



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS ESTRUTURAIS
DE EDIFÍCIOS COM PLANTAS BAIXAS FLEXÍVEIS**

LUCAS DE FREITAS ANDRADE

UBERLÂNDIA/MG, OUTUBRO DE 2019.

LUCAS DE FREITAS ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS ESTRUTURAIS
DE EDIFÍCIOS COM PLANTAS BAIXAS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), da Universidade Federal de Uberlândia como requisito exigido para a conclusão do curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jesiel Cunha

UBERLÂNDIA/MG, OUTUBRO DE 2019.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil
 Avenida João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: 34 3239-4138 - Bloco 1Y



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	GCI057 - Trabalho de Conclusão de Curso				
Data:	22/11/2019	Hora de início:	15h30min	Hora de encerramento:	17h00min
Matrícula do Discente:	11421ECV001				
Nome do Discente:	Lucas de Freitas Andrade				
Título do Trabalho:	Análise comparativa entre modelos estruturais de edifícios com plantas baixas flexíveis.				

Reuniu-se na Projeções da FECIV, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Civil, assim composta: Professores Doutores: Arquimedes Diógenes Ciloni - FECIV/UFU, Paulo Roberto Cabana Guterres - FECIV/UFU e Jesiel Cunha - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dr. Jesiel Cunha, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Jesiel Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/11/2019, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Arquimedes Diogenes Ciloni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/11/2019, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Cabana Guterres, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/11/2019, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1693025** e o código CRC **ECD4EA3F**.

Referência: Processo nº 23117.099014/2019-89

SEI nº 1693025

Criado por jeronima, versão 3 por jecunha em 19/11/2019 08:08:17.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus familiares, especialmente aos meus pais e aos meus avós, que sempre procuraram em me proporcionar as melhores oportunidades de estudo, crescimento e desenvolvimento, me apoiando e me incentivando nos caminhos em que escolhi trilhar.

Aos meus professores, que contribuíram para a base da minha formação profissional, compartilhando suas experiências e conhecimento.

Aos meus amigos, que sempre estão ao meu lado torcendo pelo meu sucesso pessoal e profissional.

“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível.”

- Charles Chaplin

RESUMO

Projetos arquitetônicos com plantas baixas flexíveis são tendências do mercado imobiliário brasileiro e estão cada vez mais presentes em empreendimentos das médias e grandes cidades do país. A possibilidade de permitir ao usuário diversas configurações da sua própria residência, como aumento da sala de estar, criação ou ampliação de dormitórios, opção por cozinha americana ou a junção de demais cômodos são estratégias atuais utilizadas pelas construtoras para realizar projetos inovadores e atender às necessidades do consumidor. Entretanto, projetos com conceito de plantas flexíveis sugerem a eliminação de vigas no interior de alguns cômodos, resultando em lajes contínuas com recortes, o que dificulta o dimensionamento dessas estruturas devido a picos de esforços gerados por causa da geometria irregular das lajes. Sendo assim, o presente trabalho mostra uma análise comparativa realizada em um edifício de sete pavimentos, dimensionado de três maneiras diferentes com o *software* Eberick, variando a geometria das lajes, para entender o comportamento dos esforços nessas estruturas e o consumo de concreto e de aço nas lajes e vigas dos três modelos processados. Os resultados mostram que o consumo de concreto nos três modelos pouco variou, por outro lado, o consumo de aço aumentou em aproximadamente 25% entre o modelo com lajes retangulares e o mais complexo, com lajes contínuas com recortes. O objetivo desse trabalho é mostrar que plantas flexíveis trazem inúmeras vantagens para o usuário, entretanto as lajes com geometrias irregulares possuem dimensionamento mais complexo, muitas vezes, resultando no aumento do custo da obra.

Palavras chaves: Lajes irregulares; arquitetura flexível; dimensionamento estrutural; concreto armado.

ABSTRACT

Architectural designs with flexible floor plans are trends in the Brazilian real estate market and are increasingly present in developments in medium and large cities in the country. The ability to allow the user various configurations of their own home, such as living room enlargement, creation or expansion of bedrooms, option for kitchen or joining other rooms are current strategies used by builders to carry out innovative designs and meet the needs consumer. However, designs with flexible floor plans suggest the elimination of beams inside some rooms, resulting in continuous slabs with cutouts, which makes it difficult to scale these structures due to stresses generated due to the irregular geometry of the slabs. Thus, the present work shows a comparative analysis performed in a seven-floor building, designed in three different ways with the Eberick software, varying the geometry of the slabs, to understand the behavior of the stresses in these structures and the consumption of concrete and steel in the slabs and beams of the three models processed. The results show that the concrete consumption in the three models varied little, on the other hand, the steel consumption increased by approximately 25% between the rectangular slab model and the more complex one, with continuous cutout slabs. The objective of this work is to show that flexible plants bring numerous advantages for the user, however the slabs with irregular geometries have more complex design, often resulting in increased cost of the work.

Keywords: Irregular slabs; flexible architecture; structural design; reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Maison Dom-Ino de Le Corbusier	19
Figura 2: Edifício de apartamentos de Mies van der Rohe	20
Figura 3: Planta baixa do Edifício de apartamentos de Mies van der Rohe.....	20
Figura 4: Casa 13 do Weissenhof Estate de Le Courbusier	21
Figura 5: Casa 15 do Weissenhof Estate de Le Corbusier	22
Figura 6: Edifício Esther	23
Figura 7: Planta baixa edifício Esther	24
Figura 8: Unité d'habitation de Le Corbusier	25
Figura 9: Plantas do edifício Unité d'habitation	26
Figura 10: Edifício <i>Lake Shore Drive</i>	27
Figura 11: Planta baixa edifício <i>Lake Shore Drive</i>	27
Figura 12: Provence Residence Club	29
Figura 13: Planta Baixa Provence Residence Club (opção A).....	30
Figura 14: Planta Baixa Provence Residence Club (opção B)	30
Figura 15: Planta Baixa Provence Residence Club (opção C)	31
Figura 16: <i>Sense Vertical Living</i>	32
Figura 17: Planta baixa <i>Sense Vertical Living</i> (opção A)	32
Figura 18: Planta baixa <i>Sense Vertical Living</i> (opção B).....	33
Figura 19: Planta baixa <i>Sense Vertical Living</i> (opção C).....	33
Figura 20: Planta baixa <i>Sense Vertical Living</i> (opção D)	34

Figura 21: Residencial ROC Batel	34
Figura 22: Planta Baixa padrão Residencial ROC Batel	35
Figura 23: Planta Baixa Residencial ROC Batel (opção A).....	35
Figura 24: Planta Baixa Residencial ROC Batel (opção B).....	36
Figura 25: Esforços solicitantes, tensões e armaduras segundo direção $X1$ e $X2$	38
Figura 26: Planta baixa pavimento tipo opção “1”	40
Figura 27: Planta baixa pavimento tipo opção “2”	41
Figura 28: Planta baixa pavimento tipo opção “3”	42
Figura 29: Planta baixa pavimento tipo opção “4”	43
Figura 30: Perspectiva 3D da estrutura	44
Figura 31: Planta de formas modelo “A”	45
Figura 32: Planta de formas modelo “B”	46
Figura 33: Planta de formas modelo “C”	46
Figura 34: Função “Otimizar detalhamento”	48
Figura 35: Função “Separa Plantas”.....	49
Figura 36: Opções de descrições das armaduras	50
Figura 37: Função “Descrição das armaduras”	50
Figura 38: Coeficientes adotados para a escolha das armaduras das lajes	51
Figura 39: Modelo Completo de dimensionamento	52
Figura 40: Espaçamento das faixas da grelha	53
Figura 41: Polígonos das regiões da laje	54

Figura 42: Armaduras negativas direção Y	54
Figura 43: Armaduras negativas direção X.....	55
Figura 44: Diagrama Wood&Armer negativo da laje L16	55
Figura 45: Grelha deformada do pavimento	56
Figura 46: Subdivisão do detalhamento das armaduras das lajes em faixas.....	57
Figura 47: Configurações de dimensionamento das faixas das regiões nas lajes	58
Figura 48: Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais	59
Figura 49: Classes de concreto utilizado.....	60
Figura 50: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “A”	62
Figura 51: Grelha de momentos fletores do modelo “A”.....	63
Figura 52: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “A”	63
Figura 53: Grelha de Momento Wood&Armer positivos do modelo “A”	64
Figura 54: Armações positivas pavimento tipo modelo “A”	65
Figura 55: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “A”	66
Figura 56: Armações negativas direção Y pavimento tipo modelo “A”	67
Figura 57: Momentos de cálculo e área de aço para a L18 modelo “A”	69
Figura 58: Regiões de armadura da laje L18 modelo “A”	69
Figura 59: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “B”	70
Figura 60: Grelha de momentos fletores do modelo “B”	71
Figura 61: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “B”	72
Figura 62: Grelha de Momento Wood&Armer positivos do modelo “B”	72

Figura 63: Armações positivas pavimento tipo modelo “B”	73
Figura 64: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “B”	74
Figura 65: Armações negativas direção Y pavimento tipo modelo “B”	75
Figura 66: Momentos de cálculo e área de aço para a L2 modelo “B”	77
Figura 67: Regiões de armadura da laje L2 modelo “B”	77
Figura 68: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “C”	78
Figura 69: Grelha de momentos fletores do modelo “C”	79
Figura 70: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “C”	80
Figura 71: Grelha de Momento Wood&Armer positivo do modelo “C”	80
Figura 72: Armações positivas pavimento tipo modelo “C”	81
Figura 73: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “C”	82
Figura 74: Armações negativas direção Y pavimento tipo modelo “C”	83
Figura 75: Momentos de cálculo e área de aço para a L2 modelo “C”	85
Figura 76: Regiões de armadura da laje L2 modelo “C”	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carregamento das lajes.....	60
Tabela 2: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “A”	68
Tabela 3: Consumo total de aço e concreto do modelo “A”	68
Tabela 4: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “B”	76
Tabela 5: Consumo total de aço e concreto do modelo “B”	76
Tabela 6: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “C”	84
Tabela 7: Consumo total de aço e concreto do modelo “C”	84
Tabela 8: Comparativo de consumo de aço entre os três modelos.....	86
Tabela 9: Comparativo de consumo de concreto entre os três modelos	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Arquitetura flexível.....	17
3.1.1	Contextualização histórica	18
3.1.2	Arquitetura flexível no mercado imobiliário brasileiro na década de 2010	28
3.2	Dimensionamento de lajes segundo o <i>software</i> Eberick	36
3.2.1	Método de Wood&Armer	37
3.2.2	Crítério de Parsekian	38
4	METODOLOGIA	39
4.1	Definição do projeto arquitetônico	39
4.2	Definição das plantas de forma do projeto estrutural	44
4.2.1	Modelo “A”	45
4.2.2	Modelo “B”	45
4.2.3	Modelo “C”	46
4.3	Configurações do software Eberick.....	47
4.3.1	Configurações de detalhamento	47
4.3.2	Configurações de dimensionamento	50
4.4	Materiais, cargas e características físicas dos elementos estruturais.....	59
4.4.1	Lajes	59

4.4.2	Vigas.....	61
4.4.3	Pilares.....	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	Resultados de dimensionamento do modelo “A”	62
5.2	Resultados de dimensionamento do modelo “B”	70
5.3	Resultados de dimensionamento do modelo “C”	78
5.4	Comparativo entre os dimensionamentos.....	86
6	ESTUDOS REFERENTES À ANÁLISE DOS ESFORÇOS EM LAJES COM GEOMETRIA COMPLEXA	88
7	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

A utilização de lajes de concreto com formatos irregulares, com vários recortes, são elementos cada vez mais presentes e desejados por profissionais da área da engenharia e da arquitetura em obras que buscam variar as suas formas e sair de uma concepção mais convencional de projetos. Isso ocorre, também, devido à tendência do mercado imobiliário, principalmente nas médias e grandes cidades, objetivando valorizar a exigência de novos projetos de arquitetura com plantas baixas flexíveis, permitindo assim que o usuário possa atribuir diferentes *layouts* aos ambientes.

Entretanto, dependendo do formato de laje projetado, o dimensionamento destas estruturas pode resultar em grande complexidade, dificultando a realização do projeto e aumentando o seu custo. Em geral, isso é causado devido ao pico de esforços que são gerados nessas lajes, normalmente localizados nas regiões de quina ou de maior irregularidade da estrutura. Sendo assim, o cálculo da armadura necessária nesses locais e a sua distribuição ficam dificultados, até mesmo para a análise com *softwares*, e, por isso, faz-se necessária uma análise mais atenciosa.

Dessa forma, com o auxílio dos *softwares* AutoCAD e Eberick, foi desenvolvido um projeto arquitetônico e um projeto estrutural, o qual foi dimensionado e processado de três formas diferentes. Para isso, foram criados três modelos de plantas de formas diferentes para a mesma planta baixa desenvolvida no projeto arquitetônico, sendo um deles com o mínimo de lajes com recortes, outro com a presença de duas lajes em L e o último composto por duas lajes de geometria mais elaborada, bastante irregular.

2 OBJETIVOS

Com o uso dos *softwares* Eberick V10 e Autocad, foi realizado um projeto arquitetônico de um edifício que posteriormente foi dimensionado de três maneiras diferentes, variando a geometria das lajes existentes, sendo um modelo com poucas lajes em recortes, outro acrescentado de duas lajes em L e um modelo mais complexo composto por duas lajes com vários recortes. Estas diferentes soluções estruturais para um mesmo edifício foram avaliadas comparando-se o consumo de concreto e de aço, dando uma indicação do custo de cada solução.

Dessa forma, esse trabalho pretende auxiliar engenheiros para que eles tenham algumas informações sobre qual a melhor solução sob o ponto de vista da concepção estrutural, entre lajes individualizadas com formatos retangulares ou lajes contínuas com maior extensão, que possuem formatos irregulares (lajes em L, lajes com recortes etc.). E quando for o caso de o projeto arquitetônico optar por lajes irregulares (por permitirem plantas baixas flexíveis), o presente estudo dará uma ideia sobre as implicações desta solução estrutural em termos de consumo de material/custo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Arquitetura flexível

O conceito de arquitetura flexível passa a ter sentido quando as necessidades do indivíduo passam a ser analisadas intrinsecamente com a sociedade na qual ele está inserido. A constante necessidade de mobilidade, flexibilidade e adaptabilidade do espaço de trabalho ou moradia são resultados marcantes no perfil de vida cotidiana do homem contemporâneo, principalmente nas médias e grandes cidades do mundo.

Com a perda dos conceitos da família tradicional e o surgimento de novos modos de viver, provenientes de diferentes contextos sociais e culturais de cada região, a arquitetura precisou se adaptar a essas mudanças. Desta maneira, a arquitetura flexível, ou arquitetura cinética, tem como objetivo promover a possibilidade de variar, adaptar, personalizar e transformar o espaço em função da necessidade do utilizador, visto que a sociedade vive em constante mutação.

Somado a isso, a dificuldade de se projetar uma edificação capaz de manter-se útil para as necessidades da sociedade ao longo do tempo, faz desse tipo de arquitetura um desafio. No mais, o modelo de projeto flexível pretende expandir o relacionamento entre morador e moradia, adaptando as diferentes fases da vida do homem, diminuindo a sua necessidade de mudar para um novo endereço, alterando assim a concepção de que “o homem deve adaptar-se ao espaço” para a que o “espaço deve adaptar-se ao homem”.

“[...] as exigências da vida moderna são tão complexas e mutantes, que todas as intenções de antecipá-las por parte do arquiteto conduzem a edifícios inadequados para sua função [...]” (COLQUHOUN, 1977 apud DIGIÁCOMO, 2004, p.12).

Como esse tipo de obra trabalha com a remoção e construção de novas paredes no interior das edificações, para a confecção ou integração de novos ambientes, não são todos os sistemas construtivos que possibilitam a execução desses projetos, o que pode ser um desafio para a engenharia civil. Dificilmente serão vistas obras feitas com estruturas de paredes de concreto, alvenaria estrutural ou concreto pré-moldado, sendo mais comum projetos em estruturas metálicas, *steel frame* ou concreto armado.

Na maioria dos projetos arquitetônicos compostos por plantas baixas flexíveis, é comum a utilização de lajes de grandes dimensões e a eliminação de vigas, visto que a presença de vigas no interior dos cômodos podem limitar as possibilidades de configuração dos ambientes pelo

usuário. Dessa forma, a ocorrência de lajes com formatos irregulares passa a ser mais um desafio para os projetos estruturais.

Por outro lado, mesmo sabendo da importância dos projetos de arquitetura e de engenharia adaptarem-se a essa necessidade das plantas flexíveis, essa concepção de projeto enfrenta dificuldades de ser colocada em prática, frente à padronização das construções, principalmente, no caso de edifícios de apartamentos, que, várias vezes, buscam, com a produção em massa, baratear o custo. Como ponto negativo, a construção em larga escala considera, de um modo geral, que todos os habitantes possuem as mesmas necessidades de moradia, o que não ocorre na realidade.

3.1.1 Contextualização histórica

Apesar da atualidade do tema da flexibilidade na arquitetura, esse conceito, mesmo que de maneira indireta e sem um planejamento prévio, sempre existiu decorrente da dinâmica das variações dos usos e costumes de uma determinada população. Esse dinamismo define e é definido, por um conjunto de fatores: culturais, econômicos, arquitetônicos, sociais, demográficos, psicológicos e políticos, que mudam durante o curso do tempo (LAWRENCE, 1990).

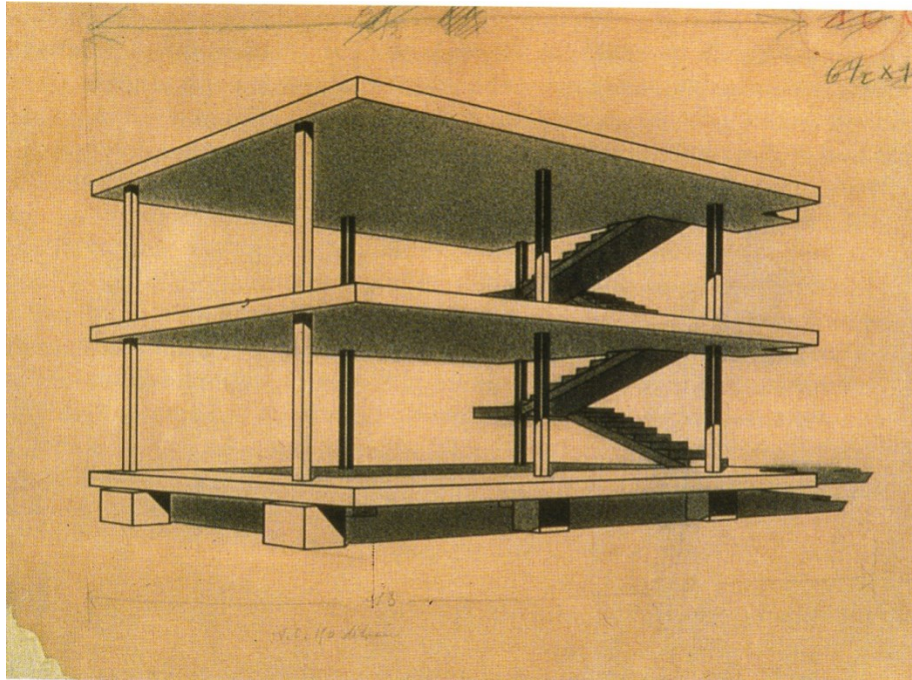
De acordo com Paiva (2002), a arquitetura tradicional japonesa é pioneira na flexibilização do espaço interno das residências, devido ao sistema construtivo empregado composto por pilares e vigas que possuem recortes que possibilitam encaixar portas e paredes corrediças. Além disso, o mobiliário quase que totalmente móvel empregado nas residências, também era utilizado para configurar e criar ambientes para as mais diversas atividades diárias.

Nas principais cidades americanas e europeias, os desenvolvimentos dos conceitos da flexibilidade na arquitetura começaram a ser notados anteriormente do que nas cidades brasileiras, junto com o período da Arquitetura Moderna marcante no século XX. As grandes inovações tecnológicas, decorrentes principalmente após a Revolução Industrial, foram fundamentais para evolução do conhecimento dos materiais, sobretudo do concreto e do aço, e das diferentes técnicas construtivas empregadas, no que se pode chamar de “Indústria da Construção Civil”; fato esse que favoreceu as inovações na arquitetura.

Na Europa, arquitetos famosos do Movimento Moderno da arquitetura, como Auguste Perret, Le Corbusier e Walter Gropius, foram profissionais que ficaram reconhecidos por implantar a flexibilidade nos projetos de habitações. Já em 1914, Le Corbusier apresentou um dos projetos

pioneiros desse conceito arquitetônico, a Maison Dom-Ino (Figura 1), direcionado para o sistema de construção em massa, composto por uma estrutura de plataformas sustentadas por pilares que permite que, internamente, as paredes sejam dispostas livremente de acordo com as necessidades e gosto do usuário. Esse projeto também possibilitava a flexibilização das fachadas.

Figura 1: Maison Dom-Ino de Le Corbusier



Fonte: Le Corbusier Fondation (2019)

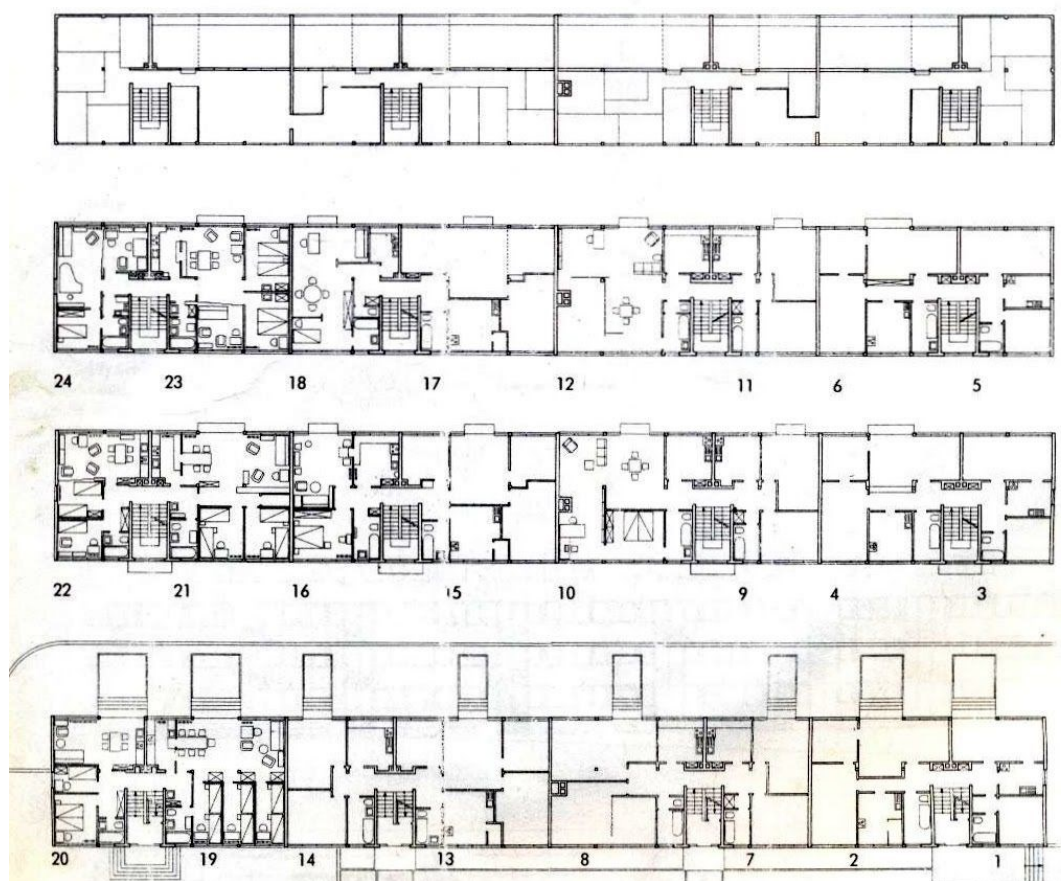
Em 1927, o arquiteto alemão naturalizado americano Ludwig Mies van der Rohe, coordenou a exposição de arquitetura da habitação Weissenhofsiedlung em Stuttgart, que reuniu arquitetos progressistas, que apresentaram propostas com ênfase para o conceito de flexibilidade das unidades habitacionais. Nessa exposição, todas as obras foram construídas no conjunto habitacional Weissenhof Estate, e foi destaque um dos primeiros projetos de habitação multifamiliar flexível, que foi o Edifício de Mies van der Rohe (Figura 2). Com o uso de divisórias móveis ele criou doze apartamentos, todos com arranjos diferentes, para cada uma das duas unidades básicas (JHONSON; PHILIP, 1947), totalizando 24 configurações diferentes no mesmo edifício, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 2: Edifício de apartamentos de Mies van der Rohe



Fonte: Casa Abierta (2019)

Figura 3: Planta baixa do Edifício de apartamentos de Mies van der Rohe



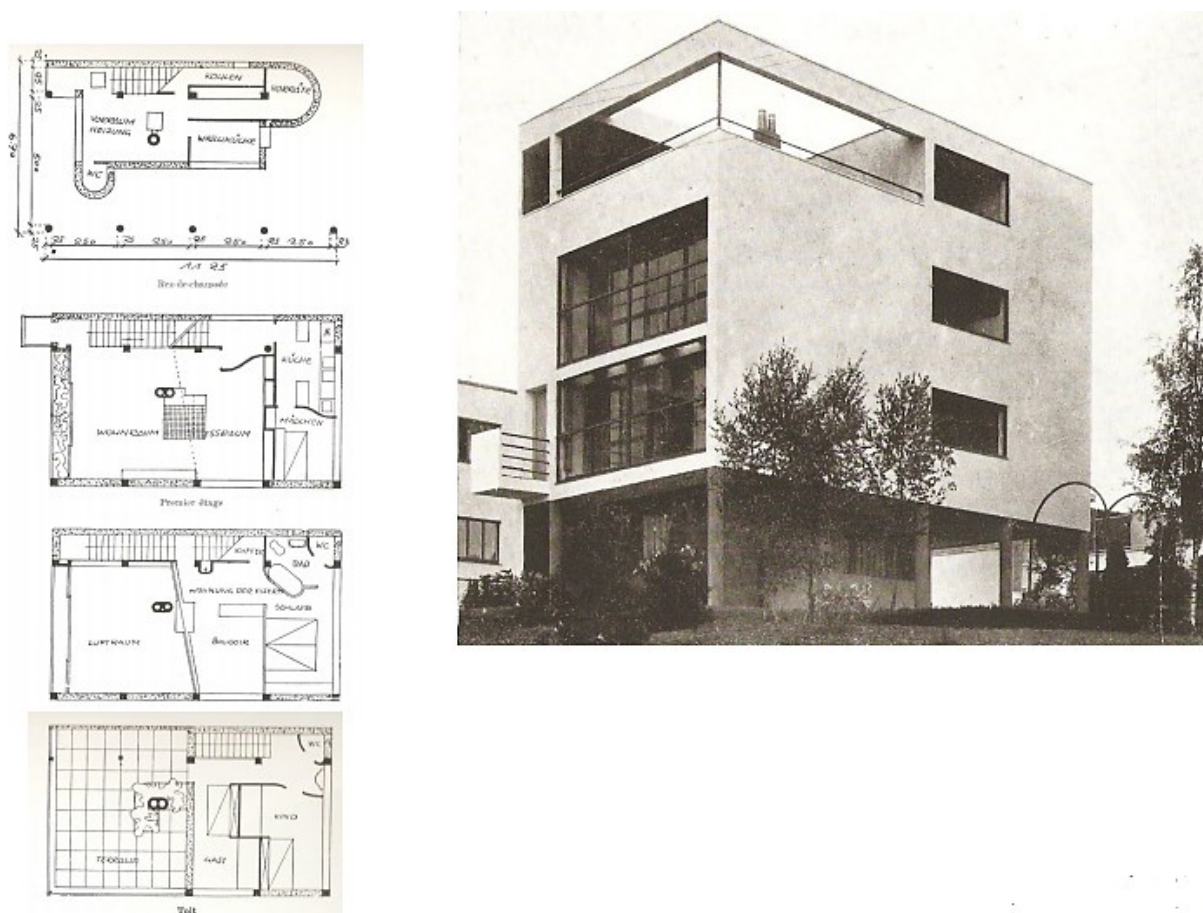
Fonte: Bau und Wohnung (1927)

Sobre o edifício, Mies e outros participantes da exposição de 1927, publicaram no livro da exposição Bau um Wohnungo seguinte (BAU UM WOHNUNGO, 1927):

“Atualmente são os motivos econômicos que exigem racionalizar e normalizar a construção de moradias de aluguel. Porém, por outro lado, a crescente diferenciação das nossas necessidades de habitabilidade exige maior liberdade na forma de uso. No futuro, será necessário fazer-se justiça a ambos os aspectos. A construção de um esqueleto é o sistema estrutural mais adequado para isso. Permite a execução racional e deixa completa liberdade para dividir o espaço interior. Se nos limitamos a apenas configurar o banheiro e a cozinha como espaços constantes, por causa de suas instalações, e optamos por dividir o resto da superfície habitável com paredes móveis, creio que podemos satisfazer qualquer necessidade de habitabilidade.”

