

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GIANLUCA PIACENTINI FRIGHETTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE
DIMENSIONAMENTO NO CUSTO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO**

CAXIAS DO SUL

2023

GIANLUCA PIACENTINI FRIGHETTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE
DIMENSIONAMENTO NO CUSTO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Me. Luciano Zatti

CAXIAS DO SUL

2023

GIANLUCA PIACENTINI FRIGHETTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE
DIMENSIONAMENTO NO CUSTO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Me. Luciano Zatti

Aprovado em 30/11/2023

Banca examinadora

Prof. Me. Luciano Zatti

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Esp. Maurício Monteiro Almeron

Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

O projeto estrutural tem evoluído com o desenvolvimento de recursos, principalmente computacionais, de análise do comportamento da estrutura. Com isso surge a responsabilidade e a necessidade de o engenheiro civil utilizá-los a fim de conceber edificações cada vez mais eficientes. A minimização dos custos compõe um dos requisitos da otimização estrutural e existem diferentes técnicas para aplicá-la. A presente monografia analisou a relação entre a alteração dos parâmetros de dimensionamento (dimensão geométrica dos elementos estruturais e classe de resistência do concreto) com o custo de execução, para uma edificação multifamiliar de 9 pavimentos, com área total de 2700 m², localizada na cidade de Garibaldi, Rio Grande do Sul. Foram definidos 48 arranjos estruturais, a partir da variação e combinação dos parâmetros, e modelados no *software* de cálculo estrutural TQS, partindo da condição de pré-dimensionamento. Com base nos quantitativos de materiais resultantes para cada caso, foi realizada a orçamentação da estrutura, através das referências de custo do SINAPI. Verificou-se uma tendência que estabelece que o aumento da classe do concreto provoca um aumento no custo da estrutura, e por outro lado, a redução das dimensões dos elementos estruturais, gera uma redução no custo da estrutura. Ademais, percebeu-se um comportamento particular nos pilares em relação a resistência do concreto, contrária a linearidade do arranjo como um todo, apresentando uma relação ótima com classe C35. Por fim, foi apresentado o arranjo que demonstrou menor custo de execução, onde se notou um potencial de redução total de 7,2% se comparando com o custo inicial (do pré-dimensionamento). Dessa forma, é possível afirmar que existe a possibilidade de economia ao analisar e determinar os parâmetros ótimos de dimensionamento para uma estrutura de concreto armado.

Palavras-chave: edificação; concreto armado; projeto estrutural; custo; TQS; análise; comparativo; orçamentação; otimização.

ABSTRACT

The structural design has evolved with the development of resources, especially computational ones, for analyzing the behavior of the structure. As a result, there is a responsibility and a need for civil engineers to use them in order to conceive increasingly efficient buildings. Cost minimization is one of the requirements of structural optimization, and there are different techniques to apply it. This present monograph examined the relationship between the alteration of design parameters (geometric dimensions of structural elements and concrete strength class) with the construction cost for a nine-story multifamily building, with a total area of 2700 square meters, located in the city of Garibaldi, Rio Grande do Sul. Forty-eight structural arrangements were defined, based on the variation and combination of parameters, and modeled in the TQS structural calculation software, starting from the pre-dimensioning condition. Based on the resulting material quantities for each case, the structure was budgeted using SINAPI cost references. A trend was observed, establishing that an increase in the concrete class leads to an increase in the structure's cost, while, on the other hand, a reduction in the dimensions of structural elements results in a cost reduction. Furthermore, a particular behavior was noticed in pillars regarding concrete strength, contrary to the linearity of the overall arrangement, presenting an optimal relationship with class C35. Finally, the arrangement that demonstrated the lowest execution cost was presented, showing a potential total reduction of 7.2% compared to the initial cost (from pre-dimensioning). Thus, it is possible to assert that there is an opportunity for savings by analyzing and determining the optimal design parameters for a reinforced concrete structure.

Keywords: building; reinforced concrete; structural design; cost; TQS; analysis; comparative; budgeting; optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de um sistema estrutural	21
Figura 2 - Fachada sul da estrutura	38
Figura 3 - Planta de formas pavimento tipo (x8).....	39
Figura 4 - Matriz de análise	43
Figura 5 - Análise gráfica do custo da estrutura em diferentes arranjos e fcks	44
Figura 6 - Análise numérica do custo da estrutura em diferentes arranjos e fcks	45
Figura 7 - Redução das dimensões x Impacto no custo da estrutura.....	46
Figura 8 - Aumento do fck x Impacto no custo da estrutura	47
Figura 9 - Análise percentual do consumo de aço nos pilares do arranjo L10V40P70/50 com diferentes fcks	48
Figura 10 - Análise gráfica do custo da estrutura no arranjo L10V40P70/50 e diferentes fcks.....	49
Figura 11 - Análise numérica do custo da estrutura no arranjo L10V40P70/50 e diferentes fcks	49
Figura 12 - Análise percentual do impacto da variação do fck do arranjo L10V40P70/50 no custo da estrutura.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistências de concretos estruturais	15
Tabela 2 - Características das barras e fios de aço	17
Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental (CAA)	19
Tabela 4 - Correspondência entre a CAA e a qualidade do concreto	20
Tabela 5 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal ($\Delta c = 10$ mm)	20
Tabela 6 - Peso específico aparente dos materiais de construção	26
Tabela 7 - Peso de composições de materiais de construção	27
Tabela 8 - Valores característicos nominais das cargas acidentais	28
Tabela 9 - Parâmetros adotados de acordo com a CAA II	40
Tabela 10 - Cargas acidentais na estrutura	40
Tabela 11 - Dados para velocidade característica do vento.....	41
Tabela 12 - Valores para coeficiente de arrasto.....	41
Tabela 13 - Referências de custos tabelas SINAPI.....	42
Tabela 14 - Análise numérica do consumo de aço em cada elemento estrutural do arranjo L10V40P70/50 com diferentes fcks.....	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Classe de agressividade ambiental
CA	Concreto armado
CEF	Caixa Econômica Federal
cm	centímetro
CP	Concreto protendido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	quilograma
kgf	quilograma-força
kN	quilo Newton
m	metro
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade do aço
E_{ci}	Módulo de elasticidade do concreto
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{yk}	Resistência característica do aço ao escoamento
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado
Δc	Tolerância de execução para o cobrimento
ρ	Massa específica
ν	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA DA PESQUISA	13
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA.....	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo geral.....	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	13
1.4	HIPÓTESE	13
1.5	PRESSUPOSTOS.....	14
1.6	DELIMITAÇÕES.....	14
1.7	DELINEAMENTO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	CONCRETO ARMADO	15
2.1.1	Concreto.....	15
2.1.2	Aço.....	16
2.1.3	Forma	18
2.1.4	Durabilidade da estrutura	18
2.2	SISTEMA ESTRUTURAL	21
2.2.1	Lajes	22
2.2.1.1	Pré-dimensionamento	22
2.2.2	Vigas.....	23
2.2.2.1	Pré-dimensionamento	23
2.2.3	Pilares.....	24

2.2.3.1	Pré-dimensionamento	25
2.2.4	Ações.....	26
2.2.4.1	Ações permanentes.....	26
2.2.4.2	Ações variáveis	27
2.2.4.3	Ações excepcionais.....	29
2.2.5	Estados limites de segurança	29
2.2.5.1	Estado limite último	29
2.2.5.2	Estado limite de serviço.....	30
2.3	PROJETO ESTRUTURAL.....	30
2.3.1	Concepção estrutural.....	31
2.3.2	Cálculo e detalhamento estruturais	31
2.3.3	Quantitativos e orçamentação	32
2.3.3.1	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil...33	
2.4	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	34
2.4.1	Técnicas de otimização.....	35
2.4.2	Otimização estrutural na prática	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	OBJETO DE ESTUDO	37
3.1.1	Pré-dimensionamento da estrutura	37
3.2	PARÂMETROS DE PROJETO.....	40
3.3	QUANTITATIVOS E ORÇAMENTAÇÃO.....	41
3.4	MATRIZ DE ANÁLISE	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	CUSTO DA ESTRUTURA	44
4.1.1	Redução das dimensões dos elementos.....	46
4.1.2	Aumento da resistência do concreto.....	46
4.2	CONSUMO DE AÇO	47
4.3	OTIMIZAÇÃO DO CUSTO	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	APÊNDICE A - ORÇAMENTOS ESTRUTURAS	56
	APÊNDICE B - PROJETO ESTRUTURAL OTIMIZADO.....	66
	APÊNDICE C - ORÇAMENTO ESTRUTURA OTIMIZADA.....	92

1 INTRODUÇÃO

A engenharia, em sua essência, existe para identificar, formular e solucionar problemas. O profissional protagonista, que possui o papel de apresentar a resolução para a problemática, a partir de conhecimentos técnicos e científicos, é chamado de engenheiro. Sua atuação é deveras importante para o desenvolvimento da sociedade, ao mesmo tempo que, possui enorme responsabilidade. Um bom engenheiro é aquele que consegue desenvolver, analisar e sintetizar a solução ótima, garantindo a segurança, economia e eficiência do projeto (BAZZO; PEREIRA, 2013).

Segundo Fusco e Onishi (2018), o projeto estrutural está em constate evolução, sempre em busca de arranjos cada vez mais eficientes. Não é mais suficiente se basear em métodos tradicionais ou comparativos, que observam apenas as soluções já aplicadas anteriormente e consideradas satisfatórias. Necessita-se englobar uma análise racional para solucionar os sistemas de forma criativa e inovadora. Isso é possível devido a disponibilidade de recursos de análise dos comportamentos das estruturas e dos materiais que a compõem, ao exemplo dos *softwares* estruturais.

Consoante a isso, a minimização dos custos é de grande valia para a busca de um produto eficiente. Mei e Wang (2021) analisaram uma série de artigos sobre otimização estrutural e concluíram que a maior parte dos estudos engloba aplicações voltadas ao objetivo de redução de custos na execução de estruturas. Isso demonstra a preocupação e relevância do tema frente a um mercado cada vez mais exigente. Nina (2006) destaca que o custo ideal está relacionado também ao peso ideal dos elementos estruturais e que as restrições do problema de otimização são estabelecidas pelas normas e códigos que regulam a prática do projeto. Em suma, tem-se o objetivo de garantir os requisitos de desempenho, segurança e economia.

