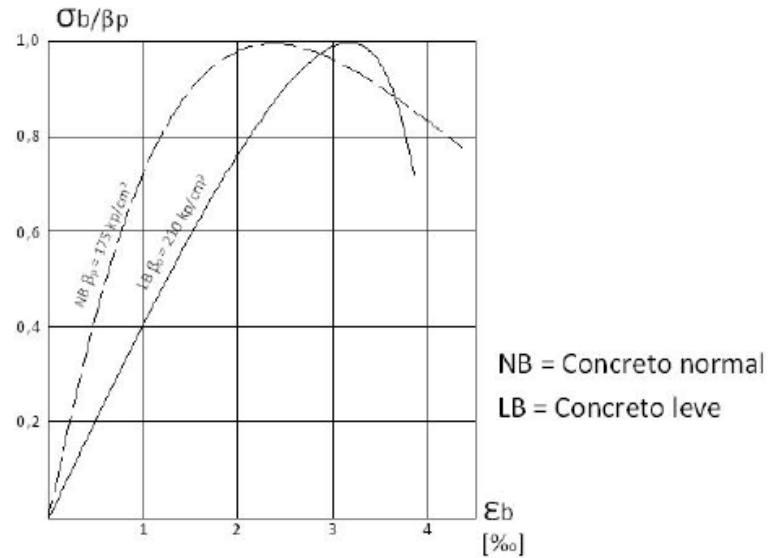
Segundo Silva (2007), o módulo de deformação dos concretos leves é influenciado pelos seguintes fatores:

- quanto maior o volume, a máxima dimensão e o módulo de deformação do agregado graúdo, maior é o módulo de deformação do concreto;
- quanto maior é a porosidade (e a relação A/C) do concreto, menor o seu módulo de deformação;
- a aderência agregado-pasta exerce um papel importante no valor do módulo de deformação concretos leves;
- o módulo de deformação varia diretamente com a resistência à compressão dos concretos.

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

Segundo Leonhardt e Mönning (1978), o diagrama tensão-deformação para esforços de compressão de curta duração em prismas de concreto leve é mais inclinado e mais alongado do que no caso de concreto convencional de mesma resistência, como se observa na Figura 21.

Figura 21: Diagramas tensão x deformação medidos para um concreto convencional com $f_{ck}=25\text{MPa}$ e massa específica 2150 kg/m^3 e para um concreto leve com agregado de argila expandida de mesmo f_{ck} e massa específica 1300 kg/m^3 .

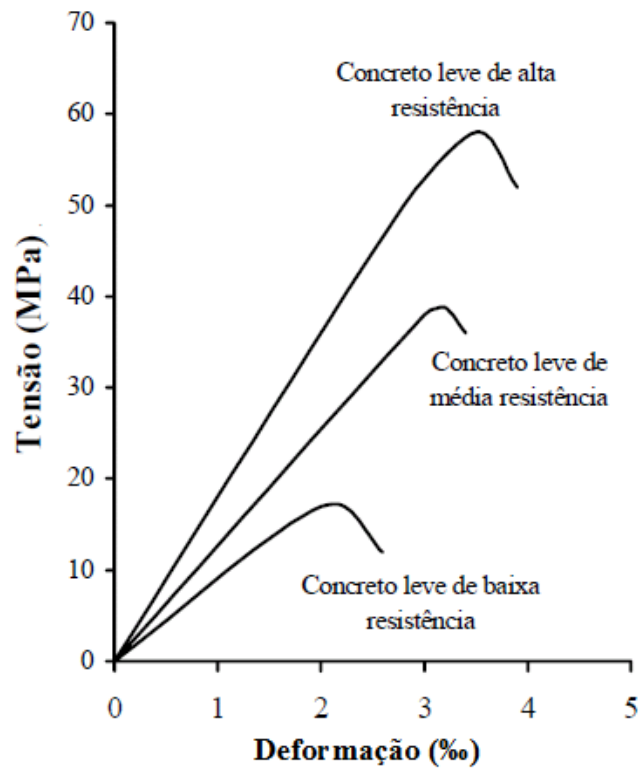


Fonte: (LEONHARDT E MÖNNING, 1978).

De acordo com o manual CEB/FIP (1977), o módulo de deformação do concreto leve normalmente varia entre 30 e 70% do valor do módulo de deformação do concreto convencional para um mesmo nível de resistência à compressão. Quanto mais próximos forem os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, melhor será o comportamento do concreto no regime elástico.

A Figura 22 apresenta um esquema do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves segundo sua classe de resistência à compressão.

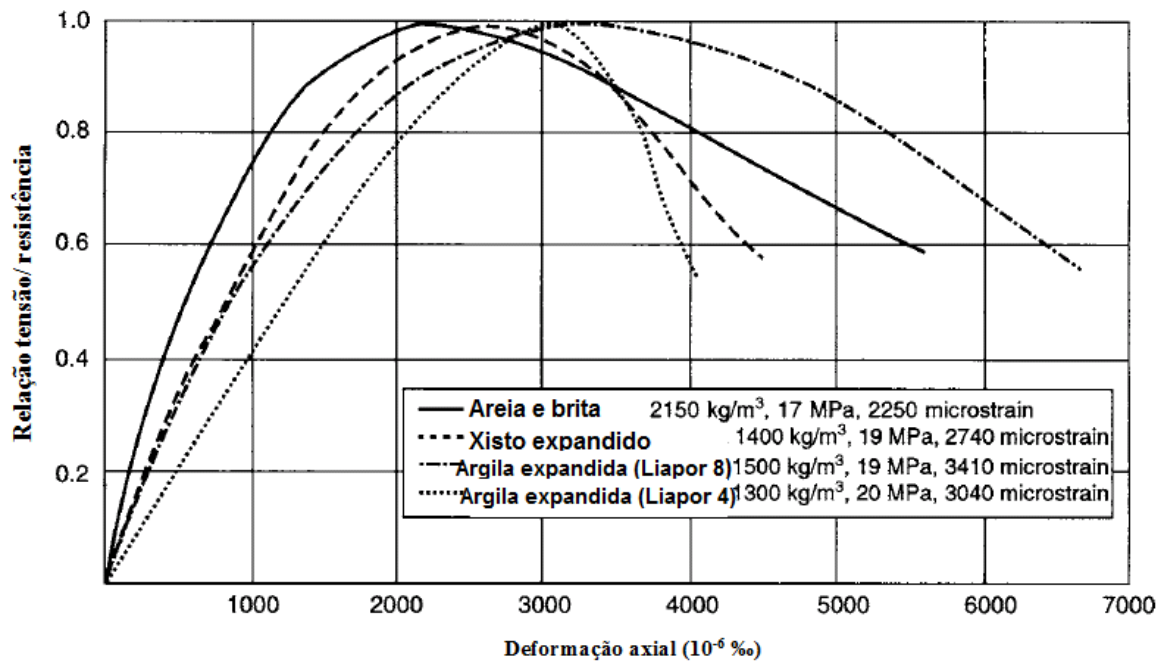
Figura 22: Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves.



Fonte: (CARRASQUILLO et al, 1981).

Segundo Newman e Owens (2003), a curva tensão-deformação dos concretos com agregados leves é mais linear e frágil do que a dos concretos convencionais. A Figura 23 apresenta a curva tensão-deformação de concretos leves com vários tipos de agregados leves comparada à de um concreto convencional de massa específica 2150kg/m^3 .

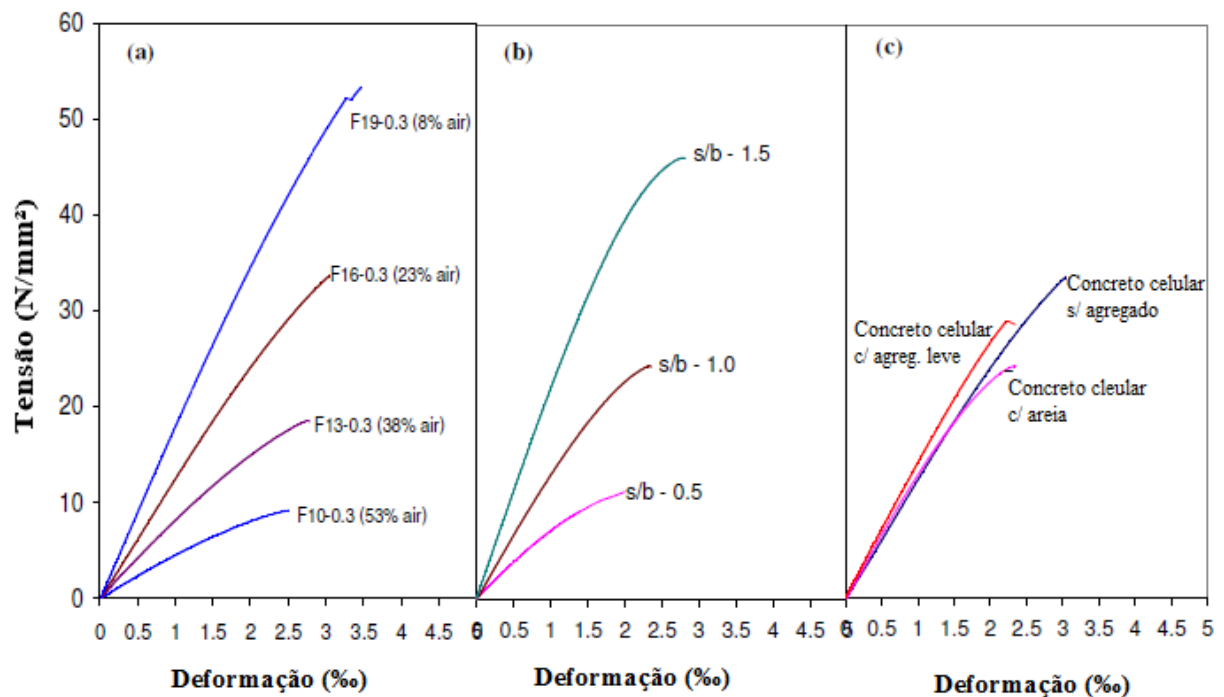
Figura 23: Relação tensão-deformação para concretos leve e convencional.



Fonte: (NEWMAN e OWENS, 2003).

Babu (2008), em seus estudos analisou o comportamento da curva tensão-deformação de 3 tipos de concreto leve, a saber: concreto celular com areia, concreto celular sem agregados e concreto celular com agregados leves. Todos apresentaram um comportamento tensão-deformação quase linear até a ruptura, como é mostrado na Figura 24.

Figura 24: Curva tensão-deformação para concretos leves com ar incorporado.



Fonte: (BABU, 2008).

A Figura 24 (a) refere-se ao concreto celular sem agregados e com diferentes teores de ar incorporado, a Figura 24 (b) refere-se ao concreto celular com areia, onde *s/b* (*sand to binder ratio*) é a relação de areia/ ligante utilizada e a Figura 24 (c) mostra a curva tensão-deformação dos 3 tipos de concretos estudados, quais sejam: concreto celular com areia, concreto celular sem agregados e concreto celular com agregados leves.

A Figura 24 (a) mostra concretos celulares contendo diferentes quantidades de ar incorporado. Com o aumento do ar incorporado, o grau de inclinação da curva é reduzido.

Malesev et al (2014), analisaram o comportamento da curva tensão-deformação de 4 diferentes tipos de misturas de concretos com agregados leves e uma de concreto convencional, que são mostrados na Tabela 8.

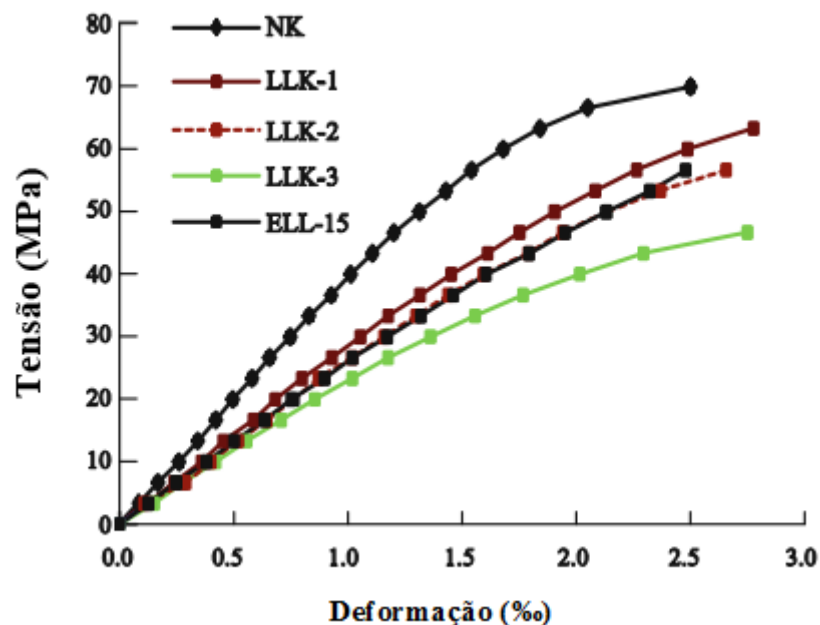
Tabela 8: Composição da mistura dos concretos (kg materiais/ m³ mistura)

| COMPOSIÇÃO | CONCRETOS LEVES | | | | CONCRETO CONVENCIONAL |
|--------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | ELL -15 | LLK-1 | LLK-2 | LLK-3 | NK |
| CEM I 42.5R | 450 | 450 | - | 350 | 450 |
| CEM II/B-M (S-V-L) | - | - | 450 | - | - |
| Água | 180 | 180 | 180 | 175 | 180 |
| Água adicional | - | 15,3 | 15,3 | 161 | - |
| Areia 0/4 mm | 770 | 940 | 940 | 984 | 851 |
| Areia 4/16 mm | - | - | - | - | 885 |
| Argila expandida 4/15 mm | 420 | 333 | 333 | 349 | - |
| SIKA VSC 4000BP | 2,25 | 3,15 | 3,15 | 2,8 | 3,15 |

Fonte: (MALESEV et al, 2014).

As curvas tensão-deformação para os 4 tipos de concretos são apresentadas na Figura 25.

Figura 25: Curva tensão-deformação dos concretos estudados.



Fonte: (MALESEV et al, 2014).

Os resultados encontrados por Malesev et al (2014) mostram que a tensão última alcançada no pico da carga de compressão está entre 2.48 e 2.78 ‰ para os concretos com

agregados leves de argila expandida (LLK-1, LLK-2, LLK-3, ELL-15), enquanto para o concreto convencional NK é 2.50 ‰. A baixa rigidez dos agregados leves resulta em maiores deformações nos concretos leves.

Em 1989, Tezuka estudou o módulo de deformação dos concretos celulares. Os resultados obtidos em seu trabalho são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores de módulo de deformação inicial.

| Massa específica (kg/m³) | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
|---|------------|-------------|-------------|-------------|
| Módulo de deformação inicial (MPa) | 2760 | 3495 | 9500 | 10650 |

Fonte: (TEZUKA, 1989).

Segundo Ferreira (1987), os concretos celulares, de um modo geral, além das deformações elásticas, sofrem também deformações plásticas sob a ação de cargas de longa duração. A análise experimental realizada por Ferreira (1987) obteve os seguintes resultados para concretos celulares sem armadura (Tabela 10).

Tabela 10: Valores de módulo de deformação inicial.

| Massa específica (kg/m³) | f_{ck28} (MPa) | Módulo de deformação inicial (MPa) | |
|--|-------------------------------|---|----------------------|
| | | Curta duração | Longa duração |
| 1200 | 5,5 | 3700 | 2200 |
| 1400 | 10,0 | 5000 | 3000 |
| 1600 | 15,0 | 6100 | 3600 |
| 1800 | 23,0 | 7500 | 4500 |

Fonte: (FERREIRA, 1987).

A norma ACI 318 (2008) traz para concretos com massa específica entre 1440 kg/m³ e 2480 kg/m³ e resistências à compressão de até 41 MPa, a seguinte expressão para o módulo de deformação:

$$E_{lc} = 0,043 \times \gamma^{1,5} \times \sqrt{f_{cm}}, \text{ em MPa} \quad (5)$$

onde:

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ resistência à compressão do concreto em MPa;

γ = massa específica do concreto em kg/m³.

Os valores encontrados podem divergir dos obtidos experimentalmente em até 20%.

O EUROCODE 2 (1999), traz para concretos leves com resistência característica à compressão entre 12 e 80MPa , a seguinte equação para valores médios de módulo secante (E_{lc})

$$E_{lc} = (\gamma/2400)^2 \times 22 \times [(f_{cm})/10]^{0,3} , \text{ em GPa.} \quad (6)$$

onde:

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ resistência à compressão do concreto em MPa;

γ = massa específica do concreto em kg/m³.

O manual CEB/FIP (1977) apresenta a seguinte equação para o módulo de deformação de concretos leves:

$$E_c = 1,6 \times \gamma^2 \times (f_{cck} + 8)^{0,33} \times 10^{-6} , \text{ em GPa.} \quad (7)$$

onde:

γ = massa específica do concreto em kg/m³.

f_{cck} = resistência à compressão do concreto em MPa;

2.6 Resumo

Este capítulo teve como objetivo apresentar alguns tipos de concretos leves, bem como suas propriedades físicas e mecânicas. Os concretos estudados foram o concreto celular e o concreto com agregados leves.

No concreto celular, observa-se que os vazios de ar incorporado desempenham um papel fundamental no controle de suas propriedades. A resistência à compressão desse material varia linearmente com a massa específica e esta, por sua vez, é influenciada pelo tempo de mistura. Conforme o tempo de mistura aumenta, a quantidade de ar incorporado diminui aumentando a massa específica e conseqüentemente a resistência à compressão. Devido à sua alta porosidade e baixa condutividade térmica, o concreto celular se apresenta como um bom material para ser usado como isolante térmico. Quanto à retração, por se tratar de um material poroso, apresenta valores mais altos quando comparado ao concreto convencional. No que tange à fluência, esta aumenta quando o teor de ar incorporado é aumentado. A relação entre resistência à compressão e à tração no concreto celular é similar ao concreto convencional da ordem de 10-15% da resistência à compressão. O valor do módulo de deformação de concreto leve em geral, é menor do que o encontrado em concretos convencionais. O diagrama tensão-deformação para esforços de compressão de curta duração em prismas de concreto leve é mais inclinado e mais alongado do que no caso de concreto convencional de mesma classe resistência. Para concreto celular, com o aumento do ar incorporado, o grau de inclinação da curva é reduzido.

Para concretos com agregados leves, observa-se que as propriedades mecânicas são limitadas e diretamente relacionadas às propriedades mecânicas dos agregados utilizados na mistura. A massa específica depende principalmente da massa específica do agregado. Uma curva granulométrica mais rica em partículas finas conduz a uma maior massa específica e conseqüentemente maior resistência à compressão. O concreto com agregados leves apresenta uma baixa permeabilidade devido a fatores como: a relação água/cimento é geralmente mais baixa nos concretos leves do que nos concretos convencionais para uma mesma resistência, a matriz apresenta menos poros capilares e é mais densa, a região da interface em torno do agregado apresenta melhor qualidade de modo que não se formam percursos mais fáceis em volta do agregado. Quanto à retração, os concretos com agregados leves apresentam valores superiores aos encontrados nos concretos convencionais. Esses valores superiores de retração

ocorrem devido ao agregado leve oferecer baixa restrição à retração da pasta de cimento, em função dos baixos valores do módulo de deformação em comparação aos agregados tradicionais.

A fluência nesse tipo de concreto também é mais elevada devido ao menor módulo de deformação dos agregados leves. No que tange à condutividade térmica, observa-se que esta é mais baixa do que nos concretos convencionais, e assim, proporciona uma melhor proteção contra aumentos de temperatura excessivos. Os esforços de compressão no concreto convencional transmitem-se preferencialmente de partícula a partícula e no concreto leve, por meio da argamassa, desviando-se dos grãos do agregado. Sendo assim, as resistências do concreto leve dependem da resistência da argamassa e de sua estrutura interna entre os agregados. Quanto aos valores de resistência à tração, observa-se que estes são ligeiramente inferiores aos obtidos em concretos convencionais e deve-se considerar também a linha de ruptura. Nos concretos convencionais a linha de ruptura contorna os agregados, enquanto nos concretos leves, ela os atravessa prejudicando a resistência à tração.

O módulo de deformação dos concretos com agregados leves é mais baixo do que o do concreto convencional. Isso é atribuído ao fato dos agregados leves apresentarem um módulo de deformação menor do que o módulo de deformação dos agregados comumente utilizados. Diante disso, as deformações em uma peça de concreto leve serão maiores se comparadas às peças de concreto convencional para mesma tensão aplicada.

3 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS LEVES ESTUDADOS

Os concretos leves têm suas propriedades diretamente limitadas e relacionadas às propriedades dos agregados utilizados, bem como o teor de ar incorporado em sua mistura. Diante disso, torna-se complicado generalizar esse material quando se trata de dimensionamento de peças produzidas com esse tipo de concreto, uma vez que determinado agregado pode ser convenientemente adequado para determinado tipo de aplicação, mas para outros usos pode se mostrar inadequado e até mesmo ineficaz. Nesse contexto, é importante que haja uma caracterização dos concretos considerados no presente estudo, bem como uma limitação de uso. Nos exemplos comparativos serão considerados dois tipos de concreto leve, quais sejam: concreto celular e concreto com agregados leves de argila expandida. A seguir serão apresentadas as características consideradas.

3.1 Concreto celular

O concreto leve celular apresenta grande potencial de aplicação no sistema construtivo de paredes moldadas no local.

O concreto celular, quando empregado no sistema construtivo de paredes moldadas no local apresenta massa específica por volta de 1700kg/m^3 , o que representa valores de ar incorporado por volta de 30% (SACHT, 2008).

A massa específica do concreto celular aqui considerada, está compreendida no intervalo de 1700 a 2000kg/m^3 . De acordo com Cortelassi (2005) concretos celulares com massa específica unitária inferior a 1600kg/m^3 apresentam resistências mecânicas muito baixas e por isso não servem para fins estruturais e aqueles que apresentam massa específica superior a 2000kg/m^3 se encontram muito próximos aos concretos convencionais. Diante disso, o intervalo acima mencionado se mostrou adequado para o estudo.

Cortelassi (2005) em sua pesquisa determinou a dosagem de concretos celulares de alto desempenho. Para isso, ele produziu uma matriz de alto desempenho composta pelos materiais apresentados na Tabela 11. Em posse dessa matriz, a fim de se obter diferentes massas unitárias, ele adicionou diferentes quantidades de espuma em cada amostra e variou o tempo de mistura. Os resultados por ele obtidos são mostrados na Tabela 12.

Tabela 11: Traço da matriz de alto desempenho para 1m³

| Cimento (kg) | Sílica ativa (kg) | Superplastificante (l) | Areia grossa (kg) | Pó de brita (kg) | Água (l) |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 489,9 | 48,9 | 9,7 | 925,7 | 925,7 | 201,8 |

Fonte: (CORTELASSI, 2005).

Tabela 12: Proporções matriz de alto desempenho/ espuma x massa unitária concreto celular espumoso de alto desempenho

| Proporção matriz/ espuma | Tempo (s) | Volume espuma (litros) | Massa unitária (kg/m³) | Volume de concreto (litros) |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|--|
| 100 /0 | 0 | 0,00 | 2463,5 | 100,0 |
| 90,8/ 9,2 | 4 | 3,40 | 2393,0 | 103,4 |
| 81,6/ 18,4 | 8 | 6,80 | 2153,0 | 106,8 |
| 72,3/ 27,7 | 12 | 10,20 | 1946,5 | 110,2 |
| 63,1/ 36,9 | 16 | 13,60 | 1829,0 | 113,6 |
| 53,9/ 46,1 | 20 | 17,00 | 1777,5 | 117,0 |
| 44,6/ 55,4 | 24 | 20,40 | 1713,5 | 120,4 |

Fonte: (CORTELASSI, 2005).