Nessa mesma exposição, também foram destaques as duas propostas de casas construídas de concreto e aço apresentadas por Le Corbusier. A casa 13 do Weissenhof Estate mostrada na Figura 4 possuía espaços multifuncionais e era uma versão de outro projeto apresentado por ele anteriormente, a Maison Citrohan, que seria o ideal de habitação industrial desse arquiteto.

Figura 4: Casa 13 do Weissenhof Estate de Le Courbusier

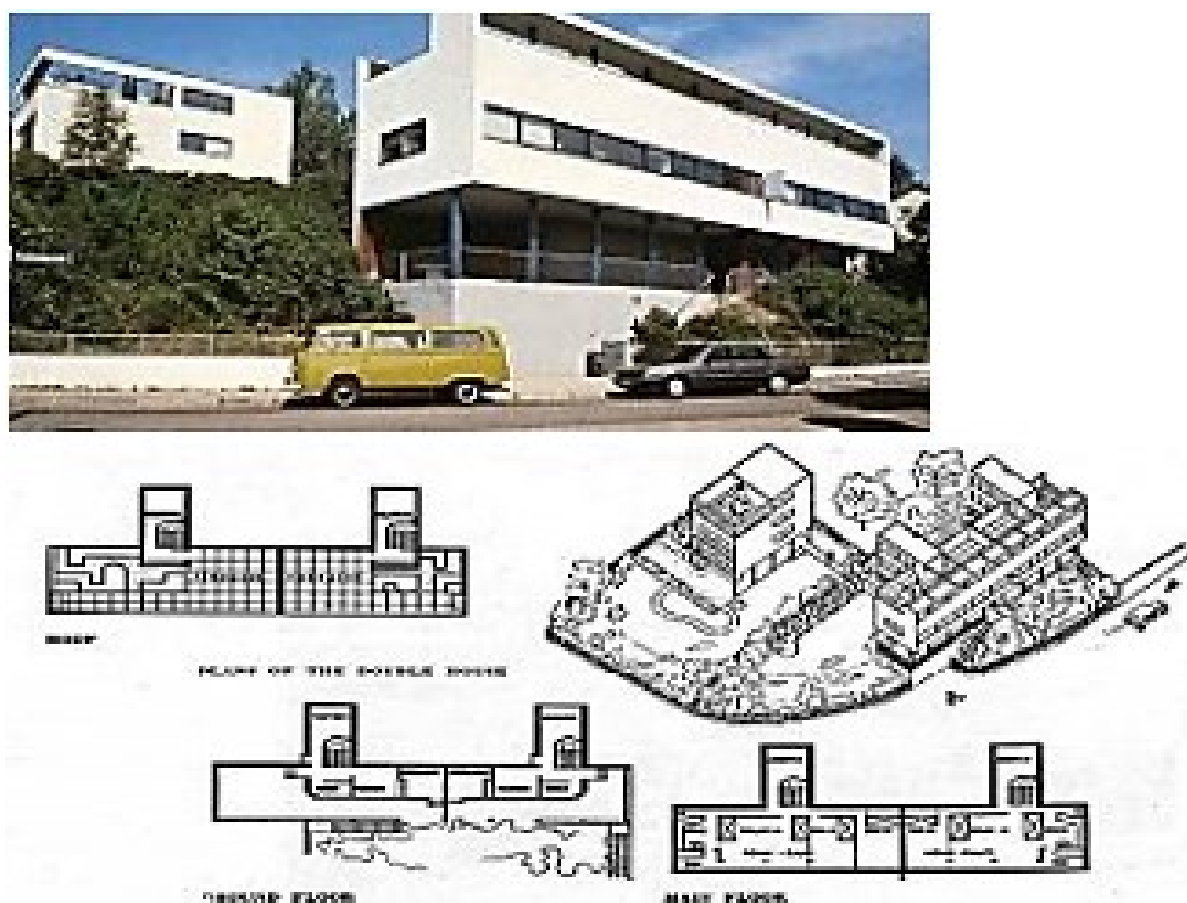


Fonte: Weissenhofsiedlung (2019)

Nessa obra, o arquiteto optou por manter no pavimento térreo a garagem e outras funções de serviços da casa. No primeiro andar, estão as salas de jantar e estar, cozinha e área de serviços. No segundo pavimento está o quarto principal, que poderia ter sua configuração alterada, subdividindo em mais de um dormitório. No último pavimento ficava o terraço composto por um jardim.

O segundo tipo de casa apresentado por Le Corbusier, que foi a casa 15 do Weissenhof Estate, mostrada na Figura 5, tinha como objetivo minimizar os elementos arquitetônicos, o uso de mobiliário e a utilização de paredes deslizantes. O uso das paredes deslizantes internas ficou condicionado em função da utilização diurna ou noturna da moradia, pois permitiam ampliar ou reduzir os espaços internos, permitindo, por exemplo, a utilização de uma grande sala de jantar durante o dia e a divisão de dormitórios a noite.

Figura 5: Casa 15 do Weissenhof Estate de Le Corbusier



Fonte: Weissenhofsiedlung (2019)

No ano de 1929, em Frankfurt, foi realizado o Segundo Congresso Internacional de Arquitetura Moderna, abordando como tema principal os conceitos de habitação mínima e mais uma vez a flexibilização dos espaços, tendo em vista a redução do tamanho das unidades habitacionais

nesse período. Por outro lado, apesar de bastante discutido em projetos pelos arquitetos modernistas, a aplicação da flexibilização dificilmente era colocada em prática.

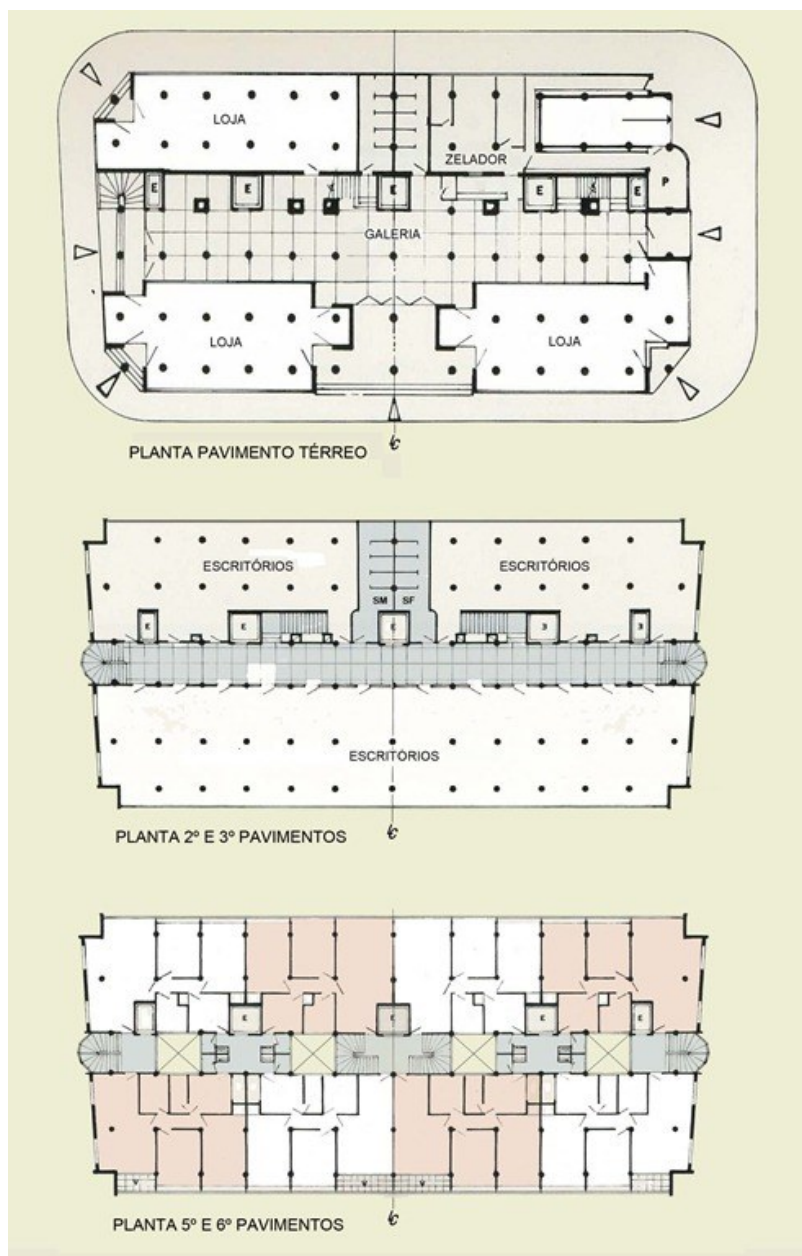
No Brasil, o primeiro edifício construído com influência da arquitetura modernista de flexibilização, foi o Esther, em São Paulo, no ano de 1938, mostrado na Figura 6. O prédio multifuncional projetado por Álvaro Vital Brasil e Adhemar Marinho, com estrutura em concreto armado, era de uso misto e abrigava habitações, escritórios e comércio, e possuía apenas as áreas úmidas e de circulação fixadas, ficando o restante livre para diferentes subdivisões, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 6: Edifício Esther



Fonte: ArchDaily (2019)

Figura 7: Planta baixa edifício Esther



Fonte: ArchDaily (2019)

No período pós-guerra, a crise habitacional vivida na Europa impulsionou a construção em massa de edifícios padronizados, que raramente se preocupava com a arquitetura flexível. Mesmo que alguns arquitetos modernistas tentassem impor a ideia, poucos projetos eram executados, como o Unité d'habitation, de Le Corbusier, edifício de uso misto construído na cidade de Marselha na França entre 1945 e 1952, mostrado na Figura 8.

Figura 8: Unité d'habitation de Le Corbusier

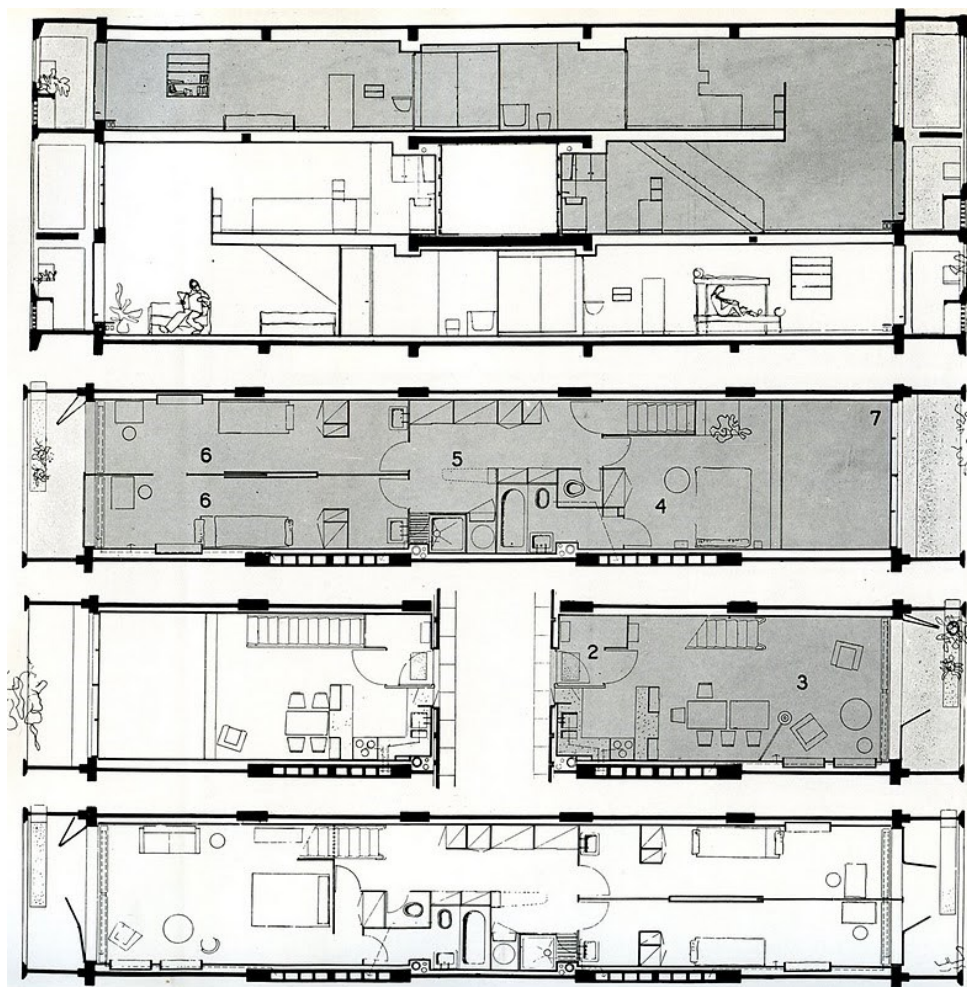


Fonte: Le Corbusier Fondation (2019)

A Unidade de Habitação de Marselha é um conjunto habitacional com 58 apartamentos por pavimento, com 23 tipos diferentes de planta (duplex). A Figura 9 mostra tanto o corte de duas unidades habitacionais como dois tipos das plantas do edifício, sendo a parte da Figura com fundo cinza relativa ao primeiro tipo, e a com fundo branco relativo ao segundo tipo.

No primeiro tipo, a sala e a cozinha estão integradas em um só piso, por onde acontece a entrada na unidade; no pavimento superior deste tipo estão os três quartos, dois para os filhos que são separados por painéis deslizantes, o que permite uma maior flexibilidade do espaço, o dormitório do casal com banheiro. No corredor do pavimento dos quartos há um banheiro e o que corresponderia à área de serviço no Brasil. No segundo tipo, o diferencial é que a cozinha e a sala de jantar ficam no pavimento onde acontece a entrada da unidade, mas a parte de estar do apartamento acontece no pavimento inferior onde estão os dois quartos e banheiros. Na realidade o quarto do casal se converte em sala de estar (CASELLI; CRISTINA KANYA, 2007).

Figura 9: Plantas do edifício Unité d'habitation



Fonte: Le Corbusier Fondation (2019)

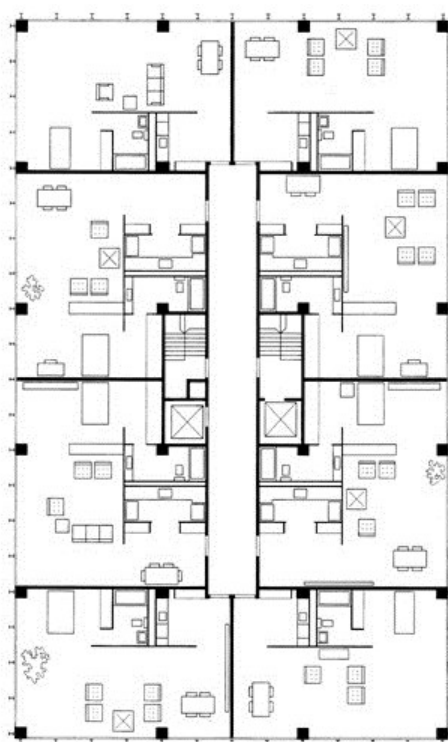
Já nos Estados Unidos, devido à crise habitacional e estagnação da construção civil durante a Segunda Guerra, o período do pós-guerra foi marcado pelo incentivo a novos métodos de construção, e o marco da arquitetura flexível em edifícios residenciais foi o prédio de apartamentos *Lake Shore Drive* (Figura 10), projetado por Mies van der Rohe, construído em Chicago entre os anos de 1948 e 1951. Como pode ser visto na Figura 11, a planta baixa do edifício tem fixado apenas as áreas de circulação de uso comum e as delimitações das áreas molhadas em um núcleo central interno dos apartamentos, ficando o restante sem compartimentação, livre para novas configurações. No mais, os conceitos de flexibilidade em outros projetos foram empregados principalmente na questão do mobiliário das residências.

Figura 10: Edifício *Lake Shore Drive*



Fonte: Arch Daily (2019)

Figura 11: Planta baixa edifício *Lake Shore Drive*



Fonte: Arch Daily (2019)

Nas décadas de 1960 e 1970, o maior destaque desse modelo de arquitetura ficou com o grupo Archigram da cidade de Londres, formado por Ron Herron, Dennis Crompton, David Greene, Peter Cook, Mike Webb e Warren Chalk. Segundo Silva (2004), era proposta uma visão futurista

dentro do cenário econômico e social da época, fundamentados em princípios da mobilidade, da flexibilidade, da mutabilidade e da instabilidade, baseados na robótica, no consumismo, e na invenção de novas máquinas e da computação. Os projetos apresentavam megaestruturas dinâmicas, mutáveis e extremamente tecnológicas. Entretanto, nenhuma das obras utópicas do grupo chegou a ser construída, devido à tamanha complexidade delas.

Da década de 1980 até o final do século XX, diversos projetos baseados na flexibilidade foram desenvolvidos, a maioria deles fixando as áreas de serviços e deixando as outras divisórias feitas de paredes ou painéis móveis. O momento também ficou marcado pelo ideal do *Open Building* que tinha como desafio garantir que os conceitos de flexibilidade fossem aplicados nas moradias pelos moradores subsequentes, o que não era visto na prática.

No entanto, é recorrente a dificuldade encontrada pelos moradores, desde os primeiros projetos modernistas de alterar as configurações das suas moradias. Além da questão financeira havia problemas técnicos, tanto na dificuldade da movimentação física das divisórias, como também na redistribuição das instalações elétricas, sistema de aquecimento, isolamento acústico, etc. (JIA, 1998).

3.1.2 Arquitetura flexível no mercado imobiliário brasileiro na década de 2010

No mercado imobiliário da década de 2010 no Brasil, a procura por apartamentos que apresentassem plantas flexíveis aumentou consideravelmente. Dessa forma, diversas construtoras do país passaram a adaptar suas obras, de modo a atender a demanda do mercado consumidor, independente do tamanho das unidades habitacionais.

Quanto ao sistema construtivo mais adotado nessas obras, as estruturas em concreto armado ganharam destaque, visto a tradição cultural de executar obras desse tipo e a facilidade de remanejar paredes, já que essas edificações são marcadas pela presença de grandes lajes (sejam elas maciças, nervuradas ou cogumelo) e vão livres, e raramente existem paredes autoportantes como nas estruturas de alvenaria estrutural. Além disso, esse sistema construtivo, quando bem planejado, facilita a alteração das instalações elétricas e hidráulicas prediais.

Distante de apresentar plantas flexíveis que permitiriam configurar praticamente quase todos os cômodos da residência, como proposto pelos arquitetos modernistas na primeira metade do século XX, no Brasil a flexibilidade normalmente se restringe a alguns cômodos. O tipo mais comum de flexibilização apresentado pelas construtoras, é a possibilidade de se ter uma cozinha tradicional ou americana integrada à sala, ampliação da sala de estar com a eliminação de algum

dormitório, criação de *Home Office*, ampliação dos banheiros para adaptação de banheiras ou ofurô, ou a junção de dois dormitórios para a criação de uma suíte estendida com *closet*.

Na cidade de Uberlândia, a Maxi Construtora e Incorporadora realizou o empreendimento Provence Residence Club, mostrado na Figura 12. Nesse edifício de padrão médio alto, composto por duas torres de apartamentos de dois e três dormitórios, a construtora apresentou plantas baixas flexíveis para os apartamentos, com possibilidade da utilização de cozinha tradicional ou americana, ampliação da sala de estar com a eliminação de um dos dormitórios ou a criação de um *Home Office* com a eliminação do *closet* da suíte, como pode ser visto nas Figuras 13, 14 e 15.

Figura 12: Provence Residence Club



Fonte: Maxi Construtora (2019)



Figura 14: Planta Baixa Provence Residence Club (opção B)



Figura 15: Planta Baixa Provence Residence Club (opção C)



Fonte: Maxi Construtora (2019)

A Brasal Incorporações também apresentou em Uberlândia o empreendimento de alto padrão *Sense Vertical Living*, visto na Figura 16. O projeto composto por três torres de 25 pavimentos de apartamentos de três dormitórios apresenta até quatro possíveis configurações de plantas que são mostradas nas Figuras 17, 18, 19 e 20, variando a cozinha entre americana e tradicional, e a eliminação de um dormitório para ampliação da sala de estar. A construtora entrega as paredes passíveis de remoção em *drywall* (paredes identificadas na cor branca na planta baixa), para facilitar o remanejamento dos cômodos.

Figura 16: *Sense Vertical Living*



Fonte: Brasal Incorporações (2019)

Figura 17: Planta baixa *Sense Vertical Living* (opção A)



Fonte: Brasal Incorporações (2019)

Figura 18: Planta baixa *Sense Vertical Living* (opção B)



Fonte: Brasal Incorporações (2019)

Figura 19: Planta baixa *Sense Vertical Living* (opção C)



Fonte: Brasal Incorporações (2019)

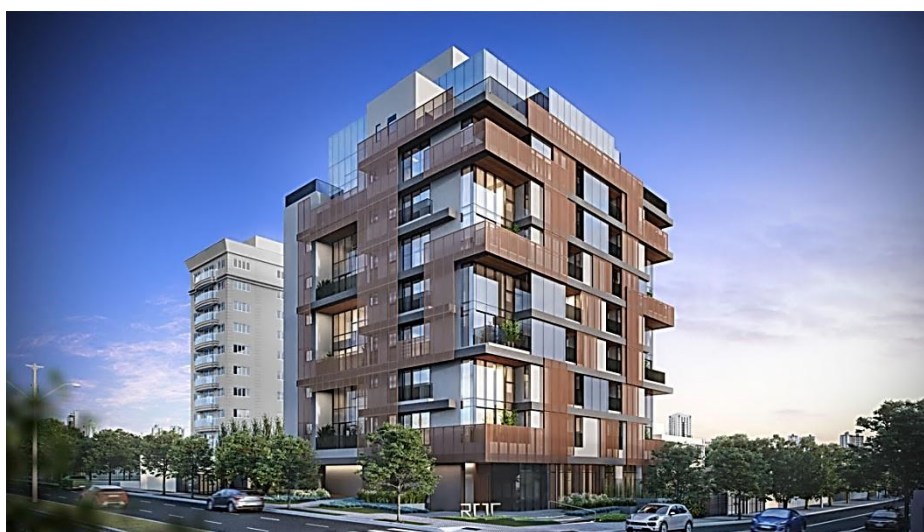
Figura 20: Planta baixa *Sense Vertical Living* (opção D)



Fonte: Brasal Incorporações (2019)

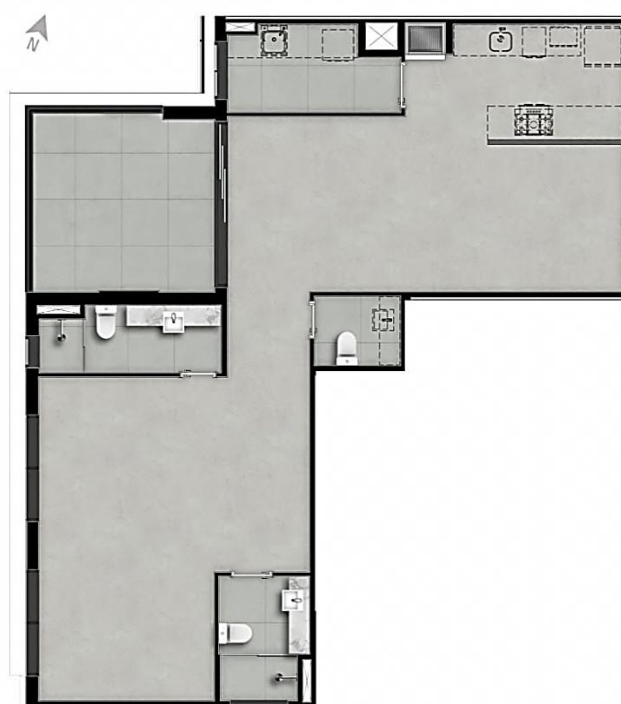
Em Curitiba, a Construtora Laguna apresentou o empreendimento ROC Batel *Residence Open Concept*, mostrado na Figura 21. Nele, a incorporadora entrega como fixo apenas as áreas molhadas do apartamento (Figura 22), ficando a divisão do restante a critério do cliente. A construtora sugere a configuração de um dormitório com escritório ou até duas suítes, como pode ser visto nas Figuras 23 e 24.

Figura 21: Residencial ROC Batel



Fonte: Construtora Laguna (2019)

Figura 22: Planta Baixa padrão Residencial ROC Batel



Fonte: Construtora Laguna (2019)

Figura 23: Planta Baixa Residencial ROC Batel (opção A)



Fonte: Construtora Laguna (2019)

Figura 24: Planta Baixa Residencial ROC Batel (opção B)



Fonte: Construtora Laguna (2019)

A tendência desse tipo de projeto não se limita a alguma região do Brasil, e é encontrada por todo o território. Além dos exemplos mostrados, em praticamente todas as médias e grandes cidades do país foi possível encontrar empreendimentos que possuem plantas flexíveis.

3.2 Dimensionamento de lajes segundo o *software* Eberick

Em praticamente todos os casos de projetos que apresentam plantas baixas flexíveis, como os mostrados anteriormente no item 3.1, ocorre à necessidade da concepção de projetos estruturais com a presença de lajes em L ou lajes irregulares, com recortes. Esses tipos de laje, por apresentarem dimensionamentos mais complexos, devido ao surgimento de pico de esforços, nem sempre são possíveis de serem dimensionadas por qualquer *software*, e por isso a escolha adequada do programa a ser utilizado para realizar o projeto estrutural é importante.

No *software* Eberick, o modelo de “dimensionamento completo” disponibilizado pelo programa é próprio para ser empregado no caso de existência de lajes desse tipo no projeto. Esse modelo permite o programa calcular regiões de armaduras para a laje em função da composição dos momentos existentes em cada região somado a contribuição da resistência do concreto, ao invés de aplicar uma armadura uniforme para toda a laje.