Neste contexto, a presente monografia analisou diferentes arranjos estruturais para o dimensionamento de uma edificação de concreto armado, através de recurso computacional disponibilizado pelo *software* TQS. Buscou-se assim determinar, a partir das situações e condições observadas, qual a combinação de parâmetros de dimensionamento que resulta no menor custo para execução da estrutura.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Otimização de projeto estrutural de concreto armado.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Existe a possibilidade de redução no custo de uma estrutura de concreto armado através da alteração de parâmetros de dimensionamento?

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho se dividiram em duas categorias: objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a influência da alteração de parâmetros de dimensionamento, tais como, dimensões dos elementos e resistência do concreto, no custo de uma estrutura de concreto armado.

1.3.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, se consolidaram os objetivos específicos a seguir:

- a) identificar a relação entre a alteração dos parâmetros e o custo da estrutura;
- b) avaliar a influência da alteração dos parâmetros no consumo de materiais;
- c) projetar e orçar a estrutura otimizada.

1.4 HIPÓTESE

Com a alteração de parâmetros de dimensionamento, tais como, dimensões dos elementos e resistência do concreto, pode-se obter uma redução do custo da estrutura de concreto armado.

1.5 PRESSUPOSTOS

A estrutura analisada atendeu as normas técnicas brasileiras aplicáveis, delineadas nas publicações feitas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

1.6 DELIMITAÇÕES

O estudo se restringiu aos elementos estruturais de concreto armado: pilares, vigas e lajes. Não foram consideradas as fundações e outros elementos da estrutura, tais como, rampas e escadas. O parâmetro de resistência do concreto abrange apenas os concretos de classes do Grupo I, conforme ABNT NBR 8953:2015.

O *software* utilizado para modelagem e análise do projeto estrutural da edificação foi o TQS. Não foi aberta a discussão dos possíveis impactos na pesquisa caso utilizado outro *software* de cálculo estrutural.

1.7 DELINEAMENTO

A primeira etapa do estudo compreendeu na introdução ao tema e na evidência de informações importantes para o desenvolvimento do trabalho.

A segunda etapa se baseou no referencial teórico, através da exposição de conceitos sobre os elementos e materiais do objeto de estudo, sacramentados por especialistas de cada área.

Na terceira etapa realizou-se a modelagem da estrutura e modificações nos parâmetros de dimensionamento, através do *software* TQS, a fim de coletar dados para análise posterior.

Na quarta etapa foram tratados os dados coletados, destacando os resultados obtidos através de tabelas e gráficos comparativos, que avaliam o impacto causado pela etapa anterior, no custo da estrutura de concreto armado.

Por fim, a quinta etapa conclui a monografia expondo as considerações finais e propondo novos campos para aprimorar o estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO ARMADO

Carvalho e Figueiredo Filho (2014) conceituam concreto armado como a associação de concreto e barras de aço, a fim de resistir aos esforços solicitantes, de forma solidária. Destacam também, que o concreto possui boa resistência à compressão, porém, necessita da associação com o aço para suportar os esforços de tração. Araújo (2014) salienta que a relação só é possível devido à aderência entre os materiais, e complementa, evidenciando o importante papel do concreto na proteção do aço contra corrosão.

2.1.1 Concreto

Araújo (2014, p. 1) define: “concreto é o material resultante da mistura dos agregados (naturais ou britados) com cimento e água”. E acrescenta que a resistência adquirida pelo concreto, após endurecimento, depende de diversos fatores, como a quantidade de cimento e de água adicionados à mistura, o grau de adensamento, os tipos de agregados e aditivos, entre outros.

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), o concreto pode ser classificado em dois grupos em função de sua resistência característica à compressão, mensurada em Mega Pascal (MPa). Esta divisão está evidenciada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de resistências de concretos estruturais

(continua)

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100 ^a	100
C50	50		

(conclusão)

^a Cabe destacar que a ABNT NBR 6118:2014 não contempla concretos da classe de resistência C100. Tal norma se aplica exclusivamente às classes C20 a C90.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8953:2015

Outra característica mecânica do concreto onde Carvalho e Figueiredo Filho (2014) qualificam como a medida da rigidez de um material sólido, é o módulo de elasticidade. Também chamado de módulo de deformação, pode ser encontrado através da relação entre tensão aplicada e deformação observada. Os valores estimados para o módulo de elasticidade, a partir da resistência à compressão do concreto, para aqueles pertencentes ao Grupo I, podem ser calculados através da Equação 1, definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Sendo que:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse

$\alpha_E = 0,9$ para calcário

$\alpha_E = 0,7$ para arenito

A depender do regime da solicitação, o módulo de elasticidade pode ter deformação secante (E_{cs}), neste caso temos que E_{cs} é igual ao valor resultante da multiplicação entre E_{ci} e um coeficiente α_i , conforme Equações 2 e 3.

$$E_{cs} = E_{ci} \cdot \alpha_i \quad (2)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot f_{ck} / 80 \leq 1,0 \quad (3)$$

Ainda, para efeito de cálculo, admite-se uma massa específica de 2400 kg/m³ para concreto simples e 2500 kg/m³ para concreto armado, além de um coeficiente de Poisson de $\nu = 0,2$, conforme descrito na NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.1.2 Aço

Segundo Goto, Ribeiro e Centofante (2018), o aço é uma liga metálica composta de ferro e pequenos teores de carbono, sendo que os aços estruturais, utilizados na

construção civil, apresentam teores de carbono em torno de 0,18% a 0,25%. O aço se solidifica por meio da formação de cristais que crescem em diferentes direções, formando os eixos de cristalização, e é constituído de um agregado, cujas propriedades dependem da sua estrutura cristalina. As características físicas do aço estrutural incluem um módulo de elasticidade de $E = 200\ 000\ \text{MPa}$, um coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$ e uma massa específica de $\rho = 7850\ \text{kg/m}^3$.

Segundo a NBR 7480 (ABNT, 2022), o aço pode ser classificado de duas formas: barras e fios. O que difere é o processo de fabricação e tamanhos, onde as barras são produzidas por laminação a quente e possuem diâmetro mínimo de 6,3 mm e os fios são produzidos por trefilação ou laminação a frio e possuem diâmetro máximo de 10,0 mm. É possível observar na Tabela 2 algumas características das barras e fios de aço.

Tabela 2 - Características das barras e fios de aço

Diâmetro nominal (mm)		Área da seção (mm ²)	Massa nominal (kg/m)
Fios	Barras		
3,4		9,1	0,071
3,8		11,3	0,089
4,2		13,9	0,109
4,6		16,6	0,130
5,0		19,6	0,154
5,5		23,8	0,187
6,0		28,3	0,222
	6,3	31,2	0,245
6,4		32,2	0,253
7,0		38,5	0,302
8,0	8,0	50,3	0,395
9,5		70,9	0,558
10,0	10,0	78,5	0,617
	12,5	122,7	0,963
	16,0	201,1	1,578
	20,0	314,2	2,466
	22,0	380,1	2,984
	25,0	490,9	3,853
	32,0	804,2	6,313
	40,0	1256,6	9,865

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7480:2022

Araújo (2014) expõe que as barras de aço podem ser classificadas por outras três categorias: CA-25, CA-50 e CA-60. Os aços de classe CA-25 são barras lisas que possuem tensão de escoamento característica (f_{yk}) de 25 kN/cm², aços CA-50 são barras nervuradas com f_{yk} igual a 50 kN/cm² e aços CA-60 são os fios, que podem ser lisos, entalhados ou nervurados e possuem f_{yk} igual a 60 kN/cm².

2.1.3 Forma

Santos (2017) define a forma de uma estrutura como um molde para posicionar as armaduras e servir de delimitação para quando for despejado o concreto. Os moldes podem ser de diferentes materiais, como madeira, aço e plástico. Para Goto, Ribeiro e Centofante (2018), a qualidade global de uma estrutura depende em grande parte da qualidade das formas e dos cimbramentos utilizados na sua execução.

Barros, Melhado e Araújo (2006) complementam, destacando que as formas possuem diversas funções, como dar forma ao concreto armado, conter o concreto fresco e sustentá-lo até que atinja resistência suficiente, servir de suporte para o posicionamento das armaduras, espaçadores e de elementos de instalações, além de proteger o concreto contra choques mecânicos e limitar a perda de água de amassamento. É importante que as formas apresentem baixa aderência ao concreto, facilitando os procedimentos de desforma e evitando danos na superfície do elemento. O sistema de formas pode ser composto por moldes, estruturas dos moldes, escoramentos e peças acessórias.

Segundo Goto, Ribeiro e Centofante (2018), o molde define a forma e a textura do concreto e pode ser dividido em painéis de laje, fundos e faces de vigas e faces de pilares. A estrutura do molde sustenta e estabiliza o molde e é composta por gravatas, sarrafos e travessões. O cimbramento dá apoio às formas, transferindo os esforços para um ponto de suporte e divide-se em guias, pontaletes e pés-direitos. Os acessórios são usados para nivelamento, prumo e locação das peças.