Com base nos valores apresentados na Tabela 12, Cortelassi (2005) definiu a quantidade de espuma que deveria ser incorporada ao concreto para se obter a massa unitária desejada (Tabela 13).

Tabela 13: Teor e volumes de espumas adicionadas a matriz

| Concretos | Porcentagem de espuma (%) | Volume de espuma (l) | Massa unitária (kg/m³) |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| Amostra 1,720 | 54 | 117,39 | 1720 |
| Amostra 1,859 | 33 | 49,25 | 1859 |
| Amostra 1,874 | 32 | 47,06 | 1874 |
| Amostra 2,009 | 21 | 26,58 | 2009 |
| Amostra 2,432 | 0 | 0 | 2432 |

Fonte: (CORTELASSI, 2005).

Por fim, Cortelassi (2005) realizou ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e retração. Os resultados desses ensaios são apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Resultados das propriedades dos concretos ensaiados

| Concretos | Resistência à compressão média (MPa) | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | Teor de ar incorporado (%) |
|----------------------|---|--|-----------------------------------|
| Amostra 1,720 | 14,51 | 0,75 | 29,0 |
| Amostra 1,859 | 18,82 | 1,68 | 20,0 |
| Amostra 1,874 | 25,18 | 1,90 | 22,0 |
| Amostra 2,009 | 27,52 | 2,34 | 15,0 |
| Amostra 2,432 | 70,91 | 6,45 | 3,90 |

Fonte: (CORTELASSI, 2005).

Tabela 15: Resultados das propriedades dos concretos ensaiados

| Concretos | Retração média entre idades (dias) (%) | | | | | |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 |
| Amostra 1,720 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,018 | 0,019 | 0,020 |
| Amostra 1,859 | 0,012 | 0,013 | 0,017 | 0,017 | 0,018 | 0,019 |
| Amostra 1,874 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,019 | 0,019 |
| Amostra 2,009 | 0,010 | 0,010 | 0,013 | 0,013 | 0,015 | 0,015 |
| Amostra 2,432 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |

Fonte: (CORTELASSI, 2005).

Os resultados dos ensaios de retração realizados por Cortelassi (2005) mostraram que a amostra 2,432 que não continha espuma em sua mistura apresentou os menores valores de retração, enquanto a amostra 1,720, que continha a maior quantidade de espuma na mistura, apresentou os maiores valores de retração, mostrando que o aumento nos valores de retração acompanha o aumento do teor de espuma adicionado na mistura.

Cortelassi (2005) concluiu em sua pesquisa que o concreto celular de alto desempenho se mostra como um aprimoramento do concreto celular convencional, apresentando boas características de resistência mecânica e um bom potencial para aplicação em paredes moldadas no local, painéis de vedação, pré-moldados, dentre outros fins estruturais.

A Tabela 16 apresenta valores típicos de propriedades do concreto celular de acordo com Newman e Owens (2003).

Tabela 16: Valores típicos de propriedades do concreto celular

| Massa específica seca (kg/m ³) | Resistência à compressão (MPa) | Módulo de deformação (MPa) | Retração (%) |
|--|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 400 | 0,5 – 1,0 | 800 - 1000 | 0,030 – 0,035 |
| 600 | 1,0 – 1,5 | 1000 - 1500 | 0,022 – 0,025 |
| 800 | 1,5 – 2,0 | 2000 - 2500 | 0,020 – 0,022 |
| 1000 | 2,5 – 3,0 | 2500 - 3000 | 0,015 – 0,018 |
| 1200 | 4,5 – 5,5 | 3500 - 4000 | 0,009 – 0,011 |
| 1400 | 6,0 – 8,0 | 5000 - 6000 | 0,007 – 0,009 |
| 1600 | 7,5 – 10 | 10000 - 12000 | 0,006 – 0,007 |

Fonte: (NEWMAN E OWENS, 2003).

O valor de cálculo de resistência à compressão é dado pela seguinte equação proposta pelo EUROCODE 2 (1999) para concretos leves

$$f_{lctd} = \alpha_{lct} f_{lctk} / \gamma_c \quad (8)$$

onde

γ_c é o coeficiente de ponderação para o concreto;

α_{lct} é um coeficiente recomendado = 0,85.

O módulo de deformação é obtido pela equação (5) proposta pelo ACI 318 (2008) mostrada no capítulo anterior.

O projeto de norma da ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que em caso de ausência de ensaios, o módulo de deformação seja estimado pela seguinte equação:

$$E_{ci} = 40 \rho_c^{3/2} \sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

Onde:

E_{ci} = módulo de deformação inicial do concreto celular (GPa);

ρ_c = massa específica aparente seco do concreto celular estrutural (kg/m³);

f_{ck} = resistência característica do concreto celular estrutural à compressão (MPa).

O valor de cálculo de resistência à tração é dado pela equação (1) apresentada no capítulo anterior.

3.2 Concreto com agregados leves

As propriedades do concreto com agregados leves estão diretamente limitadas e relacionadas às propriedades dos agregados leves utilizados na mistura. Desse modo, optou-se por considerar nos exemplos os concretos com areia e agregados leves de argila expandida com massa específica compreendida entre 1700 kg/m³ e 2000 kg/m³.

A norma *American Society for Testing and Materials*, (2014) (ASTM C330/ C330M-14) estabelece valores para resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e massa específica aparente para concretos com agregados leves, que são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Exigências para concreto estrutural com agregados leves

| Massa específica seca ao ar máx. aos 28 dias (kg/m³) | Resistência à tração por compressão diametral min. aos 28 dias (MPa) | Resistência à compressão mín. aos 28 dias (MPa) |
|--|---|--|
| Todos os agregados leves | | |
| 1760 | 2,2 | 28 |
| 1680 | 2,1 | 21 |
| 1600 | 2,0 | 17 |
| Combinação de agregado normal e leve | | |
| 1840 | 2,3 | 28 |
| 1760 | 2,1 | 21 |
| 1680 | 2,1 | 17 |

Fonte: (ASTM C330/ C330M, 2014).

Pereira (2008) estudou o uso de argila expandida na produção de concretos leves. Em sua pesquisa, ele utilizou 3 tipos de traços de concreto, fixando a relação água/cimento em 0,43. Os traços foram nomeados como “T-1”, “T-2” e “T-3” e suas proporções são apresentadas na Tabela 18. Na indicação da proporção dos traços, o primeiro algarismo indica a quantidade de cimento, o segundo a quantidade de areia fina, o terceiro indica a quantidade de argila tipo 0500 e o quarto a quantidade de argila tipo 1506.

Tabela 18: Composição dos traços T-1, T-2, T-3

| Traços | Proporção dos materiais | Argilas | | Fator a/c |
|------------|-------------------------|---------|------|-----------|
| | | 0500 | 1506 | |
| T-1 | 1:2,01:1,10:0,78 | 50% | 50% | 0,43 |
| T-2 | 1:2,00:1,32:0,62 | 60% | 40% | 0,43 |
| T-3 | 1:1,93:1,54:0,47 | 70% | 30% | 0,43 |

Fonte: (PEREIRA, 2008)

Na formulação dos traços para concreto, Pereira (2008) utilizou dois tipos de argila. A argila tipo 0500 apresenta-se como material triturado, de graduação equivalente a areia grossa, ao passo que a argila tipo 1506 é recoberta por uma casca cerâmica vítrea, e sua graduação equivale a brita 1.

A partir desses traços, Pereira (2008) analisou a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e a massa específica do concreto leve com argila expandida. Os resultados por ele obtidos são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19: Resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e massa específica do concreto leve com argila expandida

| Traço | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | Dias | Massa específica (kg/m ³) |
|------------|--------------------------------|---|------|---------------------------------------|
| T-1 | 20,80 | 1,98 | 28 | 1650 |
| T-2 | 22,77 | 2,24 | 28 | 1670 |
| T-3 | 22,16 | 2,32 | 28 | 1740 |

Fonte: (PEREIRA, 2008)

Os concretos estudados por Pereira (2008) mostraram-se adequados para fins estruturais, uma vez que apresentaram valores de resistência aceitáveis de acordo com a ASTM C330 e uma redução de massa específica da ordem de 32% a 39%.

O valor de cálculo de resistência à compressão é dado pela equação (9).

O módulo de deformação é obtido pela equação (5) proposta pelo ACI 318 (2008) mostrada no capítulo anterior.

A resistência à tração por compressão diametral é estimada pela seguinte equação proposta pelo ACI 318 (1995):

$$f_{ct} = 0,48 \cdot f_{cil}^{0,5}, \text{ em MPa.} \quad (10)$$

Onde:

f_{ct} = tensão de tração em MPa;

f_{cil} = tensão de compressão em corpos de provas cilíndricos em MPa

3.3 Resumo

Neste capítulo buscou-se uma caracterização das propriedades dos concretos considerados nos exemplos comparativos da presente pesquisa, uma vez que estes têm suas propriedades diretamente afetadas pelo tipo de agregado utilizado, bem como pela quantidade de ar incorporado.

Os estudos realizados por Cortelassi (2005) e Pereira (2008) mostraram que o concreto leve celular e o concreto com agregado leve de argila expandida apresentam grande potencial de aplicação para fins estruturais, uma vez que apresentaram bons resultados no que tange à resistência mecânica, atendendo às prescrições normativas.

A Tabela 20 apresenta as propriedades de cada concreto em função da massa específica e tipo de agregado.

Tabela 20: Propriedades dos concretos

| | Massa específica (kg/m³) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | Fonte |
|---|--|---------------------------------------|--|----------------------------|
| Concreto celular | 1720 | 14,51 | 0,75 | Cortelassi (2005) |
| | 1859 | 18,82 | 1,68 | |
| | 1874 | 25,18 | 1,90 | |
| Concreto com agregados leves | 1600 | 17,00 | 2,00 | ASTM C330/ C330M (2014) |
| | 1680 | 21,00 | 2,10 | |
| | 1760 | 28,00 | 2,20 | |
| Concreto leve com argila expandida | 1650 | 20,80 | 1,98 | Pereira (2008) |
| | 1670 | 22,77 | 2,24 | |
| | 1740 | 22,16 | 2,32 | |

Fonte: Citada na própria Tabela

Para elaboração dos exemplos comparativos de vigas e lajes, foi considerado o concreto celular estudado por Cortelassi (2005) e o concreto leve com argila expandida estudado por Pereira (2008).

Para os exemplos de paredes, o projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que o concreto celular deve apresentar resistência à compressão entre 5MPa e 20MPa. Desse modo, foram considerados 2 concretos celulares com resistência de 5MPa e 14,5MPa, um concreto leve com argila expandida com 15MPa de resistência e um concreto convencional de resistência 8MPa. Embora a norma NBR 16055:2012 não recomende o uso de concreto de tão baixa resistência para a aplicação no sistema construtivo de paredes de concreto moldadas no local, aqui foi considerado para efeito de comparação. As características dos concretos leves considerados nos cálculos das paredes são apresentadas na Tabela 21

Tabela 21: Característica dos concretos das paredes.

| Propriedades | Concreto celular 2 | Concreto celular 3 | Concreto leve com argila expandida 1 | Concreto convencional 1 |
|--|---------------------------|---------------------------|---|--------------------------------|
| Massa específica (kg/m³) | 1720 | 1700 | 1600 | 2400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 14,51 | 5,00 | 15,00 | 8,00 |
| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | 0,75 | - | - | - |
| Módulo de deformação secante (GPa) | 14,55 | 10,87 | 13,20 | 20,22 |
| Teor de ar incorporado (%) | 29% | 34% | 0 | 0 |
| Fonte | Cortelassi (2005) | CHIOCCA (2015) | CINEXPAN (2015) | CEHOP (2015) |

Fonte: (Elaborada pela autora).

4 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

Os concretos leves apresentam diferentes propriedades de resistência quando comparados aos concretos convencionais, diante disso, exigem critérios especiais de dimensionamento.

Desse modo, são apresentados os critérios de dimensionamento de peças em concreto leve encontrados em normas nacionais e internacionais, bem como em literatura técnica pertinente.

O estudo inclui tanto a análise dos critérios para dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) quanto para verificação no Estado Limite de Serviço (ELS).

4.1 Dimensionamento no Estado Limite Último (ELU)

A NBR 6118: 2014 define o ELU como sendo “o estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura”.

No ELU, deve-se garantir segurança adequada e boa ductilidade, de modo que uma eventual ruína ocorra de forma avisada alertando o usuário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

4.1.2 Elementos Sujeitos à Flexão Simples

O valor de cálculo de resistência à compressão recomendado pelo EUROCODE 2 (1999) para concretos leves é dado pela equação (8) apresentada no capítulo anterior e mostrada aqui novamente:

$$f_{lctd} = \alpha_{lct} f_{lctk} / \gamma_c \quad (8)$$

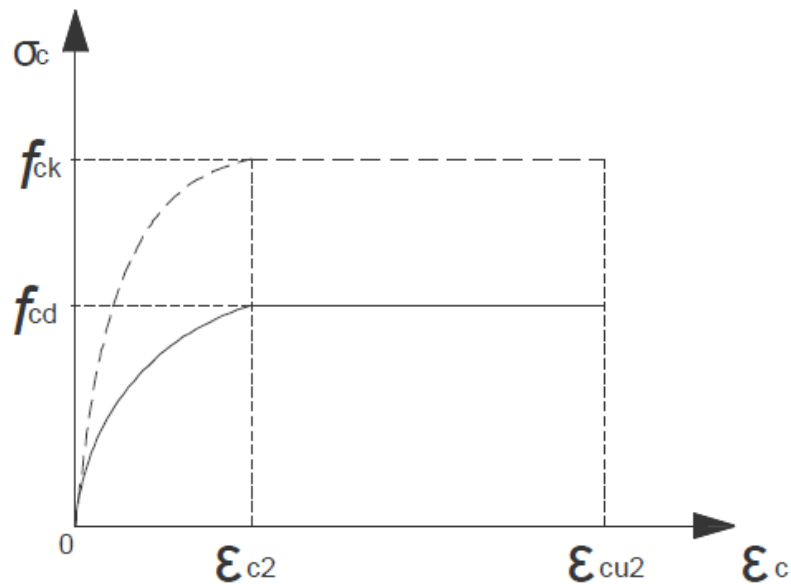
onde

γ_c coeficiente de ponderação para o concreto;

α_{lct} é um coeficiente recomendado = 0,85.

A Figura 26 apresenta o diagrama de cálculo para concreto à compressão proposto pelo EUROCODE 2 (1999).

Figura 26: Diagrama parábola-retângulo para concreto à compressão.



Fonte: (EUROCODE 2, 1999).

O diagrama parábola-retângulo para concretos leve é definido pelas seguintes equações:

$$\sigma_{lc} = f_{lcd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} \right)^n \right], \text{ para } 0 \leq \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_{cu2} \quad (11)$$

$$\sigma_{lc} = f_{lcd}, \text{ para } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}, \quad (12)$$

Os valores de ε_{c2} e ε_{cu2} dependem da classe do concreto leve e são apresentados a seguir:

- concretos leves com resistência inferior a 55/ 60 MPa ε_{c2} (‰) = 2,0 e ε_{cu2} (‰) = 3,5 η_1 ;
- concretos leves com resistência entre 55/ 60 MPa ε_{c2} (‰) = 2,2 e ε_{cu2} (‰) = 3,1 η_1 ;

- concretos leves com resistência entre 60 a 66 MPa ε_{c2} (‰) = 2,3 e ε_{cu2} (‰) = 2,9 η_1 ;
- concretos leves com resistência entre 70 a 77 MPa ε_{c2} (‰) = 2,4 e ε_{cu2} (‰) = 2,7 η_1 ;
- concretos leves com resistência entre 80 a 88 MPa ε_{c2} (‰) = 2,5 e ε_{cu2} (‰) = 2,6 η_1 .

Sendo η_1 um coeficiente para determinação da tensão de tração dado por:

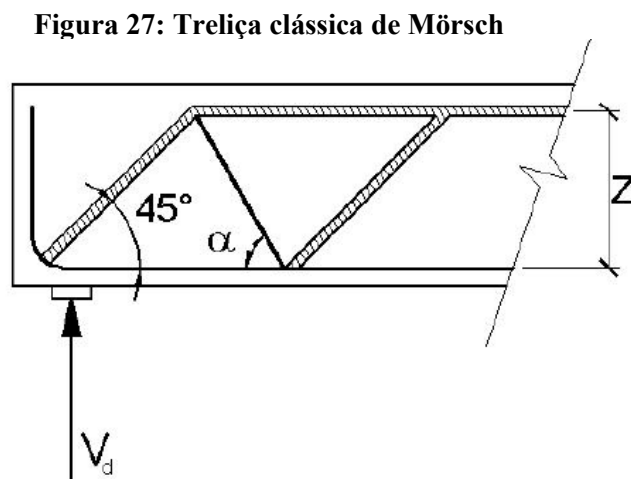
$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho / 2200$$

Onde ρ é a massa específica do concreto leve em kg/m³

4.1.3 Elementos Sujeitos à Força Cortante – Cisalhamento

A NBR 6118:14 bem como diversas normas internacionais, adotam o modelo de treliça proposto por Morsch para o dimensionamento de armaduras de cisalhamento.

Morsch propôs que, após fissurada a viga se comportava como uma treliça, onde a armadura longitudinal de tração e a zona comprimida fazem o papel dos banzos tracionado e comprimido respectivamente, a armadura transversal, constituída de estribo ou barras inclinadas, constituí os montantes ou diagonais tracionados, o intervalo entre duas fissuras consecutivas comporta-se como uma diagonal comprimida (SILVA, 2003). A Figura 27 ilustra a treliça clássica de Morsch.



Fonte: (SILVA, 2003).

No passado, alguns estudos foram realizados no Brasil com o objetivo de verificar o comportamento e a resistência ao esforço cortante de elementos de concreto leve. Dentre eles, pode-se destacar a pesquisa feita por Castro em 1975, onde ele ensaiou 10 vigas de concreto leve até a ruptura. As vigas foram divididas em 2 grupos de acordo com o tipo de ruptura. No primeiro grupo a ruptura se deu por escoamento da armadura transversal e no segundo por esmagamento da biela de concreto. Após a análise dos resultados, Castro (1975), concluiu que a resistência do concreto leve ao esforço cortante é comparável à resistência do concreto convencional e que no concreto leve há uma participação efetiva da zona comprimida da viga no combate ao esforço cortante.

Cabe ressaltar também o estudo realizado por Climaco em 1975. Com objetivo de verificar a resistência ao esforço cortante de vigas curtas de concreto leve de argila expandida sem armadura transversal, foram ensaiadas 10 vigas até a ruptura.

Após a análise dos dados, Climaco (1975) concluiu que a avaliação da resistência última ao esforço cortante mostrou a necessidade de uma correção numérica, motivada pela diferença quantitativa de resistência relativamente ao concreto comum, apesar de não haver diferença fundamental de comportamento. Segundo Silva (2003), a correção adotada por Climaco foi a recomendada pelo ACI 318 de 1971, que consistia em calcular a tensão de cisalhamento última τ_{wu} , pelas mesmas expressões propostas para o concreto comum e, então, multiplicá-la por um coeficiente de redução igual a 0,85.

O EUROCODE (1999) traz a seguinte equação para a tensão máxima de cisalhamento em peças feitas com concreto estrutural leve:

$$\sigma_{Rd,max} = v_{cl} \times f_{cd} = [0,6 - (f_{ck} / 235)] \times f_{cd} \quad (13)$$

Onde:

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

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão dada por f_{ck} / γ_c .

v_{cl} = fator de redução da força de cisalhamento

O Manual CEB/FIP (1977) recomenda que para vigas armadas de concreto leve, a relação entre a área da seção transversal e a armadura transversal não seja menor que 0,20%.

Se a tensão de cisalhamento ($\tau = V/b_w$) da viga atender uma das seguintes limitações, não é necessário armadura além da porcentagem acima recomendada:

$$\tau \leq \tau_0 = \frac{0.6}{\gamma_c} \sqrt[4]{\xi} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para } h \leq 150\text{mm}; \quad (14)$$

$$\tau \leq \tau_0 = \frac{0.1}{\gamma_c} \left(7 - \frac{d}{150} \right) \sqrt[4]{\xi} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para } 150\text{mm} < h < 600\text{mm}; \quad (15)$$

$$\tau \leq \tau_0 = \frac{0.3}{\gamma_m} \sqrt[4]{\xi} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para } h \geq 600\text{mm}. \quad (16)$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento em MPa;

V é a força de cisalhamento;

b_w é a largura da alma da viga;

h é altura da seção transversal;

d é a altura útil da seção transversal;

ξ é a taxa de armadura dada por:

$$\xi = A_{st}/b_w d; \quad (17)$$

f_{ck} é a resistência característica à compressão do cilindro de concreto em MPa.

Se a tensão de cisalhamento calculada exceder as limitações acima, então deve-se prever uma armadura calculada a partir da seguinte equação:

$$A = \frac{(\tau - 0.85\tau_0)b_w s}{f_{yd}(\sin \alpha + \cos \alpha)} \quad (18)$$

onde:

A é a área total de armadura;

s é o espaçamento da armadura;

f_{yd} resistência de projeto do aço;

α é o ângulo entre os estribos e o eixo da viga.

A NBR 6118:14 estabelece que os estribos nas vigas tenham uma área mínima dada pela equação:

$$\rho_{sw} = A_{sw} / (b_w \times s \times \text{sen} \alpha) \geq 0,2 (f_{ctm} / f_{ywk}) \quad (19)$$

onde

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

s = espaçamentos dos estribos;

α = inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal;

b_w = largura média da alma da viga;

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

$$f_{ctm} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} \text{ com } f_{ck} \text{ e } f_{ctm} \text{ em MPa.}$$

Para concretos leves, de acordo com o EUROCODE 2 (1999), esses mesmos critérios podem ser adotados.

4.1.4 Ancoragem por aderência

De acordo com Giongo (2004), a análise da ancoragem de barras em elementos estruturais de concreto armado é de suma importância, pois ao se definirem seus pontos de interrupções, pelos diagramas de esforços solicitantes, há necessidade de se transferir para o concreto que as envolvem as tensões que as solicitam.

A resistência por aderência dos concretos com agregados leves é similar a dos concretos convencionais. A ancoragem nos concretos leves é menor do que nos concretos convencionais, devido à baixa capacidade de resistência causada pela relativa fraqueza dos agregados leves (NEWMAN, 1993).

O Manual CEB/FIP (1977) ressalta que estudos comparativos dos ensaios de arrancamento realizados em concretos leve e comum, para uma mesma resistência à compressão apresentaram como resultado, menor resistência de aderência para o concreto

leve, com a ressalva de que a tensão de aderência no concreto leve se iguala ao concreto comum nos casos onde o agregado empregado for a argila expandida. E acrescenta que a justificativa da menor aderência está no fato de existir cavidades ao longo de toda a porção inferior das barras longitudinais.

De acordo com Oliveira (2006), os agregados leves são menos resistentes à concentração de tensões do que os agregados normais. Os grãos se dividem mais facilmente na região entre as nervuras das barras de aço. Então, a aderência da barra inserida no concreto é menor nestes pontos, embora a resistência da matriz seja a mesma de um concreto comum.