No caso do dimensionamento de lajes armadas em duas direções com pelo menos dois bordos adjacentes apoiados, quando submetida ao carregamento, existe uma tendência do levantamento dos bordos, que quando restringidos, surgem momentos fletores positivos em direção ao centro da laje e momentos negativos nas proximidades dos apoios. Isso faz com que esses efeitos de levantamento do bordo também sejam considerados no dimensionamento.

Para que o dimensionamento de uma laje seja feito de maneira correta, o ideal é que se leve em conta todos os esforços existentes na estrutura, sendo convencional adotar um sistema de eixos fixos para toda a laje coincidente com as direções em que as armaduras serão dispostas, e assim calcular os esforços presentes nesse sistema. Dessa maneira, são normalmente adotados dois eixos paralelos principais aos bordos, que resultam os momentos de flexão, e outro eixo perpendicular, que gera esforços de torção, conhecidos como momentos volventes.

Dentre alguns modelos matemáticos conhecidos que dimensionam lajes considerando o momento volvente, o modelo de Wood&Armer (1968) é um dos mais conhecidos e utilizados pelos *softwares* de cálculo estrutural, como é o caso do Eberick.

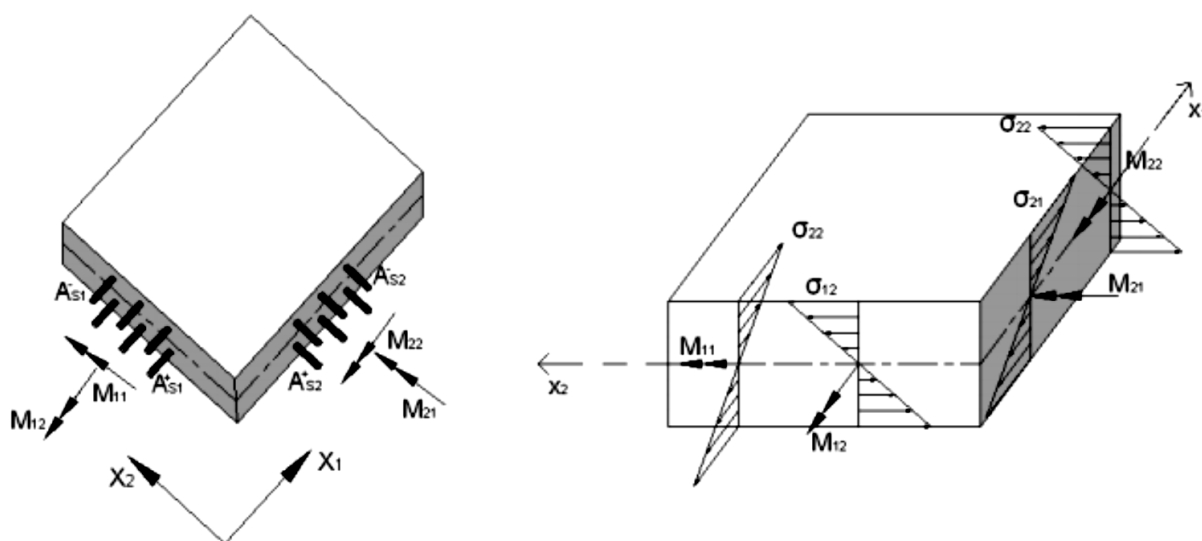
3.2.1 Método de Wood&Armer

O método de Wood&Armer (1968) é um método que consiste em dimensionar uma laje baseada no critério de Johansen, também conhecido como critério das linhas de plastificação. Na prática, o método de Wood é a particularização do método de Armer, visto que o segundo foi desenvolvido de forma generalizada para dimensionar armaduras com direções oblíquas, enquanto o primeiro se restringe ao dimensionamento de armaduras com direções ortogonais.

O objetivo principal do método é elaborar equações que consistem em obter o momento equivalente, considerando o momento fletor atuante acrescido do módulo do momento torsor, definindo assim um momento equivalente nas direções principais paralelas aos bordos. Sendo assim, como os valores dos momentos fletores equivalentes, são obtidas as armaduras em cada uma das direções.

Para as lajes retangulares é comum admitir as duas direções paralelas aos bordos X_1 e X_2 , e uma direção X_3 perpendicular ao plano. Dessa forma, os momentos principais de flexão resultam em M_{11} e M_{22} , e o momento de torção ou momento volvente em M_{12} e M_{21} . Os momentos M_{11} e M_{22} são adotados como positivos quando ocorre tração na parte inferior da placa, ou seja, na coordenada negativa do eixo Z. A Figura 25 mostra os esforços solicitantes, tensões e armaduras segundo as direções X_1 e X_2 .

Figura 25: Esforços solicitantes, tensões e armaduras segundo direção X_1 e X_2



Fonte: Celeste (2011)

Nesse trabalho não serão mostradas as equações do método, porém elas podem ser encontradas em Celeste (2011).

3.2.2 Critério de Parsekian

Para obter um dimensionamento mais preciso e maior economia no projeto de lajes de concreto armado, Parsekian (1996) propõe a consideração da resistência do concreto ao momento volvente, determinando um critério para cálculo dessa resistência. Isso ocorre, pois o cisalhamento presente em uma peça de concreto armado sujeita a um momento torçor, é em parte resistido pelo próprio concreto.

É considerado que as tensões cisalhantes produzidas pelo momento volvente, combinadas com as tensões cisalhantes devidas a força cortante, devem ser menores que as tensões cisalhantes resistidas pelo concreto. Dessa maneira, o *software* Eberick utiliza o critério de Parsekian no dimensionamento da estrutura. A demonstração das fórmulas usadas para obter as tensões pode ser encontrada em Parsekian (1996).

4 METODOLOGIA

Para fazer as análises desse trabalho, primeiramente realizou-se um projeto arquitetônico no *software* AutoCAD de um edifício de sete pavimentos tipo, um pavimento cobertura e a laje do barrilete, compostos por uma planta baixa flexível, que permite diferentes *layouts* de arquitetura. Sendo assim, foi possível obter variadas plantas de forma para a mesma edificação.

Com o uso do *software* Eberick V10 disponibilizado pela empresa Dimensão Projetos e Construções Ltda., esse mesmo edifício foi processado para três modelos diferentes. O modelo “A” com poucas lajes com recortes, o “B” acrescentado de duas lajes em L e o “C”, um modelo mais complexo, com lajes com vários recortes.

Sendo assim, a partir do dimensionamento das lajes pelo método da Analogia de Grelha disponibilizado pelo *software* Eberick, somado ao dimensionamento das vigas, os dados foram coletados e foi possível analisar e comparar os resultados obtidos.

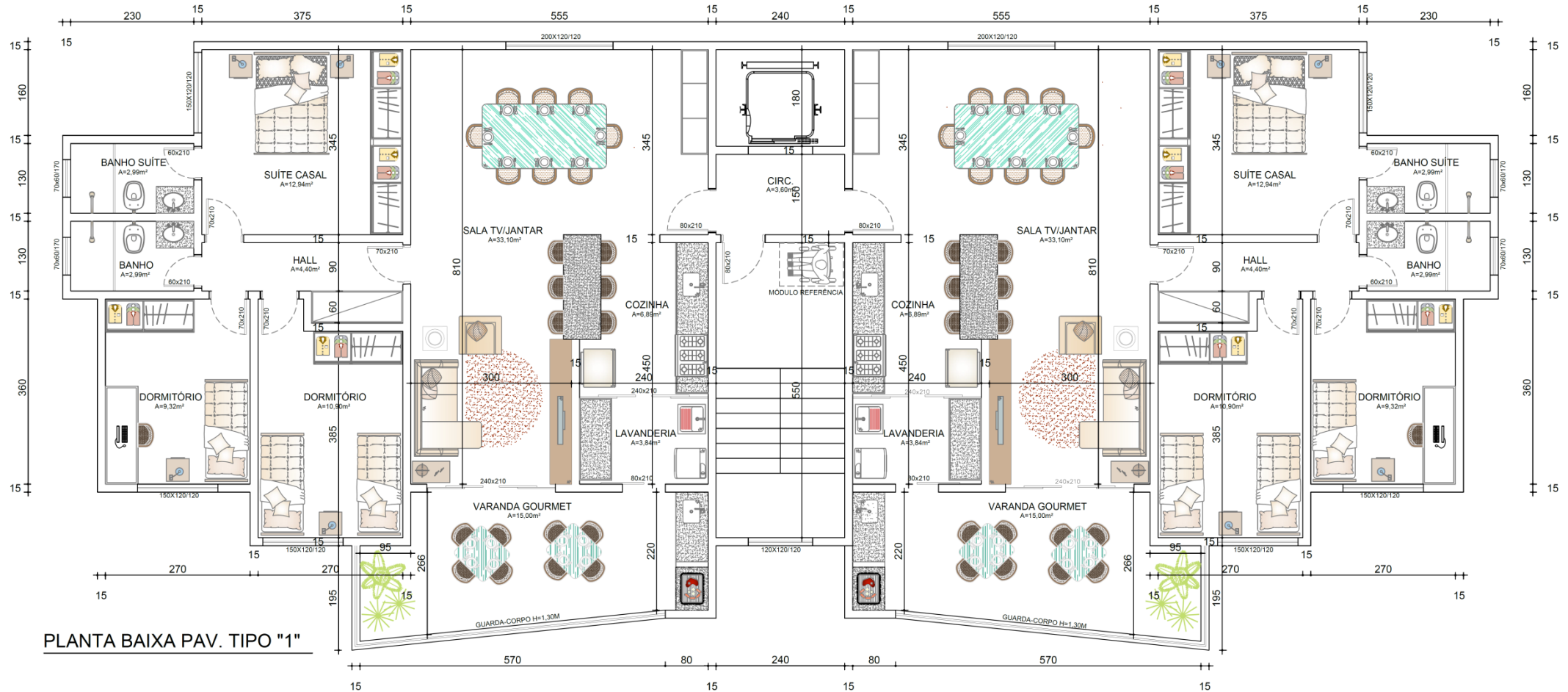
4.1 Definição do projeto arquitetônico

Como objeto de estudo desse trabalho, o projeto arquitetônico foi feito de maneira a possibilitar a flexibilização do layout de arquitetura pelo usuário, de forma que em seu interior fosse possível existir lajes com geometrias variáveis, sejam elas em L ou com vários recortes. Dessa forma, foram elaboradas possibilidades diferentes de configurações para a planta baixa desse mesmo edifício, que possui dois apartamentos iguais de 115,5 m² cada um por andar, sete pavimentos tipo, com pé direito de três metros de altura e um pavimento cobertura.

A opção “1” mostrada na Figura 26 pode ser considerada a planta baixa de referência desse edifício, das quais as outras opções são variações dessa. Nessa opção a planta baixa é composta por apartamentos de três dormitórios, sala em L e a possibilidade de adaptação de cozinha americana. Já a opção “2” possui apartamentos com dois dormitórios, um *office* no *hall* dos quartos, possibilidade de adaptação de cozinha americana e a sala composta por três ambientes (sala de jantar, TV e estar), como pode ser visto na Figura 27.

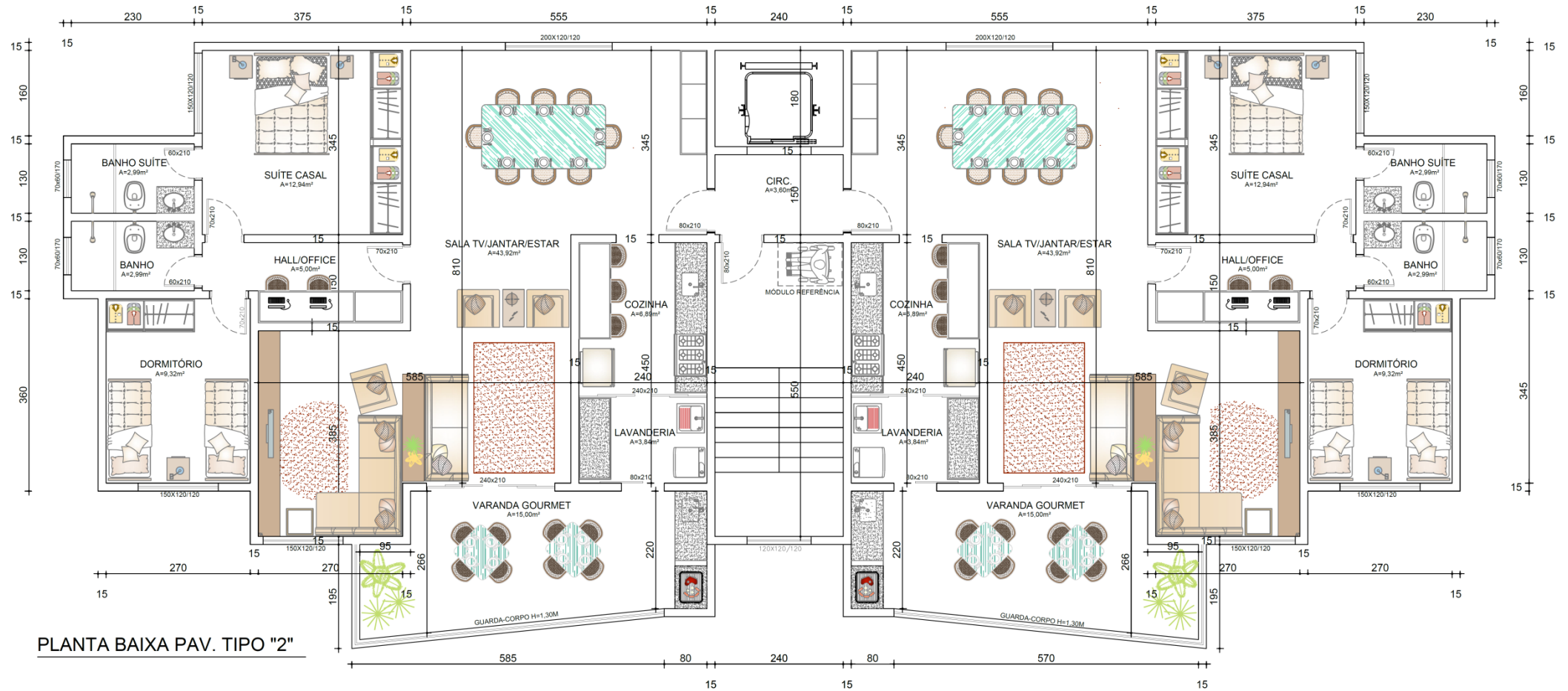
Nas alternativas de projeto “3” e “4”, foi optado por ampliar a suíte dos apartamentos, criando um *closet* dividido por uma parede em *drywall*. Entretanto, a opção “3” conta com apartamentos de três dormitórios enquanto a opção “4” possui dois dormitórios, sala ampliada em três ambientes e um *office* no *hall* dos quartos. Ambas as alternativas podem optar por cozinha americana e os projetos são mostrados nas Figuras 28 e 29.

Figura 26: Planta baixa pavimento tipo opção “1”



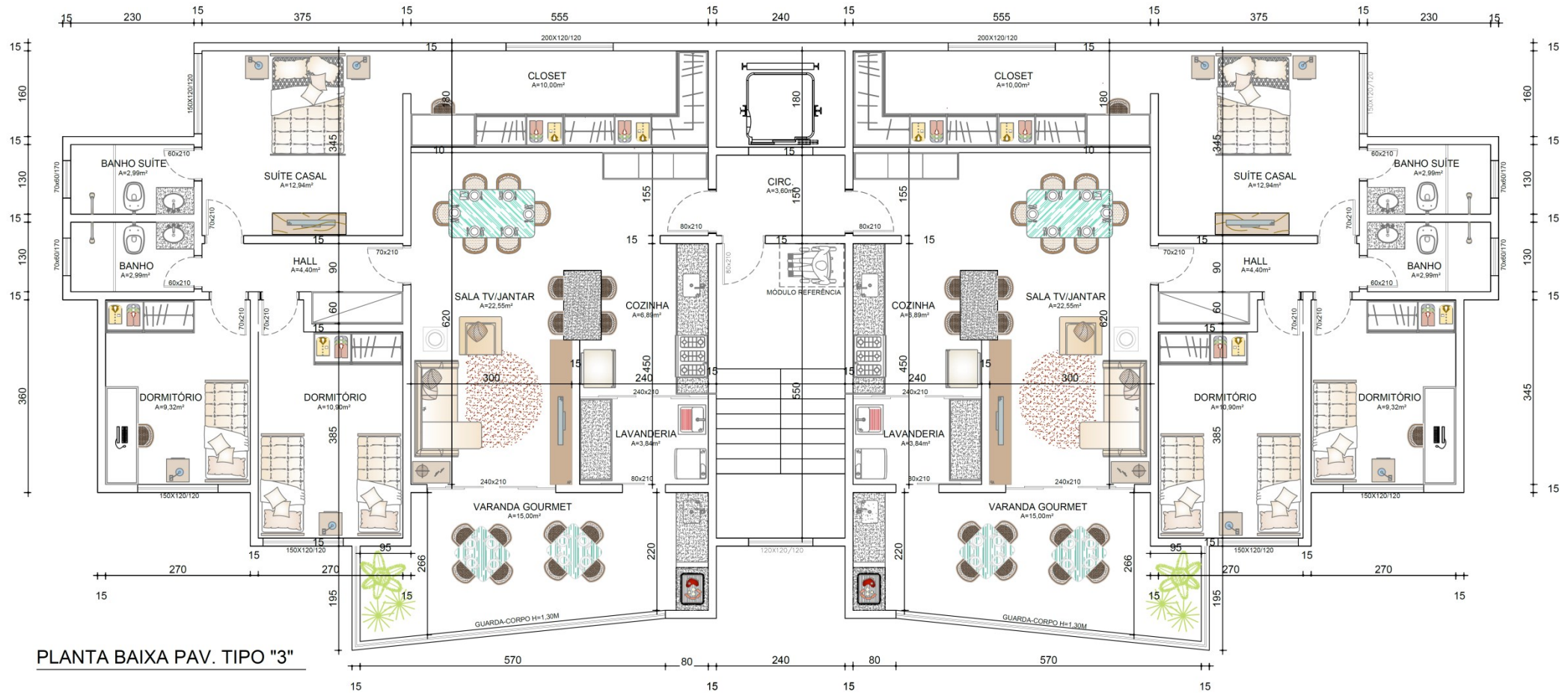
Fonte: autor

Figura 27: Planta baixa pavimento tipo opção “2”



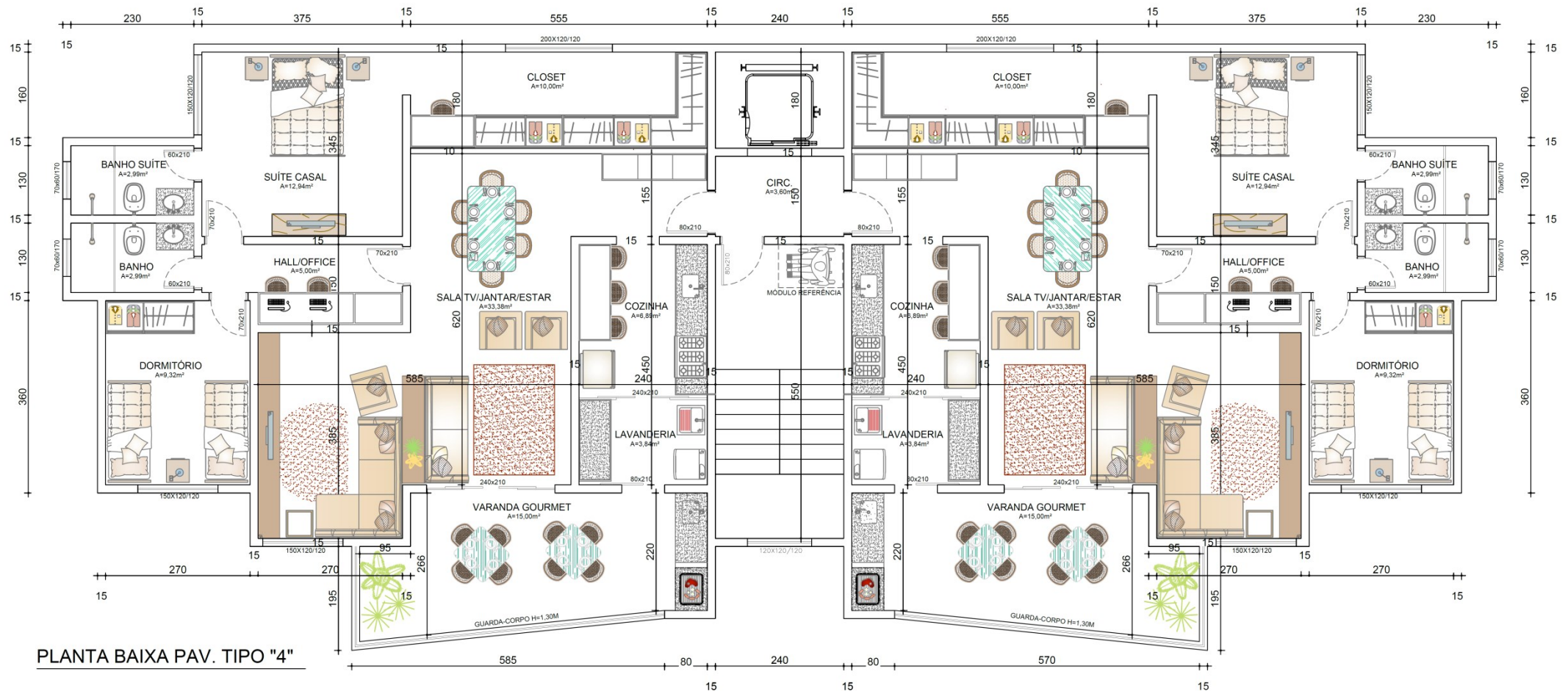
Fonte: autor

Figura 28: Planta baixa pavimento tipo opção “3”



Fonte: autor

PLANTA BAIXA PAV. TIPO "4"

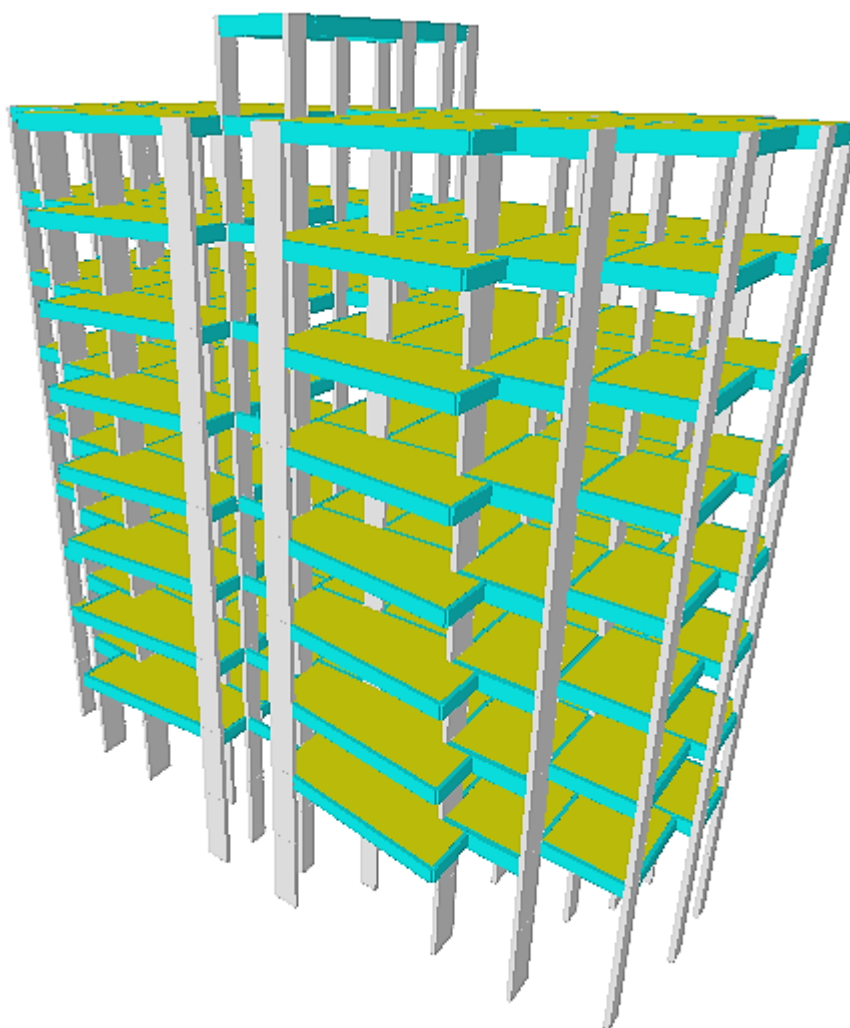


4.2 Definição das plantas de forma do projeto estrutural

A partir do projeto arquitetônico definido, foram elaborados três projetos estruturais de formas diferentes, denominados de modelos “A”, “B” e “C”. Os projetos possuem sete pavimentos tipo, um pavimento cobertura e a laje do barrilete. A perspectiva 3D da estrutura do edifício para todos os modelos é mostrada na Figura 30.

Para fazer o lançamento do projeto estrutural no Eberick, primeiramente foi importado o projeto arquitetônico realizado no AutoCAD. Sendo assim, foram lançados os pilares da estrutura, em seguida as vigas e por fim as lajes, finalizando o pavimento tipo, que depois foi copiado para os demais pavimentos. As escadas do edifício (que não foi objeto de análise desse trabalho) não foram lançadas e a laje do barrilete foi posicionada em cima do local de previsão da escada no último andar.

Figura 30: Perspectiva 3D da estrutura

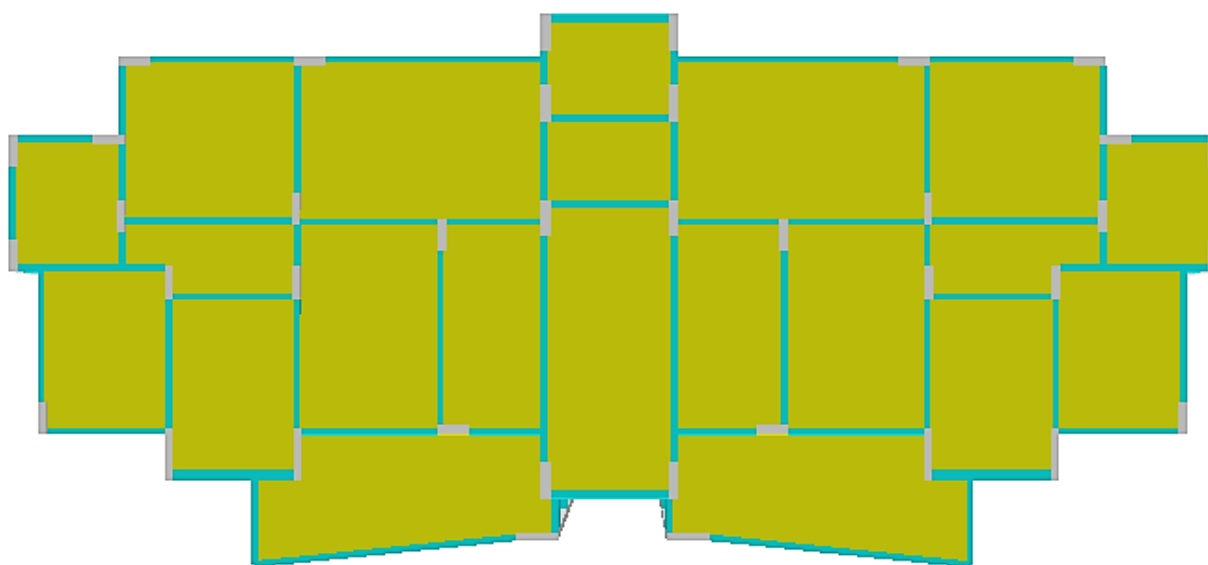


Fonte: autor

4.2.1 Modelo “A”

O modelo “A” de estudo foi pensado para uma planta de forma que apresentasse o mínimo de lajes com recortes, respeitando o projeto de arquitetura, porém permitindo menor flexibilidade ao usuário, devido à presença de mais vigas que esteticamente podem não favorecer e dificultar a configuração de outros ambientes. Desse modo, ele não possui nenhuma laje L ou com qualquer outra geometria mais elaborada, apresentando em seu interior principalmente lajes retangulares, evitando assim possíveis picos de esforços. A planta de forma desse modelo é mostrada na Figura 31.