2.1.4 Durabilidade da estrutura

Araújo (2014) explica que a durabilidade das estruturas é um dos assuntos que tem ganhado grande relevância nas exigências das normas, isso devido,

principalmente, pelo descuido no atendimento a parâmetros de projeto que provocam deterioração precoce das edificações, por parte de muitos projetistas e construtores. De acordo com a NBR 15575-2 (ABNT, 2013), as estruturas devem ser projetadas para atender a uma determinada vida útil de projeto, ou seja, o projeto deve garantir que durante esse período, desde que submetida a intervenções periódicas de manutenção e conservação, as funções para que a estrutura foi construída sejam atendidas. Araújo (2014) sugere que, para edificações correntes, esse período seja, ao menos, 50 anos. De modo a garantir essas condições, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define uma série de parâmetros a serem adotados, a partir da condição em que a estrutura estará exposta.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), deve-se observar a agressividade física e química em que o ambiente onde a estrutura de concreto estará localizada pode proporcionar. Para as edificações correntes, a classificação quanto a agressividade ambiental observada deve ser definida a partir da Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa ao ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade da estrutura de concreto depende fortemente da qualidade e espessura do concreto de cobertura da armadura. Para garantir a qualidade do concreto, são estabelecidos requisitos

mínimos na relação água/cimento da mistura e na classe de resistência, de acordo com a CAA, que pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Correspondência entre a CAA e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

De modo a garantir o cobrimento adequado à armadura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve que deve ser considerado para o projeto e execução um cobrimento nominal resultante do cobrimento mínimo acrescido de uma tolerância de execução (Δc), conforme exposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal ($\Delta c = 10$ mm)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior das lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas por outra, respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da CAA IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

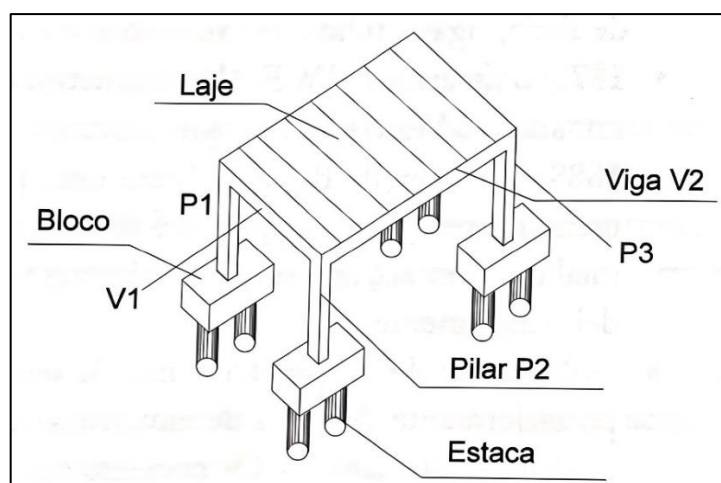
De maneira geral, nas obras correntes o valor de Δc deve ser 10 mm ou maior, porém, no caso de um controle de qualidade rígido na execução, permite-se adotar $\Delta c = 5$ mm. Além disso, para o caso da utilização de concreto de resistência superior ao mínimo, o cobrimento nominal pode ser reduzido em até 5 mm.

2.2 SISTEMA ESTRUTURAL

De acordo com Santos (2017), sistema compreende na organização de elementos, interconectados, a fim de atingir algum objetivo. Sendo o sistema estrutural, aquele que possui o objetivo de suportar os carregamentos incidentes na estrutura e transmiti-los para o solo, com segurança. Carvalho e Figueiredo Filho (2014) sintetizam, definindo o tópico como o modo de arranjo de elementos estruturais.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), os elementos estruturais são caracterizados a partir de seu formato geométrico e função estrutural. Podem ser elementos lineares (vigas, pilares, tirantes e arcos) ou de superfície (placas, chapas, cascas e pilares-parede). Para Fusco e Onishi (2018), a estrutura como um todo apresenta grande complexidade para análise dos esforços atuantes, dessa forma, o arranjo estrutural é decomposto em seu formato mais simples que pode ser estudado, representado pelas peças estruturais. Essas por sua vez, são classificadas de acordo com sua forma geométrica e são analisadas isoladamente. Na Figura 1 podemos visualizar elementos encontrados em um sistema estrutural.

Figura 1 - Elementos de um sistema estrutural



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2014)

2.2.1 Lajes

Também denominadas placas, possuem superfície plana e estão sujeitas com maior frequência a ações normais em sua extensão, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014). Segundo Araújo (2014), as lajes desempenham a função estrutural de receber as cargas de utilização das edificações aplicadas aos pisos, somam-se ao seu peso próprio e transmitem a carga resultante para as vigas. Elas são elementos estruturais bidimensionais planos, com uma espessura (h) consideravelmente menor que as outras duas dimensões (l_x e l_y). Existem diferentes tipos de lajes, como as lajes maciças, lajes nervuradas, lajes cogumelo, entre outras. A escolha do tipo adequado depende de questões arquitetônicas, requisitos econômicos e de segurança.

As lajes maciças são placas que possuem espessura uniforme e tem suas bordas apoiadas em vigas ou alvenarias. Esse tipo de laje é comumente utilizado em edifícios residenciais com vãos de tamanho relativamente pequeno. As lajes nervuradas possuem nervuras onde são inseridas armaduras longitudinais de tração, o que resulta em uma redução do peso próprio da laje, a partir da eliminação do concreto (criação de vazios) na zona tracionada da peça. Esse tipo de laje é empregado quando se tem a necessidade de vãos maiores, geralmente acima de 8 metros.

2.2.1.1 Pré-dimensionamento

As dimensões planas das lajes são definidas pelas limitações de vigas, preferencialmente locadas em todos os bordos do plano. Para definir a altura (h), que representa a espessura da peça, existem diferentes métodos, porém, de forma simplificada, pode-se aplicar a Equação 4, para o caso de lajes maciças armadas em duas direções (CUNHA, 2014).

$$h = l/40 \tag{4}$$

Onde:

l = menor vão da laje

Ainda, deve-se ater a algumas condições limites previstas na NBR 6118 (ABNT, 2014). Sobre a espessura mínima admitida para as lajes, tem-se: 7 cm para cobertura não em balanço; 8 cm para lajes de piso não em balanço; 10 cm para lajes em balanço;

10 cm para lajes que suportem veículos com peso ≤ 30 kN; 12 cm para lajes que suportem veículos com peso > 30 kN.

2.2.2 Vigas

A NBR 6118 (ABNT, 2014) retrata vigas como sendo, basicamente, elementos lineares que estão, com maior frequência, submetidos a flexão. Segundo Araújo (2021), as vigas recebem as cargas das lajes apoiadas, as cargas de alvenarias, eventuais cargas de pilares apoiados, somam-se ao seu peso próprio e transmitem a carga resultante para os pilares. De acordo com Rebello (2000), a viga é o elemento estrutural que exige maior resistência e consumo de material, devido a necessidade de suportar os esforços de momento fletor, os quais causam uma deformação vertical ao eixo da viga chamada de flecha. Além disso, as vigas também estão sujeitas a esforços cortantes que provocam escorregamento entre as seções. A classificação delas é realizada de acordo com a quantidade de apoios, podendo ser biapoiada, em balanço ou contínua.

Rebello (2000) relata que as vigas biapoiadas são solicitadas por tensões de compressão nas fibras superiores e tração nas inferiores. Já as vigas em balanço têm essas tensões invertidas e, em certos casos, podem contribuir para a redução dos momentos nos vãos, proporcionando economia no seu dimensionamento. Nas vigas contínuas, com mais de dois apoios, ocorre compressão nos vãos e tração nos apoios, resultando em momentos positivos nas fibras inferiores e negativos nas superiores. Por serem hiperestáticas, apresentam uma compensação entre os momentos nos vãos e nos apoios, proporcionando valores menores se comparados a vigas biapoiadas com vãos e carregamentos iguais.

2.2.2.1 Pré-dimensionamento

As vigas são normalmente locadas junto ao eixo das paredes e respeitam uma dimensão de largura (b_w) que não interfira na arquitetura, de forma a embutir o elemento na alvenaria. Além disso, é recomendado o valor de $b_w = 20$ cm, para vãos de comprimento entre 4 m e 8 m. O comprimento é determinado a partir da distância entre os apoios, que podem ser pilares ou outras vigas. E a altura (h) pode ser pré-

dimensionada, simplificada, para um valor de 10% do comprimento do vão (CUNHA, 2014).

Ademais, deve-se levar em consideração algumas condições mínimas previstas na NBR 6118 (ABNT, 2014). A largura da seção transversal da viga não deve ser inferior a 12 cm, salvo o caso excepcional em que pode ser adotado um valor mínimo de 10 cm, ao respeitar as condições de espaçamentos e cobrimentos das armaduras, além do lançamento e vibração do concreto estar em acordo com a ABNT NBR 14931.

2.2.3 Pilares

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os pilares são elementos lineares, normalmente posicionados na posição vertical, que possuem eixo reto e estão submetidos, com maior frequência, a forças normais de compressão. Rebello (2000) destaca que os pilares podem sofrer o fenômeno de flambagem a partir da compressão e devido a sua esbeltez. Complementa que eles são também submetidos a esforços de flexão quando sujeitos a cargas horizontais como o vento e frenagem de veículos.

Para Araújo (2014), os pilares podem ser classificados, inicialmente, de três maneiras: pilares curtos, onde não existe a necessidade da consideração dos efeitos de segunda ordem; pilares moderadamente esbeltos, que devem ter os efeitos de segunda ordem considerados, porém, podendo-se adotar métodos simplificados; e pilares esbeltos, que necessitam de uma análise rigorosa dos efeitos de segunda ordem. Normalmente os pilares das edificações correntes se enquadram em pilares curtos ou pilares moderadamente esbeltos.

Ainda, Araújo (2014) destaca que os pilares são classificados de acordo com suas funções na estrutura, podem ser considerados pilares contraventados ou pilares de contraventamento. Segundo Araújo (2021), os pilares contraventados recebem exclusivamente as ações das vigas, e os pilares de contraventamento, estão submetidos, também, às ações do vento e efeitos do desaprumo nas forças normais. Ambos têm a função de transmitir as ações resultantes para as fundações da estrutura.

2.2.3.1 Pré-dimensionamento

Segundo Silva (2022), deve-se organizar a locação dos pilares, bem como definir sua altura destravada, de acordo com os requisitos arquitetônicos, mas sempre garantindo a estabilidade global da estrutura, buscando definir a melhor orientação dos elementos. Rebello (2000) indica que a distribuição dos pilares com espaçamentos na faixa de 4 m a 6 m é o ideal na busca de soluções mais econômicas para o conjunto estrutural.