Soudais (2014) estudou o fenômeno da aderência entre as barras de aço e o concreto celular para uso estrutural. Ele elaborou 3 traços correspondentes a três massas específicas aos 28 dias, a saber: 2255 kg/m³, 1565 kg/m³ e 1510 kg/m³. O traço que apresentava massa específica de 2255 kg/m³ não continha agente espumígeno, o traço correspondente a massa específica de 1510 kg/m³ continha o dobro da quantidade de agente espumígeno necessária para se atingir a massa específica de 1565kg/m³. Para avaliar a aderência entre o concreto celular e as barras de aço, Soudais (2014) realizou dois tipos de ensaio de arrancamento. O primeiro tipo (tipo “Barra”) consistiu em arrancar uma barra de aço longitudinal de diâmetro igual a 4,2 mm parcialmente imersa dentro de um cilindro de concreto, de diâmetro igual a 10 cm e de comprimento igual a 20 cm. O segundo tipo (tipo “Tela”), consistiu em arrancar uma barra de diâmetro igual a 4,2 mm, dotada de uma barra transversal soldada de comprimento igual a 9,50 cm e imersa no centro do cilindro de concreto. Ao final dos ensaios, entre os valores de massa específica de 2255 kg/m³ e 1565 kg/m³ houve uma diminuição de 92,30% da tensão última de aderência e entre 2255 kg/m³ e 1510 kg/m³ houve uma diminuição de 97,30% da tensão última de aderência, ficando clara a grande influência do agente espumígeno na diminuição da aderência entre a barra de aço e o concreto celular. Após a análise dos resultados de sua pesquisa, Soudais (2014) constatou também que, além de reduzir a tensão última de aderência (τ_{bu}), o aumento da quantidade de agente espumígeno reduz também a relação τ_{bu} / f_c , provocando uma queda da eficiência em comparação à resistência à compressão do traço.

O EUROCODE 2 (1999) aplica a mesma equação de tensão de aderência para concretos convencionais em concretos leves, substituindo apenas o valor de f_{ctd} por f_{ctd} .

A equação para tensão de aderência em concretos convencionais recomendada pelo EUROCODE2 (1999) é a seguinte:

$$f_{bd} = 2,25 \times \eta_1 \times \eta_2 \times f_{ctd} \quad (20)$$

Onde:

η_1 = fator relacionado à posição da barra durante a concretagem:

$\eta_1 = 1$ para situações de boa aderência;

$\eta_1 = 0,7$ para situações de má aderência.

η_2 = fator relacionado ao diâmetro da barra da armadura:

$\eta_2 = 1$ para barras com ϕ de até 32mm;

$\eta_2 = (132-\phi)$ para barras com ϕ superior a 32mm.

$$f_{ctd} = \left(0,7 \times 0,3 \times f_{ck}^{2/3}\right) / \gamma_c \text{ para valores de } f_{ck} \text{ até } 55 \text{ MPa.}$$

Substituindo o valor de f_{ctd} por f_{lctd} , a equação obtida é:

$$f_{bd} = 2,25 \times \eta_1 \times \eta_2 \times f_{lctd} \quad (21)$$

onde:

$$f_{lctd} = f_{lctk,0,05} / \gamma_c \quad (22)$$

$f_{lctk} 0,05$ é uma relação analítica experimental definida na tabela 11.3.1 do EUROCODE2 (1999).

4.2 Verificação no Estado Limite de Serviço (ELS)

Os estados limites de serviço são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e a boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados.

Os estados limites de serviço definidos pela NBR 6118:14 para o concreto armado são:

- ✓ Estado limite de formação de fissuras (ELS-F);
- ✓ estado limite de abertura das fissuras (ELS-W);
- ✓ estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF);
- ✓ estado limite de vibrações excessivas (ELS-VE).

Segundo o EUROCODE 2 (1999) todos os critérios estabelecidos para cálculo no Estado Limite de Serviço, para peças executadas com concreto comum, são válidos também para as peças executadas com concreto leve, bastando apenas substituir os valores do módulo de deformação e da tensão de tração média do concreto comum pelos respectivos valores do concreto leve.

4.2.1 Estado limite de abertura de fissuras (ELS-W)

No ELS-W busca-se controlar a abertura de fissuras visando à proteção das armaduras e a aceitação sensorial dos usuários. Nesse contexto, tem-se a adoção de cobrimentos mínimos recomendados pela norma.

De acordo com a NBR 6118: 2014, para garantir o cobrimento mínimo, o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que se trata do cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc).

O valor do cobrimento depende da classe de agressividade do ambiente. A Tabela 22 apresenta algumas classes de agressividade ambiental.

Tabela 22: Classes de agressividade ambiental.

| Macroclima | Microclima | | | |
|---------------|------------------------|--|-------------------------------------|--|
| | Ambientes Internos | | Ambientes externos e obras em geral | |
| | Seco $UR \leq 65\%$ | Úmido ou ciclos de molhagem ou secagem | Seco $UR \leq 65\%$ | Úmido ou ciclos de molhagem ou secagem |
| Rural | I | I | I | II |
| Urbano | I | II | I | II |

Fonte: (PINHEIRO, 2004).

Para essas classes I e II, e para $\Delta c = 10\text{mm}$, a NBR 6118: 2014 recomenda os cobrimentos indicados na Tabela 23.

Tabela 23: Cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

| Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental | |
|------------------------|-----------------------------------|----|
| | I | II |
| | Cobrimento Nominal (mm) | |
| Laje | 20 | 25 |
| Viga/ Pilar | 25 | 30 |

Fonte: (ABNT NBR 6118, 2014).

A NBR 6118: 2014 determina que a abertura de fissuras em peças executadas com concreto convencional seja a menor dentre as obtidas, empregando-se as seguintes equações:

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (23)$$

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad (24)$$

Onde:

σ_{si} = tensão de tração no centroide da armadura considerada;

ϕ_i = diâmetro da barra que protege a região de envolvimento considerada;

E_{si} = módulo de deformação do aço da barra considerada, de diâmetro ϕ_i ;

ρ_{ri} = taxa de armadura passiva em relação à área da região de envolvimento A_{cri} ;

η_i = coeficiente de conformação superficial da armadura considerada, sendo:

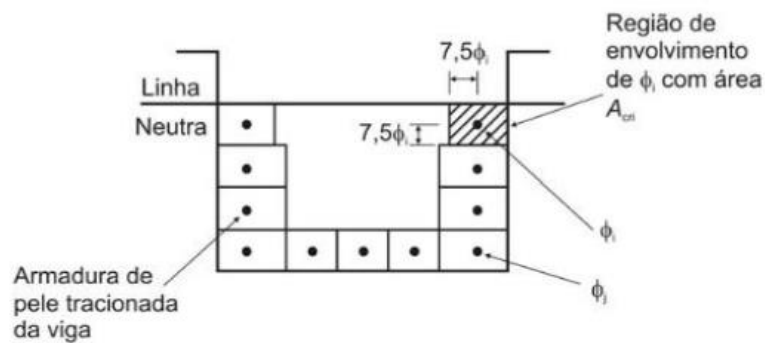
$\eta_i = 1,0$ para barras lisas (CA 25);

$\eta_i = 1,4$ para barras entalhadas (CA 60);

$\eta_i = 2,25$ para barras nervuradas (CA 50).

A área de região de envolvimento (A_{cri}) é apresentada na Figura 28.

Figura 28: Área de região de envolvimento.



Fonte: (NBR 6118, 2014).

De acordo com a NBR 6118: 2014, de um modo geral, a presença de fissuras com aberturas máximas entre o intervalo de 0,2 mm a 0,4 mm sob a ação das combinações frequentes, não denotam importância significativa na corrosão das armaduras passivas.

As normas brasileiras atuais não fazem menção à abertura de fissuras em peças executadas com concreto leve. Já o EUROCODE 2 (1999), recomenda que sejam usados os mesmos critérios de controle de fissuração para o concreto convencional e para o concreto leve, substituindo apenas a tensão f_{ctm} por f_{ctm} .

O Manual CEB/FIP (1977) traz a seguinte equação para controle de fissuras para concreto normal:

$$w_{\max} = \left(15c + \frac{0.16\phi}{\xi_r} \right) \left(\sigma_s - \frac{300}{\xi_r} \right) \cdot 10^{-6} \leq w_{\lim} \quad (25)$$

onde:

w_{\max} é a largura máxima da fissura calculada em mm;

c é a espessura do cobrimento da armadura em mm;

ϕ é o diâmetro da barra em mm;

σ_s é a resistência do aço em MPa;

ξ_r é a taxa de armadura, para vigas e lajes igual a $A_s / 0.25b_w h$;

w_{\lim} é a largura limite da fissura:

0,1mm para reservatórios e para ambientes severamente agressivos;

0,004 vezes a espessura do cobrimento ou 0,2mm para peças expostas às condições atmosféricas ordinárias;

0,3mm para peças protegidas.

4.2.2 Estado limite de deformação excessiva (ELS-DEF)

O estado limite de deformação excessiva (ELS-DEF) é o estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da estrutura (SILVA, 2003).

Segundo a NBR 6118: 2014 deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas da estrutura. Esses limites são classificados pela norma em quatro grupos básicos, quais sejam:

- aceitabilidade sensorial: caracterizado por vibrações indesejadas ou efeito visual desagradável;
- efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir o uso adequado da construção;
- efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão ligados a ela;
- efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas.

A Tabela 24 apresenta os limites estabelecidos pela NBR 6118: 2014.

Tabela 24: Limites para deslocamentos.

| Tipo de efeito | Razão da limitação | Exemplo | Deslocamento a considerar | Deslocamento limite |
|---------------------------------------|--|---|------------------------------------|----------------------------|
| Aceitabilidade sensorial | Visual | Deslocamentos visíveis em elementos estruturais | Total | $l/250$ |
| | Outro | Vibrações sentidas no piso | Devido a cargas acidentais | $l/350$ |
| Efeitos estruturais em serviço | Pavimentos que devem permanecer planos | Ginásios e pistas de boliche | Total | $l/350 +$ contraflecha |
| | | | Ocorrido após a construção do piso | $l/600$ |

Tabela 24: Limites para deslocamentos (continuação).

| Elementos que suportam equipamentos sensíveis | | Laboratórios | Ocorrido após nivelamento do equipamento | De acordo com recomendação do fabricante do equipamento |
|---|---|--|--|--|
| Efeitos em elementos não estruturais | Paredes | Alvenaria, caixilhos e revestimentos | Após a construção da parede | $l/500$ e 10mm $\Theta = 0,0017$ rad |
| | | Divisórias leves e caixilhos telescópicos | Ocorrido após a instalação da divisória | $l/500$ e 25mm |
| | | Movimento lateral de edifícios | Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\Psi_1=0,30$) | $H/1700$ e $H_i/850$ entre pavimentos |
| | | Movimentos térmicos verticais | Provocado por diferença de temperatura | $l/400$ e 15mm |
| | | Movimentos térmicos horizontais | Provocado por diferença de temperatura | $H_i/500$ |
| Efeitos em elementos não estruturais | Forros | Revestimentos colados | Ocorrido após a construção do forro | $l/350$ |
| | | Revestimentos pendurados ou com juntas | Deslocamento ocorrido após a construção do forro | $l/175$ |
| | | Pontes rolantes | Desalinhamento de trilhos | Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem |
| Efeitos em elementos estruturais | Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas | Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado. | | |

Fonte: (ABNT NBR 6118, 2014).

A NBR 6118: 2014 estabelece a seguinte equação para o cálculo da flecha imediata:

$$a = \frac{5}{384} \cdot \frac{pl^4}{(EI)_{eq}} \quad (26)$$

Onde:

p é a carga definida por certa combinação;

l é o vão a ser vencido;

$(E.I)_{eq}$ é a rigidez equivalente expressão pela equação:

$$(E.I)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \times I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{II} \right\} \leq E_{cs} \cdot I_c \quad (27)$$

Onde:

I_c – momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} – momento de inércia da seção fissurada do concreto no Estádio II, calculado com o

coeficiente $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$;

E_s – módulo de deformação do aço;

E_{cs} – módulo de deformação secante do concreto;

M_a – momento fletor na seção crítica do vão considerado;

M_r – momento de fissuração do elemento estrutural expresso por:

$$M_{cr} = \alpha \times f_{ct} \times \frac{I_c}{y_t} \quad (28)$$

Onde:

α = fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, sendo igual a 1,2 para seções T, 1,3 para seção duplo T e 1,5 para seções retangulares;

f_{ct} = resistência à tração direta no concreto, devendo-se no estado limite de deformação excessiva para concretos leves usar o valor de f_{ctm} no lugar de f_{ct} ;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

y_t = distância do centro geométrico da seção até a fibra mais tracionada.

O Manual CEB/FIP (1977) recomenda que para dispensar a verificação da deformação em vigas e lajes, a relação vão/ altura útil não seja maior que:

$$l_i/h = 10, \text{ para vigas e lajes em balanço;}$$

$$l_i/h = 12, \text{ para vigas retangulares;}$$

$$l_i/h = 25, \text{ para lajes nervuradas, pisos alveolares e vigas T;}$$

$$l_i/h = 150/l_i \text{ para pisos com vão igual ou mais que 5m.}$$

Onde:

l_i é a distância entre pontos de momento igual a zero.

A relação vão/ altura útil deve ser multiplicada pelos fatores da Tabela 25 para permitir o efeito da armadura de tração.

Tabela 25: Fatores de multiplicação para relação vão/ altura útil

| Resistência característica da armadura (MPa) | $\frac{100A_s}{b_e h}$ | | | | |
|--|------------------------|------|------|------|-------------|
| | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 2.00 | ≥ 3.00 |
| 250 | 1.4 | 1.4 | 1.0 | 0.8 | 0.7 |
| 400 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 0.6 | 0.5 |
| 500 | 0.9 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |

Fonte: (CEB/FIP, 1977).

O b_e constante na tabela refere-se a largura efetiva.

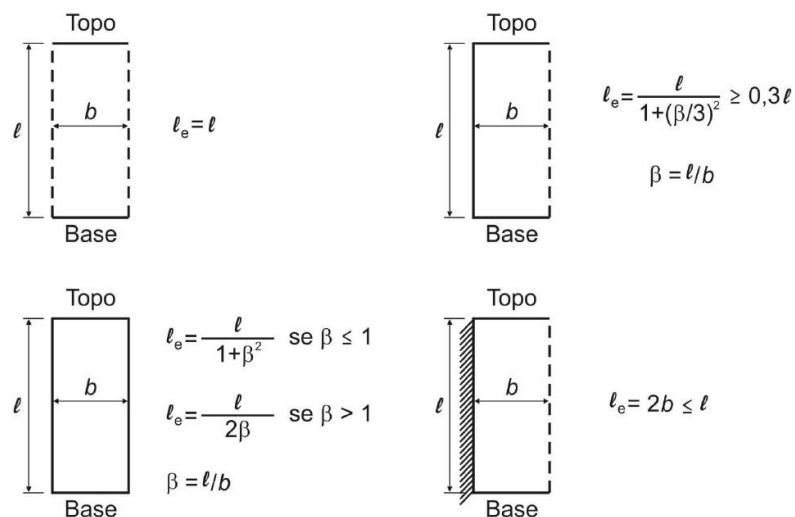
O EUROCODE 2 (1999) cita que todos os critérios estabelecidos para cálculo no Estado Limite de Serviço de peças em concreto convencional são válidos também para peças em concreto leve, substituindo apenas os valores do módulo de deformação e da tensão de tração média do concreto convencional pelos respectivos valores do concreto leve. Sendo assim, para verificação da deformação das peças de concreto leve aqui consideradas, serão utilizados os critérios previstos na NBR 6118: 2014 substituindo os valores do módulo de deformação e tensão de tração como recomendado pelo EUROCODE 2: 1999.

4.3 Dimensionamento de paredes em concreto celular

De acordo com o projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) as paredes executadas com concreto celular devem atender os seguintes requisitos:

- comprimento da parede maior ou igual a dez vezes a sua espessura;
- espessura da parede igual ou maior que 10 cm
- consideração dos esforços causados pelas restrições aos efeitos da variação volumétrica (retração, temperatura, etc.);
- análise dos esforços de torção, quando o centro de torção não coincidir com o centro geométrico do edifício, e o modelo de análise não considere intrinsecamente esses esforços de torção;
- paredes devem ser dimensionadas à flexo-compressão para os esforços atuantes, considerando-se, a excentricidade mínima de $(1,5 + 0,03 t)$ cm, onde t é a espessura da parede sem revestimento;
- comprimento equivalente da parede (l_e) de acordo com a Figura 29.

Figura 29: Comprimento equivalente (l_e)



Fonte: (ABNT/ CEE-185, 2013).

4.3.1 Resistência de cálculo sob normal de compressão

O projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que a resistência de cálculo seja determinada pela seguinte equação:

$$\eta_{d,resist} = \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{k_1 [1 + 3k_2(2 - k_2)]} \leq \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{1,643} \leq 0,4 f_{cd} t \quad (29)$$

Onde:

$\eta_{d,resist}$ = força normal resistente de cálculo, por unidade de comprimento, admitida no plano médio da parede;

ρ = taxa geométrica de armadura vertical da parede, não superior a 1%;

t = espessura da parede;

$$f_{scd} = E_s \cdot 0,002 / \gamma_c$$

λ = esbeltez da parede definida por:

Para $35 \leq \lambda \leq 86$ $k_1 = \lambda/35$ e $k_2=0$;

Para $86 < \lambda \leq 120$ $k_1 = \lambda/35$ e $k_2 = \frac{\lambda - 86}{35}$

Onde λ é a esbeltez da parede dada por:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} = \sqrt{12} \cdot \frac{l_e}{t}$$

O dimensionamento é atendido se:

$$\eta_{d,resist} \geq \frac{3 \cdot \eta_{d,max} + \eta_{d,min}}{4} \quad (30)$$

Onde:

$n_{d,max}$ = maior valor da força normal por unidade de comprimento, para o carregamento considerado no trecho escolhido;

$n_{d,min}$ = menor valor da força normal por unidade de comprimento, para o carregamento considerado no trecho escolhido;

4.3.2 Armadura mínima

O projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que a armadura vertical mínima em paredes de concreto celular corresponda a 0,09% da seção da parede e a armadura horizontal mínima seja pelo menos 0,15% da seção da parede.

Referido projeto, recomenda também, que o espaçamento máximo entre as barras das armaduras verticais e horizontais não seja maior que duas vezes a espessura da parede, respeitando o máximo absoluto de 30 cm.

4.3.3 Dimensionamento ao cisalhamento

O projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que a força cortante resistente de cálculo seja determinada pela seguinte equação:

$$V_d \leq F_{vd}$$

$$F_{vd} = 0,3 \cdot f_{ctd} \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cmd}}{f_{ck}} \right) \Sigma t \cdot l, \text{ com } \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cmd}}{f_{ck}} \right) \leq 2 \quad (31)$$

Sendo:

$$f_{ctd} = \frac{0,21 \cdot (f_{ck})^{2/3}}{\gamma_c} \quad (32)$$

Onde:

σ_{cmd} = tensão média de cálculo no concreto celular comprimido (MPa);

t = largura (sem revestimento) de cada trecho que compõe uma mesma parede, tomado sempre na direção do esforço cortante, em metros (m);

l = comprimento de cada trecho que compõe uma mesma parede, tomado sempre na direção do esforço cortante, em metros (m);

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto celular (MPa).

Se a condição $V_d \leq F_{vd}$ não for satisfeita, o projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) prevê uma armadura de cisalhamento dada por:

$$A_{sh}/s = V_d/f_{yd} \text{ e } A_{sv}/s = (V_d - n_d/2)/f_{yd} \quad (33)$$

Onde:

v_d = força cortante por unidade de comprimento;

n_d = força de compressão por unidade de comprimento no mesmo trecho de parede.

4.3.4 Cobrimento

Para garantir o cobrimento mínimo da armadura das paredes de concreto celular, o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que se trata do cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc).

O valor do cobrimento depende da classe de agressividade do ambiente. A Tabela 26 apresenta classes de agressividade ambiental.

Tabela 26: Classes de agressividade ambiental

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|--|----------------------|---|---|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| II | Moderada | Urbana | Pequeno |
| III | Forte | Marinha Industrial | Grande |
| IV | Muito forte | Industrial Respingo de maré | Elevado |

Fonte: (ABNT/ CEE-185, 2013).

A Tabela 27 mostra a correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$.

Tabela 27: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

| Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|----|-----|----|
| | I | II | III | IV |
| | Cobrimento nominal (mm) | | | |
| Laje | 25 | 30 | 40 | 50 |
| Parede | 30 | 35 | 45 | 55 |

Fonte: (ABNT/ CEE-185, 2013).

5 APLICAÇÃO DO CONCRETO LEVE EM LAJES, VIGAS E PAREDES MOLDADAS NO LOCAL

Para o estudo da viabilidade técnica da aplicação dos concretos leves optou-se pelo dimensionamento de lajes maciças, vigas e paredes moldadas no local.

Os dimensionamentos foram feitos em concreto convencional, concreto celular estrutural e concreto leve com argila expandida e seguiram os critérios apresentados no capítulo 4. Os concretos leves estudados foram caracterizados no capítulo 3 e na Tabela 28 é apresentado um resumo de suas propriedades admitidas.

Tabela 28: Propriedades dos concretos estudados

| Propriedades | Concreto celular 1 | Concreto celular 2 | Concreto leve com argila expandida | Concreto convencional |
|--|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|
| Massa específica (kg/m³) | 1874 | 1720 | 1740 | 2400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 25,18 | 14,51 | 22,16 | 25,00 |
| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | 1,90 | 0,75 | 2,32 | 2,50 |
| Módulo de deformação (GPa) | 20,09 | 14,55 | 17,14 | 23,80 |
| Fonte | Cortelassi (2005) | Cortelassi (2005) | Pereira (2008) | NBR 6118 (2014) |

Fonte: Citada na própria Tabela

Para o cálculo do módulo de deformação dos concretos leves estudados foi utilizada a equação (5).

5.1 Dimensionamento à flexão

5.1.1 Concreto com agregados leves

Para o dimensionamento de estruturas de concreto com agregados leves à flexão simples, conforme Leonhardt e Mönning (1978) e o EUROCODE 2 (1999), pode-se considerar as mesmas hipóteses do concreto convencional, quais sejam:

a) as seções transversais permanecem planas após a deformação. Assim resulta que, as deformações das fibras de uma seção são proporcionais as suas distâncias à linha neutra, sendo o diagrama de deformação retilíneo, conforme mostra a Figura 30;

b) a resistência a tração do concreto é desprezada;

c) existe a perfeita aderência entre o aço e o concreto, e a deformação das barras deve ser a mesma do concreto em seu entorno;

d) a distribuição de tensões no concreto se faz de acordo com o diagrama parábola – retângulo e a seguinte relação de tensão-deformação e tensão de pico podem ser utilizadas:

$$\sigma_{lc} = f_{lcd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{lc}}{\varepsilon_{lc2}} \right)^n \right], \text{ para } 0 \leq \varepsilon_{lc} \leq \varepsilon_{lc2} \quad (11)$$

$$\sigma_{lc} = f_{lcd}, \text{ para } \varepsilon_{lc2} \leq \varepsilon_{lc} \leq \varepsilon_{lcu2}, \quad (12)$$

$$f_{lcd} = \alpha_{lcc} \cdot f_{lck} / \gamma_c$$

Onde:

$$n = 2$$

$$\varepsilon_{lc2} = 2,0\%, \text{ para concretos com } f_{clk} \leq 50\text{MPa};$$

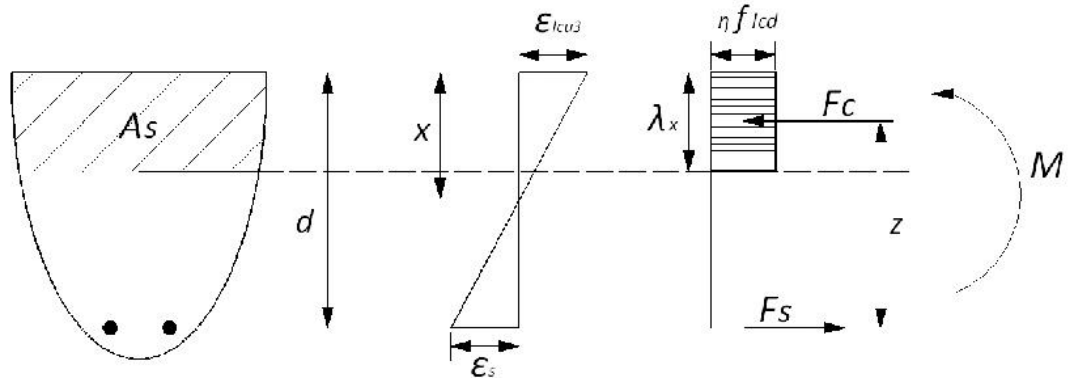
$$\varepsilon_{lcu2} = 3,5\%, \text{ para concretos com } f_{clk} \leq 50\text{MPa};$$

$$\alpha_{lcc} = 0,85$$

e) O diagrama parábola-retângulo pode ser substituído por um diagrama retângulo de altura igual a λx onde x é a posição da linha neutra e $\lambda = 0,80$, com a tensão máxima igual a $0,85f_{lcd}$, de acordo com Figura 30;

f) o alongamento máximo do aço é de 10%.