Figura 31: Planta de formas modelo “A”

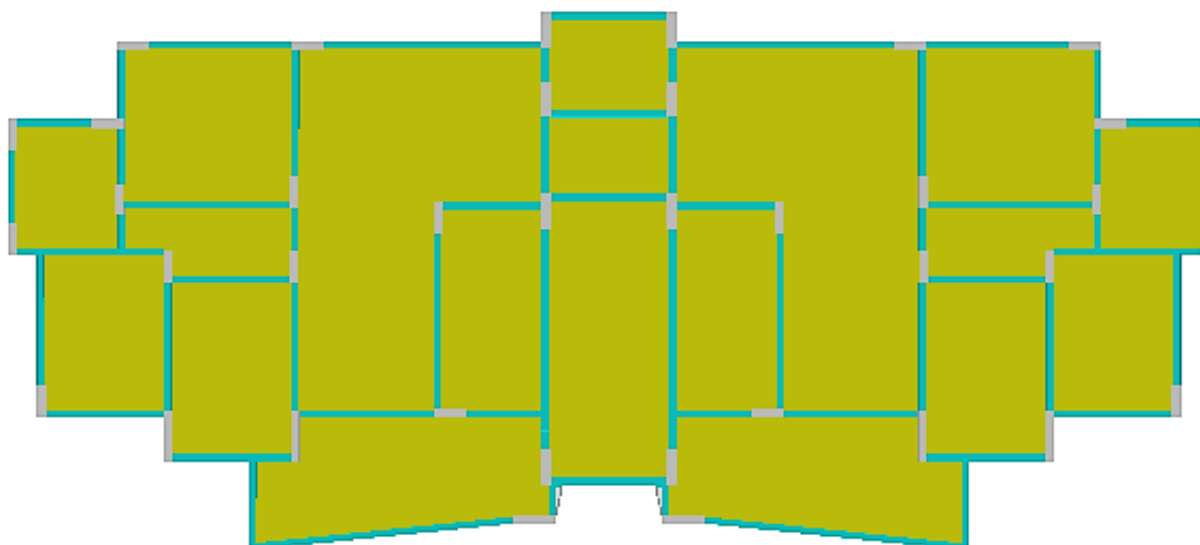


Fonte: autor

4.2.2 Modelo “B”

Para o modelo “B” de estudo, foi removido uma viga, na sala de cada apartamento, da planta de formas do modelo “A”, de modo que o projeto passou a ter em seu interior duas lajes em L. As demais lajes tiveram suas geometrias mantidas, como pode ser notado na Figura 32.

Figura 32: Planta de formas modelo “B”

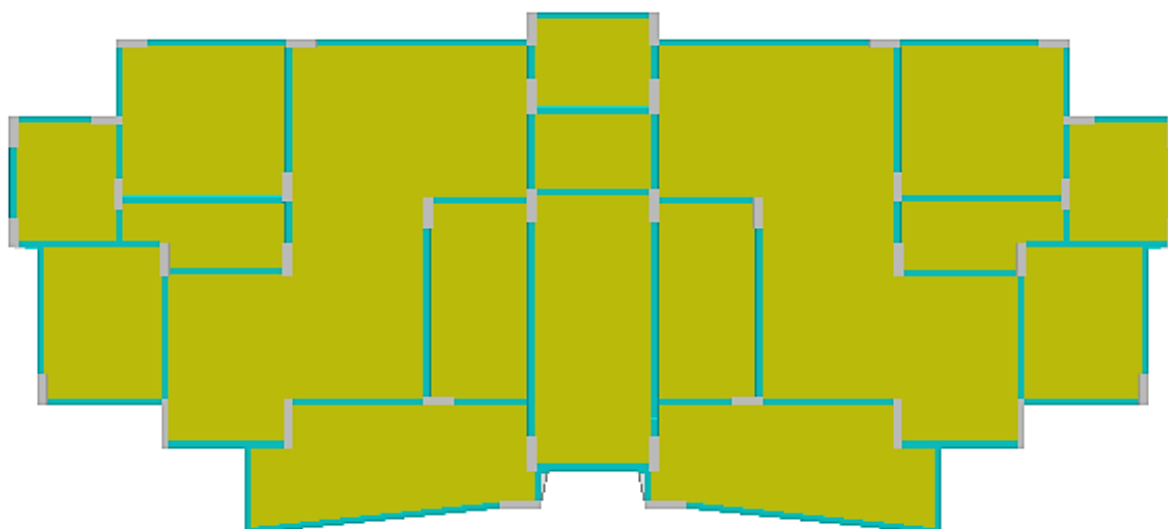


Fonte: autor

4.2.3 Modelo “C”

Para o modelo “C”, foram retiradas mais duas vigas da planta de forma do modelo “B”, que foram substituídas por cargas lineares de paredes (o que não impede também a utilização de paredes em *drywall*), de modo que um dos quartos também se juntou à sala, modelo esse que permite ao usuário maiores opções de flexibilização da planta baixa do pavimento, devido à ausência de vigas. Dessa forma, todas as lajes da sala se unificaram, não prevendo vigas em seu interior, o que resultou em uma laje extensa, com geometria irregular e vários recortes. A Figura 33 mostra como ficou a planta de formas desse pavimento.

Figura 33: Planta de formas modelo “C”



Fonte: autor

4.3 Configurações do software Eberick

Ao ser instalado, o *software* Eberick já vem com algumas configurações de apresentação, análise e dimensionamento pré-definidas pela AltoQi, empresa que desenvolveu o programa e que é responsável pela sua manutenção. Entretanto, para o uso eficiente do programa e para garantir a segurança do usuário, visto que os padrões configurados são de responsabilidade de quem utiliza o programa, é sempre recomendado que o engenheiro que trabalha com o *software* revise esses valores de referência e adeque eles de acordo com a necessidade de cada projeto.

Diante disso, para realizar as análises necessárias a esse trabalho, principalmente no caso do dimensionamento dos painéis de lajes, alguns valores foram modificados dos padrões originais do programa, procurando sempre adequar as melhores condições para esse estudo. Todos os passos que foram configurados serão mostrados em seguida.

4.3.1 Configurações de detalhamento

Para organizar a representação das armaduras no detalhamento, no programa na parte de configuração do detalhamento das lajes, é possível habilitar a função “Otimizar detalhamento”, mostrada na Figura 34 , que permite uma melhor organização dos textos nas armaduras. A opção “Separa plantas”, possibilita a apresentação do detalhamento das armaduras da região X e Y juntas ou separadas, que nesse caso foi optado por manter juntas para as armaduras positivas e separadas para as armaduras negativas, de acordo com a Figura 35.

Figura 34: Função “Otimizar detalhamento”

Detalhamento [Lajes]

Pilares Vigas **Lajes** Sapatas Blocos Muros

Geral

Escala das lajes 1:50 ...

Ancoragem da armadura reta

☐ Evitar o traspasse de 100% das barras na mesma direção

☐ Representar nome conforme simbologia da forma

☒ **Otimizar detalhamento**

Redução da indicação 25 %

Separar plantas

☐ Capitéis

☐ Armaduras positivas em X e Y

☒ Armaduras negativas em X e Y

Descrição das armaduras

Armaduras positivas Completa

Distância em relação à extremidade 40 cm

Armaduras negativas Completa

☒ Usar fundo opaco

Armadura negativa

Ancoragem da laje em balanço 1.5 x

☐ Agrupar continuidade pela maior armadura

☒ Cotar dobras

Cotas na planta

☒ Positivas

☒ Exibir linhas de chamada

☒ Negativas

☒ Negativas adicionais

☐ Cotar direção principal

Armadura no apoio

Distância máxima para detalhar ferro até a extremidade do apoio 10 cm

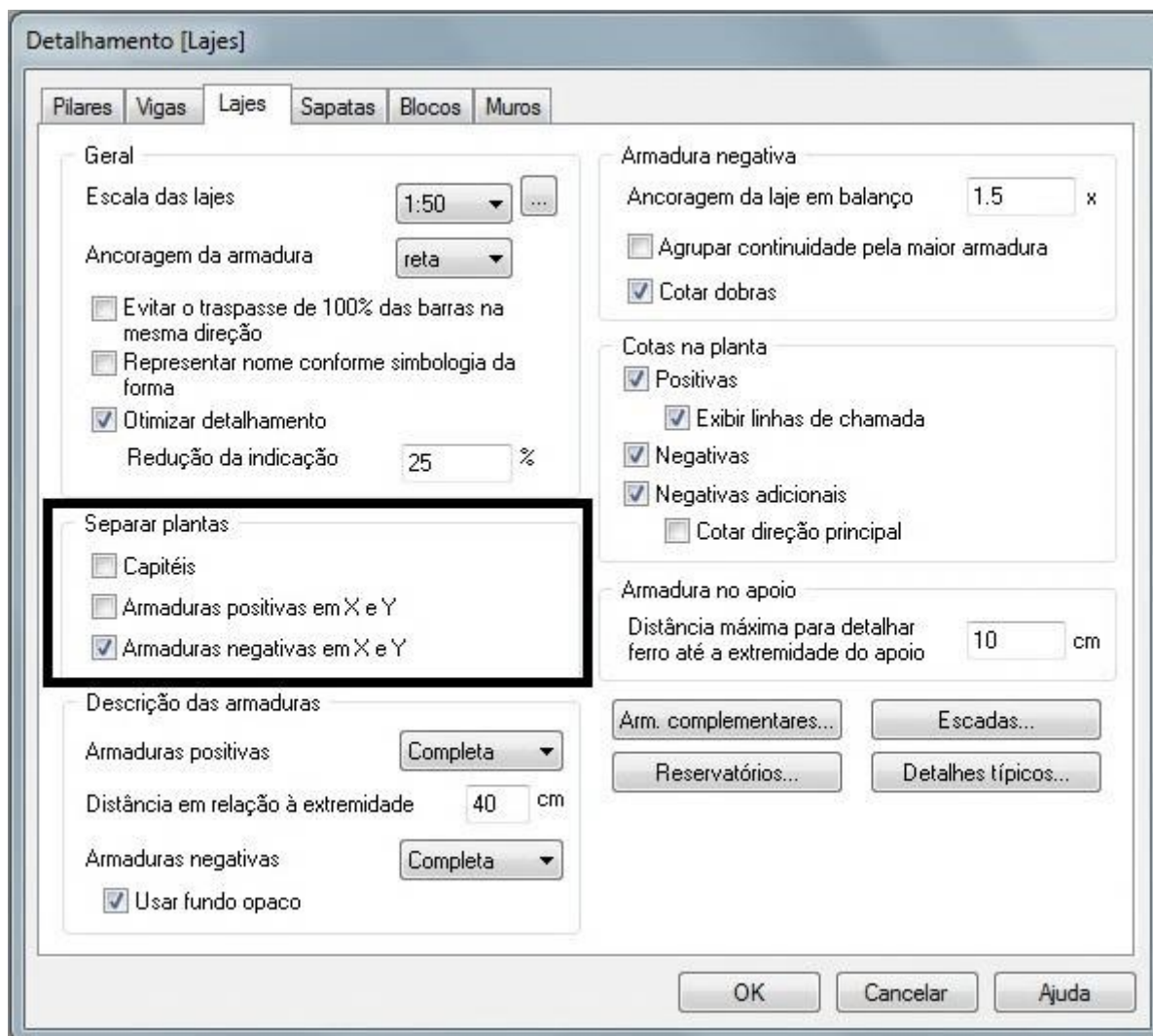
Arm. complementares... Escadas...

Reservatórios... Detalhes típicos...

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

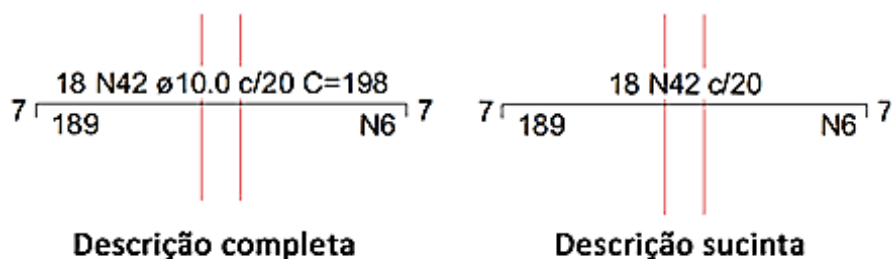
Figura 35: Função “Separa Plantas”



Fonte: AltoQi Eberick (2019)

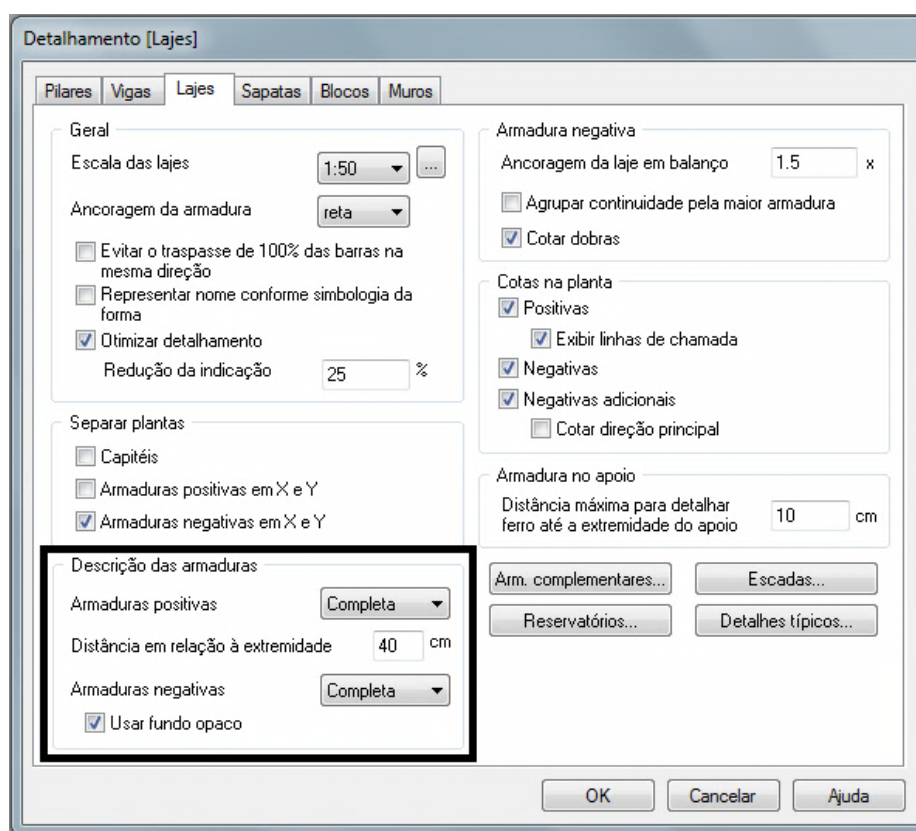
No caso das descrições das armaduras, elas também podem ser apresentadas no detalhamento de forma “Completa” ou “Sucinta”, apresentando maiores ou menores detalhes, como mostrado na Figura 36. Essa alternativa também pode ser habilitada nas opções de detalhamento de lajes, e nesse caso foi adotada a descrição “Completa” para as armaduras negativas e positivas, mostrada na Figura 37.

Figura 36: Opções de descrições das armaduras



Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Figura 37: Função “Descrição das armaduras”



Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Além desses parâmetros apresentados, que foram configurados para este projeto, considerados aqui mais relevantes, ainda existem várias outras configurações que podem ser feitas no *software* para melhorar e facilitar o detalhamento, de acordo com a preferência do usuário.

4.3.2 Configurações de dimensionamento

O Eberick permite ao usuário a configuração “Coeficientes de escolhas das armaduras”, que possibilita atribuir parâmetros para a escolha inicial das armaduras das lajes no projeto. Quanto

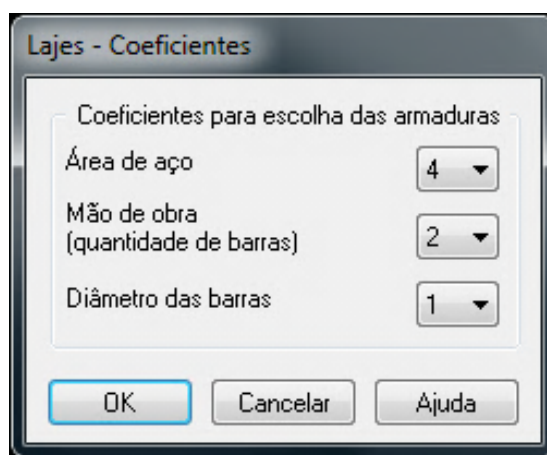
maior for o coeficiente atribuído a cada critério, maior será a importância do item correspondente no processo de detalhamento dos elementos.

O *software* permite atribuir três coeficientes diferentes para a escolha das armaduras, são eles:

- **Área de aço:** o programa seleciona a armadura com a bitola que proporcionar a área de aço mais próxima ao valor calculado, ou seja, prioriza a economia do consumo de aço.
- **Mão de obra:** o *software* prioriza a escolha por armaduras que apresentem o menor número de barras possíveis, visando facilidade e menor demanda de mão de obra.
- **Diâmetro das barras:** o programa opta por selecionar barras que apresentem menor diâmetro no dimensionamento, gerando maior facilidade de dobramento.

Nesse trabalho, como o objetivo maior é analisar o consumo de aço e a disposição das armaduras no projeto como um todo, inclusive para as regiões irregulares das lajes, optou-se por atribuir coeficiente quatro para “Área de aço”, dois para “Mão de obra” e um para “Diâmetro das barras”. Esses valores adotados são mostrados na Figura 38.

Figura 38: Coeficientes adotados para a escolha das armaduras das lajes



Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Para a análise e dimensionamento das lajes, o *software* possui dois modelos de dimensionamento: o modelo “Simplificado”, no qual o programa faz o dimensionamento dos painéis de lajes apenas pelos esforços máximos de flexão, e não considera os momentos de torção (momento volvente) e nem é verificada a necessidade de armadura negativa, sendo o modelo recomendado para lajes de formatos regulares, e o modelo “Completo”, que possui opções que abrangem soluções mais complexas, principalmente para análise de lajes com formatos irregulares, com vários recortes e de maiores dimensões.

Na opção de modelo de dimensionamento “Completo”, o programa define um critério global de cálculo para dimensionamento das armaduras longitudinais, obtendo a composição entre os momentos de flexão e torção segundo o critério de Wood&Armer, levando em conta ainda a contribuição do concreto na interação entre o esforço cortante e o momento torçor, segundo o critério de Parsekian, para assim determinar as armaduras inferiores e superiores necessárias em cada barra da grelha do pavimento. Isso permite que a armadura possa ser disposta em faixas, criando regiões diferentes de armaduras, em função do diagrama existente, e não apenas pelo esforço máximo, como é realizado no modelo “Simplificado” e em outros *softwares* de cálculo estrutural.

Sendo assim, devido à presença de lajes irregulares, com vários recortes no projeto de estudo, que apresentam picos de tensões que necessitam de maiores cuidados no cálculo, o modelo de dimensionamento “Completo” foi o que viabilizou a realização desse trabalho. A Figura 39 mostra a seleção desse modelo de dimensionamento para os painéis de lajes.

Figura 39: Modelo Completo de dimensionamento

Painéis de lajes

Geral

Redução na torção: 40 %

Grelha não linear

Continuidades

Redistribuição máxima: 15 %

Aplicar para taxas de armadura maiores que: 0.3 %

Demais Casos

Redistribuição máxima: 25 %

Aplicar para taxas de armadura maiores que: 0.5 %

Nº máximo de iterações: 10

Flechas

Número máximo de iterações: 3

Precisão mínima: 10 %

Paredes

Espaçamento das faixas: 50 cm

Concentrar armadura no topo / base para tração superior a: 10 tf

Região de interesse: 15 % h

Coeficiente de empuxo: 0.5

Redução na rigidez axial: 0 %

Grelha (lajes maciças)

Espaçamento das faixas: 25 cm

Número mínimo de faixas em uma direção: 4

Modelo para dimensionamento

☐ Simplificado

☒ Completo

Capitéis

Espaçamento no capitel: 15 cm

Pilar

Distância mínima para considerar pilar dentro da laje: 20 cm

Escadas

Modelo para análise

☒ Pavimentos independentes

☐ Projeto inteiro

Redução na rigidez axial: 50 %

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Para as lajes maciças, o Eberick possibilita a configuração do espaçamento das faixas da grelha que serão utilizadas no dimensionamento. Como esse trabalho busca analisar com mais precisão os momentos e as armaduras resultantes nas regiões de quinas e recortes das lajes, tentou-se utilizar o menor valor possível disponibilizado pelo programa, que são faixas de cinco centímetros. Entretanto, ao processar o dimensionamento com esse espaçamento, as lajes não foram processadas e apresentaram erros de dimensionamento, possivelmente devido ao pico de momento existente nas regiões mais solicitadas.

Dessa forma, os valores de faixas foram reajustados de cinco em cinco centímetros, até que os três modelos processados nesse estudo não apresentassem erros. Sendo assim, devido ao modelo “C” possuir em seu interior uma laje mais complexa, o menor valor de espaçamento das faixas aceito pelo *software* foi de 25 cm, além de ter sido adotado um número mínimo de quatro faixas por direção, valores mostrados na Figura 40.

Figura 40: Espaçamento das faixas da grelha

Painéis de lajes

Geral

Redução na torção: 40 %

Grelha não linear

Continuidades

Redistribuição máxima: 15 %

Aplicar para taxas de armadura maiores que: 0.3 %

Demais Casos

Redistribuição máxima: 25 %

Aplicar para taxas de armadura maiores que: 0.5 %

Nº máximo de iterações: 10

Flechas

Número máximo de iterações: 3

Precisão mínima: 10 %

Paredes

Espaçamento das faixas: 50 cm

Concentrar armadura no topo / base para tração superior a: 10 tf

Região de interesse: 15 % h

Coefficiente de empuxo: 0.5

Redução na rigidez axial: 0 %

Grelha (lajes maciças)

Espaçamento das faixas: 25 cm

Número mínimo de faixas em uma direção: 4

Modelo para dimensionamento

☐ Simplificado

☒ Completo

Capitéis

Espaçamento no capitel: 15 cm

Pilar

Distância mínima para considerar pilar dentro da laje: 20 cm

Escadas

Modelo para análise

☒ Pavimentos independentes

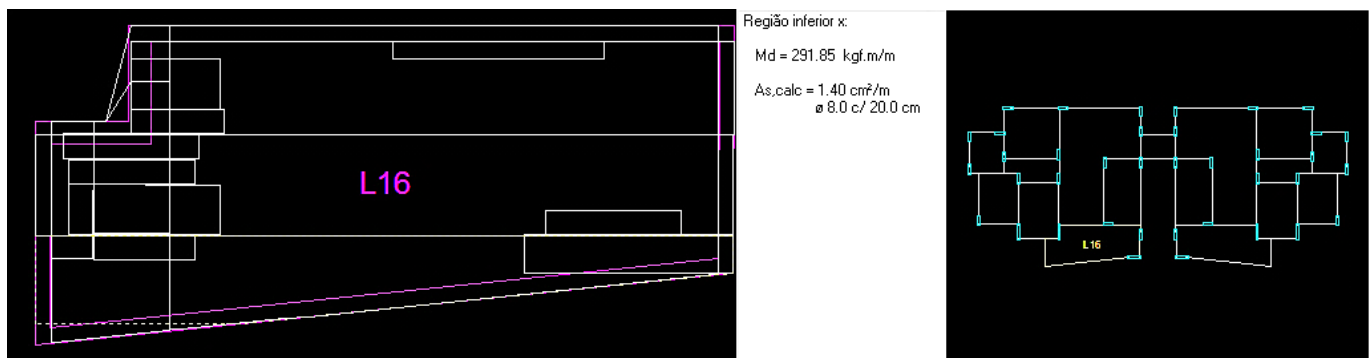
☐ Projeto inteiro

Redução na rigidez axial: 50 %

OK Cancelar Ajuda

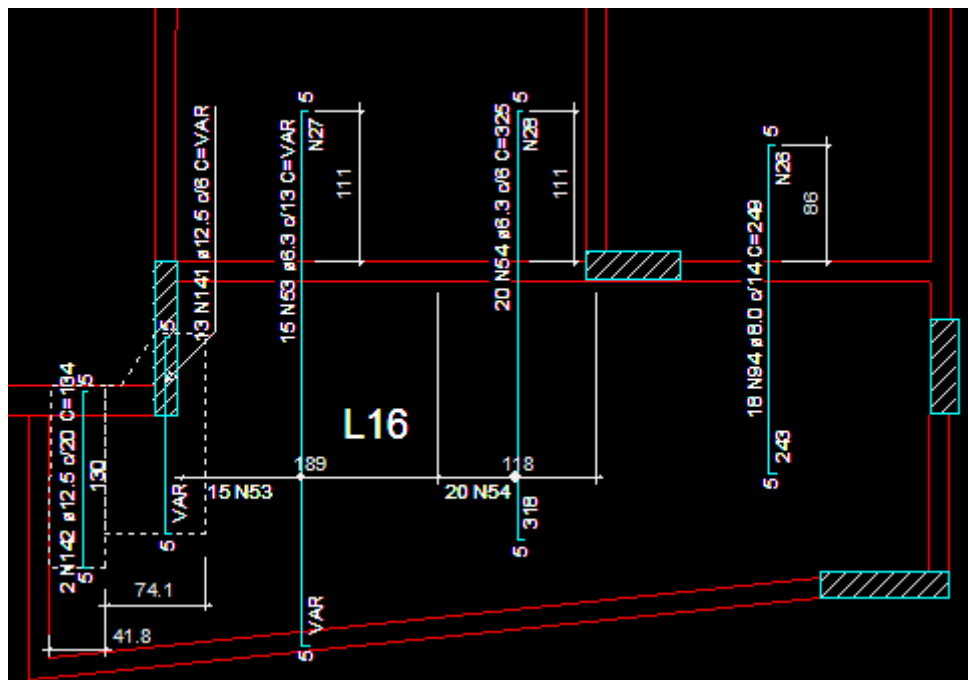
O detalhamento das regiões de armaduras criadas pelo programa pode ser visualizado, após o processamento e dimensionamento da estrutura, na janela “regiões”, presente na aba de dimensionamento das lajes da estrutura. Adotando como exemplo a laje L16 mostrada na Figura 41, os polígonos brancos representam as regiões definidas onde serão distribuídas as armaduras, que são vistas nas Figuras 42 e 43.