A definição das dimensões geométricas iniciais dos pilares apresenta maior complexidade. Rebello (2007) descreve um método empírico, a fim de pré-dimensioná-los, que consiste na determinação da área da seção transversal, e a partir disso, fixando uma das dimensões, calcula-se a outra. Para pilares com altura livre menor que 4 m, é aplicada a Equação 5.

$$A_{\text{seção}} = P/100 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (5)$$

Onde:

P = carga atuante no pilar

Para determinação da carga atuante no pilar, considera-se: uma área de influência (A_i), a partir da metade do comprimento entre os apoios, em ambas as direções; o número de pavimentos acima daquele observado (n); e uma carga hipoteticamente distribuída em toda a área do edifício (q). Sugere-se as cargas distribuídas de 7,85 kN/m² para pisos e 5,88 kN/m² para cobertura. Essas parcelas são multiplicadas através da Equação 6. Ainda, Bastos (2015) sugere uma majoração de 50% para as cargas atuantes nos pilares de extremidade e de canto, a fim de levar em conta os esforços de momento fletor.

$$P = (A_i \cdot q_{\text{piso}}) \cdot n + A_i \cdot q_{\text{cobertura}} \quad (6)$$

A NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve os critérios mínimos para os pilares, onde a área da seção transversal, independente da forma geométrica, deve possuir ao menos 360 cm², sendo que nenhuma das dimensões pode possuir valor inferior a 19 cm. Apenas em situações específicas, é permitida a adoção de dimensão mínima entre 19 cm e 14 cm, para isso adota-se no cálculo dos esforços solicitantes um coeficiente adicional a fim de majorá-los.

2.2.4 Ações

Ações são o fenômeno que causa os esforços e as deformações nas estruturas. Na prática, as forças e deformações atuantes são, por definição, as próprias ações, onde as forças são consideradas ações diretas e as deformações ações indiretas. De acordo com a variação ocorrida com o tempo, elas são divididas em ações permanentes, variáveis e excepcionais, como relata a NBR 8681 (ABNT, 2003). Fusco e Onishi (2018) analisam os critérios de classificação, concomitantemente, observando o tempo de permanência (ações de longa ou de curta duração) e a frequência de atuação (ações repetidas ou não repetidas) das ações na estrutura.

2.2.4.1 Ações permanentes

Em acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as ações permanentes são aquelas que possuem constância em seus valores, sendo previsíveis ao longo da vida útil da estrutura. A fim de dimensionamento, deve-se adotar a condição mais desfavorável para a segurança. As ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura, dos elementos construtivos fixos, das instalações e dos empuxos permanentes. As indiretas contemplam as deformações devido a retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e protensão.

Na falta de experimentação, para o cálculo do peso próprio da estrutura, pode-se utilizar tabelas que listam os pesos específicos médios dos materiais e composições, que estão presentes em uma obra. Essa referência é encontrada na norma NBR 6120 (ABNT, 2019) e as Tabelas 6 e 7 apresentam alguns exemplos encontrados lá.

Tabela 6 - Peso específico aparente dos materiais de construção

(continua)

Material	Peso específico aparente (kN/m³)
Água doce	10
Argamassa de cal, cimento e areia	19
Basalto	29
Bloco de concreto vazado	14

(conclusão)	
Poliestireno expandido (EPS) de alta densidade	0,3
Porcelanato	23
Solo	18

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:2019

Tabela 7 - Peso de composições de materiais de construção

Material	Peso (kN/m ²)
Bloco cerâmico vazado e = 19 cm + 2 cm de revestimento por face	2,3
<i>Drywall</i> (e = 7 a 30 cm)	0,5
Forro de gesso em placas	0,15
Revestimento de pisos de edifícios residenciais e comerciais e = 5 cm	1,0
Telhas fibrocimento onduladas e = 5 mm + estrutura de madeira	0,4

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:2019

2.2.4.2 Ações variáveis

Araújo (2014) conceitua as ações variáveis como sendo aquelas que ocorrem durante a vida da construção com valores que variam significativamente, e que são divididas de acordo com a sua probabilidade de ocorrência com o tempo. A NBR 6118 (ABNT, 2014) as divide em ações variáveis diretas, compostas pelas cargas acidentais na utilização e construção da edificação, ação do vento e da água, regulamentadas por Normas Brasileiras específicas, e ações variáveis indiretas, que contemplam as variações de temperatura e ações dinâmicas.

As normativas e procedimento de cálculo para consideração das ações do vento são descritas na NBR 6123 (ABNT, 1988), que leva em consideração: a velocidade característica do vento atuante na edificação, calculada a partir da velocidade básica (V_0) definida por observatórios, dos fatores topográficos (S_1), da rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2), além de um fator estatístico (S_3); a área de referência, onde o vento incide diretamente, que pode ser cada uma das projeções de fachada, indicadas pelo ângulo de incidência (vento a 0° ,

90°, 180° ou 270°); e o coeficiente de arrasto, a depender da turbulência do vento ser baixa ou alta, é definido através de gráfico presente na norma.

Já as cargas acidentais na utilização e construção da edificação, são descritas na NBR 6120 (ABNT, 2019) e consideram situações diversas para uma variedade de locais, a fim de definir a ação a ser considerada em cada caso. Podemos observar na Tabela 8 alguns valores de cargas acidentais. Ademais, as cargas variáveis podem ser reduzidas, através da multiplicação por um coeficiente de minoração, de acordo com algumas situações descritas na norma.

Tabela 8 - Valores característicos nominais das cargas acidentais

Local		Carga uniformemente distribuída (kN/m ²)
Edifícios residenciais	Dormitórios	1,5
	Sala, copa, cozinha	1,5
	Sanitários	1,5
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2
	Áreas de uso comum	3 ^a
Cobertura	Acesso apenas para manutenção ou inspeção	1
	Com placas solares ou fotovoltaicas	1,5
Paredes divisórias	Sem posição definida em projeto	0,75 ^b
Sacadas, varandas e terraços	Residencial	2,5
Áreas técnicas	Barrilete	1,5
Garagem	Veículos de passeio (PBT≤30kN)	3

^a Redução de cargas variáveis não permitida.

^b No caso de paredes sem posição definida em projeto, com peso próprio maior que 1 kN/m e igual ou menor que 2 kN/m.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:2019

2.2.4.3 Ações excepcionais

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as ações excepcionais são aquelas cujos efeitos não podem ser controlados por outros meios, e que para isso dispõem de Normas Brasileiras específicas com suas considerações. Araújo (2014) sinaliza que essas ações possuem baixa probabilidade de ocorrência e durações curtas, mas devem ser consideradas no dimensionamento de algumas estruturas. São exemplos desse tipo de ação: explosões, choque de veículos, enchentes e sismos.

Em suma, Carvalho e Figueiredo Filho (2014) destacam que para o caso de construções usuais, são observadas, por simplificação, as ações permanentes de peso próprio, retração, protensão, fluência e recalques, e as ações variáveis de carga accidental vertical, vento e temperatura.

2.2.5 Estados limites de segurança

Fusco e Onishi (2018), descrevem os estados limites de segurança como sendo o método de análise e dimensionamento utilizado para garantir a segurança das estruturas. São baseados na observação da condição em que a estrutura apresenta risco de ruína, ou que não proporcione as características normais de utilização. Ou seja, os estados limites de segurança representam a situação em que a estrutura demonstra desempenho inadequado à sua finalidade. São considerados dois estados nessa análise, os estados limites último e de serviço.

2.2.5.1 Estado limite último

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a segurança das estruturas de concreto requer a verificação dos seguintes estados limites últimos: perda de equilíbrio da estrutura como um corpo rígido; esgotamento da capacidade resistente devido a solicitações normais e tangenciais, permitindo redistribuição interna de esforços e interação entre elas quando relevante; esgotamento da capacidade resistente considerando efeitos de segunda ordem; solicitações dinâmicas; colapso progressivo; esgotamento da capacidade resistente considerando exposição ao fogo; esgotamento da capacidade resistente considerando ações sísmicas; e outros estados limites últimos que possam surgir em casos especiais, de acordo com as normas aplicáveis.

2.2.5.2 Estado limite de serviço

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), estados limites de serviço referem-se às condições relacionadas ao conforto do usuário, à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, tanto para os usuários quanto para as máquinas e equipamentos suportados por elas. Esses estados limites incluem a formação de fissuras, com aberturas dentro dos limites estabelecidos, deformações excessivas que não comprometam a utilização normal, para o caso de a estrutura ser de concreto armado, além da ocorrência de vibrações desconfortáveis. A verificação desses estados limites é realizada de acordo com as especificações das normas aplicáveis.

2.3 PROJETO ESTRUTURAL

De acordo com Bazzo e Pereira (2013), projeto é um misto de ciência e arte, que exige, entre outras características, criatividade, experiência, técnica, bom senso e roteiro de ação, com o objetivo de resolver uma problemática. Contempla as atividades de planejamento colocadas em prática antes da execução de um produto, a fim de atingir as metas desejadas dentro do orçamento e tempo. Os projetos podem ser caracterizados de duas formas: projeto por evolução é aquele que aprimora um projeto já existente e conhecido através da incorporação de novas tecnologias; e projeto por inovação, aquele que aplica técnicas e conhecimentos ainda não experimentados, resultando em um produto inédito.

Conforme Santos (2017), o projeto estrutural passa por diversas etapas para sua completa elaboração: inicia pela seleção do material que irá compor a estrutura, podendo ser madeira, aço, concreto, entre outros; segue pela escolha do sistema estrutural, de acordo com a arquitetura, custo e métodos envolvidos; determinação dos carregamentos atuantes na estrutura; cálculo, análise dos esforços e dimensionamento dos elementos; e por fim, o detalhamento de toda a estrutura, através de representação gráfica e de quantitativos.

Para Fusco e Onishi (2018), o projeto estrutural está em constante evolução e deixa de se basear em métodos tradicionais ou comparativos, que observam apenas as soluções já aplicadas anteriormente e consideradas satisfatórias, e passa a englobar uma análise racional para solucionar os sistemas de forma criativa e

inovadora, proporcionando arranjos mais eficientes. Isso é possível devido a disponibilidade de recursos de análise dos comportamentos e dos materiais das estruturas, que podem ser probabilísticos ou experimentais.

2.3.1 Concepção estrutural

Bazzo e Pereira (2013) descrevem a fase de concepção estrutural como o momento de reunir o conhecimento técnico e a imaginação criadora do projetista com o objetivo de formular uma primeira ideia, também chamada de pré-dimensionamento, que é caracterizada pela definição inicial das dimensões geométricas dos elementos estruturais, para que posteriormente, e após validações, seja adotado o dimensionamento mais adequado. Santos (2017) diz que existem diversas soluções de sistema estrutural para cada concepção arquitetônica. O que caracteriza uma boa escolha, baseada na criatividade e conhecimento sobre os materiais e dinâmica das estruturas, é propor a estrutura mais econômica que atenda aos requisitos da arquitetura e seja de fácil execução.