Figura 30: Distribuição de tensão retangular



Fonte: (EUROCODE 2, 1999)

Na figura 30, M é o momento solicitante de cálculo, F_c é a resultante de compressão no concreto, F_s é a resultante de tração no aço, z é o braço de alavanca e $\eta = 0,85$.

Com o equilíbrio de forças e momentos normais à seção transversal, substituindo os valores da resultante das tensões de compressão no concreto ($b_w \cdot 0,80 \cdot 0,85 f_{cd}$) e do braço de alavanca ($d - 0,4 x$), obtém-se o momento resistente da seção transversal retangular:

$$M_d = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) b_w \cdot f_{cd} \quad (34)$$

Onde:

d = altura útil da seção retangular (distância do centroide da resultante de tração até a borda comprimida);

x = altura da linha neutra;

b_w = largura da seção transversal admitida constante;

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto à compressão aos 28 dias.

Resolvendo a equação, obtém-se x :

$$x = \frac{0,68 \cdot d + \sqrt{(0,68d)^2 - 4 \cdot 0,272 \left(\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}} \right)}}{0,544} \quad (35)$$

Conhecida a posição da linha neutra x , verifica-se o domínio em que a peça está trabalhando.

$$x_{23} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \cdot d \quad x_{34} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{yd}} \cdot d$$

$x_{23} = x$ no limite entre os domínios 2 e 3;

$x_{34} = x$ no limite entre os domínios 3 e 4;

ε_c = deformação última do concreto na flexão (3,5‰)

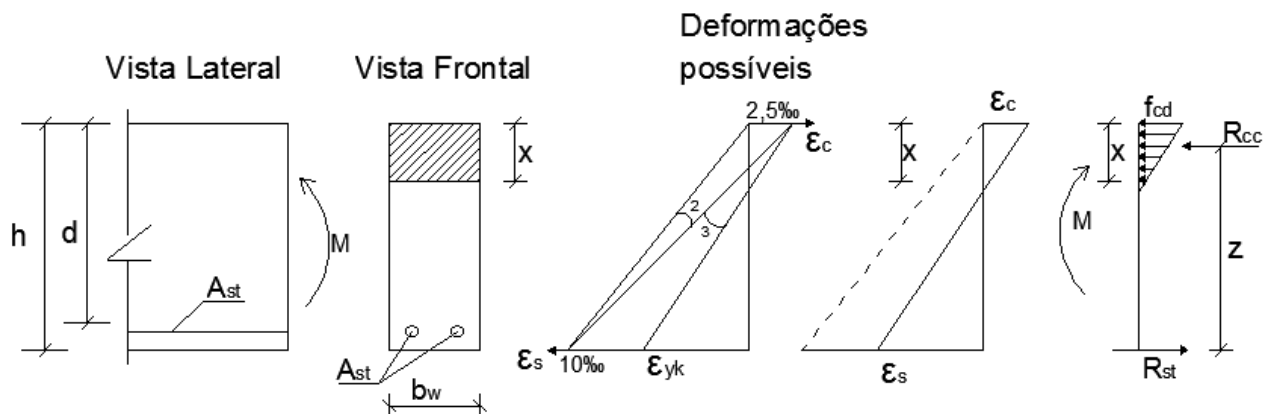
ε_s = deformação do aço (nos domínios 2 e 3 $\varepsilon_s = 10‰$);

ε_{yd} = deformação de escoamento de cálculo do aço.

5.1.2 Concreto celular

Para o dimensionamento das peças em concreto celular, foi considerado o diagrama tensão x deformação do estudo de Babu (2008) mostrado na Figura 24 do item 2.5.3 deste trabalho. A Figura 31 mostra a distribuição de tensões considerada.

Figura 31: Distribuição de tensões para o concreto celular



Fonte: (Elaborada pela autora)

Na Figura 31, R_{cc} é a resultante de tensões de compressão do concreto dada por:

$$R_{cc} = \frac{x \cdot b}{2} \cdot f_{cd} \quad (36)$$

O braço de alavanca z é expresso por:

$$z = d - \frac{1}{3}x \quad (37)$$

Substituindo os valores da resultante das tensões de compressão no concreto e do braço de alavanca, obtém-se o momento resistente da seção:

$$M_r = M_d = (0,5 \cdot x \cdot d - 0,165x^2) b_w \cdot f_{cd} \quad (38)$$

Resolvendo a equação, obtém-se x:

$$x = \frac{0,5 \cdot d \pm \sqrt{(0,5d)^2 - 4 \cdot 0,165 \left(\frac{M_r}{b_w \cdot f_{cd}} \right)}}{0,333} \quad (39)$$

Conhecida a posição da linha neutra x, verifica-se o domínio em que a peça está trabalhando.

$$x_{23} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \cdot d \quad x_{34} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{yd}} \cdot d$$

x_{23} = x no limite entre os domínios 2 e 3;

x_{34} = x no limite entre os domínios 3 e 4;

ε_c = deformação última do concreto na flexão (2,5‰)

ε_s = deformação do aço (nos domínios 2 e 3, ε_s = 10‰);

ε_{yd} = deformação de escoamento de cálculo do aço.

5.2 Aplicação dos concretos leves em lajes.

O modelo de laje escolhido para o estudo da aplicação do concreto leve foi laje maciça armada em uma direção.

A laje selecionada é caracterizada a seguir:

- laje biapoiada armada em uma direção,
- vãos a serem vencidos: 2,00m, 3,00m e 4,00m;

- cargas atuantes: permanente: 1,0 kN/m²
acidental: 1,5 kN/m² (uso residencial)
peso próprio: $\gamma.h$

5.2.1 Determinação da altura inicial da laje

Para a determinação da altura inicial da laje em estudo com os diferentes tipos de concreto, optou-se pela análise dos deslocamentos.

As lajes devem ter uma espessura que atenda a verificação do estado limite de serviço de deformações excessivas. Desse modo, a altura inicial das lajes foi determinada igualando os deslocamentos aos deslocamentos previstos na NBR 6118: 2014 apresentados na Tabela 23 para condição de aceitabilidade sensorial.

Para a laje com vão $l= 2,0\text{m}$, tem-se:

- para carga total $l/250 = 8\text{mm}$
- para carga acidental $l/350 = 5,7\text{mm}$

Para a laje com vão $l= 3,0\text{m}$, tem-se:

- para carga total $l/250 = 12\text{mm}$
- para carga acidental $l/350 = 8,6\text{mm}$

Para a laje com vão $l= 4,0\text{m}$, tem-se:

- para carga total $l/250 = 16\text{mm}$
- para carga acidental $l/350 = 11,4\text{mm}$

A altura da laje foi determinada pela equação 26.

$$a = \frac{5}{384} \cdot \frac{pl^4}{(EI)_{eq}} = \frac{(\rho \cdot h_i + p)}{Eh_i^3} \cdot l^4 \cdot \frac{60}{384}, \text{ para carga total.}$$

Os resultados da determinação das alturas iniciais são apresentados na Tabela 29. É importante ressaltar que a massa específica constante na tabela abaixo refere-se somente ao

concreto, não foi considerado o efeito do peso da armadura, por não haver norma específica para concreto leve.

Tabela 29: Altura inicial das lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00m | | | | |
|---|---|----------------|--------------|---|
| Concretos | γ (kN/m³) | E (GPa) | h (m) | Deslocamento imediato, elástico inicial p/ carga total (m) |
| Concreto convencional | 24,00 | 23,80 | 0,035 | 0,008 |
| Concreto celular 1 | 18,74 | 20,09 | 0,036 | 0,008 |
| Concreto celular 2 | 17,20 | 14,55 | 0,041 | 0,008 |
| Concreto leve com argila expandida | 17,40 | 17,14 | 0,039 | 0,008 |
| Laje com vão l=3,00m | | | | |
| Concretos | γ (kN/m³) | E (GPa) | h (m) | Deslocamento imediato, elástico inicial p/ carga total (m) |
| Concreto convencional | 24,00 | 23,80 | 0,056 | 0,012 |
| Concreto celular 1 | 18,74 | 20,09 | 0,058 | 0,012 |
| Concreto celular 2 | 17,20 | 14,55 | 0,063 | 0,012 |
| Concreto leve com argila expandida | 17,40 | 17,14 | 0,061 | 0,012 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | |
| Concretos | γ (kN/m³) | E (GPa) | h (m) | Deslocamento imediato, elástico inicial p/ carga total (m) |
| Concreto convencional | 24,00 | 23,80 | 0,077 | 0,016 |
| Concreto celular 1 | 18,74 | 20,09 | 0,080 | 0,016 |
| Concreto celular 2 | 17,20 | 14,55 | 0,088 | 0,016 |
| Concreto leve com argila expandida | 17,40 | 17,14 | 0,084 | 0,016 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Catoia (2012) afirma que, se tratando de concreto leve, com um pequeno aumento na altura da laje pode-se vencer o mesmo vão do concreto convencional com uma redução significativa do peso próprio. Isso pode ser observado nos resultados acima. Fixando o valor

do deslocamento igual ao deslocamento limite consegue-se alturas de mesma ordem de grandeza para os 3 tipos de concretos estudados.

A NBR 6118: 2014 estabelece uma altura mínima de $h=8$ cm para lajes de piso. Desse modo, para as lajes com vão de 2,00m será adotada altura igual a 8cm tanto para o concreto convencional quanto para os concretos celular e com argila expandida, para a laje com vão de 3,00m será adotada altura igual a 9 cm e para a laje com vão de 4,00m será adotada altura igual a 10cm. As alturas foram adotadas a critério da autora para os cálculos iniciais.

5.2.2 Cálculos dos momentos fletores atuantes nas lajes

O momento máximo positivo de uma laje unidirecional, desprezando o efeito de placa, bi-apoiada, por unidade de comprimento, é dado pela seguinte equação:

$$M_a = \frac{pl^2}{8} \quad (40)$$

Onde:

p é a carga total atuante;

l é o vão.

A Tabela 30 apresenta os valores de momento fletor obtidos para os 4 tipos de concreto estudados.

Tabela 30: Momento fletor atuante nas lajes

| Laje com vão $l=2,00m$ | | |
|---|---------------------------------------|---|
| Concreto | Carga total (kN/m²) | Momento fletor M_a (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,42 | 2,21 |
| Concreto celular 1 | 4,00 | 2,00 |
| Concreto celular 2 | 3,87 | 1,93 |
| Concreto leve com argila expandida | 3,89 | 1,94 |
| Laje com vão $l=3,00m$ | | |
| Concreto | Carga total (kN/m²) | Momento fletor M_a (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,66 | 5,25 |
| Concreto celular 1 | 4,18 | 4,70 |
| Concreto celular 2 | 4,05 | 4,55 |
| Concreto leve com argila expandida | 4,06 | 4,57 |
| Laje com vão $l=4,00m$ | | |
| Concreto | Carga total (kN/m²) | Momento fletor M_a (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,90 | 9,80 |
| Concreto celular 1 | 4,37 | 8,75 |

Tabela 30: Momento fletor atuante nas lajes (continuação)

| | | |
|---|------|------|
| Concreto celular 2 | 4,22 | 8,44 |
| Concreto leve com argila expandida | 4,24 | 8,48 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos resultados acima pode-se observar que a massa específica mais baixa dos concretos leves conduz a uma redução da ordem de 8% a 14% no momento fletor atuante nas lajes.

5.2.3 Determinação da altura útil mínima

A partir do momento fletor é possível se determinar a altura útil mínima utilizando a seguinte equação:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{M_d}{(0,68 \times \xi_{34} - 0,272 \times \xi_{34}^2) \times b_w \times f_{cd}}} \quad (41)$$

Onde:

$$b_w = 1,0 \text{ m}$$

$$\xi_{34} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{yd}} = 0,628 \text{ para o concreto convencional e leve com argila expandida e}$$

para $\varepsilon_{yd} = 2,07\%$ para aço CA50 e $\varepsilon_c = 3,5\%$;

$$\xi_{34} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{yd}} = 0,547 \text{ para o concreto celular e para } \varepsilon_{yd} = 2,07\% \text{ para aço CA50 e}$$

$\varepsilon_c = 2,5\%$;

$$M_d = 1,4 M_a$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

A Tabela 31 apresenta os valores encontrados para as lajes estudadas.

Tabela 31: Valores da altura útil mínima para as lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00m | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Concreto | M_a (kN.m/m) | f_{ck} (MPa) | d_{mín} (cm) |
| Concreto convencional | 2,21 | 25,00 | 2,32 |
| Concreto celular 1 | 2,00 | 25,18 | 2,31 |
| Concreto celular 2 | 1,95 | 14,51 | 3,00 |
| Concreto leve com argila expandida | 1,95 | 22,16 | 2,32 |
| Laje com vão l=3,00m | | | |
| Concreto | M_a (kN.m/m) | f_{ck} (MPa) | d_{mín} (cm) |
| Concreto convencional | 5,25 | 25,00 | 3,58 |
| Concreto celular 1 | 4,71 | 25,18 | 3,55 |
| Concreto celular 2 | 4,55 | 14,51 | 4,60 |
| Concreto leve com argila expandida | 4,57 | 22,16 | 3,55 |
| Laje com vão l=4,00m | | | |
| Concreto | M_a (kN.m/m) | f_{ck} (MPa) | d_{mín} (cm) |
| Concreto convencional | 9,80 | 25,00 | 4,90 |
| Concreto celular 1 | 8,75 | 25,18 | 4,84 |
| Concreto celular 2 | 8,44 | 14,51 | 6,26 |
| Concreto leve com argila expandida | 8,48 | 22,16 | 4,84 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para lajes maciças pode-se considerar a altura útil como sendo $d=h-3\text{cm}$, desse modo as alturas de laje inicialmente adotadas (8 cm para lajes com vão de 2,0m; 9 cm para lajes com vão de 3m e 10cm para lajes com vão de 4,0m) atendem as condições de flecha-limite e altura útil mínima.

5.2.4 Verificação do domínio

A partir da posição da linha neutra x , é possível verificar o domínio em que a peça está trabalhando. O valor de x é encontrado a partir das equações definidas no item 5.1.

A Tabela 32 apresenta os valores de x para as lajes estudadas.

Tabela 32: Posição da linha neutra das lajes estudadas

| Laje com vão l=2,00m | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 3,09 | 17,85 | 1 | 0,05 | 0,005 |
| Concreto celular 1 | 2,80 | 17,98 | 1 | 0,05 | 0,006 |
| Concreto celular 2 | 2,71 | 10,36 | 1 | 0,05 | 0,011 |
| Concreto leve com argila expandida | 2,72 | 15,83 | 1 | 0,05 | 0,005 |
| Laje com vão l=3,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 7,34 | 17,85 | 1 | 0,06 | 0,011 |
| Concreto celular 1 | 6,59 | 17,98 | 1 | 0,06 | 0,013 |
| Concreto celular 2 | 6,37 | 10,36 | 1 | 0,06 | 0,011 |
| Concreto leve com argila expandida | 6,40 | 15,83 | 1 | 0,06 | 0,024 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 13,72 | 17,85 | 1 | 0,07 | 0,018 |
| Concreto celular 1 | 12,25 | 17,98 | 1 | 0,07 | 0,022 |
| Concreto celular 2 | 11,82 | 10,36 | 1 | 0,07 | 0,017 |
| Concreto leve com argila expandida | 11,87 | 15,83 | 1 | 0,07 | 0,040 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para o concreto convencional e o concreto leve com argila expandida se:

$x < 0,259.d$ a peça está no domínio 2;

$0,259.d < x < 0,6283.d$ a peça está no domínio 3.

Para o concreto celular, se:

$x < 0,2.d$ a peça está no domínio 2;

$0,2.d < x < 0,5470.d$ a peça está no domínio 3.

A Tabela 33 apresenta dos domínios de cada peça.

Tabela 33: Domínio das lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00m | | | |
|---|---------------------------|--------------|----------------|
| Concreto | x₂₃ (m) | x (m) | Domínio |
| Concreto convencional | 0,01295 | 0,00502 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0100 | 0,00619 | 2 |
| Concreto celular 2 | 0,0100 | 0,01077 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,01295 | 0,00504 | 2 |
| Laje com vão l=3,00m | | | |
| Concreto | X₂₃ (m) | X (m) | Domínio |
| Concreto convencional | 0,01813 | 0,00911 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0140 | 0,01105 | 2 |
| Concreto celular 2 | 0,0140 | 0,01934 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,01813 | 0,00896 | 2 |
| Laje com vão l=4,00m | | | |
| Concreto | X₂₃ (m) | X (m) | Domínio |
| Concreto convencional | 0,02072 | 0,01529 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0160 | 0,01842 | 3 |
| Concreto celular 2 | 0,0160 | 0,03299 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,02072 | 0,01490 | 2 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.2.5 Cálculo das armaduras principall e secundária

De acordo com Carvalho e Figueiredo (2014), o cálculo da armadura pode ser feito do mesmo modo como em vigas retangulares sob flexão simples para uma faixa de laje de largura igual a 1,0m. A armadura longitudinal de seções retangulares para concretos de classe até C50 pode ser calculada pela equação:

$$A_{sx} = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad (42)$$

Onde z é o braço de alavanca definido no item 5.1.

A armadura secundária positiva pode ser determinada por:

$$A_{sy} = 0,20 \cdot A_{sx} \geq 0,90 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad (43)$$

A Tabela 34 apresenta os valores encontrados para as peças estudadas.

Tabela 34: Armaduras principal e secundária para as lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00m | | | | | |
|---|-----------------------------------|--------------|-----------------------------|--|--|
| Concreto | M_d (kN.m/m) | z (m) | f_{yd} (MPa) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) |
| Concreto convencional | 2,93 | 0,04787 | 435 | 1,48 | 0,29 |
| Concreto celular 1 | 2,67 | 0,04783 | 435 | 1,35 | 0,27 |
| Concreto celular 2 | 2,59 | 0,04623 | 435 | 1,35 | 0,27 |
| Concreto leve com argila expandida | 2,60 | 0,04788 | 435 | 1,31 | 0,26 |
| Laje com vão l=3,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m/m) | z (m) | f_{yd} (MPa) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) |
| Concreto convencional | 7,34 | 0,06635 | 435 | 2,54 | 0,51 |
| Concreto celular 1 | 6,59 | 0,06632 | 435 | 2,29 | 0,46 |
| Concreto celular 2 | 6,37 | 0,06355 | 435 | 2,31 | 0,46 |
| Concreto leve com argila expandida | 6,40 | 0,06642 | 435 | 2,22 | 0,44 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m/m) | z (m) | f_{yd} (MPa) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) |
| Concreto convencional | 13,72 | 0,07388 | 435 | 4,27 | 0,85 |
| Concreto celular 1 | 12,25 | 0,07356 | 435 | 3,81 | 0,76 |
| Concreto celular 2 | 11,82 | 0,06900 | 435 | 3,93 | 0,79 |
| Concreto leve com argila expandida | 11,87 | 0,07404 | 435 | 3,69 | 0,74 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Todas as lajes não atingiram a armadura secundária positiva mínima prevista em norma, desse modo, será adotado o valor de 0,90cm²/m como recomendado.

Pelos resultados apresentados na Tabela 33, observa-se que os concretos celular e leve com argila expandida conduzem a uma redução da ordem de 10% na área de aço das peças em estudo em relação ao concreto convencional.

5.2.6 Cálculo do momento de fissuração

O momento de fissuração é calculado por meio da equação (28) apresentada no capítulo 4 e mostrada aqui novamente.

$$M_{cr} = \alpha \times f_{ct} \times \frac{I_c}{y_t} \quad (28)$$

Os valores de f_{ct} utilizados nos cálculos do momento de fissuração são os valores da resistência a tração por compressão diametral multiplicados por 0,9.

A Tabela 35 apresenta os valores dos momentos de fissuração calculados.

Tabela 35: Momento de fissuração para as lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00 m | | | |
|---|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Concreto | Carga total (kN/m²) | M_a (kN.m/m) | M_{cr} (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,42 | 2,21 | 3,60 |
| Concreto celular 1 | 4,00 | 2,00 | 2,74 |
| Concreto celular 2 | 3,87 | 1,95 | 1,08 |
| Concreto leve com argila expandida | 3,89 | 1,95 | 3,34 |
| Laje com vão l=3,00 m | | | |
| Concreto | Carga total (kN/m²) | M_a (kN.m/m) | M_r (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,66 | 5,25 | 4,50 |
| Concreto celular 1 | 4,18 | 4,71 | 3,46 |
| Concreto celular 2 | 4,05 | 4,55 | 1,37 |
| Concreto leve com argila expandida | 4,06 | 4,57 | 4,23 |
| Laje com vão l=4,00 m | | | |
| Concreto | Carga total (kN/m²) | M_a (kN.m/m) | M_r (kN.m/m) |
| Concreto convencional | 4,90 | 9,80 | 5,63 |
| Concreto celular 1 | 4,37 | 8,75 | 4,28 |
| Concreto celular 2 | 4,22 | 8,44 | 1,69 |
| Concreto leve com argila expandida | 4,24 | 8,48 | 5,22 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.2.7 Verificação dos deslocamentos para diversas combinações

A previsão do deslocamento imediato pode ser feita a partir da equação 26 mostrada no item 4.2.2 e apresentada novamente a seguir:

$$a = \frac{5}{384} \cdot \frac{pl^4}{(EI)_{eq}} \quad (26)$$

Sendo:

$$(E.I)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \times I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (27)$$

Características geométricas da seção no estádio II:

- Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}, \text{ onde } E_s = 210 \text{ GPa.}$$

- Posição da linha neutra:

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (44)$$

Onde:

$$a_1 = b_w / 2 = 50 \text{ cm}$$

$$a_2 = \alpha_e \cdot A_s$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s$$

- Inércia da seção no estádio II para seção retangular:

$$I_{x,II_0} = \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (45)$$

Os valores das características geométricas das lajes são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36: Características geométricas das lajes

| Laje com vão l=2,00m | | | | | |
|---|------------------------------|--|--|---------------------------------|---|
| Concretos | α_e | a_2 (cm²) | a_3 (cm³) | X_{II} (cm) | $I_{x,II}$ (cm⁴) |
| Concreto celular 2 | 14,44 | 19,48 | -97,40 | 1,214 | 338,85 |
| Laje com vão l=3,00m | | | | | |
| Concretos | α_e | a_2 (cm²) | a_3 (cm³) | X_{II} (cm) | $I_{x,II}$ (cm⁴) |
| Concreto celular 2 | 14,44 | 33,29 | -199,87 | 1,693 | 779,37 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | | |
| Concretos | α_e | a_2 (cm²) | a_3 (cm³) | X_{II} (cm) | $I_{x,II}$ (cm⁴) |
| Concreto convencional | 8,824 | 37,69 | -263,82 | 1,95 | 1208,30 |
| Concreto celular 1 | 10,45 | 39,85 | -278,98 | 1,99 | 1263,03 |
| Concreto celular 2 | 14,44 | 56,83 | -397,83 | 2,31 | 1660,97 |
| Concreto leve com argila expandida | 12,25 | 45,18 | -316,24 | 2,10 | 1393,40 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para as lajes que tiveram seus momentos atuantes menores que os momentos de fissuração, não se faz necessário calcular a inércia no estágio II. Para verificação da flecha utiliza-se a inércia bruta.