Figura 41: Polígonos das regiões da laje



Fonte: autor (2019)

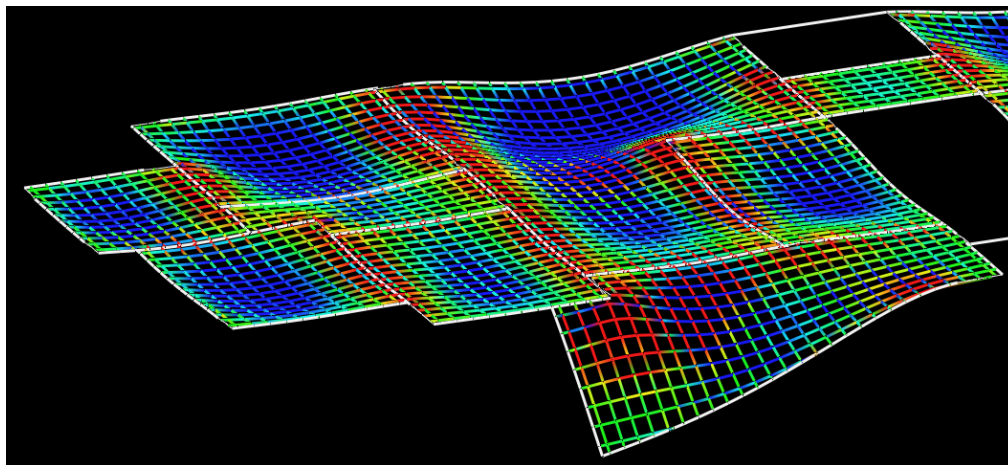
Figura 42: Armaduras negativas direção Y



Fonte: autor (2019)

Para visualizar o comportamento deformado da grelha das lajes do pavimento junto com a deformação das barras, o diagrama de momento elástico fletor possibilita uma boa representação desse caso. A grelha deformada da laje em análise pode ser observada na Figura 45.

Figura 45: Grelha deformada do pavimento



Fonte: autor (2019)

Para as regiões de armadura, o programa permite que o projetista obtenha diversas configurações para apresentar a unificação e a uniformização das faixas de armadura, que podem facilitar as plantas de detalhamento. Entretanto, é válido ressaltar que na maioria dos casos, quanto maior for a unificação e a uniformização das faixas, maior será o consumo de aço e mais fácil tende a ser a execução, demandando menor mão de obra. Dessa maneira, cabe ao engenheiro projetista analisar o nível de otimização desejado para julgar a relação custo X trabalhabilidade do seu projeto.

Na configuração do dimensionamento das lajes, na aba regiões do *software*, o usuário pode escolher entre fazer todo o detalhamento da laje por meio de uma armadura constante, calculada pelos pontos de esforços máximos, em função apenas da geometria da laje, ou subdividindo as regiões das lajes em faixas, de acordo tanto com a geometria quanto com os diagramas existentes, ou seja, o programa ainda subdivide as regiões resultantes da geometria da laje em função das diferenças de esforços atuantes, priorizando a melhoria do consumo de aço ou da trabalhabilidade.

Essa subdivisão pode ser adotada tanto para as armaduras das lajes quanto das continuidades (armaduras negativas), que, quando desativada, também, não leva em conta a diferença nos esforços atuantes. Nesse trabalho, como mostrado na Figura 46, optou-se por subdividir o detalhamento em faixas.

Figura 46: Subdivisão do detalhamento das armaduras das lajes em faixas

Regiões

Armadura das lajes

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar faixas: 15 %

Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais: 25 %

Escalonamento

☒ Desenhar ferros escalonados

Redução mínima para efetuar escalonamento: 15 %

Espaçamento máximo

Principal (escalonada): 30 cm

Secundária (escalonada): 30 cm

Armadura das continuidades

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar: 15 %

Comprimento mínimo para separar trechos: 100 cm

Malha base

Diâmetro: 8.0

Espaçamento (lajes maciças): 10 cm

Quantidade (lajes nervuradas): 2 c/ N

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

A separação das faixas dentro das regiões ocorre tanto para as armaduras das lajes quanto para as armaduras das continuidades, na configuração da “Fração do momento máximo para separar faixas” e na “Redução mínima na armadura para separar faixas”. No primeiro parâmetro é determinada uma porcentagem abaixo do momento máximo na qual será gerada uma nova faixa de armaduras, a qual deverá atender o comprimento mínimo para separar um trecho para as lajes, medida também configurada no programa. Como exemplo, caso seja adotado como parâmetro uma fração de 50% do momento máximo, as regiões em que apresentar valores inferiores a isso, serão separadas em uma nova faixa.

Na opção de “Redução mínima na armadura para separar faixas” é determinado um percentual mínimo de diferença de área de aço entre as faixas geradas para que elas sejam separadas ou não. Por exemplo, caso o valor adotado seja de 30%, as faixas só serão separadas caso a área de armadura de uma faixa seja 30% maior do que o da faixa adjacente. Quanto maior for o valor adotado, maior será a separação das regiões de armadura, menor o consumo de aço e maior a demanda de mão de obra.

No projeto de estudo foi adotado para “Fração do momento máximo para separar faixas” um percentual de 50%; e, para “Redução mínima na armadura para separar faixas”, o valor de 25%. Isso pode ser visto na Figura 47.

Figura 47: Configurações de dimensionamento das faixas das regiões nas lajes

Regiões

Armadura das lajes

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar faixas: 25 %

Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais: 100 %

Escalonamento

☒ Desenhar ferros escalonados

Redução mínima para efetuar escalonamento: 15 %

Espaçamento máximo

Principal (escalonada): 30 cm

Secundária (escalonada): 30 cm

Armadura das continuidades

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar: 25 %

Comprimento mínimo para separar trechos: 100 cm

Malha base

Diâmetro: 8.0

Espaçamento (lajes maciças): 10 cm

Quantidade (lajes nervuradas): 2 c/ N

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Outro parâmetro importante na configuração das regiões é o “Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais”, que determina qual deve ser a diferença de área de aço entre as regiões para que elas sejam agrupadas. No caso desse trabalho, como mostrado na Figura 48, foi adotado o valor de 100%, visto que não foi optado por juntar regiões, já que essa configuração poderia alterar consideravelmente os valores finais de consumo de aço pretendidos.

Figura 48: Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais

Regiões

Armadura das lajes

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar faixas: 25 %

Percentual mínimo de armadura para agrupar regiões adicionais: 100 %

Escalonamento

☒ Desenhar ferros escalonados

Redução mínima para efetuar escalonamento: 15 %

Espaçamento máximo

Principal (escalonada): 30 cm

Secundária (escalonada): 30 cm

Armadura das continuidades

☒ Separar faixas se possível

Fração do momento máximo para separar faixas: 50 %

Redução mínima na armadura para separar: 25 %

Comprimento mínimo para separar trechos: 100 cm

Malha base

Diâmetro: 8.0

Espaçamento (lajes maciças): 10 cm

Quantidade (lajes nervuradas): 2 c/ N

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

4.4 Materiais, cargas e características físicas dos elementos estruturais

4.4.1 Lajes

Para o dimensionamento foi optado por engastar todas as lajes e utilizar concreto com Resistência Característica à Compressão $f_{ck} = 30$ MPa para as lajes, como mostra na Figura 49, concreto amplamente utilizado em edifícios residenciais e comerciais de médio porte. Além disso, foi adotada uma espessura inicial de dimensionamento constante para todas as lajes de 12 centímetros, e Classe de Agressividade Ambiental II, considerando agressividade moderada para um projeto em um ambiente urbano.

Figura 49: Classes de concreto utilizado

Elementos	Concreto
Vigas	C-30
Pilares	C-30
Lajes	C-30
Reservatórios	C-30
Blocos	C-25
Sapatas	C-25
Tubulões	C-20
Muros	C-30
Radier	C-25

Fonte: AltoQi Eberick (2019)

Por se tratar de um edifício de apartamentos, a ABNT NBR 6120:2019 prevê que o carregamento accidental (q_k) deva ser $1,5 \text{ kN/m}^2$ ou $2,0 \text{ kN/m}^2$, dependendo da utilização do cômodo. Nesse projeto, foi adotado o valor de $2,0 \text{ kN/m}^2$ para todo o pavimento. Além disso, O carregamento permanente das lajes foi previsto supondo quatro camadas de materiais, sendo elas de argamassa de nivelamento, argamassa de assentamento, piso porcelanato e argamassa de revestimento. A espessura de cada camada, bem como o peso específico de cada material adotado de acordo com a ABNT NBR 6120:2019, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Carregamento das lajes

Elemento	Material	Espessura (m)	Peso específico γ (kN/m^3)	Carga (kN/m^2)
Laje	concreto armado	0,12	25	3
Argamassa de nivelamento	cim + cal + areia	0,025	19	0,475
Argamassa de assentamento	cim + areia	0,015	21	0,315
Piso	porcelanato	0,01	22	0,22
Argamassa de revestimento	gesso	0,01	12,5	0,125
Carga de revestimento				1,135
Carga de revestimento adotada				1,15
Carga permanente total (g_k)				4,15
Carga accidental (q_k)				2

Fonte: autor

Além dos carregamentos permanente e acidental mostrados na Tabela 1, nos locais onde existem paredes (ou a possibilidade de ser construída uma parede em alvenaria), foram adicionadas cargas lineares de paredes na laje com 290 cm de altura e 15 cm de espessura. O peso específico aparente dessas paredes foi de 1300 kgf/m^3 , valor especificado na ABNT NBR 6120:2019 para tijolos furados.

4.4.2 Vigas

Como as vigas não são os objetivos principais de análise desse estudo, não foi considerada a preocupação em aperfeiçoar o dimensionamento desses elementos. Por isso, foram adotadas seções suficientes para que o projeto pudesse ser processado, sendo a maioria delas com seção transversal de 15 cm x 50 cm, com exceções das vigas V17 e V19 que recebem as vigas das sacadas, que precisaram ser aumentadas para ser processadas, passando a ter seção transversal de 22 cm x 60 cm.

O concreto utilizado nas vigas também possui Resistência Característica à Compressão $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, como nas lajes. Além disso, as vigas foram carregadas com cargas lineares de parede com 250 cm de altura e 15 cm de espessura, com exceção das vigas da sacada que foram estipuladas paredes balcão com 130 cm de altura e mesma espessura. O peso específico aparente dessas paredes também foi de 1300 kgf/m^3 .

4.4.3 Pilares

No caso dos pilares, também não foi dado enfoque em aperfeiçoar o dimensionamento, visto que não foram objetos de análise desse trabalho. Dessa forma, foram adotadas seções suficientes para que o edifício fosse processado.

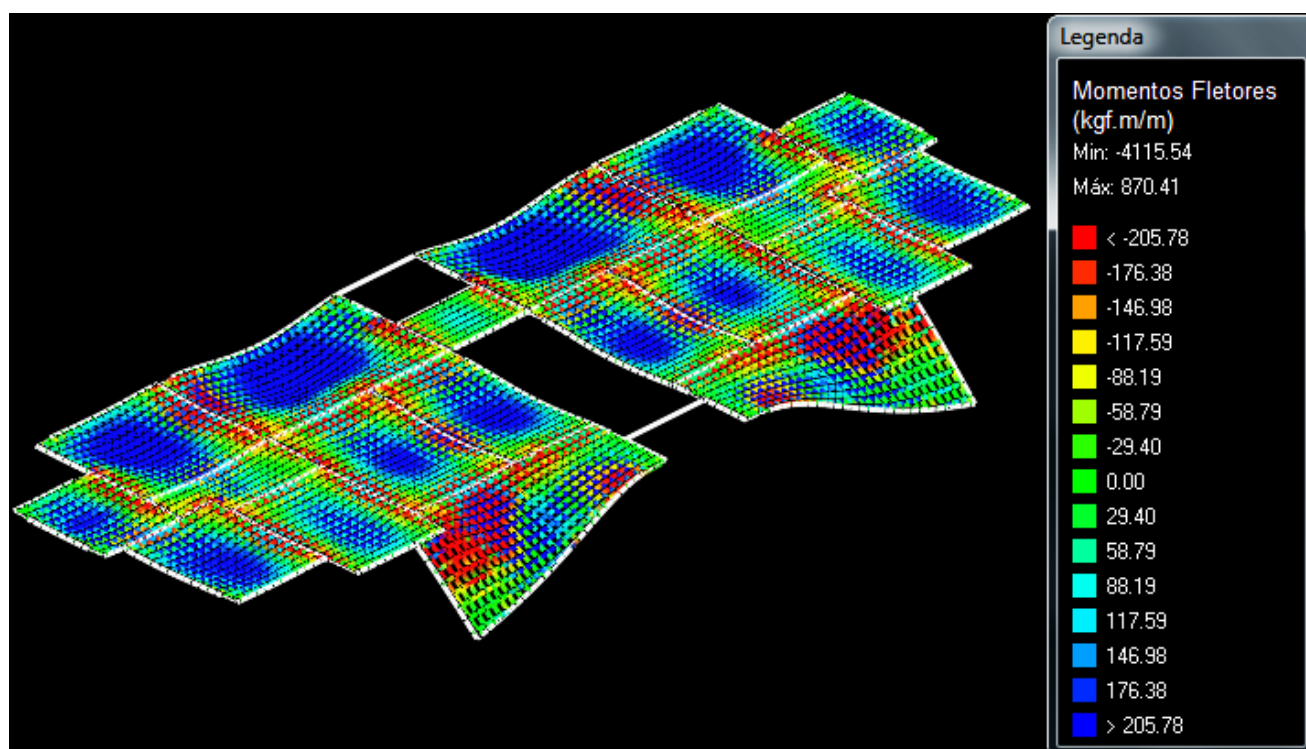
Entretanto, foi percebido que os pilares podem influenciar consideravelmente nos resultados das armaduras das lajes, principalmente quando estão localizados nas quinas das mesmas. Isso ocorre devido ao pico de momento negativo gerado por eles nas proximidades do seu entorno, o que aumenta os esforços nesses locais e, conseqüentemente, a necessidade de maiores quantidades de armadura negativa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados de dimensionamento do modelo “A”

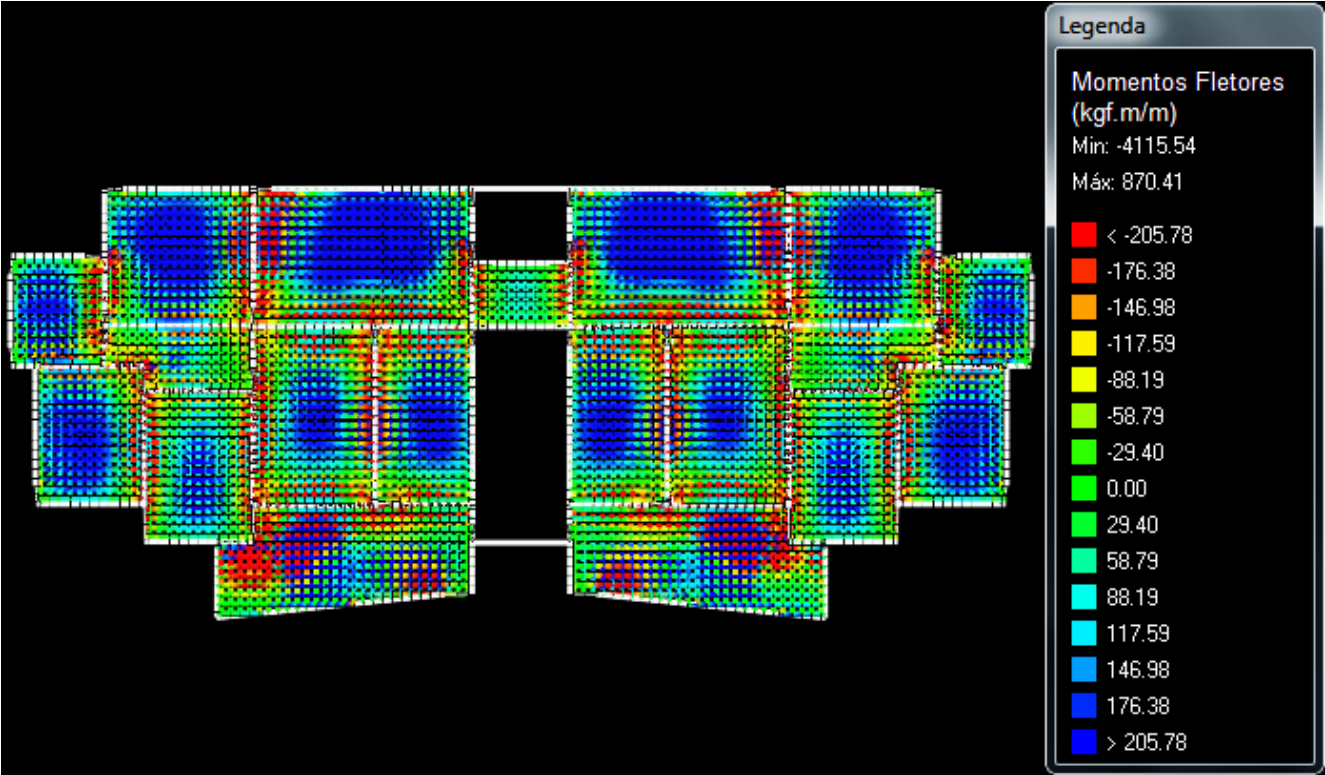
Após processado o modelo “A”, a grelha deformada e a grelha de momentos fletores do pavimento tipo, podem ser vistas, respectivamente, nas Figuras 50 e 51. As grelhas obtidas no modelo de dimensionamento, para os momentos Wood&Armer negativos e positivos, são vistos nas Figuras 52 e 53.

Figura 50: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “A”



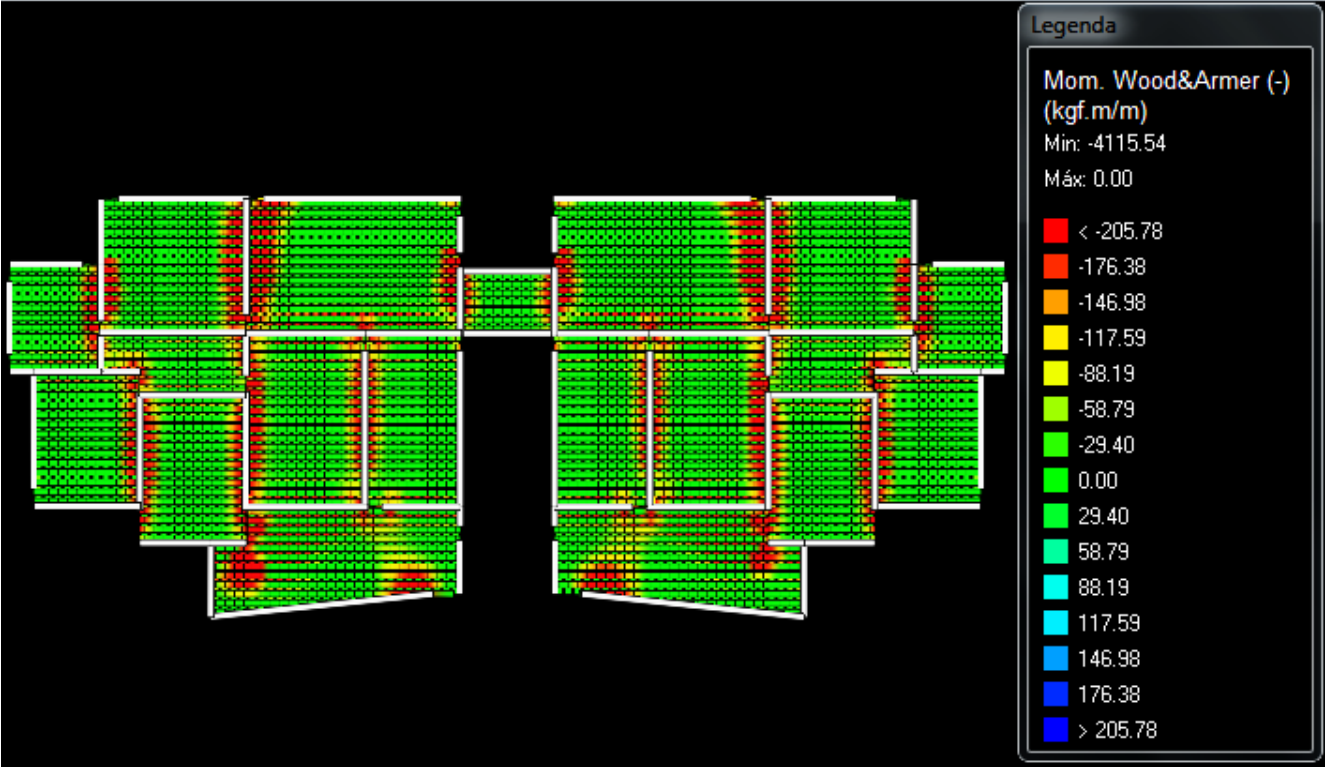
Fonte: autor

Figura 51: Grelha de momentos fletores do modelo “A”



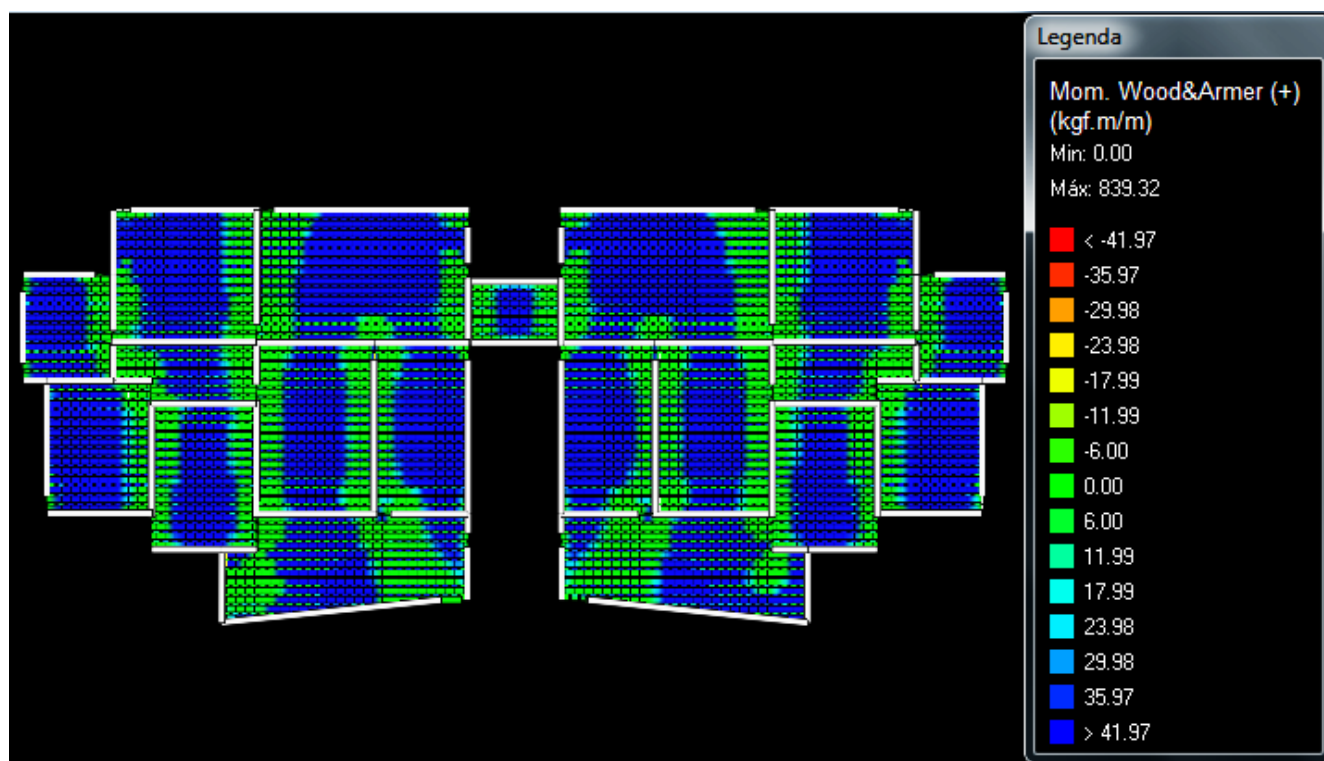
Fonte: autor

Figura 52: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “A”



Fonte: autor

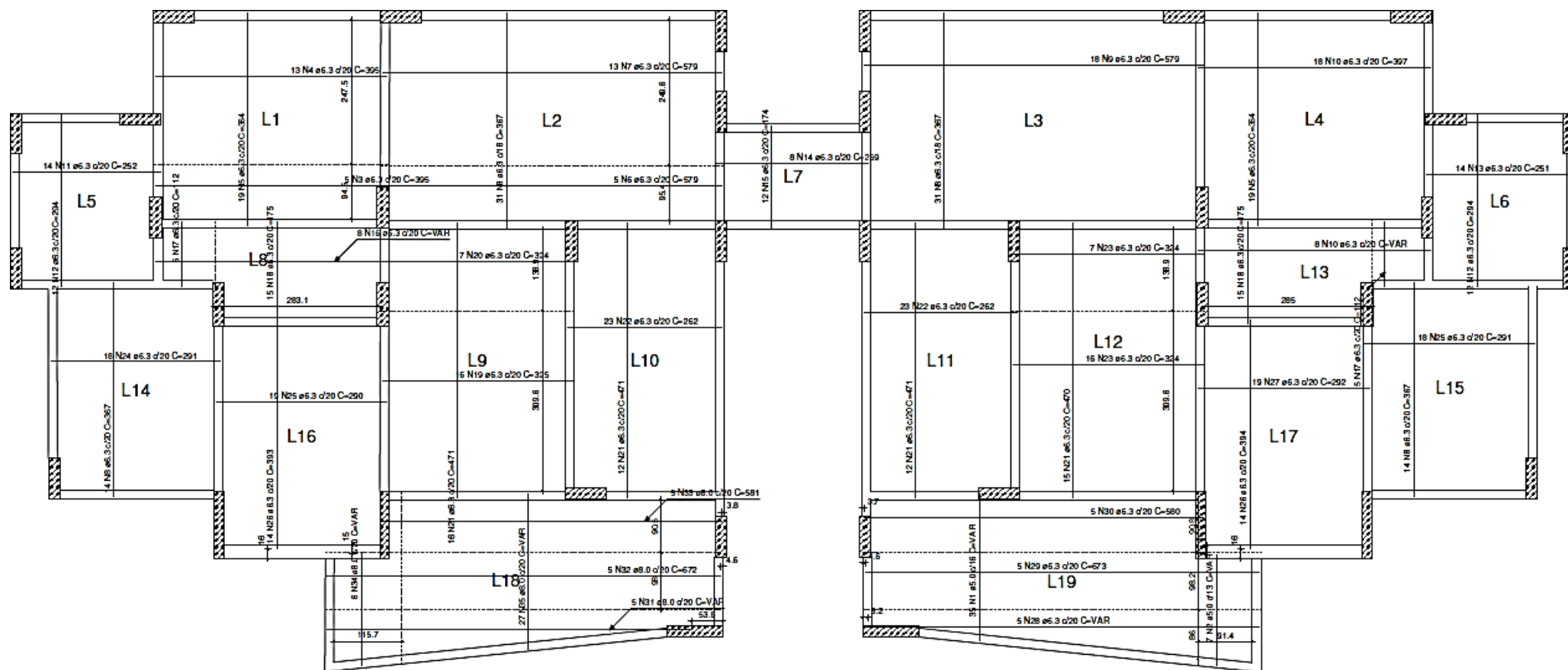
Figura 53: Grelha de Momento Wood&Armer positivos do modelo “A”



Fonte: autor

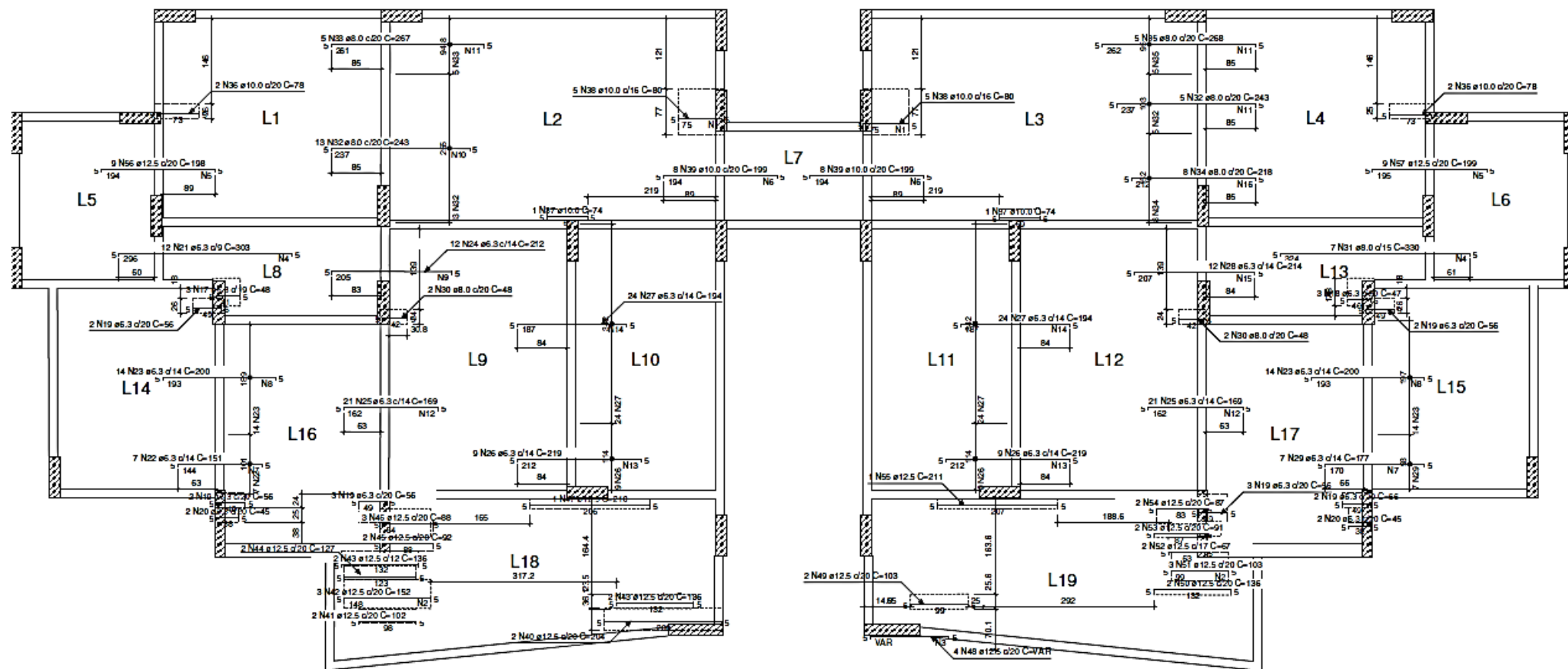
A distribuição das armaduras positivas e negativas são mostradas nas Figuras 54, 55 e 56. Além disso, o relatório de consumo de aço e concreto para as lajes e vigas de todo o edifício, nesse modelo, incluindo os sete pavimentos tipo, a cobertura e a laje do barrilete, são vistos nos relatórios das Tabelas 2 e 3.