Segundo Rebello (2000), os métodos de cálculo têm evoluído com o tempo, e através dos recursos computacionais, comportam soluções mais complexas, não limitando a criatividade dos engenheiros de estruturas. Ainda assim, as soluções mais comumente adotadas são formadas pelos elementos estruturais de barras e placas. A concepção estrutural é a atividade realizada imediatamente antes do dimensionamento, sendo assim metódica e intuitiva. É uma prática de conceber, principalmente, a forma da estrutura, o que posteriormente terá grande impacto na eficiência do projeto. Araújo (2014) destaca que é interessante adotar dimensões que facilitem a execução e garantam a qualidade dos elementos estruturais, no momento do pré-dimensionamento.

2.3.2 Cálculo e detalhamento estruturais

Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o dimensionamento, ou cálculo, de uma estrutura é o processo de análise e definição das características que os elementos estruturais devem possuir para suportar as solicitações nas fases de execução e utilização, garantindo a segurança e impedindo que a edificação atinja os

estados limites. Para isso são aplicados métodos de análise do comportamento estrutural em cada caso. De acordo com Covas (2016), os recursos computacionais que automatizam o processo de modelagem, análise, cálculo e detalhamento dos projetos estruturais no Brasil são deveras avançados, ocupando espaço entre os melhores do mundo. Devido a isso, a dinâmica de projetar estruturas já não funciona como nos velhos tempos.

Santos (2017) relata que o cálculo, o dimensionamento e o detalhamento dos elementos estruturais são realizados, comumente, através de recursos computacionais sofisticados e que atendem as normativas em sua programação. Os *softwares* possuem recursos de análise do comportamento da edificação em diferentes situações, o que exige grande grau de atenção e domínio dos usuários para aproveitar os serviços, que são de altíssima qualidade. Covas (2016) contribui relatando que esses recursos aumentam a assertividade quanto a solução de estrutura mais adequada, através do processo iterativo de analisar diversas situações e alternativas possíveis para o arranjo estrutural.

Araújo (2021) comenta que o produto final de um projeto estrutural contempla os desenhos elaborados, juntamente com as especificações e critérios adotados. Essas informações, como também, qualquer observação que facilite a execução da estrutura, devem estar evidenciadas nas plantas. Santos (2017) diz que as plantas de detalhamento seguem uma ordem lógica de numeração de acordo com as etapas de execução da estrutura, iniciando pela locação dos pilares, seguindo para fundações, armadura de pilares e assim por diante.

2.3.3 Quantitativos e orçamentação

Santos (2017) alerta sobre a necessidade da elaboração de quantitativos e índices para compor um projeto estrutural. Basicamente, o quantitativo deve considerar três itens: peso do aço (kg), área de forma (m²) e volume de concreto (m³). Normalmente, divide-se o quantitativo da infraestrutura, que considera as fundações, e o da superestrutura, que considera todos os elementos a partir da primeira laje. Outro item que pode ser considerado é a área total da estrutura (m²), que compõe os índices relativos a fim de análises combinadas. Por exemplo, ao comparar duas

estruturas, em termos de consumo de materiais, pode-se analisar a relação peso de aço / área da estrutura, resultando em um índice com unidade kg/m^2 .

Coelho (2015) destaca a importância da realização de um orçamento para todas as etapas de uma edificação, tanto para avaliar o investimento necessário, quanto para balizar o planejamento e a gestão da obra. A orçamentação é o processo de detalhamento de todos os insumos e serviços necessários e seus respectivos custos para execução de um empreendimento. Representa uma estimativa de consumo de materiais, quantidade e tipologia de mão de obra, além do valor a ser desembolsado para tal. A qualidade de uma orçamentação está diretamente ligada a capacidade do engenheiro detalhar com precisão todos os itens necessários à execução do projeto.

Segundo Carvalho e Marchiori (2019), a organização dos orçamentos deve ser baseada nos chamados manuais orçamentários, estes possuem uma gama de composições de custos disponíveis para consulta. Geralmente são organizados em pacotes de serviços que contemplam o custo de insumos, mão de obra e equipamentos, para a execução das atividades, de forma unificada, sem discriminar individualmente cada item da composição. Eles podem ser elaborados pela própria empresa ou por outras instituições, e são baseados em cotações de mercado ou pesquisas acadêmicas. Um exemplo de manual corrente é o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

2.3.3.1 Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

De acordo com Coelho (2015), o SINAPI é referência em informações sobre insumos e composição de custos da construção civil nas áreas de habitação, saneamento e infraestrutura urbana. Opera por meio de um banco de dados, disponibilizado por uma parceria entre a Caixa Econômica Federal (CEF), responsável pela parte técnica de engenharia, e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que possui o papel de coleta e tratamento dos dados. Tabelas são divulgadas com informações sobre quantidade de materiais, tempo de mão de obra e de locação de equipamentos para cada serviço que compõe as obras.

Ademais, Carvalho e Marchiori (2019) ressaltam que o Governo Federal do Brasil utiliza como referência o SINAPI em obras e investimentos do setor público. O sistema

é completo e abrange todo o processo de orçamentação. Divide-se em dois módulos: preços e custos, que contemplam a etapa de elaboração e análise de orçamentos, e índices mensais, que servem como base para a atualização de valores nos contratos e orçamentos em vigor.

2.4 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Millan Paramo (2020) diz que o processo de otimização se refere à ação de utilizar da melhor forma possível uma situação ou recurso disponível. Esse conceito tem se tornado cada vez mais importante em nosso mundo atual, devido às limitações de recursos e ao aumento da população. Na engenharia, a busca por sistemas estruturais eficientes é constante, visando projetar estruturas econômicas e fortes o suficiente para suportar as demandas funcionais ao longo de sua vida útil. A abordagem tradicional de tentativa e erro no projeto estrutural já não é mais suficiente para atender aos critérios de segurança e econômicos simultaneamente. Assim, a otimização é vista como uma técnica valiosa para solucionar esse tipo de problema.

De acordo com Rodrigues Júnior (2005), a busca pelo projeto ideal que leve em consideração aspectos como consumo, desempenho e eficiência sempre foi um dos principais objetivos da engenharia estrutural. Com estruturas cada vez mais complexas e esbeltas, a experiência e o bom senso do projetista não são mais suficientes para alcançar esses objetivos. Por isso, as técnicas de otimização são ferramentas valiosas na atualidade.

Para Nina (2006) o problema de otimização consiste em encontrar a melhor solução para um problema matemático que representa um problema físico específico, com o objetivo de satisfazer determinadas condições. No âmbito das estruturas, como as de concreto ou aço, a otimização pode ser aplicada para determinar o custo ou peso ideal de vigas, pilares, lajes, pórticos ou treliças, que são os modelos mais frequentemente estudados. As restrições do problema, por sua vez, são estabelecidas pelas normas e códigos que regulam a prática do projeto de estruturas, tais como as limitações de dimensões das peças, equilíbrio de esforços e limites de deslocamento. O objetivo final é obter um projeto eficiente que atenda aos requisitos de desempenho, segurança e economia.

Bazzo e Pereira (2013) contrapõem o método tradicional de ensino do tema otimização, que é a abordagem com formulações matemáticas. Na prática, é utópica a ideia da aplicação de modelos matemáticos para a resolução de todos os problemas que se deseja otimizar. De qualquer forma, é sempre válida a tentativa de otimização, independente do método a ser utilizado, podendo ser simplesmente a observação das possibilidades de redução de peso, aumento de resistência e melhoria no rendimento.

2.4.1 Técnicas de otimização

Rodrigues Júnior (2005) explica que a otimização de estruturas pode ser dividida em três tipos: otimização de dimensões, otimização de forma e otimização topológica. A otimização topológica busca determinar a topologia ótima de uma estrutura, eliminando elementos desnecessários e criando vazios. Já a otimização de forma busca determinar a geometria ideal dos contornos externos e internos de estruturas contínuas e das coordenadas nodais de estruturas reticuladas. Por sua vez, a otimização de dimensões, busca determinar as dimensões ideais (seções transversais, espessuras, etc.) de cada componente de uma estrutura com forma e topologia fixas.

Segundo Bazzo e Pereira (2013), podem ser aplicados diversos métodos para otimização de um problema, a depender da natureza da característica que se deseja aprimorar, como custo, peso, consumo, segurança, entre outras. A escolha da melhor técnica compete ao engenheiro, sendo que, em alguns casos, duas ou mais são empregadas ao mesmo tempo. Os métodos de otimização são divididos em: otimização por evolução, aperfeiçoando soluções já existentes através dos avanços tecnológicos; otimização por intuição, aplicando soluções através da criatividade; otimização por tentativa, iniciando com uma solução preliminar e avançando com refinamentos e novas definições até atingir a solução ideal, através do processo de iteração; técnica gráfica, avaliando a melhor disposição dos elementos por meio de esquemas ou desenhos que permitem uma análise visual; método analítico, formulando soluções matemáticas e solucionando com o auxílio de recursos computacionais.

2.4.2 Otimização estrutural na prática

Mei e Wang (2021) analisam uma série de artigos sobre otimização estrutural e, baseado nas informações coletadas e levando em consideração os aspectos de: redução de custos, resultante a partir da redução do peso e volume da estrutura; aumento do rendimento, através do aprimoramento de propriedades estruturais; redução do impacto ambiental, por meio da diminuição do consumo de energia e emissão de gases; e multi objetivo, englobando dois ou mais aspectos. Concluem que, a maior parte dos estudos engloba aplicações voltadas ao objetivo de redução de custos na execução de estruturas.

Rosa, Silveira e Silva (2021) experimentaram a otimização de vigas de concreto armado levando em consideração a análise da redução de custo e impactos ambientais. Os resultados demonstram que a utilização de concretos de resistência mais elevada tem grande impacto na redução do custo e de emissões de dióxido de carbono. Ademais, notou-se que o aço é o material que mais impactada na otimização da viga, em ambos os aspectos. Por fim, é visto que o processo de otimização tem grande impacto na elaboração de projeto de maior eficiência. A ferramenta de análise hipotética utilizada para tal foi a Solver, presente no *software* Excel.