As cargas p atuantes nas lajes foram calculadas para as combinações permanente, quase permanente e rara da seguinte maneira:

- Permanente: peso próprio + contra piso + piso;
- Quase permanente: peso próprio + contra piso + piso + 0,3 acidental;
- Rara: peso próprio + contra piso + piso + acidental.

As flechas devem atender os limites mostrados na Tabela 23, quais sejam:

- $l/250$ para carga total (combinação quase permanente) e,
- $l/350$ para carga acidental.

Os valores da inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações para as lajes estudadas são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações.

| Laje com vão $l=2,00m$ | | | | | | |
|---|------------------|--|--|-----------------------------------|--|----------------------------|
| Concretos | Ações | p (kN/m²) | $M_a = M_{máx}$ (kN.m/m) | $M_r / M_{máx}$ | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 2,92 | 1,40 | 2,43 | 0,000042667 | 0,60 |
| | Quase permanente | 3,37 | 1,68 | 2,14 | 0,000042667 | 0,69 |
| | Rara | 4,42 | 2,21 | 1,63 | 0,000042667 | 0,91 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 2,50 | 1,25 | 2,19 | 0,000042667 | 0,61 |
| | Quase permanente | 2,95 | 1,47 | 1,86 | 0,000042667 | 0,72 |
| | Rara | 4,00 | 2,00 | 1,37 | 0,000042667 | 0,97 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 2,37 | 1,19 | 0,90 | 0,000032898 | 1,03 |
| | Quase permanente | 2,83 | 1,41 | 0,76 | 0,000020927 | 1,93 |
| | Rara | 3,87 | 1,98 | 0,55 | 0,000010186 | 5,44 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 2,39 | 1,19 | 2,80 | 0,000042667 | 0,68 |
| | Quase permanente | 2,84 | 1,42 | 2,35 | 0,000042667 | 0,81 |
| | Rara | 3,89 | 1,95 | 1,71 | 0,000042667 | 1,11 |

Tabela 37: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações (continuação).

| Laje com vão l=3,00m | | | | | | |
|---|------------------|---------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Concretos | Ações | p (kN/m²) | M_a= M_{máx} (kN.m/m) | M_r /M_{máx} | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 3,16 | 3,55 | 1,28 | 0,000060750 | 2,30 |
| | Quase permanente | 3,61 | 4,06 | 1,12 | 0,000060750 | 2,63 |
| | Rara | 4,66 | 5,24 | 0,87 | 0,000041825 | 4,94 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 2,69 | 3,02 | 1,14 | 0,000060750 | 2,32 |
| | Quase permanente | 3,14 | 3,53 | 0,98 | 0,000057736 | 2,85 |
| | Rara | 4,19 | 4,71 | 0,73 | 0,000027735 | 7,92 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 2,55 | 2,87 | 0,47 | 0,000013535 | 13,64 |
| | Quase permanente | 3,00 | 3,37 | 0,41 | 0,000011318 | 19,20 |
| | Rara | 4,05 | 4,55 | 0,30 | 0,000009225 | 31,80 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 2,57 | 2,89 | 1,46 | 0,000060750 | 2,60 |
| | Quase permanente | 3,02 | 3,39 | 1,25 | 0,000060750 | 3,05 |
| | Rara | 4,07 | 4,57 | 0,92 | 0,000049371 | 5,07 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | | | |
| Concretos | Ações | p (kN/m²) | M_a= M_{máx} (kN.m/m) | M_r /M_{máx} | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 3,40 | 6,80 | 0,82 | 0,000052413 | 9,08 |
| | Quase permanente | 3,85 | 7,70 | 0,73 | 0,000039860 | 13,53 |
| | Rara | 4,90 | 9,80 | 0,57 | 0,000025556 | 26,85 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 2,87 | 5,75 | 0,74 | 0,000041717 | 11,43 |
| | Quase permanente | 3,32 | 6,65 | 0,64 | 0,000031431 | 17,54 |
| | Rara | 4,37 | 8,75 | 0,48 | 0,000020881 | 40,73 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 2,72 | 4,44 | 0,38 | 0,000018601 | 33,49 |
| | Quase permanente | 3,17 | 6,34 | 0,27 | 0,000017867 | 40,64 |
| | Rara | 4,22 | 8,44 | 0,20 | 0,000017143 | 56,38 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 2,74 | 5,48 | 0,95 | 0,000073916 | 7,21 |
| | Quase permanente | 3,19 | 6,38 | 0,82 | 0,000051944 | 11,94 |
| | Rara | 4,44 | 8,48 | 0,62 | 0,000030121 | 27,37 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Segundo Carvalho e Figueiredo (2014), a flecha imediata devido à carga acidental é dada pela diferença entre a flecha devido a carga total (combinação rara) e a flecha devido à carga permanente, ou seja:

$$a_q = a_{CR} - a_{CP} \leq a_{lim} = l/350 \quad (46)$$

Onde:

a_{CR} – flecha para combinação rara;

a_{CP} – flecha para combinação permanente.

Para a laje com vão $L=2,00m$ tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 2/350 = 0,0057m = 5,70mm$$

Para a laje com vão $L=3,00m$ tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 3/350 = 0,0086m = 8,60mm$$

Para a laje com vão $L=4,00m$ tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 4/350 = 0,01143m = 11,43mm$$

A Tabela 38 apresenta os valores de flecha devido à carga acidental para as lajes estudadas.

Tabela 38: Flecha devido à carga acidental nas lajes estudadas.

| Laje com vão $L=2,00m$ | | | |
|---|---------------------|-------------------------|------------------|
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 0,91 | 0,60 | 0,31 |
| Concreto Celular 1 | 0,97 | 0,61 | 0,36 |
| Concreto Celular 2 | 5,44 | 1,03 | 4,41 |
| Concreto leve com argila expandida | 1,11 | 0,68 | 0,43 |
| Laje com vão $L=3,00m$ | | | |
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 4,94 | 2,30 | 2,64 |
| Concreto Celular 1 | 7,92 | 2,32 | 5,60 |
| Concreto Celular 2 | 31,80 | 13,64 | 18,16 |
| Concreto leve com argila expandida | 5,07 | 2,60 | 2,47 |

Tabela 38: Flecha devido à carga acidental nas lajes estudadas (continuação).

| Laje com vão L=4,00m | | | |
|---|---------------------|-------------------------|------------------|
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 26,85 | 9,08 | 17,77 |
| Concreto Celular 1 | 40,73 | 11,43 | 29,30 |
| Concreto Celular 2 | 56,38 | 33,49 | 22,89 |
| Concreto leve com argila expandida | 27,37 | 7,21 | 20,16 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos valores apresentados na Tabela 38 observa-se que para as lajes com vão de 2,00m todas as lajes atenderam o limite estabelecido pela norma com a altura de 8 cm, inicialmente adotada. Para o vão de 3,00m, a altura inicialmente adotada de 9 cm adotada não atendeu a flecha limite apenas para o concreto celular 2. E finalmente, para as lajes com vão de 4,00m a altura de 10cm inicialmente adotada ultrapassou o valor da flecha limite para os 4 tipos de concreto, sendo necessário aumentá-la.

Para a determinação das novas alturas foi seguido o mesmo roteiro apresentado acima até que se encontrasse o valor adequado. Os valores finais são apresentados nas Tabelas 39 e 40.

Tabela 39: Altura e flecha devido à carga acidental para as lajes estudadas.

| Laje com vão L=2,00m | | | | |
|---|---------------|---------------------|-------------------------|------------------|
| Concretos | h (cm) | Flechas (mm) | | |
| | | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 8 | 0,91 | 0,60 | 0,31 |
| Concreto Celular 1 | 8 | 0,97 | 0,61 | 0,36 |
| Concreto Celular 2 | 8 | 5,44 | 1,03 | 4,41 |
| Concreto leve com argila expandida | 8 | 1,11 | 0,68 | 0,43 |

| Laje com vão L=3,00m | | | | |
|---|---------------|---------------------|-------------------------|------------------|
| Concretos | h (cm) | Flechas (mm) | | |
| | | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 9 | 4,94 | 2,30 | 2,64 |
| Concreto Celular 1 | 9 | 7,92 | 2,32 | 5,60 |
| Concreto Celular 2 | 13 | 7,72 | 2,39 | 4,33 |
| Concreto leve com argila expandida | 9 | 5,07 | 2,60 | 2,47 |

Tabela 39: Altura e flecha devido à carga acidental para as lajes estudadas (continuação).

| Laje com vão L=4,00m | | | | |
|------------------------------------|--------|--------------|------------------|-----------|
| Concretos | h (cm) | Flechas (mm) | | |
| | | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 12 | 10,30 | 3,77 | 6,53 |
| Concreto Celular 1 | 13 | 11,05 | 3,11 | 7,94 |
| Concreto Celular 2 | 18 | 11,56 | 5,00 | 6,56 |
| Concreto leve com argila expandida | 12 | 9,95 | 4,17 | 5,78 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Com as novas alturas das lajes, foram calculadas novas armaduras.

Tabela 40: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações.

| Laje com vão l=3,00m | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|------------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|--------|
| Concretos | Ações | p (kN/m ²) | M _a = M _{máx} (kN.m/m) | M _r /M _{máx} | I _{eq} (m ⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 3,16 | 3,55 | 1,28 | 0,000060750 | 2,30 |
| | Quase permanente | 3,61 | 4,06 | 1,12 | 0,000060750 | 2,63 |
| | Rara | 4,66 | 5,24 | 0,87 | 0,000041825 | 4,94 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 2,69 | 3,02 | 1,14 | 0,000060750 | 2,32 |
| | Quase permanente | 3,14 | 3,53 | 0,98 | 0,000057736 | 2,85 |
| | Rara | 4,19 | 4,71 | 0,73 | 0,000027735 | 7,92 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 3,24 | 3,64 | 0,78 | 0,000098063 | 2,39 |
| | Quase permanente | 3,68 | 4,15 | 0,68 | 0,000072610 | 3,67 |
| | Rara | 4,74 | 5,33 | 0,53 | 0,000044459 | 7,72 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 2,57 | 2,89 | 1,46 | 0,000060750 | 2,60 |
| | Quase permanente | 3,02 | 3,39 | 1,25 | 0,000060750 | 3,05 |
| | Rara | 4,07 | 4,57 | 0,92 | 0,000049371 | 5,07 |

Tabela 40: Inércia equivalente e deslocamento para as diversas combinações (continuação).

| Laje com vão l=4,00m | | | | | | |
|---|------------------|---------------------------------|--|---|---------------------------------------|---------------|
| Concretos | Ações | p (kN/m²) | M_a= M_{máx} (kN.m/m) | M_r /M_{máx} | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 3,88 | 7,76 | 1,04 | 0,000144000 | 3,77 |
| | Quase permanente | 4,33 | 8,66 | 0,93 | 0,000121531 | 5,00 |
| | Rara | 5,38 | 10,76 | 0,75 | 0,000731033 | 10,30 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 3,44 | 6,87 | 1,05 | 0,000183083 | 3,11 |
| | Quase permanente | 3,89 | 7,77 | 0,92 | 0,000151942 | 4,25 |
| | Rara | 4,94 | 9,87 | 0,73 | 0,000086881 | 11,05 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 4,09 | 8,19 | 0,66 | 0,000127619 | 5,00 |
| | Quase permanente | 4,55 | 9,09 | 0,60 | 0,000153718 | 6,77 |
| | Rara | 5,59 | 11,19 | 0,49 | 0,000011088 | 11,56 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 3,09 | 6,18 | 1,21 | 0,000144000 | 4,17 |
| | Quase permanente | 3,54 | 7,08 | 1,06 | 0,000144000 | 4,78 |
| | Rara | 4,59 | 9,17 | 0,82 | 0,000089651 | 9,95 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

A partir dos dados da Tabela 40 conclui-se que, para o vão de 2,00, é possível se trabalhar com uma peça cerca de 40% mais leve quando se leva em consideração o concreto convencional versus o concreto celular 2.

Para o vão de 3,00m foi necessário um aumento de 44% na altura da laje de concreto celular 2.

Na situação aonde o vão era 4,00m, as alturas das lajes de concreto celular 1 e concreto celular 2 foram respectivamente 18% e 64% maiores em relação aos demais concretos. Essa diferença de altura pode ser atribuída à baixa resistência a tração direta do concreto celular que conduziu a momentos de fissuração menores em relação aos demais e consequentemente diminuindo significativamente a inércia equivalente de Branson.

5.2.8 Verificação do efeito da fluência

Para verificação da flecha a longo prazo, foi empregado o método previsto na NBR 6118: 2014 tanto para as peças de concreto convencional quanto para as de concreto leve, estando a diferença fundamental na verificação da flecha imediata com as devidas

adequações. Segundo Catoia (2012), o fator de fluência do concreto leve determinado experimentalmente, pode ser comparado com o do concreto convencional desde que determinados para períodos equivalentes.

A flecha a longo prazo é dada pela seguinte equação, segundo a NBR 6118:14:

$$a_{total,\infty} = a_{imediate}(1 + \alpha_f) \quad (47)$$

Onde:

$a_{total,\infty}$ = flecha a longo prazo;

$a_{imediate}$ = flecha imediata, calculada considerando a rigidez dada pela equação 27;

$\alpha_f = (\Delta\xi)/(1 + 50\rho')$, com

$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$, sendo:

$\xi(t) = 2$, para tempo superior a 70 meses, e

$\xi(t_0) = 0,68.0,996^t.t^{0,32}$, no tempo $t_0=28/30=0,93$ meses (28 dias).

$\rho' = A_s'/b.d$ = taxa geométrica de armadura longitudinal de compressão.

O carregamento das lajes foi considerado aplicado aos 28 dias, pois é o que acontece usualmente. O período de deformação final foi considerado como sendo 70 meses, conforme recomendação da NBR 6118: 2014.

Como não há armadura comprimida, então $\rho' = 0$. Desse modo, tem-se:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} = \frac{2 - 0,66}{1} = 1,34$$

O valor da flecha total no tempo infinito será a flecha ocorrida em virtude da carga obtida pela combinação quase permanente multiplicada por $(1 + \alpha_f)$.

A Tabela 41 apresenta os valores da flecha total no tempo infinito para as lajes estudadas.

Tabela 41: Flecha total no tempo infinito.

| Laje com vão l=2,00m | | |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Concreto | Flechas (mm) | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ |
| Convencional | 0,69 | 1,61 |
| Celular 1 | 0,72 | 1,68 |
| Celular 2 | 1,93 | 4,51 |
| Leve com argila expandida | 0,81 | 3,15 |
| Laje com vão l=3,00m | | |
| Concreto | Flechas (mm) | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ |
| Convencional | 2,63 | 6,15 |
| Celular 1 | 2,85 | 6,67 |
| Celular 2 | 3,67 | 8,58 |
| Leve com argila expandida | 3,05 | 7,14 |
| Laje com vão l=4,00m | | |
| Concreto | Flechas (mm) | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ |
| Convencional | 5,00 | 11,70 |
| Celular 1 | 4,25 | 9,95 |
| Celular 2 | 6,77 | 15,84 |
| Leve com argila expandida | 4,78 | 11,18 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Todas as lajes apresentaram deslocamentos dentro do limite estabelecido pela NBR 6118: 2014, qual seja: $l/250$.

5.3 Aplicação dos concretos leves em vigas.

As características das vigas estudadas são as seguintes:

- Viga bi-apoiada de seção retangular;
- vãos a serem vencidos: 2,00m, 4,00m e 6,00m;
- cargas atuantes: permanente: 8,0 kN/m
acidental: 2 kN/m
peso próprio: $\gamma \cdot h \cdot b$

5.3.1 Geometria da seção

Para o estudo das vigas foram considerados 3 diferentes vãos com as seguintes seções:

- Viga com vão $l=2,00\text{m}$
 - ✓ Seção retangular 20x25cm;
 - ✓ Altura útil estimada 19 cm (h-6);
- Viga com vão $l=4,00\text{m}$
 - ✓ Seção retangular 20x35cm;
 - ✓ Altura útil estimada 29 cm (h-6);
- Viga com vão $l=6,00\text{m}$
 - ✓ Seção retangular 30x50cm;
 - ✓ Altura útil estimada 44cm (h-6).

5.3.2 Cálculos dos momentos fletores atuantes nas vigas

O momento máximo positivo de uma viga bi-apoiada é dado pela equação 40 apresentada no item 5.1.2 e mostrada aqui novamente.

$$M_a = \frac{pl^2}{8} \quad (40)$$

Onde:

p é a carga total atuante;

l é o vão.

A Tabela 42 apresenta os valores de momento fletor obtidos para os 4 tipos de concreto estudados.

Tabela 42: Momento fletor atuante nas vigas.

| Viga com vão l=2,00m | | |
|---|---------------------------|--|
| Concreto | Carga total (kN/m) | Momento fletor M_a (kN.m) |
| Concreto convencional | 11,20 | 5,60 |
| Concreto celular 1 | 10,94 | 5,47 |
| Concreto celular 2 | 10,86 | 5,43 |
| Concreto leve com argila expandida | 10,87 | 5,44 |
| Viga com vão l=4,00m | | |
| Concreto | Carga total (kN/m) | Momento fletor M_a (kN.m) |
| Concreto convencional | 11,68 | 23,36 |
| Concreto celular 1 | 11,31 | 22,62 |
| Concreto celular 2 | 11,20 | 22,41 |
| Concreto leve com argila expandida | 11,22 | 22,44 |
| Viga com vão l=6,00m | | |
| Concreto | Carga total (kN/m) | Momento fletor M_a (kN.m) |
| Concreto convencional | 13,60 | 61,20 |
| Concreto celular 1 | 12,81 | 57,65 |
| Concreto celular 2 | 12,58 | 56,61 |
| Concreto leve com argila expandida | 12,61 | 56,75 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.3.3 Cálculo da altura mínima

Conforme Carvalho e Figueiredo (2014), a altura útil mínima de uma viga pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$d_{min} = 2,0 \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}}} \quad (48)$$

Os valores da altura útil mínima das vigas estudadas são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43: Valores da altura mínima para as vigas estudadas

| Viga com vão l=2,00m | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Concreto | M_d (kN.m) | b_w (m) | f_{cd} (MPa) | d_{min} (m) |
| Concreto convencional | 7,84 | 0,20 | 17,85 | 0,09 |
| Concreto celular 1 | 7,66 | 0,20 | 17,98 | 0,09 |
| Concreto celular 2 | 7,60 | 0,20 | 10,36 | 0,12 |
| Concreto leve com argila expandida | 7,61 | 0,20 | 15,83 | 0,10 |
| Viga com vão l=4,00m | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | b_w (m) | f_{cd} (MPa) | d_{min} (m) |
| Concreto convencional | 32,70 | 0,20 | 17,85 | 0,19 |
| Concreto celular 1 | 31,67 | 0,20 | 17,98 | 0,18 |
| Concreto celular 2 | 31,37 | 0,20 | 10,36 | 0,24 |
| Concreto leve com argila expandida | 31,41 | 0,20 | 15,83 | 0,20 |
| Viga com vão l=6,00m | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | b_w (m) | f_{cd} (MPa) | d_{min} (m) |
| Concreto convencional | 85,68 | 0,30 | 17,85 | 0,25 |
| Concreto celular 1 | 80,71 | 0,30 | 17,98 | 0,24 |
| Concreto celular 2 | 79,25 | 0,30 | 10,36 | 0,32 |
| Concreto leve com argila expandida | 79,44 | 0,30 | 15,83 | 0,26 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos resultados apresentados na Tabela 43, observa-se que as alturas mínimas calculadas são menores do que as adotadas inicialmente, desse modo serão mantidos os valores iniciais.

5.3.4 Verificação do domínio

A partir da posição da linha neutra x , é possível verificar o domínio em que a peça está trabalhando. O valor de x é encontrado a partir das equações definidas no item 5.1.

A Tabela 44 apresenta os valores de x para as vigas estudadas.

Tabela 44: Posição da linha neutra das vigas estudadas

| Viga 20x25cm L=2,00m | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 7,84 | 17,85 | 0,2 | 0,19 | 0,0176 |
| Concreto celular 1 | 7,66 | 17,98 | 0,2 | 0,19 | 0,0234 |
| Concreto celular 2 | 7,60 | 10,36 | 0,2 | 0,19 | 0,0416 |
| Concreto leve com argila expandida | 7,61 | 15,83 | 0,2 | 0,19 | 0,0194 |
| Viga 20x35cm L=4,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 32,70 | 17,85 | 0,2 | 0,29 | 0,0499 |
| Concreto celular 1 | 31,67 | 17,98 | 0,2 | 0,29 | 0,0656 |
| Concreto celular 2 | 31,37 | 10,36 | 0,2 | 0,29 | 0,1210 |
| Concreto leve com argila expandida | 31,41 | 15,83 | 0,2 | 0,29 | 0,0544 |
| Viga 30x50cm L=6,00m | | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | f_{cd} (MPa) | b_w (m) | d (m) | x (m) |
| Concreto convencional | 85,68 | 17,85 | 0,3 | 0,44 | 0,0563 |
| Concreto celular 1 | 80,71 | 17,98 | 0,3 | 0,44 | 0,0719 |
| Concreto celular 2 | 79,25 | 10,36 | 0,3 | 0,44 | 0,1282 |
| Concreto leve com argila expandida | 79,44 | 15,83 | 0,3 | 0,44 | 0,0591 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para o concreto convencional e o concreto leve com argila expandida se:

$x < 0,259.d$ a peça está no domínio 2;

$0,259.d < x < 0,6283.d$ a peça está no domínio 3.

Para o concreto celular, se:

$x < 0,2.d$ a peça está no domínio 2;

$0,2.d < x < 0,5470.d$ a peça está no domínio 3.

A Tabela 45 apresenta os domínios de cada peça.

Tabela 45: Domínio das vigas estudadas.

| Viga 20x25cm L=2,00m | | | |
|------------------------------------|-----------------------|----------|----------------|
| Concreto | x₂₃ | x | Domínio |
| Concreto convencional | 0,0492 | 0,0176 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0380 | 0,0234 | 2 |
| Concreto celular 2 | 0,0380 | 0,0416 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,0492 | 0,0194 | 2 |
| Viga 20x35cm L=4,00m | | | |
| Concreto | x₂₃ | x | Domínio |
| Concreto convencional | 0,0751 | 0,0499 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0580 | 0,0656 | 3 |
| Concreto celular 2 | 0,0580 | 0,1210 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,0751 | 0,0544 | 2 |
| Viga 30x50cm L=6,00m | | | |
| Concreto | x₂₃ | x | Domínio |
| Concreto convencional | 0,1139 | 0,0563 | 2 |
| Concreto celular 1 | 0,0880 | 0,0719 | 2 |
| Concreto celular 2 | 0,0880 | 0,1282 | 3 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,1139 | 0,0591 | 2 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.3.5 Cálculo da armadura longitudinal

Segundo Carvalho e Figueiredo (2014), a armadura longitudinal de seções retangulares para concretos de classe até C50 pode ser calculada pela equação 42:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad (42)$$

Onde z é o braço de alavanca definido no item 5.1.

A Tabela 46 apresenta os valores de armadura longitudinal encontrados para as vigas estudadas.