Figura 54: Armações positivas pavimento tipo modelo “A”



Fonte: autor

Figura 55: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “A”



Fonte: autor

Tabela 2: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “A”

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)
Barrilete	Vigas	108.4	2.2	33.8	49.1
	Lajes	92.3	2.5	21.1	36.5
	Total	200.7	4.7	54.9	42.4
Cobertura	Vigas	791.4	14.8	223.2	53.5
	Lajes	1526.9	25.2	209.8	60.7
	Total	2318.3	40.0	433.0	58.0
Tipo 7	Vigas	802.0	14.8	223.2	54.2
	Lajes	1472.6	25.2	209.8	58.5
	Total	2274.6	40.0	433.0	56.9
Tipo 6	Vigas	832.5	14.8	223.2	56.3
	Lajes	1472.3	25.2	209.8	58.5
	Total	2304.8	40.0	433.0	57.7
Tipo 5	Vigas	885.3	14.8	223.2	59.8
	Lajes	1474.8	25.2	209.8	58.6
	Total	2360.1	40.0	433.0	59.0
Tipo 4	Vigas	936.5	14.8	223.2	63.3
	Lajes	1472.6	25.2	209.8	58.5
	Total	2409.0	40.0	433.0	60.3
Tipo 3	Vigas	987.0	14.8	223.2	66.7
	Lajes	1471.9	25.2	209.8	58.5
	Total	2458.9	40.0	433.0	61.5
Tipo 2	Vigas	1085.3	14.8	223.2	73.4
	Lajes	1474.9	25.2	209.8	58.6
	Total	2560.2	40.0	433.0	64.1
Tipo 1	Vigas	1148.2	14.8	223.2	77.6
	Lajes	1472.5	25.2	209.8	58.5
	Total	2620.7	40.0	433.0	65.6
Térreo	Vigas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: autor

Tabela 3: Consumo total de aço e concreto do modelo “A”

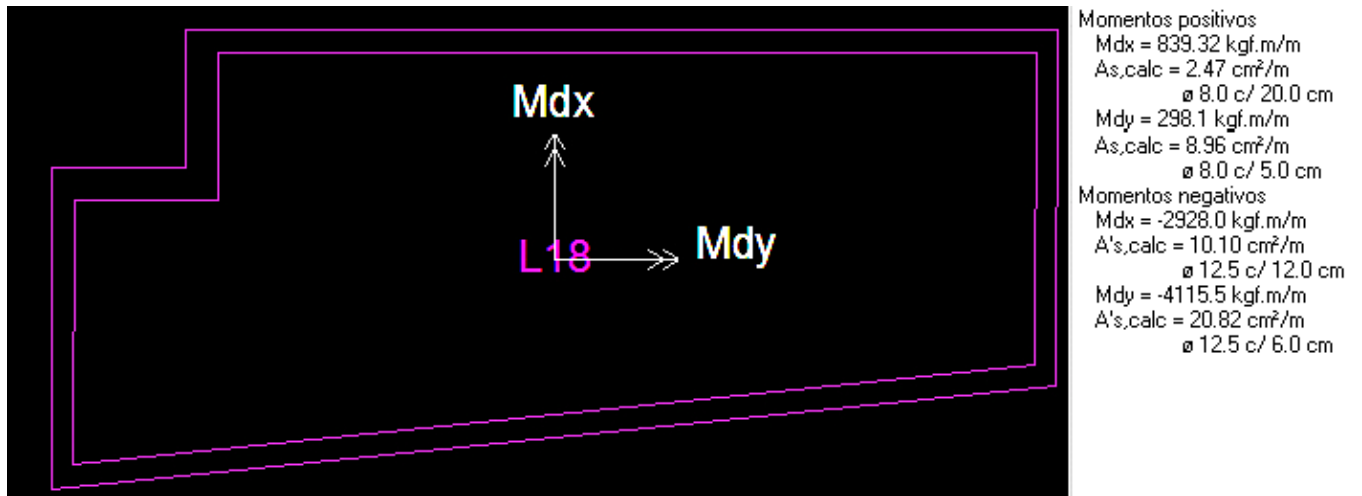
		Vigas	Lajes	Total
Peso total	CA50	6172.3	10262.3	16434.6
	CA60	1404.4	1668.4	3072.8
+ 10% (kg)	Total	7576.7	11930.7	19507.4
Volume concreto (m³)	C-30	120.6	203.9	324.5
Área de forma (m²)		1819.6	1699.4	3519.1
Consumo de aço (kgf/m³)		62.8	58.5	60.1

Fonte: autor

Devido ao fato desse modelo apresentar lajes com menos recortes, as lajes L18 e L19 das sacadas foram as que apresentaram maiores regiões de armaduras e consumo de aço. Isso, possivelmente, ocorreu por causa dessas lajes estarem com uma de suas extremidades em balanço e possuírem uma quina em seu interior, responsável por gerar um pico elevado de esforços negativos. Os máximos momentos de cálculo obtidos, bem como as áreas de aço calculadas onde ocorrem esses esforços na laje L18, são mostrados na Figura 57. Para a laje L19,

os valores obtidos foram bastante semelhantes, devido ao fato de essas lajes apresentarem as mesmas condições para dimensionamento.

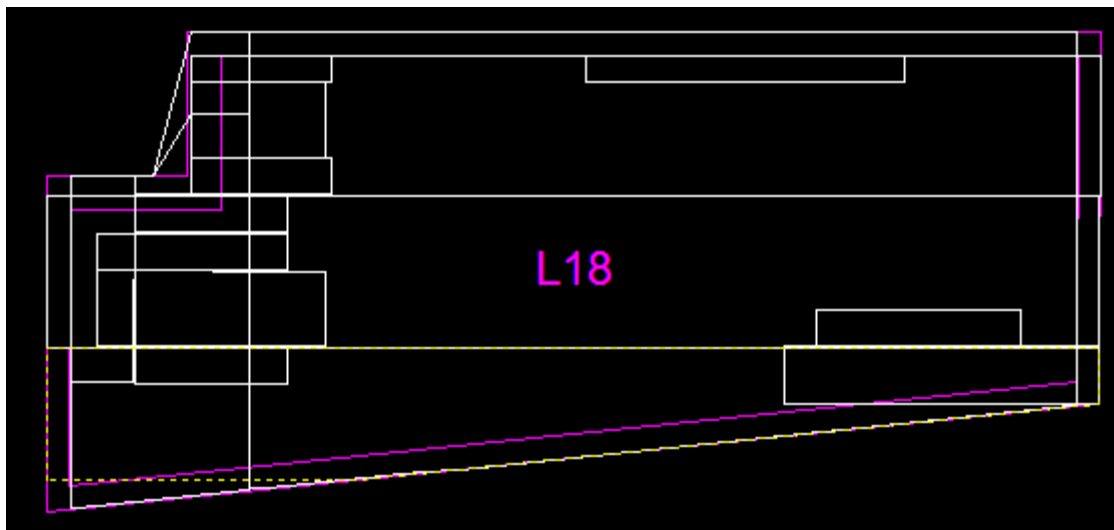
Figura 57: Momentos de cálculo e área de aço para a L18 modelo “A”



Fonte: autor

Além disso, foram obtidas 17 diferentes regiões de armaduras que são vistas na Figura 58. Vale lembrar que para cada região são obtidos esforços e armaduras diferentes, de acordo com os valores configurados previamente.

Figura 58: Regiões de armadura da laje L18 modelo “A”

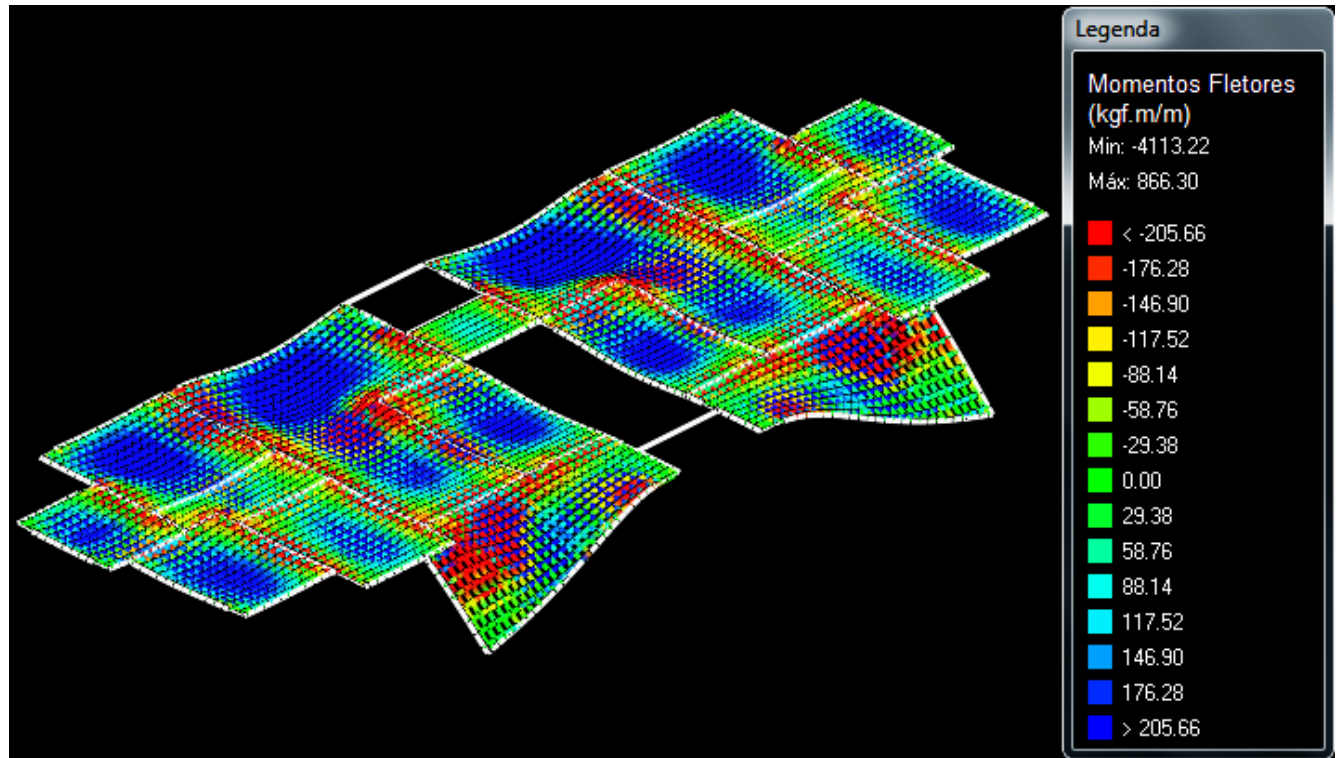


Fonte: autor

5.2 Resultados de dimensionamento do modelo “B”

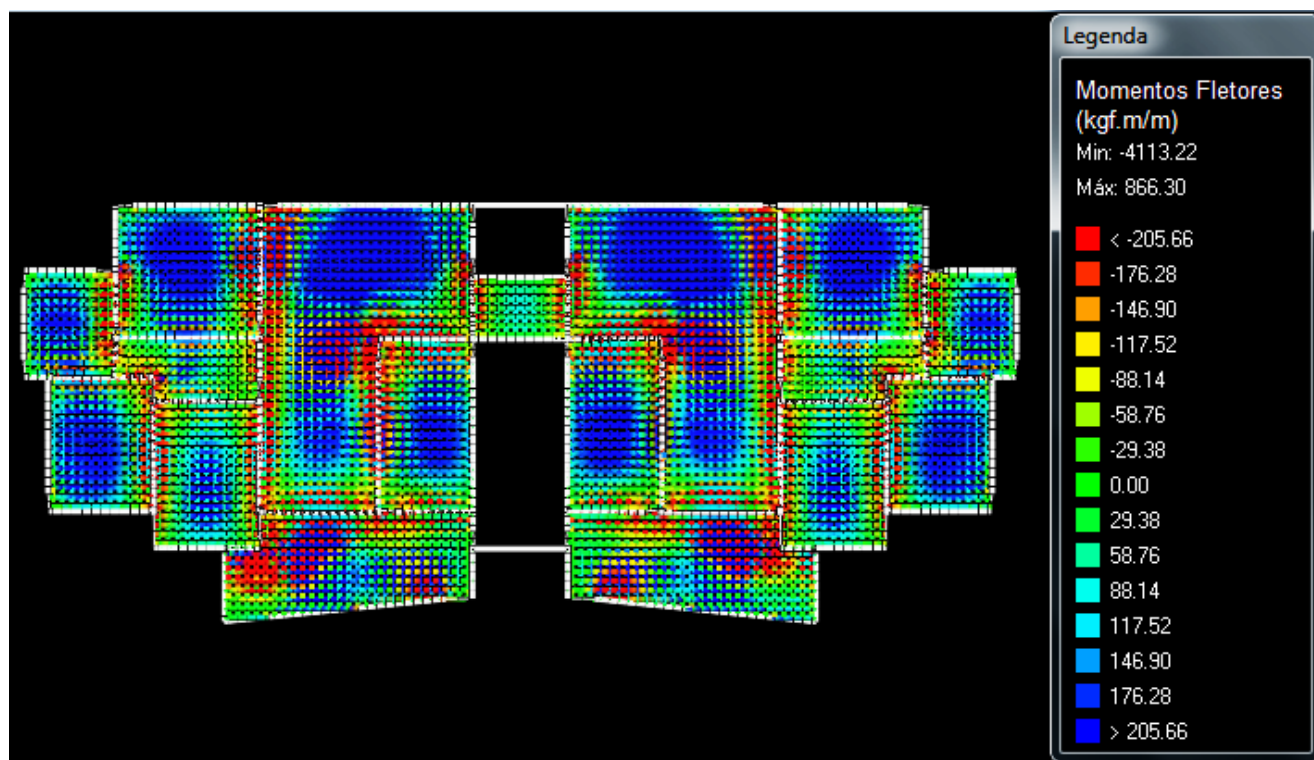
Após processado o modelo “B”, a grelha deformada e a grelha de momentos fletores do pavimento tipo, podem ser vistas respectivamente nas Figuras 59 e 60.

Figura 59: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “B”



Fonte: autor

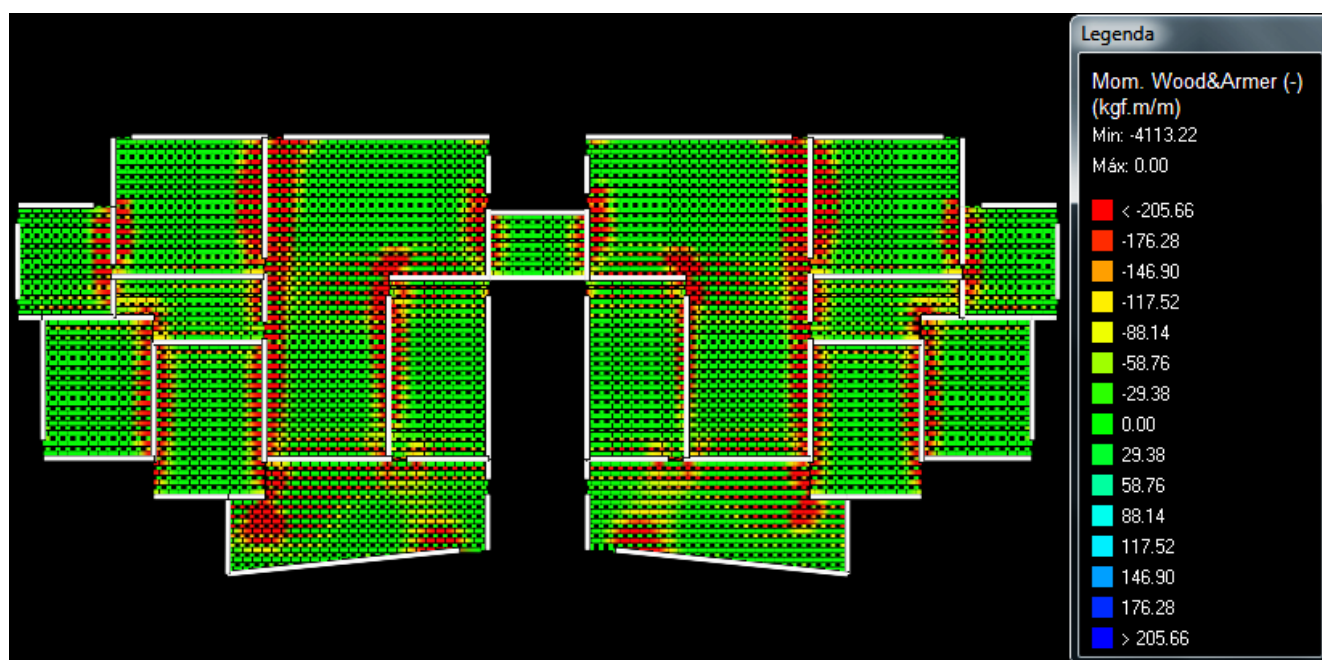
Figura 60: Grelha de momentos fletores do modelo “B”



Fonte: autor

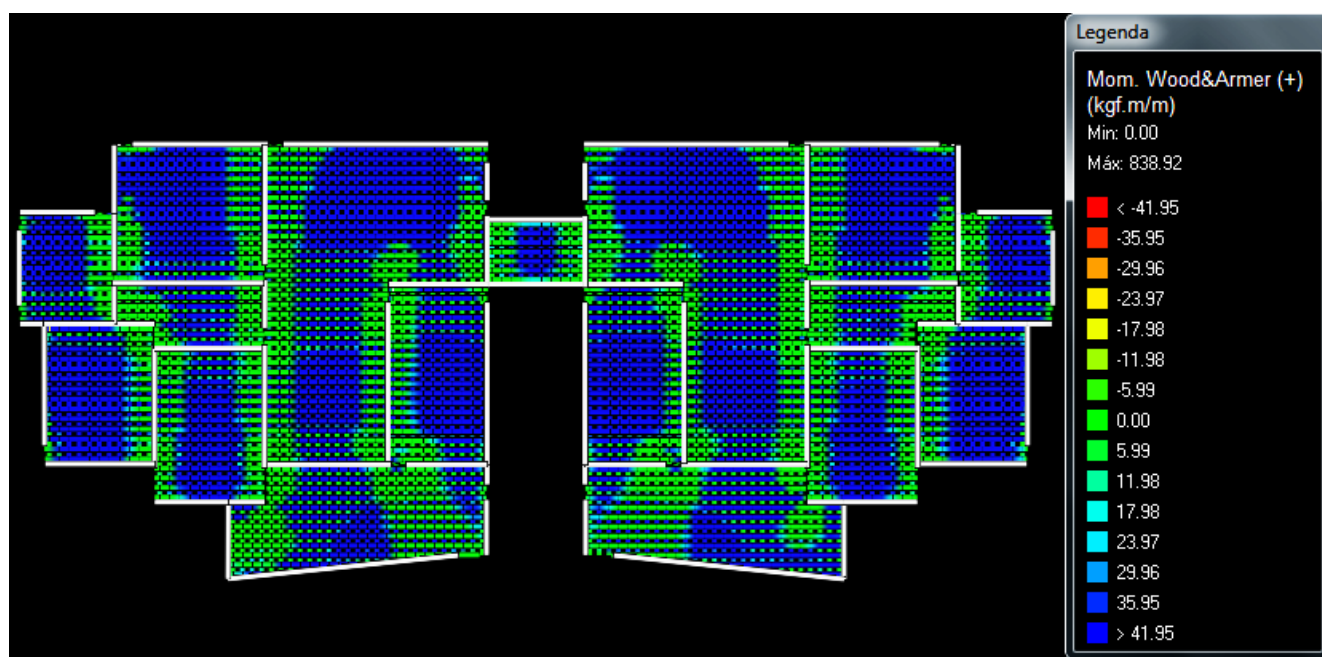
Como pode ser visto nas grelhas de momentos fletores das lajes L (L2 e L3), ocorrem em seu interior a presença de momentos fletores negativos, o que não é comum, visto que, normalmente lajes são dimensionadas para momentos positivos em seu interior. Isso possivelmente ocorre devido às condições de apoio da laje, a sua geometria, ao seu tamanho e ao carregamento na qual está submetida. As Figuras 61 e 62, mostram as grelhas de momentos negativos e positivos de dimensionamento Wood&Armer, o que, também, comprova a existência desses momentos negativos no interior da laje L.

Figura 61: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “B”



Fonte: autor

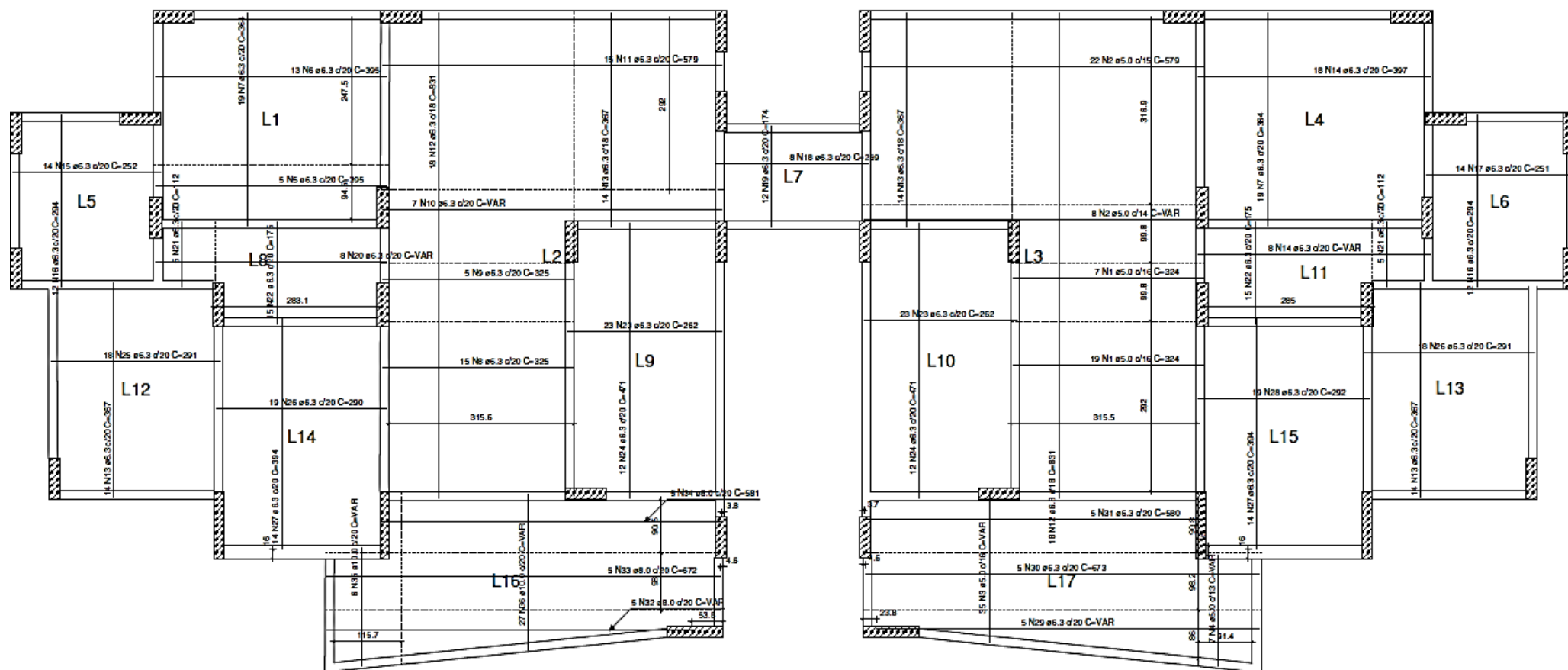
Figura 62: Grelha de Momento Wood&Armer positivos do modelo “B”



Fonte: autor

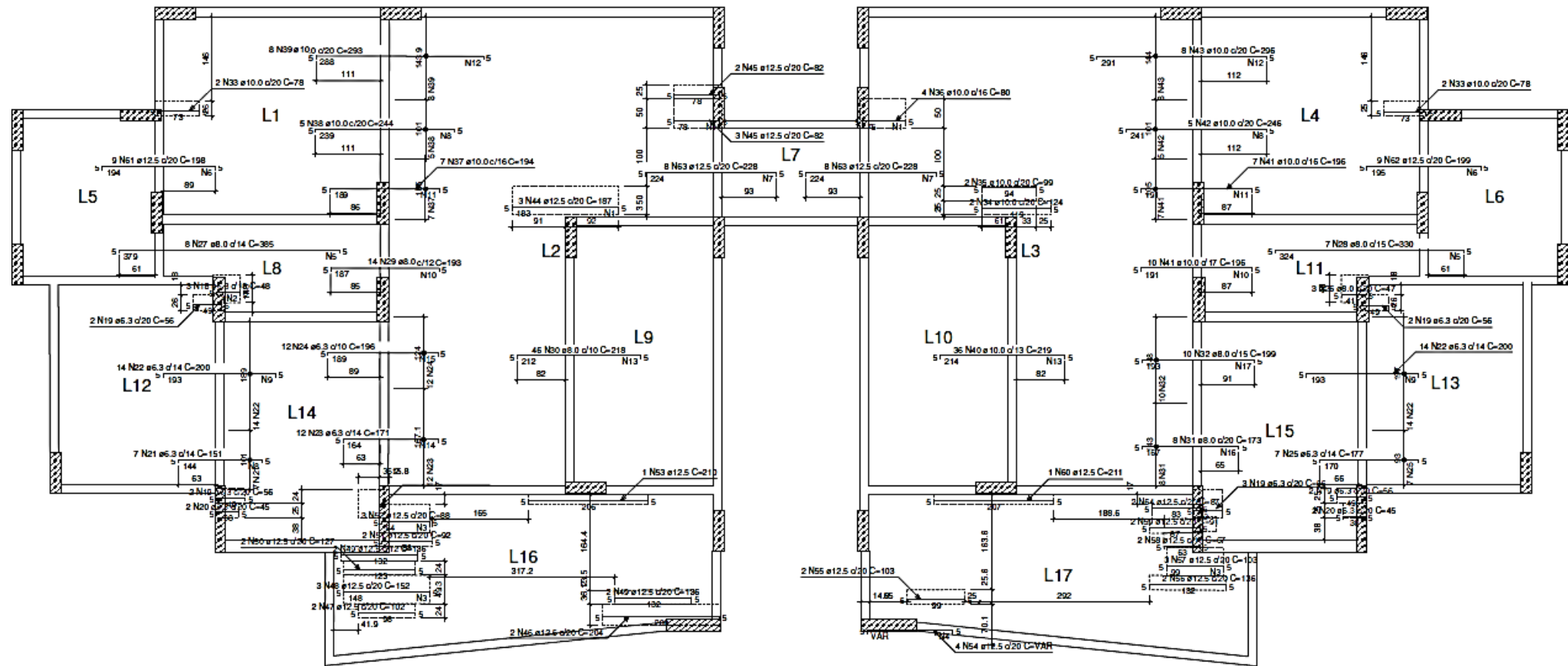
A distribuição das armaduras positivas e negativas são mostradas nas Figuras 63, 64 e 65. Além disso, o relatório de consumo de aço e concreto para as lajes e vigas de todo o edifício, nesse modelo, incluindo os sete pavimentos tipo, a cobertura e a laje do barrilete, são vistos no relatório das Tabelas 4 e 5.