De forma análoga, Correia, Bono e Bono (2019) conduziram um estudo sobre a otimização de vigas de concreto armado, com o objetivo de minimização do custo, através da ferramenta computacional Solver (disponível em planilhas eletrônicas). O dimensionamento é equacionado matematicamente, a fim de encontrar os valores ótimos para as dimensões geométricas da viga, respeitando as restrições impostas. Os resultados afirmam a importância da utilização de métodos de otimização no projeto de estruturas, pois demonstram significativo impacto econômico.

Para cada elemento estrutural deve-se definir quais variáveis se deseja otimizar. Nina (2006) sugere que no caso dos pilares retangulares de concreto armado, sejam variadas a dimensão paralela ao eixo da viga apoiada e a área de armadura longitudinal. Nas vigas, também retangulares e de CA, deve-se atentar à altura da peça e à área de armadura de aço. Almeida (2021) complementa, atestando que na solução dos valores ótimos para as lajes maciças leva-se em consideração a espessura do elemento e a área de aço longitudinal na direção principal.

3 METODOLOGIA

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo compreende em uma edificação do tipo residencial multifamiliar, composta por apartamentos de 300 m² de área, localizada na zona central da cidade de Garibaldi – Rio Grande do Sul. A estrutura possui dimensões de 15 m de largura e 20 m de comprimento e altura total de 21 m (a partir da soleira do acesso principal até o forro da cobertura). Os andares são divididos em 2 subsolos e pavimento térreo, que abrigam as garagens e áreas de utilização comum, 5 pavimentos e cobertura, contendo 1 apartamento em cada, e ático. Essa situação representa a condição limite de edificação, prevista no plano diretor do município. Ademais, as vedações externas são compostas por paredes de blocos cerâmicos, e as internas por *drywall* sem localização definida em projeto. A Figura 2 apresenta a fachada sul do esqueleto da estrutura proposta.

3.1.1 Pré-dimensionamento da estrutura

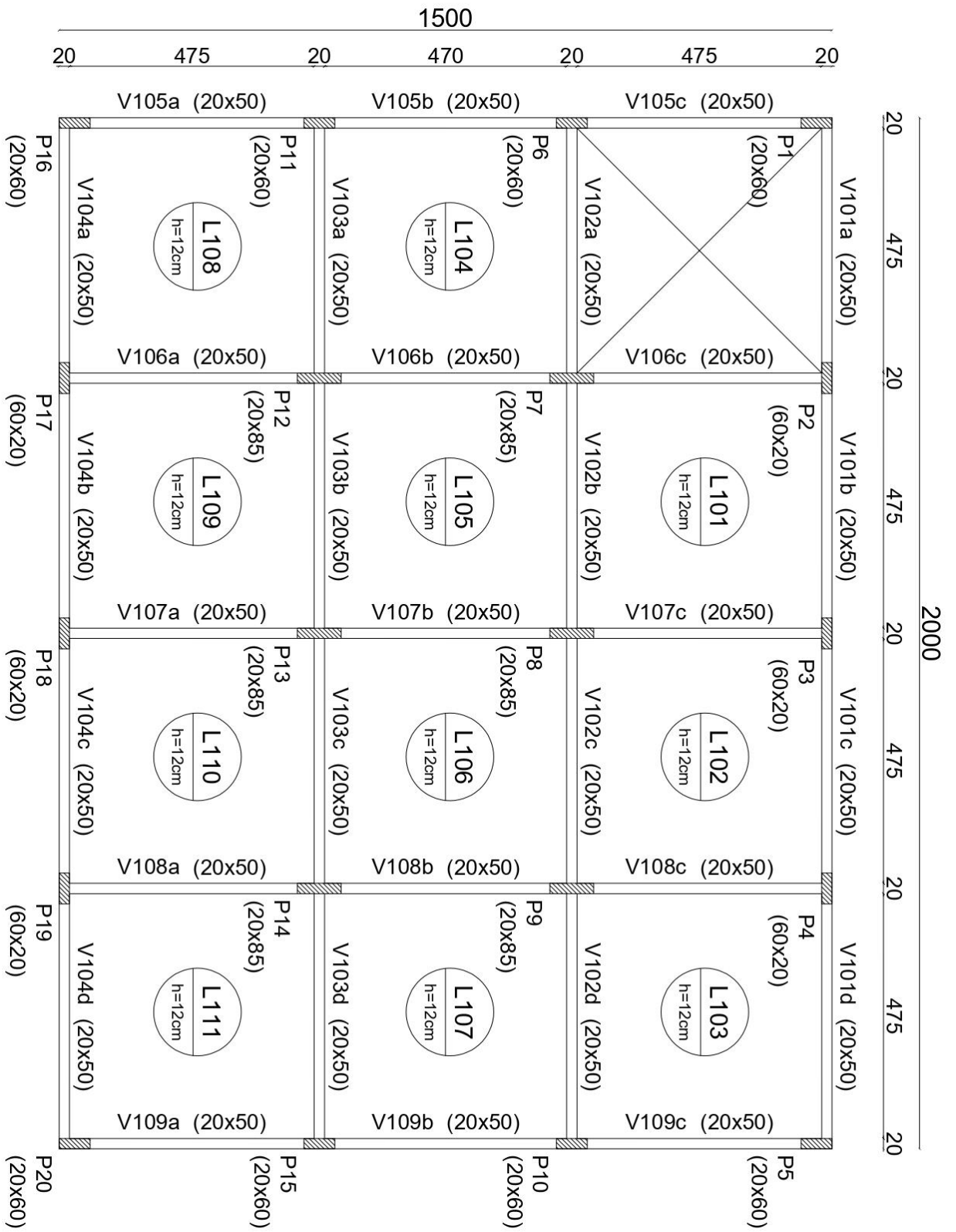
Os elementos estruturais foram pré-dimensionados de acordo com métodos empíricos, a fim de definir as dimensões geométricas iniciais dos elementos. Para as lajes, o comprimento do menor vão teórico é de 495 cm, aplicando a Equação 4 temos que $h = 12,38$ cm. Para as vigas tem-se o mesmo vão, dessa forma, $b_w = 20$ cm, e levando em consideração a relação de comprimento/altura da peça em 10%, tem-se para h o valor de 49,5 cm. Por fim, para os pilares, fixando sua largura em 20 cm, e a partir das Equações 5 e 6, tem-se para o comprimento dos pilares intermediários 85,76 cm, pilares de extremidade 64,31 cm e pilares de canto 32,16 cm.

Por questão de simetria e disposições construtivas, adotaram-se os valores de forma arredondada e padronizada entre os elementos. Com isso, as dimensões assumidas foram: 12 cm de espessura para as lajes; base e altura de 20 cm x 50 cm para vigas; e largura e comprimento de 20 cm x 85 cm para pilares intermediários e 20 cm x 60 cm para pilares de extremidade e de canto. A Figura 3 traz a planta de formas, que contém as informações descritas.

Figura 2 - Fachada sul da estrutura



Figura 3 - Planta de formas pavimento tipo (x8)



Fonte: Autor (2023)

3.2 PARÂMETROS DE PROJETO

Para a estrutura inicial, foi definido a utilização dos parâmetros mínimos previstos nas normas, de acordo com a localização da edificação. Localizada na zona urbana da cidade, a NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica a área com CAA II. A partir desta definição, foram determinados os cobrimentos e a resistência do concreto mínimos para os elementos estruturais. Optou-se por não considerar a redução de 5 mm nos cobrimentos, permitida para o caso de controle de qualidade rígido na execução. A Tabela 9 apresenta os valores adotados.

Tabela 9 - Parâmetros adotados de acordo com a CAA II

Elemento estrutural	Cobrimento nominal (mm)	Classe de concreto
Laje	25	C25
Viga	30	
Pilar		

Fonte: Autor (2023)

As ações permanentes de peso próprio da estrutura de concreto armado consideradas para o cálculo estrutural foram levantadas automaticamente pelo *software*, através do peso específico do concreto informado. Para o peso dos demais elementos e instalações da construção temos, em acordo com a Tabela 7, as cargas de 1,0 kN/m² para revestimento de piso, 0,15 kN/m² para forro, 2,3 kN/m² para alvenaria, e 0,4 kN/m² para telhado.

As ações variáveis devido ao vento e a cargas acidentais foram determinadas de acordo com a localização, características e utilização do edifício. Para isso, temos as relações estabelecidas nas Tabelas 10, 11 e 12 a fim de inserir os dados no programa.

Tabela 10 - Cargas acidentais na estrutura

(continua)		
Pavimento	Local	Carga (kN/m²)
Subsolo (x2)	Garagem	3
	Área comum	3
Térreo	Garagem	3
	Área comum	3
Pav. Tipo (x5)	Espaços internos apartamento	1,5
	Divisórias de <i>drywall</i>	0,75
	Sacada	2,5

(conclusão)		
Cobertura	Espaços internos apartamento	1,5
	Divisórias de <i>drywall</i>	0,75
	Sacada	2,5
Telhados	Cobertura + placas fotovoltaicas	1,5

Fonte: Autor (2023)

Tabela 11 - Dados para velocidade característica do vento

Fator	Valor
V0	44 m/s
S1	1.00
S2	IV
	B
S3	1.00

Fonte: Autor (2023)

Tabela 12 - Valores para coeficiente de arrasto

Variável	Valor	
	Vento a 90°	Vento a 0°
L1	15 m	20 m
L2	20 m	15 m
H	21 m	
Turbulência	Alta	

Fonte: Autor (2023)

3.3 QUANTITATIVOS E ORÇAMENTAÇÃO

Após processadas as informações e realizados os cálculos de dimensionamento da estrutura pelo *software* TQS, foram geradas tabelas que quantificam o consumo de materiais. Levaram-se em conta os dados de volume de concreto, área de formas e peso de aço, para cada elemento, e consideraram-se as características específicas de cada material, a fim de elaborar um orçamento com maior assertividade.