Tabela 46: Armadura longitudinal para as vigas estudadas.

| Viga com vão l=2,00m | | | | |
|---|-----------------------------|--------------|--|---------------------------------------|
| Concreto | M_d (kN.m) | z (m) | f_{yd} (MPa) | A_s (cm²) |
| Concreto convencional | 7,84 | 0,1829 | 435 | 0,98 |
| Concreto celular 1 | 7,66 | 0,1822 | 435 | 0,96 |
| Concreto celular 2 | 7,60 | 0,1791 | 435 | 0,99 |
| Concreto leve com argila expandida | 7,61 | 0,1822 | 435 | 0,96 |
| Viga com vão l=4,00m | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | z (m) | f_{yd} (MPa) | A_s (cm²) |
| Concreto convencional | 32,70 | 0,2700 | 435 | 2,78 |
| Concreto celular 1 | 31,67 | 0,2681 | 435 | 2,71 |
| Concreto celular 2 | 31,37 | 0,2496 | 435 | 2,89 |
| Concreto leve com argila expandida | 31,41 | 0,2682 | 435 | 2,69 |
| Viga com vão l=6,00m | | | | |
| Concreto | M_d (kN.m) | z (m) | f_{yd} (kN/m²) | A_s (cm²) |
| Concreto convencional | 85,68 | 0,4175 | 435 | 4,72 |
| Concreto celular 1 | 80,71 | 0,4160 | 435 | 4,46 |
| Concreto celular 2 | 79,25 | 0,3972 | 435 | 4,58 |
| Concreto leve com argila expandida | 79,44 | 0,4163 | 435 | 4,38 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

É necessário fazer a verificação das armaduras mínima e máxima.

A armadura mínima é verificada pela seguinte equação:

$$A_{smín} = \rho_{mín} \cdot b_w \cdot h \quad (49)$$

Sendo $\rho_{mín} = 0,15\%$ para os concretos estudados de acordo com a Tabela 17.3 da NBR 6118: 2014.

A armadura máxima deve obedecer a seguinte condição:

$$(A_s + A'_s) \leq \frac{4}{100} A_c \quad (50)$$

Os valores das armaduras mínima e máximas das vigas estudadas são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47: Armaduras mínima e máxima para as vigas estudadas.

| Viga/ vão | $A_{smín}$ (cm ²) | $A_{smáx}$ (cm ²) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Viga 20x25/ L=2m | 0,75 | 20 |
| Viga 20x35/ L=4m | 1,05 | 28 |
| Viga 30x50/ L=6m | 2,25 | 60 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Nenhuma das vigas estudadas ultrapassou o valor da armadura máxima e todas tiveram armaduras superiores à mínima necessária, desse modo, esses aspectos foram atendidos.

5.3.6 Dimensionamento ao cisalhamento

Estudos anteriores, que foram discutidos no item 4.1.3, indicam que a resistência do concreto leve ao esforço cortante é comparável à resistência do concreto convencional. Desse modo, no dimensionamento ao cisalhamento foi considerado o método proposto pela NBR 6118: 2014.

A NBR 6118: 2014 permite calcular a armadura contra o cisalhamento simplesmente corrigindo o modelo da analogia de treliça. Desse modo, admite-se uma tensão convencional de cisalhamento τ_{wd} , a qual não pode ultrapassar a tensão última de cisalhamento (τ_u).

τ_{wd} é dada pela seguinte equação:

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{b_w \cdot d} \leq \tau_u = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \cdot f_{cd} \quad (51)$$

Os valores de τ_{wd} e τ_u das vigas estudadas são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48: τ_{wd} e τ_u para as vigas estudadas.

| Viga 20x25cm l=2,00m | | | |
|---|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Concreto | V_d (kN) | τ_{wd} (MPa) | τ_u (MPa) |
| Concreto convencional | 15,68 | 0,41 | 4,339 |
| Concreto celular 1 | 15,31 | 0,40 | 4,367 |
| Concreto celular 2 | 15,20 | 0,40 | 2,636 |
| Concreto leve com argila expandida | 15,20 | 0,40 | 3,895 |
| Viga 20x35cm l=4,00m | | | |
| Concreto | V_d (kN) | τ_{wd} (MPa) | τ_u (MPa) |
| Concreto convencional | 32,70 | 0,56 | 4,339 |
| Concreto celular 1 | 31,67 | 0,55 | 4,367 |
| Concreto celular 2 | 31,37 | 0,54 | 2,636 |
| Concreto leve com argila expandida | 31,41 | 0,54 | 3,895 |
| Viga 30x50cm l=6,00m | | | |
| Concreto | V_d (kN) | τ_{wd} (MPa) | τ_u (MPa) |
| Concreto convencional | 57,12 | 0,43 | 4,339 |
| Concreto celular 1 | 53,80 | 0,41 | 4,367 |
| Concreto celular 2 | 52,83 | 0,40 | 2,636 |
| Concreto leve com argila expandida | 52,96 | 0,40 | 3,895 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

A tensão convencional de cisalhamento (τ_{wd}) não ultrapassou a tensão última de cisalhamento (τ_u) em nenhuma das vigas estudadas, portanto não há risco de esmagamento do concreto das bielas de compressão.

5.3.6.1 Cálculo da armadura transversal

A armadura transversal é obtida por:

$$\frac{a_{sw}}{n} = \frac{\tau_d}{f_{ywd}} b_w \frac{100}{n} \quad (52)$$

Onde:

n é o número de ramos do estribo;

τ_d é a tensão tangencial a ser resistida pela armadura transversal dada por:

$$\tau_d = \frac{\tau_{wd} - \tau_c}{0,9} \quad (53)$$

τ_c é a tensão devida ao concreto, absorvida por mecanismos complementares ao de treliça. É expressa por:

$$\tau_c = 0,09 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (54)$$

A armadura de cisalhamento das vigas estudadas é apresentada na Tabela 49.

Tabela 49: Armadura de cisalhamento para as vigas estudadas.

| Armadura de cisalhamento viga 20x25cm l=2,00m | | | | |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Concreto | τ_c (MPa) | τ_{wd} (MPa) | τ_d (MPa) | a_{sw}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,769 | 0,41 | 0,40 | 0,912 |
| Concreto celular 1 | 0,773 | 0,40 | 0,41 | 0,946 |
| Concreto celular 2 | 0,535 | 0,40 | 0,15 | 0,346 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,710 | 0,40 | 0,34 | 0,791 |
| Armadura de cisalhamento viga 20x35cm l=4,00m | | | | |
| Concreto | τ_c (MPa) | τ_{wd} (MPa) | τ_d (MPa) | a_{sw}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,769 | 0,56 | 0,23 | 0,525 |
| Concreto celular 1 | 0,773 | 0,55 | 0,25 | 0,580 |
| Concreto celular 2 | 0,535 | 0,54 | - | - |
| Concreto leve com argila expandida | 0,710 | 0,54 | 0,19 | 0,430 |
| Armadura de cisalhamento viga 30x50cm l=6,00m | | | | |
| Concreto | τ_c (MPa) | τ_{wd} (MPa) | τ_d (MPa) | a_{sw}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,769 | 0,43 | 0,37 | 1,290 |
| Concreto celular 1 | 0,773 | 0,41 | 0,41 | 1,401 |
| Concreto celular 2 | 0,535 | 0,40 | 0,15 | 0,518 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,710 | 0,40 | 0,34 | 1,183 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

É necessário verificar a armadura transversal mínima, que é dada por:

$$\frac{a_{swmin}}{n} = \rho_{min} \frac{b_w}{n} \quad (55)$$

Onde:

ρ_{min} é a taxa geométrica mínima de estribos, expressa por:

$$\rho_{min} = 6 \frac{f_{ck}^{2/3}}{f_{ywk}}, (\%) \quad (56)$$

A Tabela 50 apresenta os valores de armadura transversal mínima para as vigas estudadas.

Tabela 50: Armadura de cisalhamento mínima.

| Armadura de cisalhamento viga 20x25cm l=2,00m | | |
|--|----------------------------------|--|
| Concreto | ρ_{min} % | a_{swmin}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,1026 | 1,026 |
| Concreto celular 1 | 0,1031 | 1,031 |
| Concreto celular 2 | 0,0714 | 0,714 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,0947 | 0,947 |
| Armadura de cisalhamento viga 20x35cm l=4,00m | | |
| Concreto | ρ_{min} % | a_{swmin}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,1026 | 1,026 |
| Concreto celular 1 | 0,1031 | 1,031 |
| Concreto celular 2 | 0,0714 | 0,714 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,0947 | 0,947 |
| Armadura de cisalhamento viga 30x50cm l=6,00m | | |
| Concreto | ρ_{min} % | a_{swmin}/n (cm²/m) |
| Concreto convencional | 0,1026 | 1,539 |
| Concreto celular 1 | 0,1031 | 1,546 |
| Concreto celular 2 | 0,0714 | 1,071 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,0947 | 1,420 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos valores de armaduras apresentados nas Tabelas 49 e 50, observa-se que para todos os vãos as peças apresentaram armadura inferior a armadura mínima, diante disso, considera-se armadura mínima para todas.

5.3.7 Cálculo do momento de fissuração

O momento de fissuração das vigas estudadas foi obtido pela equação 29. A Tabela 51 apresenta os resultados.

Os valores de f_{ctm} são relativos aos valores da resistência à tração por compressão diametral multiplicados por 0,9.

Tabela 51: Momento de fissuração.

| Momento de fissuração viga 20x25cm l=2,00m | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------|
| Concreto | α | f_{ctm} (MPa) | I_c (m⁴) | y_t (m) | M_r (kN.m) |
| Concreto convencional | 1,5 | 2,25 | 0,000260 | 0,125 | 7,03 |
| Concreto celular 1 | 1,5 | 1,71 | 0,000260 | 0,125 | 5,34 |
| Concreto celular 2 | 1,5 | 0,68 | 0,000260 | 0,125 | 2,11 |
| Concreto leve com argila expandida | 1,5 | 2,09 | 0,000260 | 0,125 | 6,53 |
| Momento de fissuração viga 20x35cm l=4,00m | | | | | |
| Concreto | α | f_{ctm} (MPa) | I_c (m⁴) | y_t (m) | M_r (kN.m) |
| Concreto convencional | 1,5 | 2,25 | 0,00071 | 0,175 | 13,78 |
| Concreto celular 1 | 1,5 | 1,71 | 0,00071 | 0,175 | 10,47 |
| Concreto celular 2 | 1,5 | 0,68 | 0,00071 | 0,175 | 4,13 |
| Concreto leve com argila expandida | 1,5 | 2,09 | 0,00071 | 0,175 | 12,79 |
| Momento de fissuração viga 30x5cm l=6,00m | | | | | |
| Concreto | α | f_{ctm} (MPa) | I_c (m⁴) | y_t (m) | M_r (kN.m) |
| Concreto convencional | 1,5 | 2,25 | 0,00313 | 0,25 | 42,19 |
| Concreto celular 1 | 1,5 | 1,71 | 0,00313 | 0,25 | 32,06 |
| Concreto celular 2 | 1,5 | 0,68 | 0,00313 | 0,25 | 12,66 |
| Concreto leve com argila expandida | 1,5 | 2,09 | 0,00313 | 0,25 | 39,15 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.3.8 Verificação dos deslocamentos

A previsão do deslocamento imediato é feita a partir da equação 26.

Características geométricas da seção no estágio II:

- Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}, \text{ onde } E_s = 210 \text{ GPa}$$

- Posição da linha neutra:

$$x = \frac{\alpha_e \cdot A_s}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{\alpha_e \cdot A_s}} \right] \quad (57)$$

- Inércia da seção no estágio II para seção retangular:

$$I_{x,II_0} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x - d)^2 \quad (45)$$

Os valores das características geométricas das vigas estudadas são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52: Posição da linha neutra e inércia no estágio II.

| Viga 20x25cm l=2,00m | | | |
|---|------------|---------------|--|
| Concreto | α_e | x (cm) | I_{II} (cm⁴) |
| Concreto convencional | 8,824 | - | - |
| Concreto celular 1 | 10,45 | - | - |
| Concreto celular 2 | 14,43 | 4,55 | 3619,06 |
| Concreto leve com argila expandida | 12,25 | - | - |
| Viga 20x35cm l=4,00m | | | |
| Concreto | α_e | x (cm) | I_{II} (cm⁴) |
| Concreto convencional | 8,824 | 7,30 | 14166,98 |
| Concreto celular 1 | 10,45 | 7,76 | 15924,05 |
| Concreto celular 2 | 14,43 | 9,10 | 21539,66 |
| Concreto leve com argila expandida | 12,25 | 8,27 | 17948,65 |
| Viga 30x50cm l=6,00m | | | |
| Concreto | α_e | x (cm) | I_{II} (cm⁴) |
| Concreto convencional | 8,824 | 9,75 | 58131,31 |
| Concreto celular 1 | 10,45 | 10,24 | 63879,02 |
| Concreto celular 2 | 14,43 | 11,90 | 85,076,08 |
| Concreto leve com argila expandida | 12,25 | 10,89 | 71848,84 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

A Tabela 53 apresenta os valores das cargas para as diversas combinações, inércia equivalente e flechas para as vigas estudadas.

Tabela 53: Inércia equivalente e flecha.

| Viga 20x25cm l=2,00m | | | | |
|---|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------|
| Concreto | Combinação | Carga (kN/m) | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 9,20 | 0,00026042 | 0,31 |
| | Quase permanente | 9,80 | 0,00026042 | 0,33 |
| | Rara | 11,20 | 0,00026042 | 0,38 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 8,94 | 0,00026042 | 0,36 |
| | Quase permanente | 9,54 | 0,00026042 | 0,38 |
| | Rara | 10,94 | 0,00026042 | 0,44 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 8,86 | 0,000069 | 1,83 |
| | Quase permanente | 9,46 | 0,000063 | 2,13 |
| | Rara | 10,86 | 0,000054 | 2,86 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 8,87 | 0,00026042 | 0,41 |
| | Quase permanente | 9,47 | 0,00026042 | 0,44 |
| | Rara | 10,587 | 0,00026042 | 0,51 |
| Viga 20x35cm l=4,00m | | | | |
| Concreto | Combinação | Carga (kN/m) | I_{eq} (m⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 9,68 | 0,000425 | 3,18 |
| | Quase permanente | 10,28 | 0,000378 | 3,80 |
| | Rara | 11,68 | 0,000303 | 5,39 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 9,31 | 0,000295 | 5,24 |
| | Quase permanente | 9,91 | 0,000272 | 6,05 |
| | Rara | 11,31 | 0,000235 | 7,99 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 9,20 | 0,000223 | 9,44 |
| | Quase permanente | 9,80 | 0,000222 | 10,12 |
| | Rara | 11,20 | 0,000220 | 11,68 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 9,21 | 0,000425 | 4,22 |
| | Quase permanente | 9,81 | 0,000382 | 4,99 |
| | Rara | 11,21 | 0,000315 | 6,92 |

Tabela 53: Inércia equivalente e flecha (continuação).

| Viga 30x50cm l=6,00m | | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|-----------------------------------|--------|
| Concreto | Combinação | Carga (kN/m) | I _{eq} (m ⁴) | a (mm) |
| Concreto convencional | Permanente | 11,60 | 0,002423 | 3,39 |
| | Quase permanente | 12,20 | 0,002165 | 3,99 |
| | Rara | 13,60 | 0,001724 | 5,59 |
| Concreto celular 1 | Permanente | 10,81 | 0,001615 | 5,62 |
| | Quase permanente | 11,41 | 0,001469 | 6,52 |
| | Rara | 12,81 | 0,001225 | 8,78 |
| Concreto celular 2 | Permanente | 10,58 | 0,000909 | 13,49 |
| | Quase permanente | 11,18 | 0,000900 | 14,39 |
| | Rara | 12,58 | 0,000886 | 16,47 |
| Concreto leve com argila expandida | Permanente | 10,61 | 0,002538 | 4,11 |
| | Quase permanente | 11,21 | 0,002262 | 4,88 |
| | Rara | 12,61 | 0,001803 | 6,88 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

De acordo com Carvalho e Figueiredo (2014), a flecha devido à carga acidental é dada pela diferença entre a flecha devido a carga total (combinação rara) e a flecha devido à carga permanente, ou seja:

$$a_q = a_{CR} - a_{CP} \leq a_{lim} = l/350 \quad (46)$$

Onde:

a_{CR} – flecha para combinação rara;

a_{CP} – flecha para combinação permanente.

Para a viga com vão L=2,00m tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 2/350 = 0,0057m = 5,70mm$$

Para a viga com vão L=4,00m tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 4/350 = 0,01143m = 11,43mm$$

Para a viga com vão L=6,00m tem-se:

$$a_{lim} = l/350 = 6/350 = 0,01714m = 17,14mm$$

A Tabela 54 apresenta os valores de flecha devido à carga acidental para as vigas estudadas.

Tabela 54: Flecha devido à carga acidental.

| Viga 20x25cm L=2,00m | | | |
|---|---------------------|-------------------------|------------------|
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 0,38 | 0,31 | 0,07 |
| Concreto Celular 1 | 0,44 | 0,36 | 0,08 |
| Concreto Celular 2 | 2,86 | 1,83 | 1,03 |
| Concreto leve com argila expandida | 0,51 | 0,41 | 0,10 |
| Viga 20x35cm L=4,00m | | | |
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 5,39 | 3,18 | 2,21 |
| Concreto Celular 1 | 7,99 | 5,24 | 2,75 |
| Concreto Celular 2 | 11,68 | 9,44 | 2,24 |
| Concreto leve com argila expandida | 6,92 | 4,22 | 2,70 |
| Viga 30x50 L=6,00m | | | |
| Concretos | Flechas (mm) | | |
| | Comb. rara | Comb. permanente | Acidental |
| Concreto Convencional | 5,59 | 3,39 | 2,20 |
| Concreto Celular 1 | 8,78 | 5,62 | 3,16 |
| Concreto Celular 2 | 16,47 | 13,49 | 2,98 |
| Concreto leve com argila expandida | 6,88 | 4,11 | 2,77 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos valores apresentados na Tabela 54, observa-se que todas as vigas não ultrapassaram a flecha limite, desse modo esse aspecto foi atendido.

5.3.9 Verificação do efeito da fluência

A verificação da fluência nas vigas estudadas foi feita do mesmo modo como nas lajes, utilizando a equação 47 apresentada no item 5.2.8.

O carregamento das vigas foi considerado aplicado aos 28 dias, pois é o que acontece usualmente. O período de deformação final foi considerado como sendo 70 meses, conforme recomendação da NBR 6118: 2014.

Como não há armadura comprimida, então $\rho' = 0$. Desse modo, tem-se:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1+50\rho'} = \frac{2-0,66}{1} = 1,34$$

O valor da flecha total no tempo infinito será a flecha ocorrida em virtude da carga obtida pela combinação quase permanente multiplicada por $(1+\alpha_f)$.

A Tabela 55 apresenta os valores da flecha total no tempo infinito para as lajes estudadas.

Tabela 55: Flecha total no tempo infinito.

| Viga 20x25cm l=2,00m | | |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Concreto | Flechas (mm) | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total,\infty}$ |
| Convencional | 0,33 | 0,77 |
| Celular 1 | 0,38 | 0,89 |
| Celular 2 | 2,13 | 4,98 |
| Leve com argila expandida | 0,44 | 1,03 |
| Viga 20x35cm l=4,00m | | |
| Concreto | Flechas (mm) | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total,\infty}$ |
| Convencional | 3,80 | 8,89 |
| Celular 1 | 6,05 | 14,16 |
| Celular 2 | 10,12 | 23,68 |
| Leve com argila expandida | 4,99 | 11,68 |

Tabela 55: Flecha total no tempo infinito (continuação).

| Viga 30x50cm l=6,00m | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------|--|
| Concreto | Flechas (mm) | | |
| | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ | |
| Convencional | 3,99 | 9,34 | |
| Celular 1 | 6,52 | 15,25 | |
| Celular 2 | 14,39 | 33,65 | |
| Leve com argila expandida | 4,88 | 11,42 | |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para vão de 2,00m nenhuma das vigas ultrapassou o limite 1/250 para flecha final previsto na norma. Para os demais vãos, as vigas de concreto celular 2 ultrapassaram o limite 1/250. Diante disso, foi necessário calcular uma nova altura para essas vigas até que o limite fosse atendido. Para o cálculo da nova altura foi seguido o mesmo roteiro apresentado nos itens acima. Os novos valores são apresentados na Tabela 56.

Tabela 56: Altura e flecha final para as vigas.

| Viga com vão L=2,00m | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|------------------------|---------------------|
| Concretos | h (cm) | b (cm) | Flechas (mm) | |
| | | | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ |
| Concreto Convencional | 25 | 20 | 0,33 | 0,77 |
| Concreto Celular 1 | 25 | 20 | 0,38 | 0,89 |
| Concreto Celular 2 | 25 | 20 | 2,13 | 4,98 |
| Concreto leve com argila expandida | 25 | 20 | 0,44 | 1,03 |
| Viga com vão L=4,00m | | | | |
| Concretos | h (cm) | b (cm) | Flechas (mm) | |
| | | | Comb. Quase permanente | $a_{total, \infty}$ |
| Concreto Convencional | 35 | 20 | 3,80 | 8,89 |
| Concreto Celular 1 | 35 | 20 | 6,05 | 14,16 |
| Concreto Celular 2 | 45 | 20 | 6,27 | 14,67 |
| Concreto leve com argila expandida | 35 | 20 | 4,99 | 11,68 |

Tabela 56: Altura e flecha final para as vigas (continuação).

| Viga com vão L=6,00m | | | | |
|---|---------------|---------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Concretos | h (cm) | b (cm) | Flechas (mm) | |
| | | | Comb. Quase permanente | $a_{total,\infty}$ |
| Concreto Convencional | 50 | 30 | 3,99 | 9,34 |
| Concreto Celular 1 | 50 | 30 | 6,52 | 15,25 |
| Concreto Celular 2 | 60 | 30 | 10,16 | 23,77 |
| Concreto leve com argila expandida | 50 | 30 | 4,88 | 11,42 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Para as vigas que tiveram suas seções alteradas, foi calculada uma nova área de aço.

5.4 Aplicação dos concretos leves em paredes moldadas no local.

Para o estudo da aplicação dos concretos leves no sistema construtivo de paredes moldadas no local, optou-se por casa térrea e sobrado.

O projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que, para paredes, o concreto celular deve apresentar resistência à compressão entre 5MPa e 20MPa. Desse modo, para análise das paredes foram considerados 2 concretos celulares com resistência de 5MPa e 14,5MPa, um concreto leve com argila expandida com 15MPa de resistência e um concreto convencional com 8MPa de resistência. Embora a norma NBR 16055: 2012 recomende para paredes de concreto resistência mínima de 20MPa, aqui foi considerado um concreto convencional de baixa resistência para efeito de comparação. As características dos concretos leves considerados nos cálculos das paredes são apresentadas na Tabela 57.

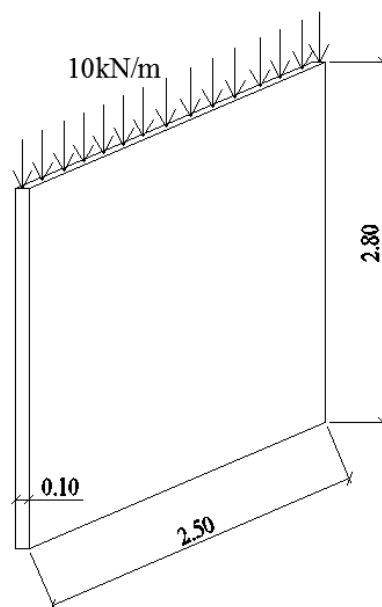
Tabela 57: Característica dos concretos das paredes.

| Propriedades | Concreto celular 2 | Concreto celular 3 | Concreto leve com argila expandida 1 | Concreto convencional 1 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Massa específica (kg/m ³) | 1720 | 1700 | 1600 | 2400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 14,51 | 5,00 | 15,00 | 8,00 |
| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | 0,75 | - | - | - |
| Módulo de deformação secante (GPa) | 14,55 | 10,87 | 13,20 | 20,22 |
| Teor de ar incorporado (%) | 29% | 34% | 0 | 0 |
| Fonte | Cortelassi (2005) | CHIOCCA (2015) | CINEXPAN (2015) | CEHOP (2015) |

Fonte: (Elaborada pela autora).