Figura 63: Armações positivas pavimento tipo modelo “B”



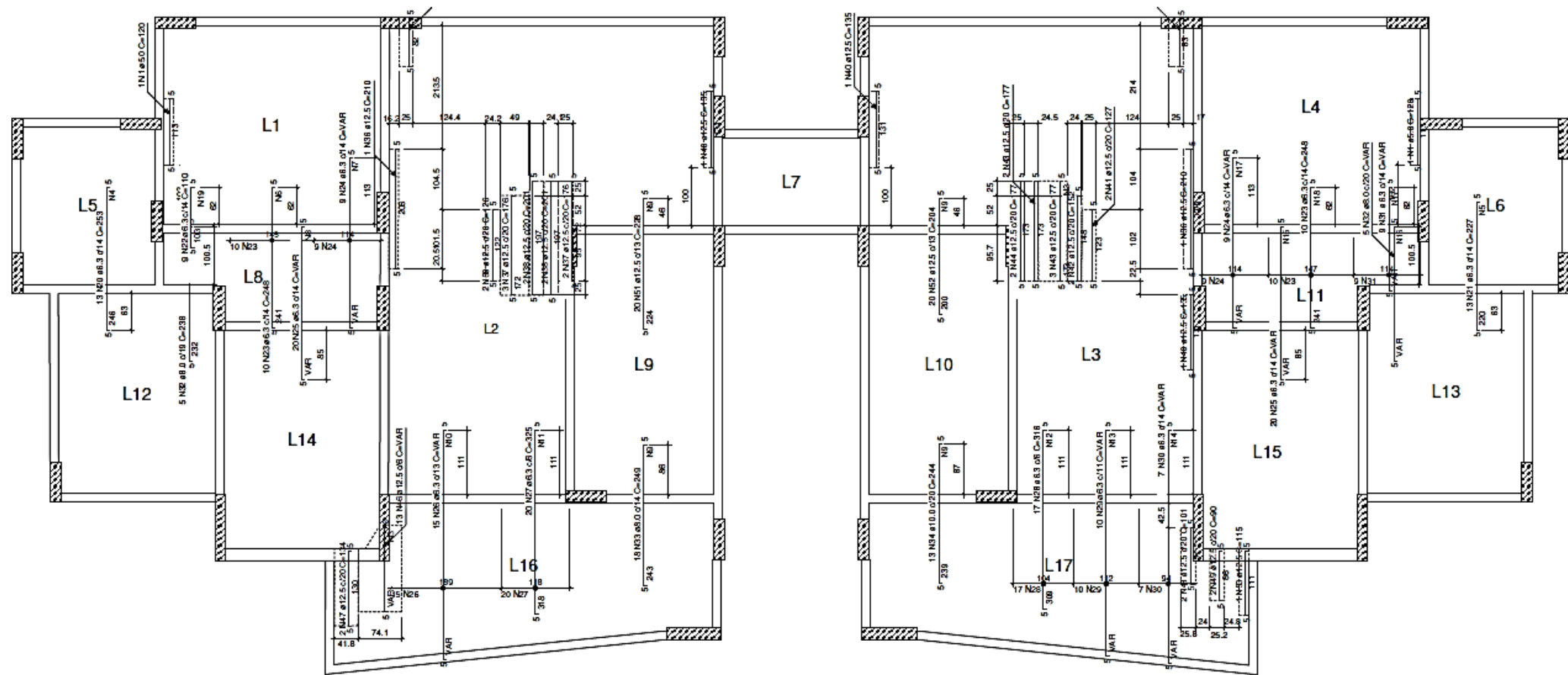
Fonte: autor

Figura 64: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “B”



Fonte: autor

Figura 65: Armações negativas direção Y pavimento tipo modelo “B”



Fonte: autor

Tabela 4: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “B”

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)
Barrilete	Vigas	108.4	2.2	33.8	49.1
	Lajes	92.3	2.5	21.1	36.5
	Total	200.7	4.7	54.9	42.4
Cobertura	Vigas	766.5	14.3	215.4	53.7
	Lajes	1619.9	25.3	210.7	64.1
	Total	2386.5	39.6	426.1	60.3
Tipo 7	Vigas	779.1	14.3	215.4	54.6
	Lajes	1642.2	25.3	210.7	64.9
	Total	2421.3	39.6	426.1	61.2
Tipo 6	Vigas	805.7	14.3	215.4	56.4
	Lajes	1644.6	25.3	210.7	65.0
	Total	2450.3	39.6	426.1	61.9
Tipo 5	Vigas	861.9	14.3	215.4	60.4
	Lajes	1644.2	25.3	210.7	65.0
	Total	2506.1	39.6	426.1	63.3
Tipo 4	Vigas	914.0	14.3	215.4	64.0
	Lajes	1646.2	25.3	210.7	65.1
	Total	2560.3	39.6	426.1	64.7
Tipo 3	Vigas	964.9	14.3	215.4	67.6
	Lajes	1644.5	25.3	210.7	65.0
	Total	2609.4	39.6	426.1	65.9
Tipo 2	Vigas	1058.9	14.3	215.4	74.1
	Lajes	1642.1	25.3	210.7	64.9
	Total	2701.0	39.6	426.1	68.3
Tipo 1	Vigas	1120.7	14.3	215.4	78.5
	Lajes	1644.3	25.3	210.7	65.0
	Total	2765.0	39.6	426.1	69.9
Térreo	Vigas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: autor

Tabela 5: Consumo total de aço e concreto do modelo “B”

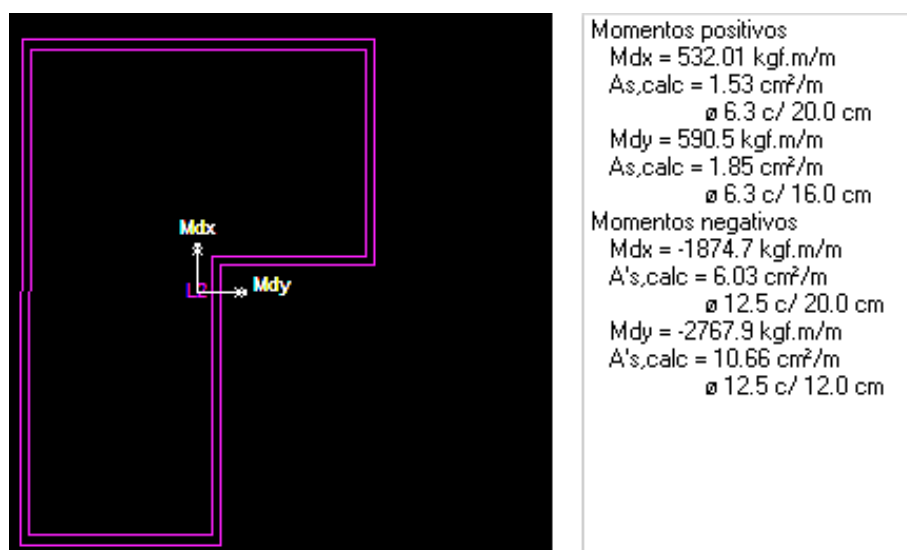
		Vigas	Lajes	Total
Peso total	CA50	6017.7	11256.5	17274.3
	CA60	1362.5	1963.7	3326.3
	Total	7380.3	13220.3	20600.5
+ 10% (kg)				
Volume concreto (m³)	C-30	116.5	204.8	321.3
Área de forma (m²)		1756.7	1707.0	3463.7
Consumo de aço (kgf/m³)		63.4	64.5	64.1

Fonte: autor

Como esse modelo apresenta duas lajes em L (L2 e L3) em seu interior, essas lajes somadas as das sacadas, foram as que apresentaram maiores regiões de armaduras e consumo de aço. No caso das lajes L, devido à geometria, ocorre concentração de esforços nas quinas, o que justifica o maior número de regiões e consumo de aço nesses locais. Os máximos momentos de cálculo obtidos, bem como as áreas de aço calculadas onde ocorrem esses esforços na laje L2, são

mostrados na Figura 66. Para a laje L3, os valores obtidos foram bastante semelhantes, devido ao fato dessas lajes apresentarem as mesmas condições para dimensionamento.

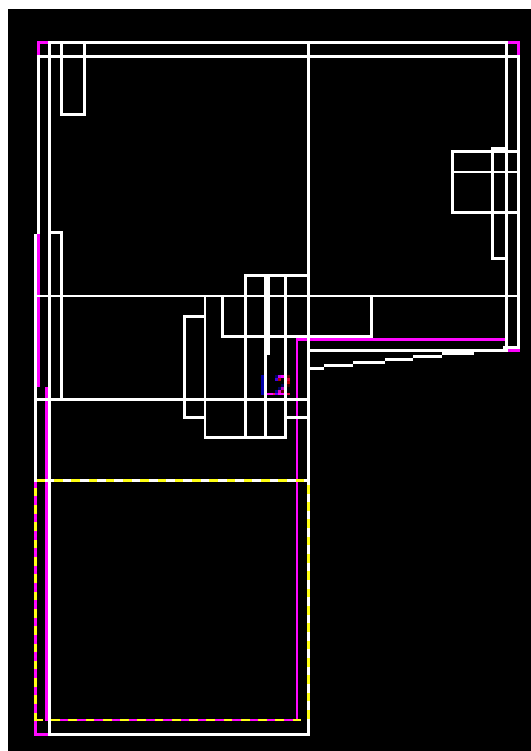
Figura 66: Momentos de cálculo e área de aço para a L2 modelo “B”



Fonte: autor

Para a L2 ainda foram obtidas 17 diferentes regiões de armaduras que podem ser vistas na Figura 67.

Figura 67: Regiões de armadura da laje L2 modelo “B”

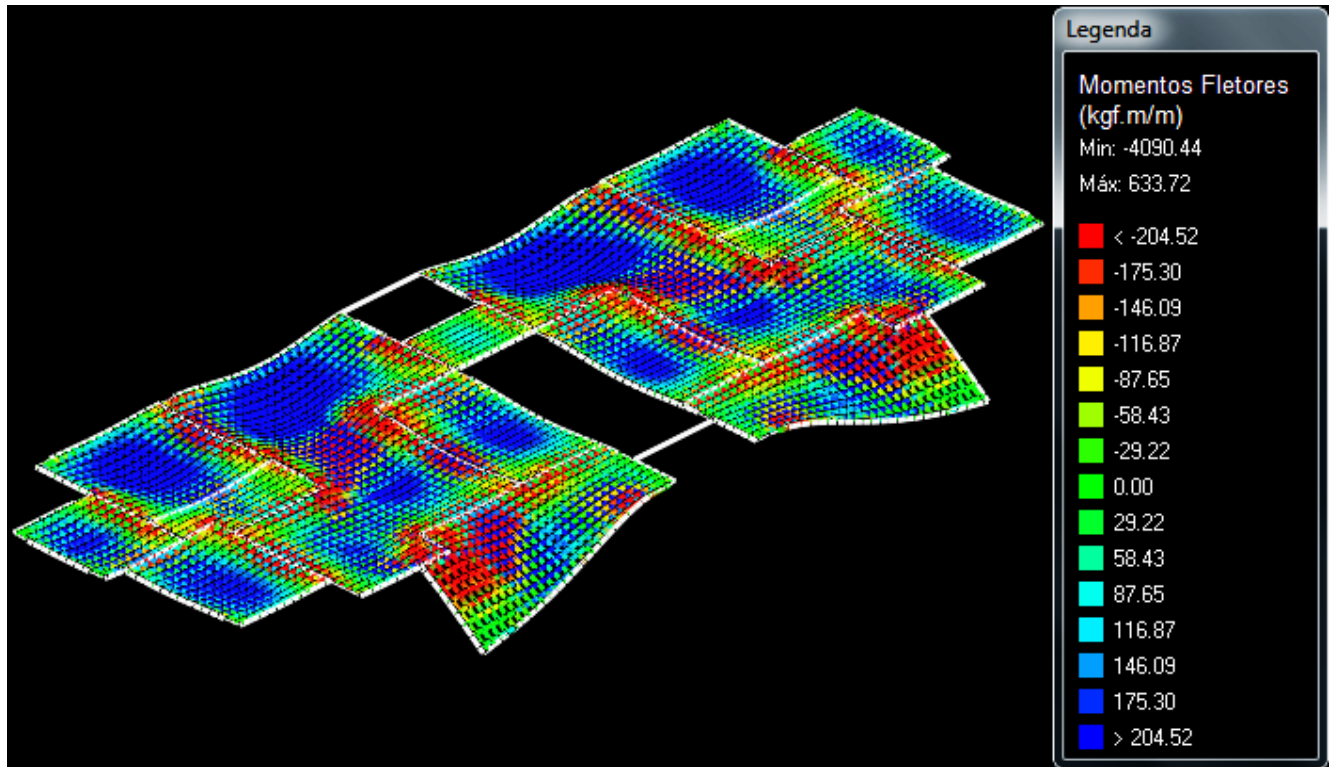


Fonte: autor

5.3 Resultados de dimensionamento do modelo “C”

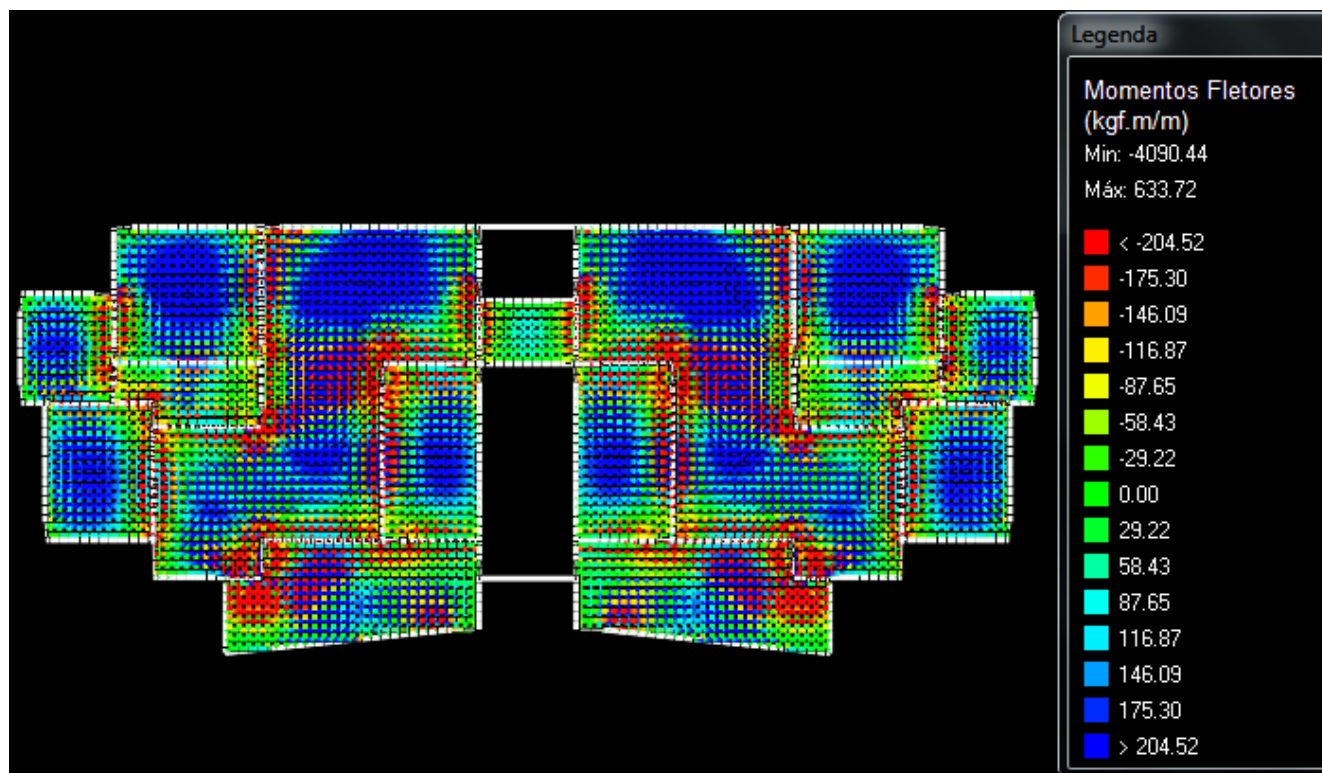
Após processado o modelo “C”, a grelha deformada e a grelha de momentos fletores do pavimento tipo, podem ser vistas respectivamente nas Figuras 68 e 69.

Figura 68: Grelha deformada de momentos fletores do modelo “C”



Fonte: autor

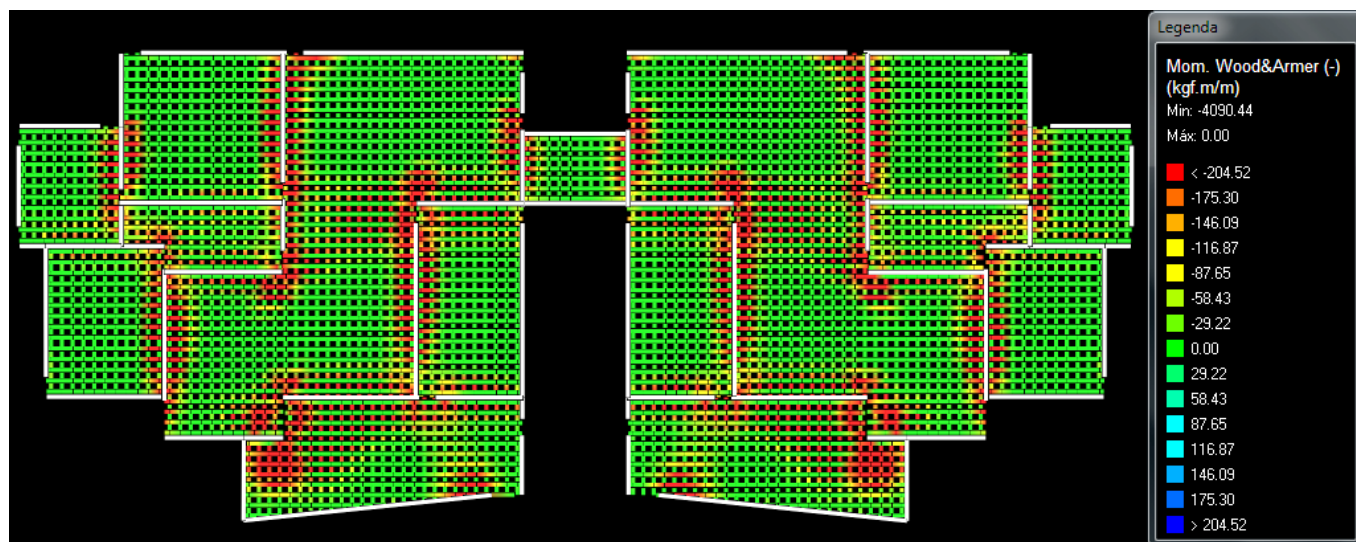
Figura 69: Grelha de momentos fletores do modelo “C”



Fonte: autor

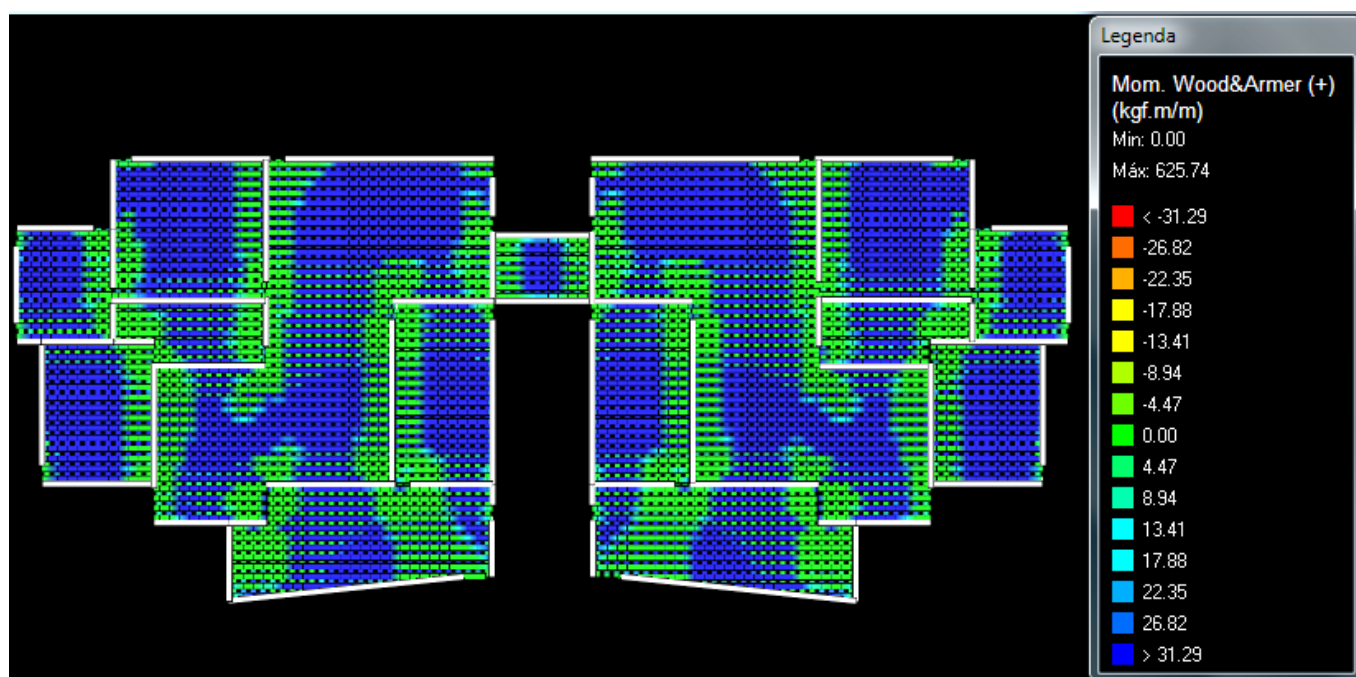
Como podem ser vistos nas Figuras 68 e 69 e também nas Figuras 70 e 71 que mostram os diagramas positivos e negativos de dimensionamento Wood&Armer, também ocorrem no interior das lajes L2 e L3 (lajes da sala dos apartamentos) regiões que apresentam momentos negativos (regiões de cor vermelha), fato também inesperado, visto que, via de regra, a maioria das lajes possuem apenas momentos positivos no seu interior. No entanto, acredita-se que, nesse caso, também, esses momentos negativos internos, sejam gerados devido à geometria da própria laje, no qual o carregamento da estrutura tende a inverter o diagrama de momentos nesses locais.