Como referência para a definição dos custos em cada situação observada de configuração da estrutura, utilizou-se os relatórios desonerados do SINAPI, datados do mês de abril de 2023. As características dos insumos selecionados foram: formas de madeira compensada plastificada ($e = 18$ mm); concreto usinado bombeável, brita 0 e 1, *slump* = 100 +/- 20 mm; aço conforme especificação na tabela. A composição

do custo não previu os gastos com a execução, apenas com o material necessário. A partir disso, tem-se os valores descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Referências de custos tabelas SINAPI

Item	Código	Unidade	Custo (R\$)
Fôrma	1345	m ²	144,34
Concreto C25	1527	m ³	521,29
Concreto C30	1525		537,33
Concreto C35	11145		553,37
Concreto C40	34479		569,40
Concreto C45	34481		594,96
Concreto C50	34483		635,67
Aço CA-60 4,2 mm	43059	kg	8,38
Aço CA-60 5,0 mm	43059		8,38
Aço CA-50 6,3 mm	32		9,34
Aço CA-50 8,0 mm	33		9,39
Aço CA-50 10,0 mm	34		8,85
Aço CA-50 12,5 mm	43055		7,67
Aço CA-50 16,0 mm	43055		7,67
Aço CA-50 20,0 mm	43056		8,84
Aço CA-50 25,0 mm	43056		8,84
Aço CA-50 32,0 mm	43057		9,72

Fonte: Autor (2023)

3.4 MATRIZ DE ANÁLISE

Para facilitar a organização e compreensão da análise, criaram-se modelos que englobam combinações entre as classes de concreto e as dimensões geométricas dos elementos. As combinações partiram da condição mínima de resistência do concreto em acordo com a CAA e variaram até a classe C50, como também, a partir do pré-dimensionamento das peças, reduziu-se em aproximadamente 20% as dimensões de espessura das lajes, altura das vigas e comprimento dos pilares. Os modelos podem ser observados a partir da intersecção entre colunas e linhas da Figura 4.

A nomenclatura dos arranjos geométricos deve ser interpretada da seguinte forma: considerando o arranjo “L12V50P85/60”, temos que L12 = lajes com espessura igual a 12 cm, V50 = vigas com altura igual a 50 cm e P85/60 = pilares com maior dimensão igual a 85 cm (intermediários) e igual a 60 cm (de extremidade e de canto).

Figura 4 - Matriz de análise

		Custo da estrutura (R\$)					
		Classe do concreto					
		C25	C30	C35	C40	C45	C50
Arranjo geométrico	L12V50P85/60						
	L12V50P70/50						
	L10V50P85/60						
	L10V50P70/50						
	L12V40P85/60						
	L12V40P70/50						
	L10V40P85/60						
	L10V40P70/50						

Fonte: Autor (2023)

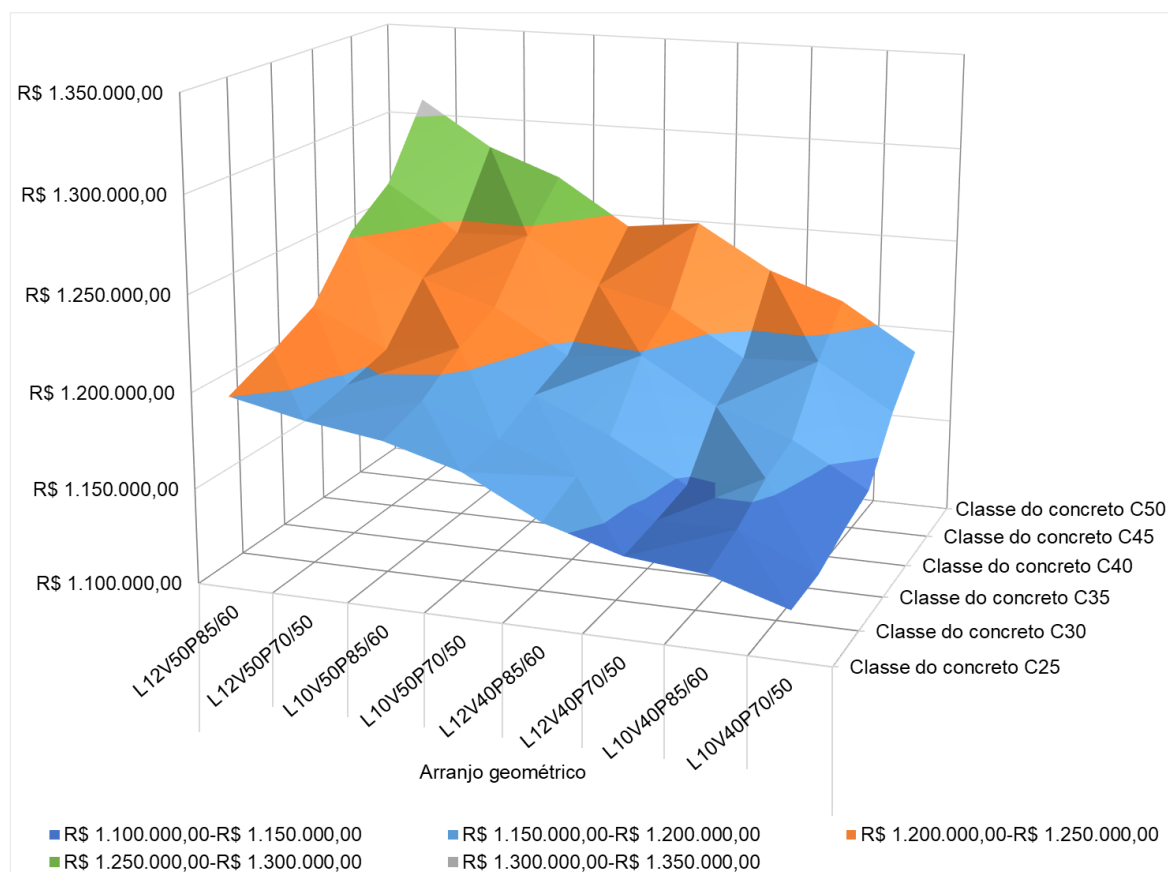
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados gerados pelo *software* de dimensionamento estrutural TQS, foram realizadas diversas análises e comparativos a fim de identificar tendências e entender os comportamentos de consumo de materiais e custo da estrutura a partir da variação dos modelos. A seguir são elencadas as principais contribuições geradas, bem como, discussões sobre os valores observados.

4.1 CUSTO DA ESTRUTURA

Observando a Figura 5, que ilustra a variação do custo da estrutura de acordo com cada modelo analisado, percebe-se uma forte tendência. É possível concluir que: o aumento da classe do concreto, ou seja, a utilização de concretos com maior resistência, provoca um aumento no custo da estrutura; por outro lado, a redução das dimensões dos elementos estruturais, gera uma redução no custo da estrutura, seguindo uma ordem de influência bem definida entre vigas, lajes e pilares.

Figura 5 - Análise gráfica do custo da estrutura em diferentes arranjos e fcks



Fonte: Autor (2023)

Também é possível visualizar, de forma numérica, a mesma análise do custo da estrutura na Figura 6, onde através de uma escala de cores é possível identificar, por outro ângulo, a variação do custo, partindo da cor verde escuro (menor custo) para a cor vermelha (maior custo), e passando por colorações verde claro, amarelo e laranja (custos intermediários).

Ademais, nota-se um destaque em vermelho no contorno do resultado exposto na Figura 6 para o modelo de arranjo L12V50P70/50 e concreto C25. Isso representa uma situação de erro, onde o processamento da estrutura no *software* resultou em dois avisos médios (taxa de armadura elevada no pilar P12 e em seu transpasse), sugerindo uma verificação e aumento da seção do elemento, para validar o dimensionamento da estrutura. Dessa forma, o modelo foi desconsiderado na análise por possuir baixa relevância frente aos demais resultados.

Figura 6 - Análise numérica do custo da estrutura em diferentes arranjos e fcks

Custo da estrutura (R\$)							
		Classe do concreto					
		C25	C30	C35	C40	C45	C50
Arranjo geométrico	L12V50P85/60	1.200.164,26	1.210.659,83	1.222.675,91	1.252.731,73	1.269.220,61	1.308.255,21
	L12V50P70/50	1.191.731,08	1.196.936,38	1.202.936,91	1.230.102,31	1.244.535,06	1.283.666,06
	L10V50P85/60	1.185.885,30	1.192.845,96	1.207.896,16	1.217.686,55	1.246.170,19	1.269.210,20
	L10V50P70/50	1.174.632,86	1.176.716,67	1.186.340,60	1.194.698,56	1.221.846,40	1.244.214,01
	L12V40P85/60	1.153.834,24	1.161.913,94	1.168.688,97	1.198.681,65	1.212.160,45	1.249.035,19
	L12V40P70/50	1.141.876,56	1.143.957,55	1.146.974,90	1.175.059,03	1.188.442,54	1.225.657,83
	L10V40P85/60	1.137.914,60	1.144.237,07	1.155.286,76	1.161.257,43	1.190.489,78	1.211.718,84
	L10V40P70/50	1.125.348,09	1.126.102,71	1.133.150,28	1.138.239,94	1.166.633,74	1.186.858,02

Fonte: Autor (2023)