A Figura 32 ilustra as paredes estudadas e suas características são apresentadas a seguir.

Figura 32: Parede casa térrea estudada.



Fonte: (Elaborada pela autora).

- espessura da parede para casas térreas: 10cm;
- espessura da parede para sobrados: 10cm;
- altura da parede: 2,80m;

- cargas atuantes: 10kN/m

5.4.1 Resistência de cálculo sob normal de compressão

A resistência de cálculo sob normal de compressão é verificada de acordo com a equação 29 mostrada no item 4.3.1 e apresentada aqui novamente.

$$n_{d, resist} = \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{k_1 [1 + 3k_2(2 - k_2)]} \leq \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{1,643} \leq 0,4 f_{cd} t \quad (29)$$

Onde:

$n_{d, resist}$ = força normal resistente de cálculo, por unidade de comprimento, admitida no plano médio da parede;

ρ = taxa geométrica de armadura vertical da parede, não superior a 1%;

t = a espessura da parede;

$$f_{scd} = E_s \cdot 0,002 / \gamma_s$$

$$\gamma_c = 1,4 \cdot 1,2 = 1,68$$

Para $35 \leq \lambda \leq 86$ $k_1 = \lambda/35$ e $k_2 = 0$;

Para $86 < \lambda \leq 120$ $k_1 = \lambda/35$ e $k_2 = \frac{\lambda - 86}{35}$

A Tabela 58 apresenta dos dados das paredes estudadas.

Tabela 58: Características das paredes estudadas.

| Casa térrea t=10cm | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|-----------------|------------|-------|----------------------------------|-------|-------|
| Concreto | f_{cd} (MPa) | f_{scd} (MPa) | ρ (%) | h (m) | $\lambda = \frac{h\sqrt{12}}{t}$ | K_1 | K_2 |
| Convencional 1 | 4,76 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Celular 2 | 8,64 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Celular 3 | 2,97 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Leve com argila expandida 1 | 8,93 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |

Tabela 58: Características das paredes estudadas (continuação).

| Sobrado $t=10\text{cm}$ | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|-----------------|------------|---------|----------------------------------|-------|-------|
| Concreto | f_{cd} (MPa) | f_{scd} (MPa) | ρ (%) | h (m) | $\lambda = \frac{h\sqrt{12}}{t}$ | K_1 | K_2 |
| Convencional 1 | 4,76 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Celular 2 | 8,64 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Celular 3 | 2,97 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |
| Leve com argila expandida | 8,93 | 365 | 0,15 | 2,80 | 96,88 | 2,77 | 0,31 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

A Tabela 59 apresenta a resistência de cálculo das paredes estudadas.

Tabela 59: Resistência de cálculo das paredes.

| Casa térrea | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|--------|-----------------|---------|-------|-------|---------------------|-------------------|----------------------|
| Concreto | f_{cd} (MPa) | ρ | f_{scd} (MPa) | t (m) | K_1 | K_2 | n_{dresit} (kN/m) | n_{dlim} (kN/m) | Carga atuante (kN/m) |
| Convencional 1 | 4,76 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 64,50 | 279,68 | 12,24 |
| Celular 2 | 8,64 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 110,80 | 480,15 | 14,06 |
| Celular 3 | 2,97 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 43,26 | 187,30 | 11,40 |
| Leve com argila expandida 1 | 8,93 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 114,28 | 495,20 | 14,20 |
| Sobrado | | | | | | | | | |
| Concreto | f_{cd} (MPa) | ρ | f_{scd} (MPa) | t (m) | K_1 | K_2 | n_{dresit} (kN/m) | n_{dlim} (kN/m) | Carga atuante (kN/m) |
| Convencional 1 | 4,76 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 64,50 | 279,68 | 14,48 |
| Celular 2 | 8,64 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 110,80 | 480,15 | 18,13 |
| Celular 3 | 2,97 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 43,26 | 187,30 | 12,80 |
| Leve com argila expandida 1 | 8,93 | 0,0015 | 365 | 0,1 | 2,77 | 0,31 | 114,28 | 495,20 | 18,40 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

As paredes com os 4 tipos de concreto apresentaram resistência de cálculo menor do que a resistência limite recomendada, desse modo, esse aspecto foi atendido.

5.4.2 Armadura mínima

O projeto de norma ABNT/ CEE-185 (2013) recomenda que a armadura vertical mínima em paredes de concreto celular corresponda a 0,09% da seção da parede. Para construções de até dois pavimentos, permite-se a utilização de armadura mínima equivalente a 67% deste valor.

A armadura horizontal mínima deve ser pelo menos 0,15% da seção da parede. Para construções de até dois pavimentos permite-se a utilização de armadura mínima de 40% desse valor.

A Tabela 60 apresenta os valores de armadura mínima para as paredes estudadas.

Tabela 60: Armadura mínima das paredes estudadas.

| Casa térrea | | | | |
|--|--------------|--|--|---------------------------|
| Concreto | t (m) | A_{horizontal} (cm²/m) | A_{vertical} (cm²/m) | Tela aço CA 60 |
| Convencional 1 | 0,10 | 0,60 | 0,603 | Q61 |
| Celular 2 | 0,10 | 0,60 | 0,603 | Q61 |
| Celular 3 | 0,10 | 0,60 | 0,603 | Q61 |
| Leve com argila expandida 1 | 0,10 | 0,60 | 0,603 | Q61 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

5.5 Comparativo de custo

A fim de se fazer um breve comparativo do custo do metro cúbico de cada um dos concretos estudados, foi elaborada uma composição de custos a partir dos traços desses concretos. Os valores são apresentados na Tabela 61.

Tabela 61: Custo por metro cúbico de concreto.

| Concreto convencional f_{ck} 25MPa | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 |
| Areia média | m ³ | 0,8669 | R\$ 76,50 | R\$ 66,32 |

Tabela 61: Custo por metro cúbico de concreto (continuação).

| | | | | |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Brita nº 1 | m ³ | 0,209 | R\$ 65,00 | R\$ 13,59 |
| Brita nº 2 | m ³ | 0,627 | R\$ 65,00 | R\$ 40,76 |
| Cimento | kg | 349,00 | R\$ 0,39 | R\$ 137,16 |
| Valor total | | | | R\$ 409,25 |
| Concreto convencional 1 f_{ck} 8MPa | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 |
| Areia grossa | m ³ | 0,608 | R\$ 76,50 | R\$ 46,50 |
| Brita nº 1 | m ³ | 0,269 | R\$ 65,00 | R\$ 17,48 |
| Brita nº 2 | m ³ | 0,562 | R\$ 65,00 | R\$ 36,53 |
| Cimento | kg | 236,00 | R\$ 0,39 | R\$ 92,04 |
| Valor total | | | | R\$ 343,98 |
| Concreto celular 1 f_{ck} 25,18MPa | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 |
| Gerador de espuma | h | 0,084 | R\$ 3,10 | R\$ 0,26 |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 |
| Areia grossa | m ³ | 0,275 | R\$ 76,50 | R\$ 21,04 |
| Pó de brita | m ³ | 0,248 | R\$ 85,00 | R\$ 21,08 |
| Silica ativa | kg | 38,14 | R\$ 1,05 | R\$ 40,05 |
| Super plastificante | l | 7,56 | R\$ 8,90 | R\$ 67,28 |
| Agente espumígeno | l | 0,52 | R\$ 6,50 | R\$ 3,38 |
| Cimento | kg | 382,12 | R\$ 0,39 | R\$ 150,17 |
| Valor total | | | | R\$ 454,69 |
| Concreto celular 2 f_{ck} 14,51MPa | | | | |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 |
| Gerador de espuma | h | 0,084 | R\$ 3,10 | R\$ 0,26 |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 |
| Areia grossa | m ³ | 0,249 | R\$ 76,50 | R\$ 19,05 |
| Pó de brita | m ³ | 0,226 | R\$ 85,00 | R\$ 19,21 |
| Silica ativa | kg | 34,71 | R\$ 1,05 | R\$ 36,45 |
| Super plastificante | l | 6,88 | R\$ 8,90 | R\$ 61,23 |
| Agente espumígeno | l | 1,29 | R\$ 6,50 | R\$ 8,39 |
| Cimento | kg | 347,83 | R\$ 0,39 | R\$ 136,70 |

Tabela 61: Custo por metro cúbico de concreto (continuação).

| Valor total | | | | | R\$ 432,70 |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| Concreto celular 3 f_{ck} 5,0MPa | | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial | |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 | |
| Gerador de espuma | h | 0,084 | R\$ 3,10 | R\$ 0,26 | |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 | |
| Servente | m ³ | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 | |
| Areia média | m ³ | 0,397 | R\$ 76,50 | R\$ 30,37 | |
| Brita n° 0 | m | 0,587 | R\$ 65,00 | R\$ 38,16 | |
| Super plastificante | l | 2,00 | R\$ 8,90 | R\$ 17,80 | |
| Agente espumígeno | l | 100 | R\$ 6,50 | R\$ 6,50 | |
| Cimento | kg | 364,00 | R\$ 0,39 | R\$ 143,05 | |
| Valor total | | | | | R\$ 387,57 |
| Concreto leve com argila expandida f_{ck} 22,16MPa | | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial | |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 | |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 | |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 | |
| Areia fina | m ³ | 0,313 | R\$ 76,50 | R\$ 23,94 | |
| Argila 0500 | m ³ | 0,495 | R\$ 225,00 | R\$ 111,38 | |
| Argila 1506 | m ³ | 0,206 | R\$ 180,00 | R\$ 37,08 | |
| Cimento | kg | 425,00 | R\$ 0,39 | R\$ 167,03 | |
| Valor total | | | | | R\$ 490,86 |
| Concreto leve com argila expandida 1 f_{ck} 15,0MPa | | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial | |
| Betoneira | h | 0,714 | R\$ 1,50 | R\$ 1,07 | |
| Pedreiro | h | 2,00 | R\$ 12,66 | R\$ 25,32 | |
| Servente | h | 12,00 | R\$ 10,42 | R\$ 125,04 | |
| Areia média | m ³ | 0,45 | R\$ 76,50 | R\$ 34,43 | |
| Argila 2215 | m ³ | 0,46 | R\$ 180,00 | R\$ 82,80 | |
| Super plastificante | m ³ | 2,72 | R\$ 8,90 | R\$ 24,21 | |
| Cimento | kg | 340,00 | R\$ 0,39 | R\$ 133,62 | |
| Valor total | | | | | R\$ 426,48 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Os valores dos materiais constantes na Tabela 61 foram cotados com fornecedores no mês de fevereiro/ 2015. Os valores de mão de obra foram baseados na convenção coletiva de maio de 2014 (vigente até o momento da pesquisa) considerando 100% de leis sociais.

Pelos dados mostrados na Tabela 61, verifica-se que em relação ao concreto convencional, os concretos celular 1, celular 2, leve com argila expandida e leve com argila expandida 1 são respectivamente 11,10%, 5,73%, 19,94% e 4,21% mais caros.

Em relação ao consumo de cimento, quando comparados ao concreto convencional, o concreto celular 1 apresenta um consumo 9,48% maior, o concreto celular 2 apresenta um consumo 0,33% menor, o concreto celular 3 possui um consumo 4,30% maior, o concreto leve com argila expandida apresenta um consumo 21,77% maior e o concreto leve com argila expandida 1 possui um consumo 2,64% menor. Esse consumo mais elevado no concreto leve com argila expandida, segundo Pereira (2008), é comum para concretos leves com resistência entre 20 e 34 MPa. Neville (1997) ressalta que para uma mesma resistência de concreto, o teor de cimento em concretos com agregados leves é maior do que em concretos convencionais, podendo chegar a 50% de aumento em situações de altas resistências. A Figura 18 do item 2.5.1 do presente trabalho mostra a relação entre resistência e consumo de cimento para concretos com agregados leves.

Os concretos celulares 1 e 2 considerados tratam-se de concretos que utilizam uma matriz de alto desempenho em sua dosagem, o que eleva o consumo de cimento e, conseqüentemente o preço final, além do custo dos materiais necessários à incorporação de ar. Entretanto, deve-se considerar que, de acordo com Cortelassi (2008) o concreto celular devido as suas características no estado fresco, não necessita de adensamento, isso se mostra como uma vantagem técnica frente aos demais concretos, uma vez que elimina uma etapa da execução. A eliminação dessa etapa conduz a um ganho de tempo no processo e conseqüentemente pode levar uma redução nos custos finais. Já o concreto celular 3, não tem como concreto base uma mistura de alto desempenho, diante disso seu custo final foi reduzido em relação ao concreto convencional. Quando se compara o concreto celular 3 com o concreto convencional de resistência 8MPa, observa-se que o concreto celular 3 é 12,67% mais caro.

No caso do concreto leve com argila expandida, a principal diferença está no preço do agregado utilizado. O custo do processo industrial de fabricação da argila expandida pode ser o responsável pelo preço final do agregado ser bem mais alto quando se compara com a brita comumente utilizada.

As Tabelas seguintes apresentam os custos das peças estudadas.

Tabela 62: Custo das lajes com vão L=2,00m

| Laje concreto convencional vão l=2m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,32 | R\$ 409,25 | R\$ 130,98 |
| Aço | kg | 8,01 | R\$ 4,97 | R\$ 39,81 |
| Valor total | | | | R\$ 170,77 |
| Laje concreto celular 1 vão l=2m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,32 | R\$ 454,69 | R\$ 145,50 |
| Aço | kg | 7,18 | R\$ 4,97 | R\$ 35,68 |
| Valor total | | | | R\$ 181,20 |
| Laje concreto celular 2 vão l=2m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,32 | R\$ 432,71 | R\$ 138,47 |
| Aço | kg | 6,16 | R\$ 4,97 | R\$ 30,62 |
| TOTAL | | | | R\$ 169,10 |
| Laje concreto leve com argila expandida vão l=2m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,32 | R\$ 490,86 | R\$ 157,08 |
| Aço | kg | 7,18 | R\$ 4,97 | R\$ 35,68 |
| Valor total | | | | R\$ 192,76 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 63: Custo das lajes com vão L=3,00m

| Laje concreto convencional vão l=3m | | | | |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,81 | R\$ 409,25 | R\$ 331,49 |
| Aço | kg | 21,48 | R\$ 4,97 | R\$ 106,76 |
| Valor total | | | | R\$438,25 |
| Laje concreto celular 1 vão l=3m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,81 | R\$ 454,69 | R\$ 368,29 |
| Aço | kg | 20,72 | R\$ 4,97 | R\$ 102,98 |
| Valor total | | | | R\$ 471,27 |
| Laje concreto celular 2 vão l=3m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 1,17 | R\$ 432,71 | R\$ 506,27 |
| Aço | kg | 14,63 | R\$ 4,97 | R\$ 72,71 |
| Valor total | | | | R\$ 578,98 |

Tabela 63: Custo das lajes com vão L=3,00m (continuação)

| Laje concreto leve com argila expandida vão l=3m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,81 | R\$ 490,86 | R\$ 397,60 |
| Aço | kg | 20,72 | R\$ 4,97 | R\$ 102,98 |
| Valor total | | | | R\$ 500,58 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 64: Custo das lajes com vão L=4,00m

| Laje concreto convencional vão l=4m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 1,92 | R\$ 409,25 | R\$ 785,76 |
| Aço | kg | 53,68 | R\$ 4,97 | R\$ 266,79 |
| Valor total | | | | R\$ 1.052,55 |
| Laje concreto celular 1 vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 2,08 | R\$ 454,69 | R\$ 956,15 |
| Aço | kg | 42,28 | R\$ 4,97 | R\$ 210,13 |
| Valor total | | | | R\$ 1.166,28 |
| Laje concreto celular 2 vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 2,88 | R\$ 432,71 | R\$ 1.246,20 |
| Aço | kg | 34,44 | R\$ 4,97 | R\$ 171,17 |
| Valor total | | | | R\$ 1.417,37 |
| Laje concreto leve com argila expandida vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 1,92 | R\$ 490,86 | R\$ 942,45 |
| Aço | kg | 42,28 | R\$ 4,97 | R\$ 210,13 |
| Valor total | | | | R\$ 1.152,58 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 65: Custo das vigas com vão L=2,00m

| Viga concreto convencional vão l=2m | | | | |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,1 | R\$ 409,25 | R\$ 40,93 |
| Aço | kg | 4,11 | R\$ 4,97 | R\$ 20,43 |
| Valor total | | | | R\$ 61,35 |

Tabela 65: Custo das vigas com vão L=2,00m (continuação)

| Viga concreto celular 1 vão l=2m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,1 | R\$ 454,69 | R\$ 45,47 |
| Aço | kg | 4,11 | R\$ 4,97 | R\$ 20,43 |
| Valor total | | | | R\$ 65,90 |
| Viga concreto celular 2 vão l=2m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,1 | R\$ 432,71 | R\$ 43,27 |
| Aço | kg | 4,11 | R\$ 4,97 | R\$ 20,43 |
| Valor total | | | | R\$ 63,70 |
| Viga concreto leve com argila expandida vão l=2m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,1 | R\$ 490,86 | R\$ 49,09 |
| Aço | kg | 4,11 | R\$ 4,97 | R\$ 20,43 |
| Valor total | | | | R\$ 69,51 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 66: Custo das vigas com vão L=4,00m

| Viga concreto convencional vão l=4m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,28 | R\$ 409,25 | R\$ 114,59 |
| Aço | kg | 10,47 | R\$ 4,97 | R\$ 52,04 |
| Valor total | | | | R\$ 166,63 |
| Viga concreto celular 1 vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,28 | R\$ 454,69 | R\$ 127,31 |
| Aço | kg | 10,47 | R\$ 4,97 | R\$ 52,04 |
| Valor total | | | | R\$ 179,35 |
| Viga concreto celular 2 vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,36 | R\$ 432,71 | R\$ 155,77 |
| Aço | kg | 8,77 | R\$ 4,97 | R\$ 43,59 |
| Valor total | | | | R\$ 199,36 |
| Viga concreto leve com argila expandida vão l=4m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,28 | R\$ 490,86 | R\$ 137,44 |
| Aço | kg | 10,47 | R\$ 4,97 | R\$ 52,04 |
| Valor total | | | | R\$ 189,48 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 67: Custo das vigas com vão L=6,00m

| Viga concreto convencional vão l=6m | | | | |
|---|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,9 | R\$ 409,25 | R\$ 368,33 |
| Aço | kg | 43,44 | R\$ 4,97 | R\$ 215,90 |
| Valor total | | | | R\$ 584,22 |
| Viga concreto celular 1 vão l=6m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,9 | R\$ 454,69 | R\$ 409,22 |
| Aço | kg | 43,44 | R\$ 4,97 | R\$ 215,90 |
| Valor total | | | | R\$ 625,12 |
| Viga concreto celular 2 vão l=6m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 1,08 | R\$ 432,71 | R\$ 467,33 |
| Aço | kg | 35,54 | R\$ 4,97 | R\$ 176,63 |
| Valor total | | | | R\$ 643,96 |
| Viga concreto leve com argila expandida vão l=6m | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,9 | R\$ 490,86 | R\$ 441,77 |
| Aço | kg | 43,44 | R\$ 4,97 | R\$ 215,90 |
| Valor total | | | | R\$ 657,67 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 68: Custo das paredes

| Parede concreto convencional 1 | | | | |
|---------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,7 | R\$ 343,98 | R\$ 240,78 |
| Tela Q61 | m ² | 1,098 | R\$ 8,36 | R\$ 9,18 |
| Valor total | | | | R\$ 249,96 |
| Parede concreto celular 2 | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,7 | R\$ 432,71 | R\$302,90 |
| Tela Q61 | m ² | 1,098 | R\$ 8,36 | R\$ 9,18 |
| Valor total | | | | R\$ 312,08 |

Tabela 68: Custo das paredes (continuação)

| Parede concreto celular 3 | | | | |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,7 | R\$ 387,57 | R\$ 271,30 |
| Tela Q61 | m ² | 1,098 | R\$ 8,36 | R\$ 9,18 |
| Valor total | | | | R\$ 280,48 |
| Parede concreto leve com argila expandida 1 | | | | |
| Item | uni | Quantidade | Valor unitário | Valor parcial |
| Concreto | m ³ | 0,7 | R\$ 426,48 | R\$ 298,54 |
| Tela Q61 | m ² | 1,098 | R\$ 8,36 | R\$ 9,18 |
| Valor total | | | | R\$ 307,72 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

O valor do aço constante nas Tabelas acima foi cotado com fornecedores em março de 2015. Esse valor se refere a uma composição onde foi considerado o valor da mão de obra (convenção coletiva de maio de 2014) mais uma média dos diversos diâmetros das barras de CA 50. O valor da tela refere-se à tela mais mão de obra e foi cotado em março de 2015. Como se trata de um breve comparativo de custo foi considerado apenas os custos referentes ao concreto e ao aço, não levando em consideração custos com fôrmas, desmoldantes, dentre outros valores inerentes ao processo.

Pelos valores, observa-se que as vigas e lajes feitas com o concreto celular e com concreto leve de argila expandida são mais caras quando comparadas às de concreto convencional. Esses custos mais elevados são devido ao custo mais alto do concreto leve, que leva em sua composição insumos de valores mais elevados. Porém, considerando-se que o uso do concreto leve na estrutura pode conduzir a fundações menos robustas, talvez esse valor mais elevado seja compensado na provável economia nos custos com fundações mais leves. Faz-se necessário um estudo de custos aprofundado para constatar esse fato.

Deve-se levar em consideração também, que em todas as peças, a área de aço foi sempre maior nas peças feitas de concreto convencional, em grandes estruturas como pontes, talvez o preço mais elevado do concreto leve seja compensado na economia com aço. Metha e Monteiro (2006) citam que em 1936 a utilização de concreto leve na construção do tabuleiro da ponte São Francisco- Oakland Bay resultou numa economia de \$3 milhões de dólares em aço.

No caso de aplicação de concreto leve no sistema construtivo de paredes moldadas no local, quando se compara a parede executada com o concreto celular 3 e a parede de concreto

convencional 1, há uma diferença de custo da ordem de 12%. É importante ressaltar que norma NBR 16055:2012 não permite o uso de concreto com resistência de 8MPa nesse tipo sistema construtivo.

6 Resultados e discussão

6.1.1 Lajes

A Tabela 69 apresenta um resumo do dimensionamento e do custo das lajes estudadas.

Tabela 69: Resumo do dimensionamento e custo das lajes

| Laje com vão l=2,00m | | | | | | |
|---|---------------|--|---------------------------------|--|--|--------------------|
| Concreto | h (cm) | Peso Próprio (kN/m²) | M_{máx} (kN.m/m) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 8 | 1,92 | 2,21 | 1,48 | 0,90 | 170,77 |
| Concreto celular 1 | 8 | 1,59 | 2,00 | 1,35 | 0,90 | 181,20 |
| Concreto celular 2 | 8 | 1,37 | 1,95 | 1,35 | 0,90 | 169,10 |
| Concreto leve com argila expandida | 8 | 1,40 | 1,95 | 1,31 | 0,90 | 192,76 |
| Laje com vão l=3,00m | | | | | | |
| Concreto | h (cm) | Peso Próprio (kN/m²) | M_{máx} (kN.m/m) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 9 | 2,16 | 5,24 | 2,54 | 0,90 | 438,25 |
| Concreto celular 1 | 9 | 1,68 | 4,71 | 2,29 | 0,90 | 471,27 |
| Concreto celular 2 | 13 | 2,24 | 5,32 | 1,81 | 0,90 | 578,98 |
| Concreto leve com argila expandida | 9 | 1,57 | 4,57 | 2,22 | 0,90 | 500,58 |
| Laje com vão l=4,00m | | | | | | |
| Concreto | h (cm) | Peso Próprio (kN/m²) | M_{máx} (kN.m/m) | A_{sx} (cm²/m) | A_{sy} (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 12 | 2,64 | 10,78 | 4,12 | 0,90 | 1.052,55 |
| Concreto celular 1 | 13 | 2,44 | 9,87 | 3,30 | 0,90 | 1.166,28 |
| Concreto celular 2 | 18 | 3,09 | 11,19 | 2,52 | 0,90 | 1.417,37 |
| Concreto leve com argila expandida | 12 | 2,08 | 9,17 | 3,50 | 0,90 | 1.152,58 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos valores apresentados na Tabela 69 observa-se que para o vão $l=2,00\text{m}$, todas as lajes atenderam os requisitos de norma com uma altura de 8 cm. Diante disso, pode-se afirmar que é possível se obter lajes até 37,7% mais leves com a mesma seção de concreto. Há também uma redução da ordem de 12% no momento máximo atuante que conduz a uma redução de armadura da ordem de 12%.