Figura 70: Grelha de Momento Wood&Armer negativos do modelo “C”



Fonte: autor

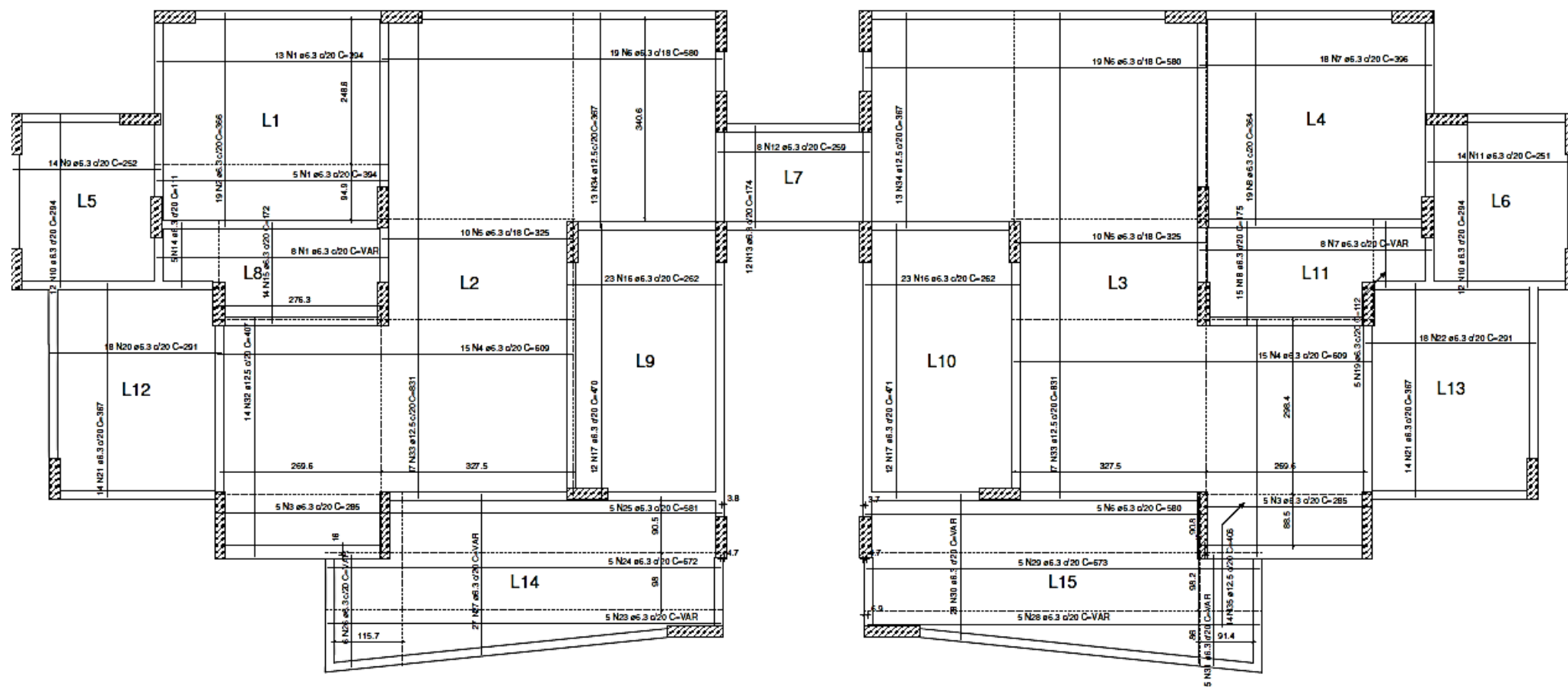
Figura 71: Grelha de Momento Wood&Armer positivo do modelo “C”



Fonte: autor

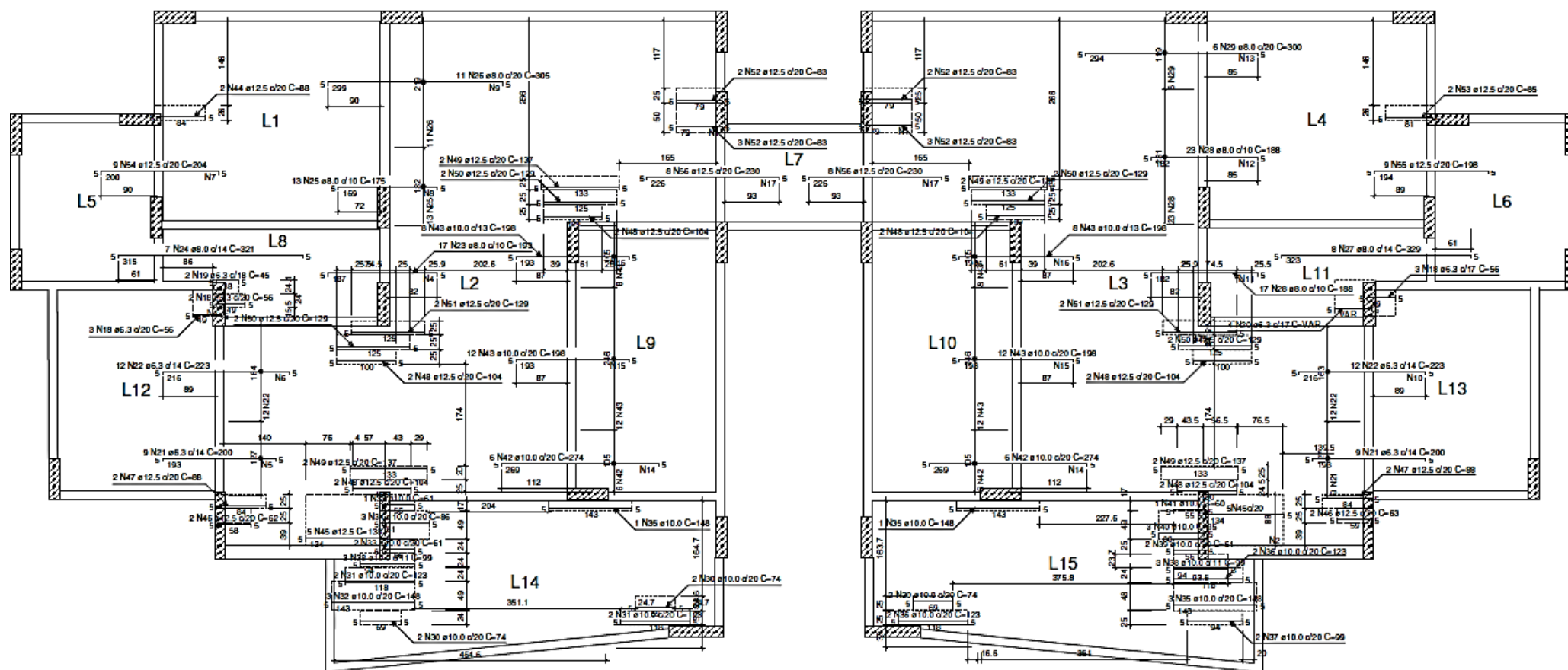
A distribuição das armaduras positivas e negativas são mostradas nas Figuras 72, 73 e 74. Além disso, o relatório de consumo de aço e concreto para as lajes e vigas de todo o edifício, nesse modelo, incluindo os sete pavimentos tipo, a cobertura e a laje do barrilete, são vistos no relatório das Tabelas 6 e 7.

Figura 72: Armações positivas pavimento tipo modelo “C”



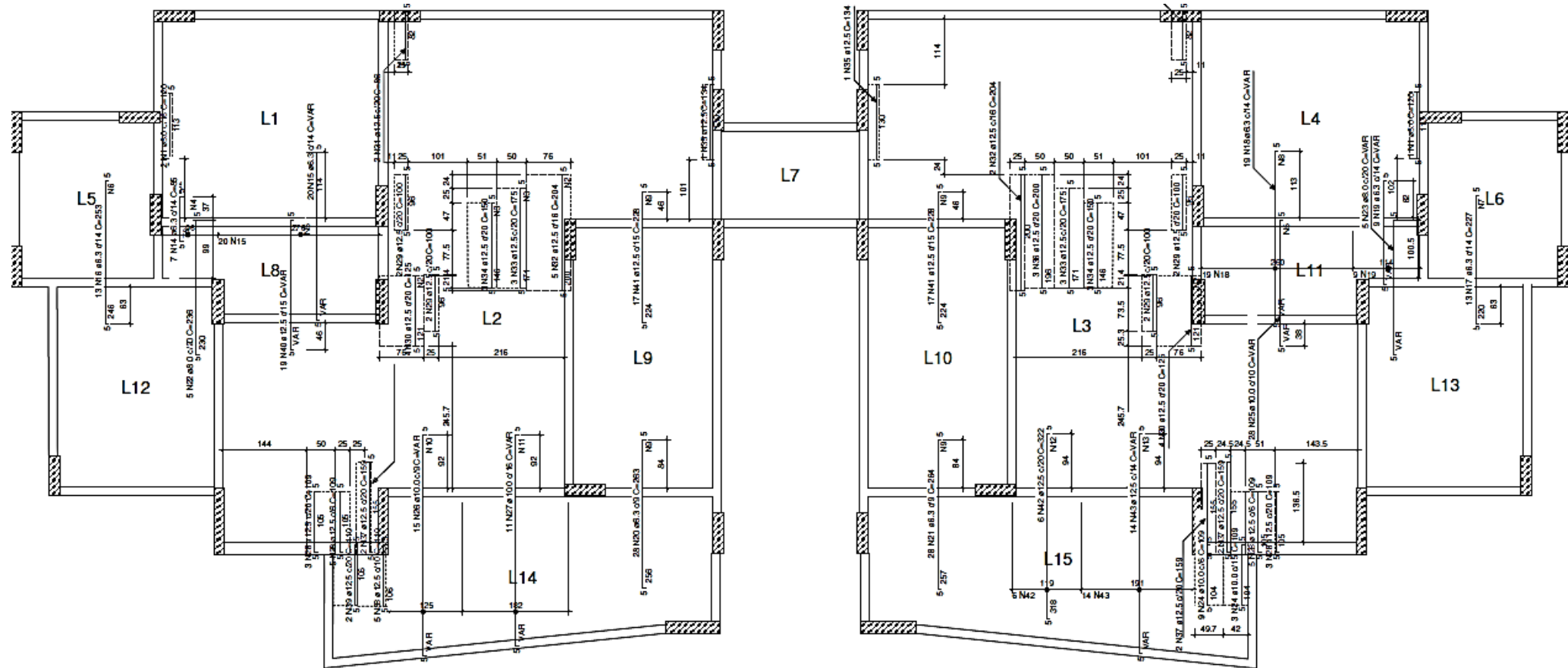
Fonte: autor

Figura 73: Armações negativas direção X pavimento tipo modelo “C”



Fonte: autor

Figura 74: Armações negativas direção Y pavimento tipo modelo “C”



Fonte: autor

Tabela 6: Consumo de aço e concreto por pavimento modelo “C”

Pavimento	Elemento	Peso do aço +10 % (kg)	Volume de concreto (m³)	Área de forma (m²)	Consumo de aço (kg/m³)
Barrilete	Vigas	112.4	2.2	33.8	50.9
	Lajes	69.2	2.5	21.1	27.4
	Total	181.6	4.7	54.9	38.3
Cobertura	Vigas	728.2	13.7	207.0	53.0
	Lajes	2181.6	25.4	211.7	85.9
	Total	2909.8	39.1	418.7	74.4
Tipo 7	Vigas	741.4	13.7	207.0	54.0
	Lajes	2142.0	25.4	211.7	84.3
	Total	2883.4	39.1	418.7	73.7
Tipo 6	Vigas	767.1	13.7	207.0	55.8
	Lajes	2142.1	25.4	211.7	84.3
	Total	2909.2	39.1	418.7	74.3
Tipo 5	Vigas	813.2	13.7	207.0	59.2
	Lajes	2142.4	25.4	211.7	84.4
	Total	2955.6	39.1	418.7	75.5
Tipo 4	Vigas	866.0	13.7	207.0	63.0
	Lajes	2142.3	25.4	211.7	84.3
	Total	3008.3	39.1	418.7	76.9
Tipo 3	Vigas	923.2	13.7	207.0	67.2
	Lajes	2142.4	25.4	211.7	84.4
	Total	3065.6	39.1	418.7	78.3
Tipo 2	Vigas	1012.9	13.7	207.0	73.7
	Lajes	2142.1	25.4	211.7	84.3
	Total	3154.9	39.1	418.7	80.6
Tipo 1	Vigas	1062.4	13.7	207.0	77.3
	Lajes	2142.3	25.4	211.7	84.3
	Total	3204.7	39.1	418.7	81.9
Térreo	Vigas	0.0	0.0	0.0	0.0
	Lajes	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: autor

Tabela 7: Consumo total de aço e concreto do modelo “C”

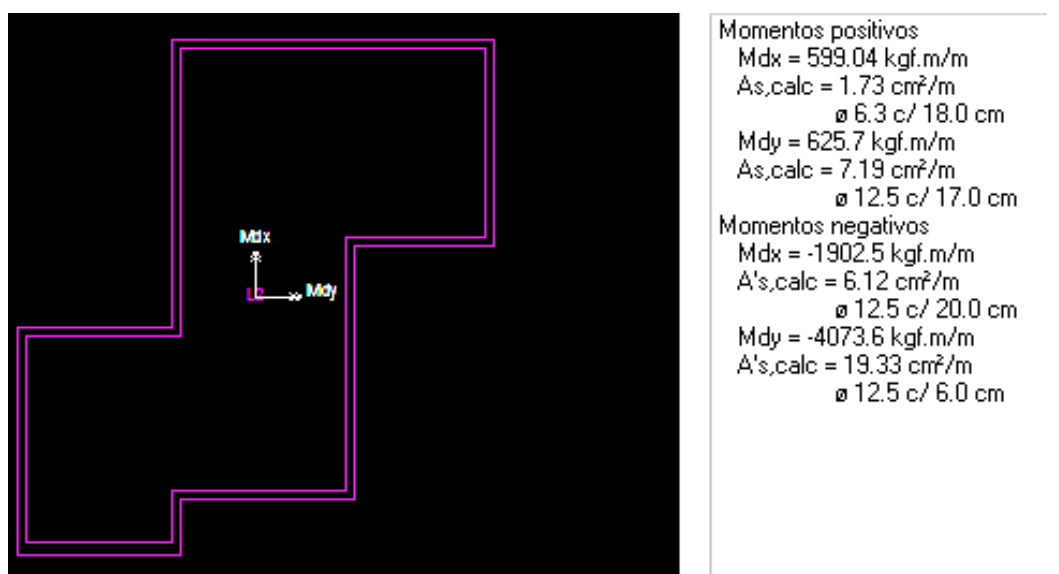
		Vigas	Lajes	Total
Peso total	CA50	5735.2	15657.6	21392.8
	CA60	1291.5	1589.0	2880.5
+ 10% (kg)	Total	7026.7	17246.5	24273.3
Volume concreto (m³)	C-30	112.1	205.7	317.8
Área de forma (m²)		1689.8	1714.3	3404.1
Consumo de aço (kgf/m³)		62.7	83.8	76.4

Fonte: autor

Nesse modelo, as lajes mais irregulares, que são as lajes L2 e L3, somadas as das sacadas, foram as que apresentaram maiores regiões de armaduras e consumo de aço. No caso das lajes L2 e L3, devido à geometria com vários recortes, ocorre concentração de esforços nas quinas como em algumas partes do seu interior, o que justifica o maior número de regiões e consumo de aço nesses locais. Os máximos momentos de cálculo obtidos, bem como as áreas de aço calculadas onde ocorrem esses esforços na laje L2, são mostrados na Figura 75. Para a laje L3, os valores

obtidos foram bastante semelhantes, devido ao fato dessas lajes apresentarem as mesmas condições para dimensionamento.

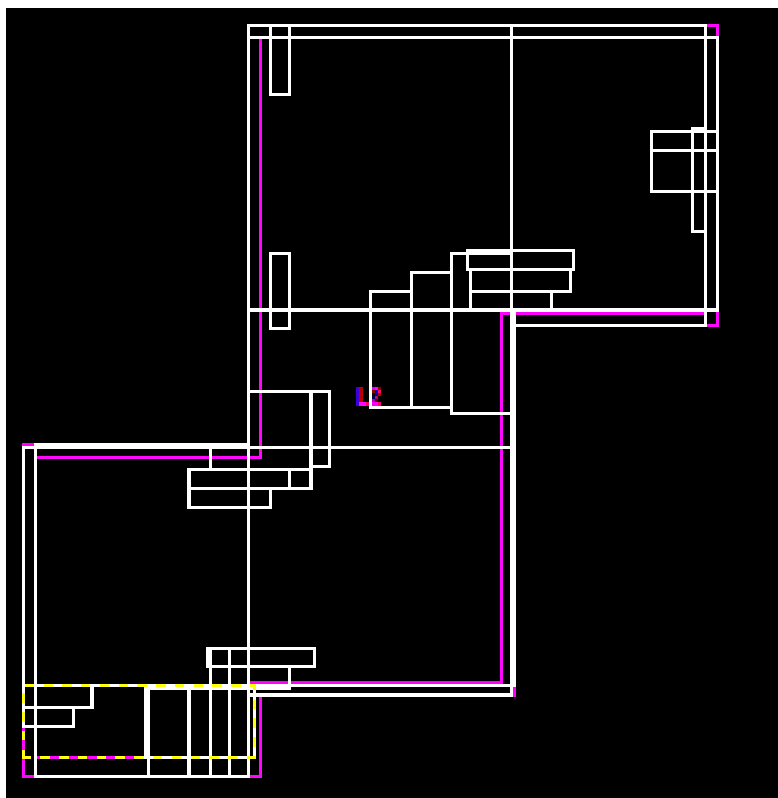
Figura 75: Momentos de cálculo e área de aço para a L2 modelo “C”



Fonte: autor

Além disso, foram obtidas 32 diferentes regiões de armaduras para a laje L2, que como em todos os outros casos, foram dimensionadas e obtidas esforços e armaduras diferentes, de acordo com os valores configurados previamente. Essas regiões são vistas na Figura 76.

Figura 76: Regiões de armadura da laje L2 modelo “C”



Fonte: autor

5.4 Comparativo entre os dimensionamentos

Depois de obtido o resultado de dimensionamento dos três modelos processados, foi realizado um comparativo entre os dados analisados. A Tabela 8 mostra um comparativo do consumo de aço entre cada modelo, no qual o modelo “A” foi adotado como sendo o modelo de referência, e o aumento percentual do consumo de aço foi calculado a partir do consumo de aço desse modelo.

Tabela 8: Comparativo de consumo de aço entre os três modelos

Modelo	Consumo de aço +10% nas vigas (kg)	Consumo de aço +10% nas lajes (kg)	Consumo total de aço (kg)	Aumento no consumo de aço (%)
A	7576,7	11930,7	19507,4	0
B	7380,3	13220,3	20600,6	5,6
C	7026,7	17246,5	24273,2	24,4

Fonte: autor

Como visto na Tabela 8, o aumento do consumo de aço do modelo “A” que apresenta o mínimo de lajes com recortes, para o modelo “B” que apresenta a laje L, foi relativamente pequeno, o que provavelmente não aumentaria de maneira significativa os custos para execução. Por outro lado, o modelo “C” com lajes com geometrias mais irregulares, teve um aumento relevante no consumo de aço, de aproximadamente 25%, o que pode influenciar consideravelmente no custo da edificação.

Já a Tabela 9, mostra a variação do consumo de concreto na edificação entre os três modelos, sabendo que alguns modelos possuem menos vigas do que outros, e a espessura das demais vigas e das lajes foram mantidos constantes entre eles. Nessa comparação, o modelo “A” foi adotado como referência, e os valores de redução do consumo de concreto foram calculados em relação a esse modelo. Como notado, a redução do consumo de concreto entre os modelos é muito pequena, o que não interferiria de maneira significativa nos custos de execução do projeto.

Tabela 9: Comparativo de consumo de concreto entre os três modelos

Modelo	Volume de concreto nas vigas (m³)	Volume de concreto nas lajes (m³)	Volume total de concreto (m³)	Redução no consumo de concreto (%)
A	120,6	203,9	324,5	0
B	116,5	204,8	321,3	1,0
C	112,1	205,7	317,8	2,1

Fonte: autor

Embora este estudo seja limitado a apenas esses três modelos que foram analisados, ele indica que para a concepção de um projeto que favorece a arquitetura flexível, geralmente, é necessária a eliminação de vigas do projeto estrutural, o que faz ocorrer lajes com geometrias variadas, com recortes e de dimensionamento mais elaborado. Além disso, como constatado na Tabela 8, o surgimento dessas lajes pode fazer com que o consumo de aço nesses projetos aumente consideravelmente em relação a um modelo composto por lajes retangulares, mais convencionais de serem executadas.

6 ESTUDOS REFERENTES À ANÁLISE DOS ESFORÇOS EM LAJES COM GEOMETRIA COMPLEXA

Depois de realizadas as análises referentes aos três modelos de edifício dimensionados nesse trabalho, foi percebido que, de um modo geral, quanto maior for a laje, quanto mais complexa for a sua geometria, e quanto mais recortes ela tiver, podem ocorrer esforços negativos no interior dessas lajes, fato até então inesperado. Como pode ser visto na figura 60, referente à grelha de momentos fletores do modelo “B”, as lajes com formato de L apresentou, em uma região do seu interior próxima a quina, momentos fletores negativos. Já no modelo “C”, é possível identificar na grelha de momentos fletores, mostrada na Figura 69, uma região ainda maior, no interior da laje, de momentos fletores negativos.

Além disso, durante o processamento dos três modelos estruturais analisados, foi percebido que a localização dos pilares em uma laje pode influenciar bastante a presença dos momentos fletores negativos no interior dessas estruturas, muitas vezes sendo responsáveis por gerar regiões de armaduras negativas no seu entorno. Quando localizados nas quinas das lajes, a sua influência tendia a ser ainda maior, alterando todo o gráfico ou grelha de momentos fletores daquele local.

Para análise e entendimento do comportamento e dos esforços existentes nessas lajes mais complexas, a fim de tentar compreender o motivo da ocorrência desses momentos negativos no interior dessas lajes, tentou-se utilizar, nesse trabalho, o Método dos Elementos Finitos através do programa ANSYS. Entretanto, para o estudo do comportamento dos momentos, especificamente nas quinas da estrutura, não foi possível observar quantitativamente o valor desses esforços, pois os momentos assumiam valores muito elevados, que tendiam ao infinito. Isso ocorria, possivelmente, devido a um erro numérico de plotagem do método e/ou do programa, que impossibilitava a leitura precisa desses valores.

Posteriormente, tentou-se utilizar os programas TQS e Eberick, por meio do método de Analogia de Grelha, para um maior entendimento dos esforços nesse tipo de laje, e tentar encontrar um padrão de ocorrência desses esforços negativos nessas estruturas, ainda que, nas quinas, não tenha sido possível uma análise com precisão. Entretanto, após vários estudos com diversas lajes, principalmente do tipo L, não se constatou um padrão de ocorrência desses esforços; visto que, dependendo das dimensões, da geometria, das condições de apoio e do carregamento aplicado na laje, os momentos fletores negativos se tornavam muito pequenos ou nulos; e sua leitura muitas vezes não era possível nos *softwares*, devido à escala de cores muito semelhantes para pequenos

momentos fletores positivos e negativos no caso do Eberick, ou a unidade de medida muito grande adotada nos gráficos de momentos fletores pelo TQS, que é dada em tf.m/m.

Dessa maneira, como sugestão para trabalhos futuros, um estudo mais aprofundado sobre a influência dos pilares e as ocorrências de momentos fletores negativos no interior de lajes com geometrias mais elaboradas e dos esforços nas quinas, seria importante para auxiliar engenheiros e arquitetos para o entendimento do comportamento estrutural dessas peças.

7 CONCLUSÃO

A ocorrência de projetos de casas e edifícios que apresentam plantas baixas flexíveis torna-se algo cada vez mais comum no mercado imobiliário, principalmente nas médias e grandes cidades do país, trazendo inúmeras vantagens para o usuário. Sendo assim, é nítida a necessidade dos projetos de engenharia civil adaptarem-se a essas novas exigências, visto que, como mostrado nesse trabalho, muitas vezes esse tipo de projeto demanda a retirada de vigas que normalmente existiriam e opta por lajes com geometrias bem diferentes do convencional.

Entretanto, essas estruturas mais complexas, podem sim, na maioria das vezes, serem executadas, apesar de demandarem dimensionamento mais detalhado. Por outro lado, esses modelos resultam no aumento do consumo de aço (segundo os casos estudados nesse trabalho); e, conseqüentemente, dos custos para a execução desses projetos, o que deve ser analisado com atenção, ficando a critério do proprietário e do arquiteto do projeto, optar ou não por esses modelos.

Como sugestão de continuidade a esse trabalho, propõe-se a realização de outros projetos arquitetônicos e estruturais composto por plantas baixas flexíveis. Seria interessante, também, realizar um novo comparativo do consumo de concreto e aço, para saber se os resultados obtidos nesse trabalho tendem a repetirem-se em outros estudos.

REFERÊNCIAS

ARCH DAILY. Lake Shore Drive – Mies van der Rohe. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/59487/ad-classics-860-880-lake-shore-drive-mies-van-der-rohe>>.

Acesso em: 05 ago 2019.

ARCHIGRAM MAGAZINE. Londres, Revista publicada entre 1962-1974, 10 números.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

CASA ABIERTA. Edifício de apartamentos de Mies van der Rohe. Disponível em: <<https://casa-abierta.com/post.php?t=58bd51080819b>>. Acesso em: 10 ago 2019.

CASELLI, C. K. **100 anos de habitação mínima. Ênfase na Europa e Japão**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Presbiteriana Mackenzie – Pós Graduação da Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

CELESTE, A.P. Análise de lajes retangulares à flexão considerando o acréscimo de armadura devido aos momentos volventes. 2011. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CESAR, D. M. **Considerações sobre o projeto computacional das lajes de uma edificação em concreto armado**. Trabalho de conclusão de curso – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CLÁSSICOS DA ARQUITETURA. Edifício Esther. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/888147/classicos-da-arquitetura-edificio-esther-alvaro-vital-brasil-e-adhemar-marinho>>. Acesso em: 04 ago 2019.

COSTA, Heliara Aparecida; LOGSDON, Louise; FABRICIO, Márcio Minto. Flexibilidade em projetos de arquitetura: contribuições a partir de uma revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, n. 3, p. 144-160, set. 2017. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650206>>. Acesso em: 21 ago. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650206>

DIGIACOMO, M. C. **Estratégias de Projeto para a Habitação Social Flexível**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina- Pós Graduação da Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

FINKELSTEIN, C. W. **Flexibilidade na arquitetura residencial – um estudo sobre o conceito e sua aplicação**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GUEDES, S.V. **Lote da Estação Velha Ensaio Sobre Arquitetura Evolutiva, Flexível e Adaptável**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura– Universidade do Porto, Porto, 2016.

JIA, Bei Si. **To Achieve Adaptability With Simplicity of Design: A Pratical Experience of Adaptable Housing in Switzerland**. Hong Kong: Papers in Desing and Development, Vol. 1. 1998.

JOHNSON, Philip. **Mies van der Rohe**. New York: The Museum of Modern Art. 1947, p.43.

LAWRENCE, Roderick J. **The qualitative aspects of housing – a synthesis**. Building Research and Practice, The Journal of CIB (CIB'89-Housing), n.2, 1990.

LE CORBUSIER FOUNDATION. **Maison Dom-Ino**. Disponível em: <http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=5972&sysLanguage=en-en&itemPos=103&itemSort=en-en_sort_string1+&itemCount=215&sysParentName=&sysParentId=65>. Acesso em: 01 ago 2019.

LE CORBUSIER FOUNDATION. Unité d'habitation. Disponível em: <<http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=5234&sysLanguage=en-en&itemPos=58&itemCount=78&sysParentName=&sysParentId=>>. Acesso em: 02 ago 2019.

PAIVA, Alexandra L.S.A. **Habitação Flexível: Análise de Conceitos e Soluções**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2002.

PARSEKIAN, G. A. **Cálculo e armação de lajes de concreto armado com a consideração do momento volvente**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

PROVENCE RESIDENCE CLUB. Maxi Construtora. Disponível em: <<http://www.provenceresidenceclub.com.br/>>. Acesso em: 18 ago 2019.

ROC BATEL RESIDENCE OPEN CONCEPT. Construtora Laguna. Disponível em: <<https://www.construtoralaguna.com.br/imoveis-residenciais/roc-batel#/>>. Acesso em: 18 ago 2019.

SENSE VERTICAL LIVING. Brasal Incorporações. Disponível em: <<https://www.brasal.com.br/incorporacoes/empreendimentos/sense-vertical-living/#&gid=null&pid=15>>. Acesso em: 15 ago 2019.

SILVA, Marcos Solon Kretli da. Redescobindo a arquitetura do Archigram. *Arquitextos*, São Paulo, ano 04, n. 048.05, Vitruvius, maio 2004. Disponível em: <<https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/04.048/585>>. Acesso em: 06 ago 2019.

SOBRE O MEU BLOCO – ZU MEINEM BLOCK. **Bau und Wohnung**. Primeira edição. Stuttgart: Karl Kramer Verlag.1927, p.77.

VAN DER ROHE, Mies. **Bau und Wohnung**. Primeira edição. Stuttgart: Karl Kramer Verlag.1927.

WEISSENHOF SIEDLUNG. Homes of The Weissenhof Estate. Disponível em: <www.weissenhofsiedlung.de/>. Acesso em: 04 ago 2019.

WOOD, R. H. The reinforcement of slabs in accordance with a predetermined field of moments. *Concrete Magazine*, London, February 1968.