Para o vão de 3,00m as lajes de concreto convencional, concreto celular 1 e concreto leve com argila expandida atenderam os requisitos de dimensionamento com uma altura $h=9\text{cm}$. Os concretos com pesos específicos menores em relação ao concreto convencional levaram a uma redução de 10% a 12% do momento fletor e conseqüentemente houve uma redução da área de aço. Para a laje considerada de concreto celular 2, foi necessário um aumento de 44,4% na altura em relação às demais.

Na situação aonde o vão era 4,00m, a altura da laje de concreto celular 2 foi 63,6% maior em relação ao concreto convencional. Essa diferença de altura pode ser atribuída à baixa resistência a tração direta do concreto celular que conduziu a um momento de fissuração menor em relação aos demais e conseqüentemente diminuiu significativamente a inércia equivalente de Branson. Apesar dessa grande diferença de altura, que reflete no custo final da peça, o uso desse concreto ainda pode ser vantajoso em situações onde o peso próprio da estrutura é um fator limitante.

Analisando os concretos estudados, percebe-se que o concreto que conferiu menor peso próprio às lajes foi sempre o concreto leve com argila expandida.

6.1.2 Vigas

A Tabela 70 apresenta um resumo do dimensionamento e custo das vigas estudadas.

Tabela 70: Resumo do dimensionamento e custo das vigas

| Viga com vão l=2,00m | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|--|------------------------|
| Concreto | h (cm) | b (cm) | Peso Próprio (kN) | M_{máx} (kN.m) | A_s (cm²) | a_{sw}/n (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 25 | 20 | 2,40 | 5,60 | 0,98 | 1,02 | 61,35 |
| Concreto celular 1 | 25 | 20 | 1,87 | 5,47 | 0,97 | 1,03 | 65,90 |
| Concreto celular 2 | 25 | 20 | 1,72 | 5,43 | 0,93 | 0,71 | 63,70 |
| Concreto leve com argila expandida | 25 | 20 | 1,74 | 5,44 | 0,96 | 0,95 | 69,51 |
| Viga com vão l=4,00m | | | | | | | |
| Concreto | h (cm) | b (cm) | Peso Próprio (kN) | M_{máx} (kN.m) | A_s (cm²) | a_{sw}/n (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 35 | 20 | 6,72 | 23,36 | 2,78 | 1,02 | 166,63 |
| Concreto celular 1 | 35 | 20 | 5,24 | 22,62 | 2,72 | 1,03 | 179,35 |
| Concreto celular 2 | 45 | 20 | 6,19 | 23,10 | 1,99 | 0,71 | 199,36 |
| Concreto leve com argila expandida | 35 | 20 | 4,87 | 22,44 | 2,69 | 0,95 | 189,48 |
| Viga com vão l=6,00m | | | | | | | |
| Concreto | h (cm) | b (cm) | Peso Próprio (kN) | M_{máx} (kN.m) | A_s (cm²) | a_{sw}/n (cm²/m) | Custo (R\$) |
| Concreto convencional | 50 | 30 | 21,60 | 61,20 | 4,72 | 1,54 | 584,22 |
| Concreto celular 1 | 50 | 30 | 16,86 | 57,65 | 4,46 | 1,55 | 625,12 |
| Concreto celular 2 | 60 | 30 | 18,57 | 58,93 | 3,60 | 1,07 | 643,96 |
| Concreto leve com argila expandida | 50 | 30 | 15,66 | 56,75 | 4,39 | 1,42 | 657,67 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos dados da Tabela 70, observa-se que para as vigas com vão de 2,00m é possível trabalhar com peças até 39,5% mais leves com a mesma seção de concreto.

Para o vão de 4,00m, foi necessário um aumento de 28,5% na altura da viga feita com concreto celular 2 em relação às demais. Entretanto, apesar desse aumento na altura, essa viga ainda ficou 8,38% mais leve quando comparada ao concreto convencional. As demais vigas atenderam os requisitos previstos em normas com uma mesma seção de concreto, porém com

uma redução média do peso próprio em relação ao concreto convencional da ordem de 33,3%. Essa redução pode ser muito vantajosa quando se trata de peças pré-moldadas, pois pode conduzir a uma redução nos gastos com transporte e montagem.

Para o vão de 6,00 metros, a viga com maior seção de concreto foi a viga de concreto celular 2. E novamente, embora ela tenha ficado com uma seção maior, ela ainda possui um peso próprio 16,5% menor em relação à de concreto convencional. As demais vigas atenderam os requisitos de dimensionamento com uma mesma seção de concreto e uma redução média de massa específica em relação ao concreto convencional da ordem de 32,8%.

Assim como nas lajes, o concreto que conferiu menor peso próprio às peças foi sempre o concreto leve com argila expandida. Diante disso, o concreto leve com argila expandida mostra-se como uma boa alternativa ao concreto convencional quando o peso próprio da estrutura for um fator limitante.

6.1.3 Paredes

A Tabela 71 apresenta um resumo das paredes estudadas.

Tabela 71: Resumo das paredes estudadas.

| Paredes | | | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Concreto | h (m) | t (m) | Peso próprio (kN/m) | n_{dresit} (kN/m) | Custo (R\$) |
| Convencional 1 | 2,80 | 0,1 | 6,72 | 64,50 | 249,96 |
| Celular 2 | 2,80 | 0,1 | 4,81 | 131,42 | 312,08 |
| Celular 3 | 2,80 | 0,1 | 4,76 | 50,37 | 280,48 |
| Leve com argila expandida 1 | 2,80 | 0,1 | 4,48 | 135,59 | 307,72 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

No dimensionamento das paredes, como se trata de pequenas edificações, foi verificada somente a resistência da parede para os diversos concretos estudados. Pelos valores da Tabela 70 percebe-se que é possível utilizar concretos até 41% mais leves do que o convencional e ainda assim atingir uma resistência bem menor do que a resistência limite recomendada em norma. Quando se trata de pequenas edificações, essa diferença no peso próprio pode não ser tão relevante, mas se tratando de edifícios de vários pavimentos, essa diminuição poderá fazer uma diferença significativa nas fundações. No caso de pequenas

edificações, o uso do concreto leve celular pode se justificar devido às suas boas propriedades térmicas, eliminação da etapa de adensamento durante a execução e boas características acústicas.

Do ponto de vista financeiro, quando se leva em conta apenas o concreto e a tela de aço, verifica-se que a parede de concreto celular 3 é apenas 12% mais cara em relação a de concreto convencional.

6.1.4 Índices

As Tabelas a seguir apresentam alguns índices quantitativos que foram calculados para as peças estudadas.

Tabela 72: Índices quantitativos para as lajes estudadas.

| Laje com vão l=2,00m | | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Concreto | Relação Custo/ m² | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 42,69 | 1,68 | 174,50 |
| Concreto celular 1 | 45,30 | 1,31 | 227,35 |
| Concreto celular 2 | 42,27 | 1,55 | 216,35 |
| Concreto leve com argila expandida | 48,19 | 1,22 | 212,50 |
| Laje com vão l=3,00m | | | |
| Concreto | Relação Custo/ m² | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 48,69 | 2,16 | 116,33 |
| Concreto celular 1 | 52,36 | 1,68 | 151,56 |
| Concreto celular 2 | 64,33 | 2,23 | 144,24 |
| Concreto leve com argila expandida | 55,62 | 1,57 | 141,67 |

Tabela 72: Índices quantitativos para as lajes estudadas (continuação).

| Laje com vão l=4,00m | | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Concreto | Relação Custo/ m² | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 61,69 | 2,64 | 87,25 |
| Concreto celular 1 | 72,89 | 2,44 | 113,67 |
| Concreto celular 2 | 88,58 | 3,09 | 108,17 |
| Concreto leve com argila expandida | 72,04 | 2,09 | 106,25 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Tabela 73: Índices quantitativos para as vigas estudadas.

| Viga com vão l=2,00m | | | |
|---|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Concreto | Relação Custo/ m | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 30,67 | 1,20 | 174,5 |
| Concreto celular 1 | 32,95 | 0,94 | 227,35 |
| Concreto celular 2 | 31,85 | 0,86 | 216,35 |
| Concreto leve com argila expandida | 34,75 | 0,87 | 212,5 |
| Viga com vão l=4,00m | | | |
| Concreto | Relação Custo/ m | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 41,66 | 1,68 | 87,25 |
| Concreto celular 1 | 44,83 | 1,31 | 113,67 |
| Concreto celular 2 | 49,84 | 1,55 | 108,17 |
| Concreto leve com argila expandida | 47,37 | 1,22 | 106,25 |
| Viga com vão l=6,00m | | | |
| Concreto | Relação Custo/ m | Relação Peso próprio/ Vão | Relação Consumo cimento/ Vão |
| Concreto convencional | 97,37 | 3,60 | 58,17 |
| Concreto celular 1 | 104,18 | 2,81 | 75,78 |
| Concreto celular 2 | 107,32 | 3,09 | 72,12 |
| Concreto leve com argila expandida | 109,61 | 2,61 | 70,83 |

Fonte: (Elaborada pela autora).

Pelos índices acima, nota-se que do ponto de vista financeiro os concretos leves estão em desvantagem quando comparados ao concreto convencional. Por se tratar de concretos especiais, que levam em suas misturas insumos alternativos aos comumente utilizados, seu custo unitário será mais alto do que o convencional. Entretanto, é necessário um estudo aprofundado de custos, pois o uso desses concretos pode prover economias em outros pontos da obra. Em relação ao peso próprio, observa-se grande vantagem dos concretos leves em relação ao convencional. Essa vantagem técnica pode conduzir a fundações menos robustas, diminuir o consumo de aço, em casos de elementos pré-moldados, reduzir o número de viagens no transporte e custo com locação de equipamentos de grande porte para montagem.

Do ponto de vista ambiental, percebe-se pelos índices acima um maior consumo de cimento nos concretos celular 1 e leve com argila expandida, o que os torna menos sustentáveis em relação ao convencional. Entretanto, deve-se considerar que os concretos leves escolhidos para esse trabalho apresentam um alto consumo de cimento, mas há relatos na literatura que determinados concretos leves têm um consumo de cimento menor quando comparados ao convencional, diante disso, se faz necessário um estudo aprofundado sobre o consumo de cimento em concretos leves com resistência até 30 MPa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão da literatura realizada na presente pesquisa, foi possível levantar propriedades físicas e mecânicas de concretos leves de um modo geral. Tais propriedades conferem vantagens frente ao concreto convencional em determinadas situações. A principal vantagem está na redução do peso próprio das estruturas, porém, observa-se pela revisão bibliográfica que o concreto celular e o concreto leve com argila expandida apresentam um desempenho superior ao concreto convencional quando se trata de conforto térmico, característica importante em um país de clima quente como o Brasil.

Quanto aos critérios de dimensionamento levantados, percebe-se que em locais onde existem normas específicas para o concreto com agregados leves, essas normas quase sempre recomendam que sejam aplicados os mesmos critérios utilizados para o concreto convencional substituindo apenas o módulo de deformação. As normas e pesquisas estudadas sobre concreto leve com argila expandida mostraram que se pode considerar o diagrama tensão deformação do concreto convencional comum para o concreto com agregados leves de argila expandida. Desse modo, conclui-se que o dimensionamento à flexão de elementos feitos com esse material pode seguir critérios semelhantes aos do concreto convencional.

Quanto ao concreto celular, observou-se uma carência tanto de normas quanto de pesquisas, no que tange a critérios de dimensionamento de peças executadas com esse material. Embora haja várias pesquisas concluídas e em andamento sobre concretos leves em geral, ainda são poucos os estudos especificamente de dimensionamento de peças em concreto celular. A pesquisa bibliográfica mostrou que o diagrama tensão deformação desse material é quase linear até a ruptura e esta é a principal diferença no dimensionamento quando se compara ao concreto convencional.

Pelos resultados apresentados nos cálculos das vigas e lajes, o concreto leve com argila expandida, em todos os casos, foi o que conferiu menor peso próprio às peças estudadas. Diante disso, conclui-se que ele se apresenta como uma boa alternativa ao concreto convencional em situações onde o peso próprio da estrutura deve ser reduzido. As peças consideradas em concreto celular foram as que tiveram maior seção de concreto ao final dos dimensionamentos, mesmo assim, ainda tiveram seu próprio reduzido em relação ao concreto convencional. Essas diferenças nas dimensões das peças podem ser atribuídas à baixa

resistência a tração direta do concreto celular, que conduziu a momentos de fissuração bem menores do que os demais concretos e afetou diretamente a verificação dos deslocamentos.

Nas paredes, o concreto leve com argila expandida 1 foi o que conferiu menor peso próprio às peças, e o concreto celular 3 menor custo dentre os concretos leves.

Do ponto de vista técnico, conclui-se que os concretos estudados se mostraram adequados ao uso estrutural, uma vez que atenderam as prescrições normativas sem grandes diferenças quando comparados ao concreto convencional. Levando em consideração que uma das principais desvantagens do concreto convencional é o seu elevado peso próprio, a possibilidade de se trabalhar com estruturas mais leves e com desempenho similar torna-se interessante.

Quanto aos custos dos concretos empregados nas vigas e lajes, quando considerados isoladamente, os concretos celulares e leve com argila expandida são mais caros do que o convencional. Entretanto, talvez as vantagens advindas do uso do concreto leve, como redução nas cargas de fundação, diminuição nas armaduras, possam conduzir a um valor final de estrutura e fundação igual ou menor quando comparado ao concreto convencional. Levando em consideração elementos pré-moldados, a redução no peso próprio das peças em consequência do uso de concretos leves pode ser vantajosa do ponto de vista econômico, uma vez que peças mais leves reduzirão o número de viagens no transporte e poderão dispensar o uso de equipamentos de maior porte para montagem.

Na aplicação do concreto leve no sistema construtivo de paredes moldadas no local, o concreto de menor resistência apresentou um custo equiparável ao concreto convencional além disso, pode-se obter economia financeira com a repetição do uso de formas metálicas, velocidade de execução, facilidade de produção do sistema.

Do ponto de vista ambiental, embora esse não fosse um objetivo da pesquisa, foi possível concluir que a utilização dos diversos tipos de concreto leve pode ser uma alternativa mais sustentável na construção civil, uma vez que tais concretos levam em sua mistura agregados alternativos aos comumente empregados. A utilização de recursos naturais para a produção de agregados convencionais causa grandes impactos no meio ambiente, a possibilidade de se empregar outros tipos de agregados, como argila expandida, resíduos de EPS, cinzas volantes, pode ser uma solução mais sustentável. Além disso, embora os concretos leves escolhidos nesse trabalho tenham apresentado um consumo de cimento maior do que o concreto convencional, de um modo geral os concretos leves apresentam um consumo de cimento reduzido o que os torna mais sustentáveis.

8 REFERÊNCIAS

ALDANA, C.; ARCE, P.; MENDOZA, K.; POLANCO, W.. **El hormigón celular**. Trabalho de pesquisa – Escuela de Construcción, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Vina Del Mar, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-08** – Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, 2008

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213 R-03** Guide for structural lightweight-aggregate concrete. Farmington Hills, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C330/ C330M - 14** Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete. West Conshohocken, 2014.

APIEDEPISTA. **Estádio St. James Park**. 2012. Disponível em: <<http://www.apiedepista.es/los-mejores-partidos-internacionales-25/>>. Acesso em: maio 2014.

ARRESHVHINA, N.; FADHADLI Z.; WARID H. M.; ZUHAIRY, A. H.; ROSWADI. Microstructural behavior of aerated concrete containing high volume of GGBFS . In: PACIFIC STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION CONFERENCE APSEC 2006, Kuala Lumpur, Malaysia. **Proceedings** of the 6th Asia. Kuala Lumpur, Malaysia, 2006.

ASHLEY, E. **Fire resistance of concrete structures**. Part 1: Walls – First of a two-part series on the technical aspects of fire resistance and concrete structural components, 2007. Disponível em: <http://www.nrmca.org/research/fireresistance_cif_winter_07.pdf>. Acesso em: maio 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 6118** – Projetos de estruturas de concreto– Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 16055** – Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações– Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT/ CEE) **Projeto 185:000.01-001-1**– Parede e laje de concreto celular estrutural moldadas no local para construção de edificações - Parte1: Projetos. Março, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT/ CB18) **2º Projeto 18:307.02-002/1**– Concreto leve — Preparo, controle e recebimento para execução de elementos de construção, tipo lajes e paredes Parte 1: Requisitos. Out, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NM 35** – Agregados leves para concreto estrutural - Especificação. Rio de Janeiro, 1995.

BABU, D. S. **Mechanical an deformational properties, and shrinkage cracking behavior of lightweight concretes**. 2008. 289 f. Tese – Departament of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore, 2008.

CARRASQUILIO, R. L.; NILSON, A. H. **Properties of high strength concrete subject to short-term loads**. In: ACI Journal Proceedings. ACI, 1981.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6.118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 416p.

CASTRO, N. **Resistência ao esforço cortante no concreto leve**. 1975. 110 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação da Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/71-1971/268-newton-de-castro#download>>. Acesso em nov. 2013.

CATOIA, T. **Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS**: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. 2012.154f. Tese Doutorado (Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CHIOCCA, A. **Consumo de cimento**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <parsekian.ufscar@gmail.com> em 16 março 2015.

CINEXPAN. **Cinexpan**. 2015. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/concreto-leve-estrutural.html>>. Acesso em março 2015.

CLICKESCOLAR. **Coliseu**. 2014. Disponível em: <<http://www.clickescolar.com.br/o-coliseu.htm>>. Acesso em: maio 2014.

CLIMACO, J. C. T. S. **Resistência ao esforço cortante em vigas curtas de concreto leve, sem armadura transversal** 1975. 84 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação da Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/master-dissertations/271-1975/2399-joao-carlos-teatini-de-souza-climaco>>. Acesso em nov. 2013.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON and FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE – CEB/FIP. **Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology**. The Construction Press. 1977. 169 p.

COMPANHIA ESTADUAL DE HABITAÇÃO E OBRAS PÚBLICAS (CEHOP). **Concreto simples**. Disponível em: <<http://187.17.2.135/orse/esp/ES00060.pdf>> Acesso em jun. 2015.

CORTELASSI, E. M. **Avaliação do comportamento de concretos celulares espumosos de alto desempenho**. 2005. 198 f. Dissertação – Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE (EuroLightCon). **Definitions and international consensus report**. Netherlands, 1998. 69 p.

EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures**. European Prestandard, Brussels. Belgium, 1999. 25p.

EUROPEAN STANDARD EN 206-1 – Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels, 2000. 72p.

FERREIRA, O. A. R. Concretos Celulares Espumosos. **Boletim Técnico**. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. 1987. Disponível em: <http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT10-%20Ferreira.PDF> Acesso em out. 2012.

FOUAD, H. Cellular Concrete. In: LAMOND, J. F.; PIELERT J. H. **Significance of tests and properties of concrete an concrete-making materials**. West Conshohocken, Pensilvânia: ASTM, 2006. p 561-569.

FARIAS, N. E. A. **Estudo comparativo envolvendo o dimensionamento de edifícios com recurso a betão leve ou betão de massa específica normal.** 2009. 122 f. Dissertação – Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

FREITAS, I. M. **Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso.** 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2004.

GETHAL. **Concreto Celular. Sistema Gethal para execução de paredes moldadas *no local*.** Gethal: São Paulo. 2006. Disponível em < www.gruposaopaulo.com.br/files/gethal.pps> Acesso em out. 2012.

GIONGO, J. S. **Concreto armado:** ancoragem por aderência. São Carlos. EESC/SET, 2004.

GOMES NETO, D. P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura** – Estudo de Caso. 1998. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments.** US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 2000.

ITALIAN STANDARD. **UNI 7548.** Part 1. Lightweight concrete by expanded clay and shale – Definition and classification. 1992

LEONHARDT, F.; MONNING, E.. **Construções de concreto: casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado.** vol. 2. Ed. Rio de Janeiro, Interciencia, 1978. 174p.

LOPEZ, M. **Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete:** a multi- scale investigation. 2005. 565 f. Tese – Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2005.

LUCAS, J. A. C. **Revestimentos para parâmetros interiores de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado.** 1986. Tese (Especialista e investigador auxiliar) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1986.

MALEŠEV, M. et al. The Effect of Aggregate, Type and Quantity of Cement on Modulus of Elasticity of Lightweight Aggregate Concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 2, p. 705-711, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3 ed. Berkeley: McGraw-Hill, 2006. 684 p.

NARAYANAN, N; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, Chennai, v. 22, p. 321-329, abr. 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946500000160>>. Acesso em jul. 2013.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NEWMAN, J.B.; OWENS, P. **Properties of lightweight concrete**. 2003.

NEWMAN, J. B. Properties of structural lightweight aggregate concrete. In: CLARCK, J. L. **Structural lightweight aggregate concrete**. Londres: Blackie Academic & Professional, 1993.p. 19-44.

OLIVEIRA, K. R. S. **Aderência da armadura ao concreto leve com adição de resíduos**. 2006. 198 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves** 2008. 82 f. Dissertação – Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: USP/ Departamento de Engenharia de Estruturas, 2004. 380 p. Apostila.

PORTAL DAS NAÇÕES. **Pavilhão de Portugal**. 2014. Disponível em: <<http://www.portaldasnacoes.pt/item/pavilhao-de-portugal/>>. Acesso em maio 2014.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G. C. (Org.). 2005 **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol. 2. P. 1331- 1362.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos** – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2003. 220 f. Tese – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural**: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1 ed. São Paulo: PINI, 2009. 144 p.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco**: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. 2008. 286 f. Dissertação – Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Ci. Inf.** v. 15, n. 1, p. 031 – 039, março 2010. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v15n1/a04v15n01.pdf>>. Acesso em: fev. 2015.

SILVA, B. M. M. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. 2007. 180 f. Dissertação – Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

SILVA, M. D. **Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais das estruturas de edifícios**. 2003. 165 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SOUDAIS, P. R. N. **Estudo da aderência entre o concreto celular e as barras de aço**. 2014. 315 f. Dissertação – Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2014.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto**. Porto Alegre: Globo, 1980. Vol. I.

TEIXEIRA FILHO, F. J. Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos. In: SIMPÓSIO IBERO AMERICANO SOBRE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS INDUSTRIALIZADAS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 3, 1992, São Paulo. **Anais...**São Paulo: 1992. p. 557-564.

TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. (1992). Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos. **Boletim técnico** da Escola Politécnica da USP.

Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. Disponível em <http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT81-%20Teixeira%20Filho.pdf> Acesso em out. 2012.

TEZUKA, Y. Concretos Especiais. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. 1989, Florianópolis. **Anais...**1989. p. 182-194.

WIKIPEDIA. **Torre de Picasso**. 2014. Disponível em: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Torre_Picasso>. Acesso em maio 2014.