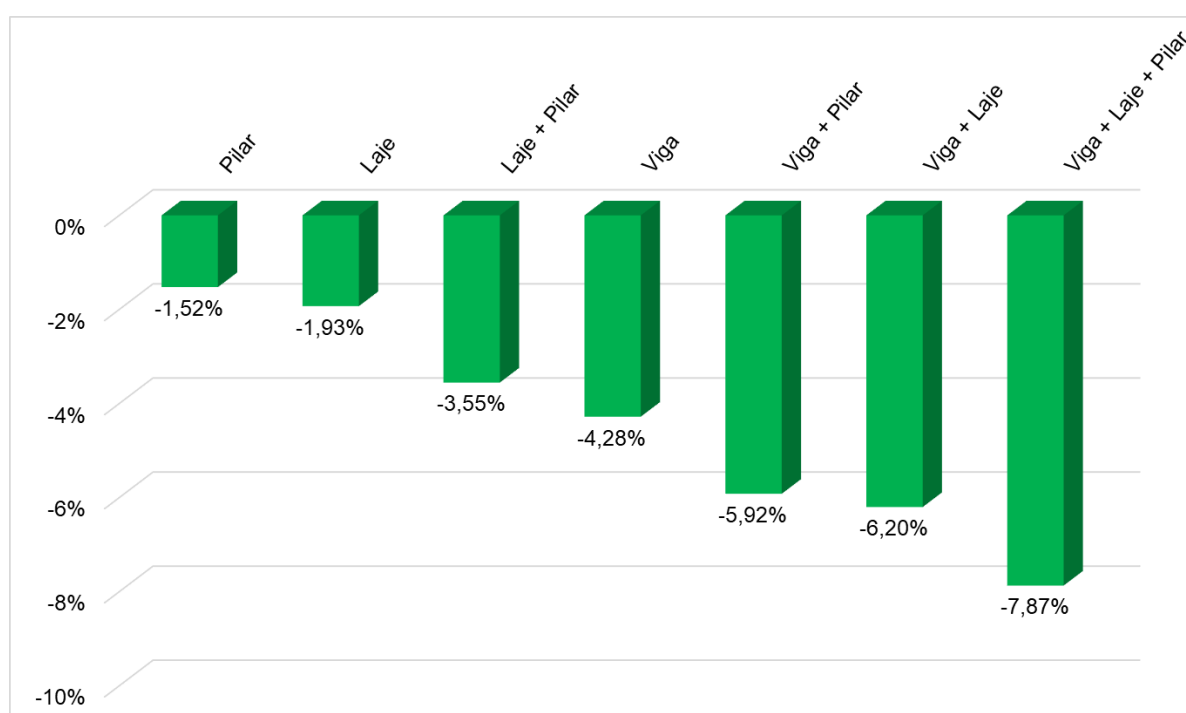
Em termos numéricos temos para a condição de pré-dimensionamento da estrutura (arranjo L12V50P85/60 e concreto C25) o custo de R\$ 1.200.164,26. Deste valor inicial foi possível reduzir R\$ 74.816,17 (ou 6,2%) com a variação dos parâmetros de dimensionamento, chegando-se ao custo R\$ 1.125.348,09 para o

modelo de arranjo L10V40P70/50 e concreto C25. O cálculo e a composição dos custos para cada modelo podem ser conferidos no Apêndice A.

4.1.1 Redução das dimensões dos elementos

Considerando a média de cada variação no arranjo estrutural para as diferentes classes de concreto, é possível estabelecer a porcentagem que cada elemento, e combinações de elementos, reduzidos, proporcionaram para a redução do custo da estrutura. Pode-se dizer que os elementos contribuem para esta redução, na seguinte ordem de intensidade: vigas (4,28%), lajes (1,93%) e pilares (1,52%). Esse padrão resultou, principalmente, da redução do consumo de concreto nas peças reduzidas, por conta da diminuição de seus volumes. A Figura 7 expõe tais percentuais, onde o potencial de redução máximo do custo da estrutura foi, em média, de 7,87%, na condição em que todos os elementos tem suas dimensões reduzidas.

Figura 7 - Redução das dimensões x Impacto no custo da estrutura



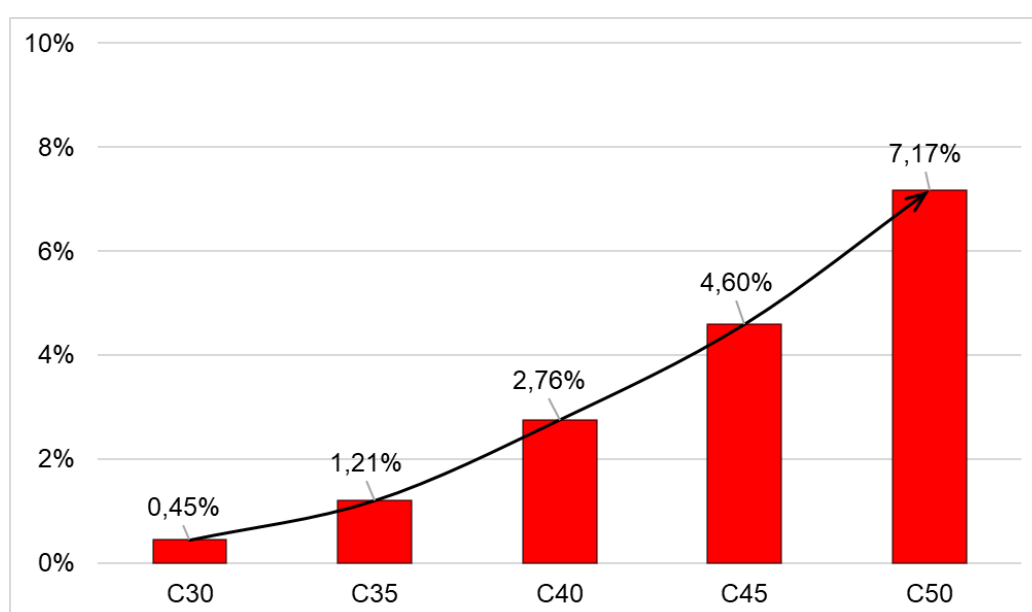
Fonte: Autor (2023)

4.1.2 Aumento da resistência do concreto

Em contraponto ao item 4.1.1, a Figura 8 mostra o aumento percentual gerado no custo da estrutura, resultante da elevação da resistência do concreto, considerando

sua média para os diferentes arranjos geométricos. Para o arranjo como um todo, notou-se um comportamento exponencial. Ao alterar a classe do concreto para C30 teve-se um aumento de 0,45% no custo da estrutura, em relação ao pré-dimensionamento (classe C25). Esse aumento triplicou quando considerado a classe C35, e seguiu em ritmo acelerado para as demais, chegando a um aumento máximo no custo da estrutura, em média, de 7,17%, com a utilização do concreto C50. O que contribuiu para essa situação foi o aumento no preço unitário para concretos de classe maior, bem como, um maior consumo de aço observado.

Figura 8 - Aumento do fck x Impacto no custo da estrutura



Fonte: Autor (2023)

4.2 CONSUMO DE AÇO

Apesar do padrão descoberto nos resultados anteriores, observou-se uma tendência discrepante ao ser analisado individualmente o comportamento do consumo de aço em cada elemento, visível na Tabela 14, de forma numérica. O modelo escolhido para intensificar esta análise foi o L10V40P70/50 por conta de ter apresentado o menor custo até então.

Os pilares demonstraram significativa redução no consumo de aço, em relação aos demais elementos estruturais, à medida que a classe de concreto foi aumentada, até o ponto em que esse consumo foi estabilizado (por conta de ter atingido a área de aço mínima). Ao passo que o consumo de aço nas vigas variou de 10.155 kgf para

10.035 kgf (diferença de 120 kgf, ou 1,2%) ao aumentar a classe para C30, por exemplo, o consumo nos pilares variou de 5.728 kgf para 4.620 kgf (diferença de 1.108 kgf, ou 19,3%). As lajes, por sua vez, apresentaram aumento gradual no consumo.

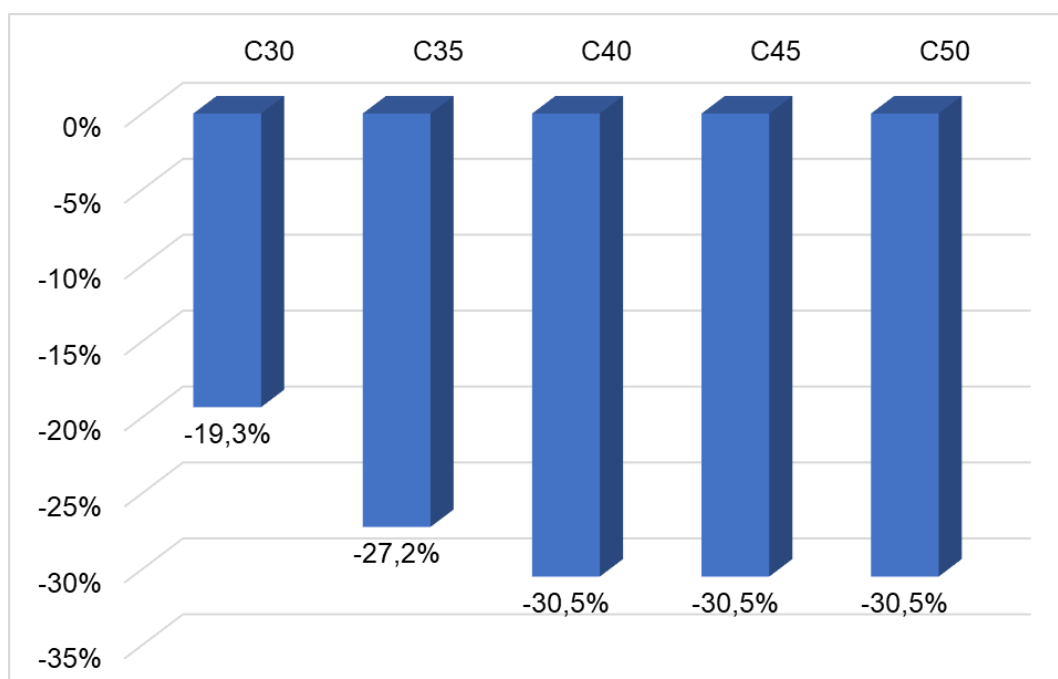
Tabela 14 - Análise numérica do consumo de aço em cada elemento estrutural do arranjo L10V40P70/50 com diferentes fcks

Consumo de aço (kgf)						
Arranjo geométrico L10V40P70/50	Classe do concreto					
	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Pilar	5.728	4.620	4.168	3.981	3.981	3.981
Viga	10.155	10.035	9.935	9.853	10.165	10.344
Laje	15.633	15.926	16.491	16.558	18.231	18.415

Fonte: Autor (2023)

Em termos percentuais, a variação do consumo de aço nos pilares pode ser vista na Figura 9, onde valores bastante expressivos foram gerados. Aumentando apenas a classe do concreto para C30, teve-se uma redução de 19,3% no consumo. Essa redução continuou para as classes C35, com 27,2% e C40, onde atingiu a redução máxima de 30,5%, mantendo-se para as classes C45 e C50.

Figura 9 - Análise percentual do consumo de aço nos pilares do arranjo L10V40P70/50 com diferentes fcks



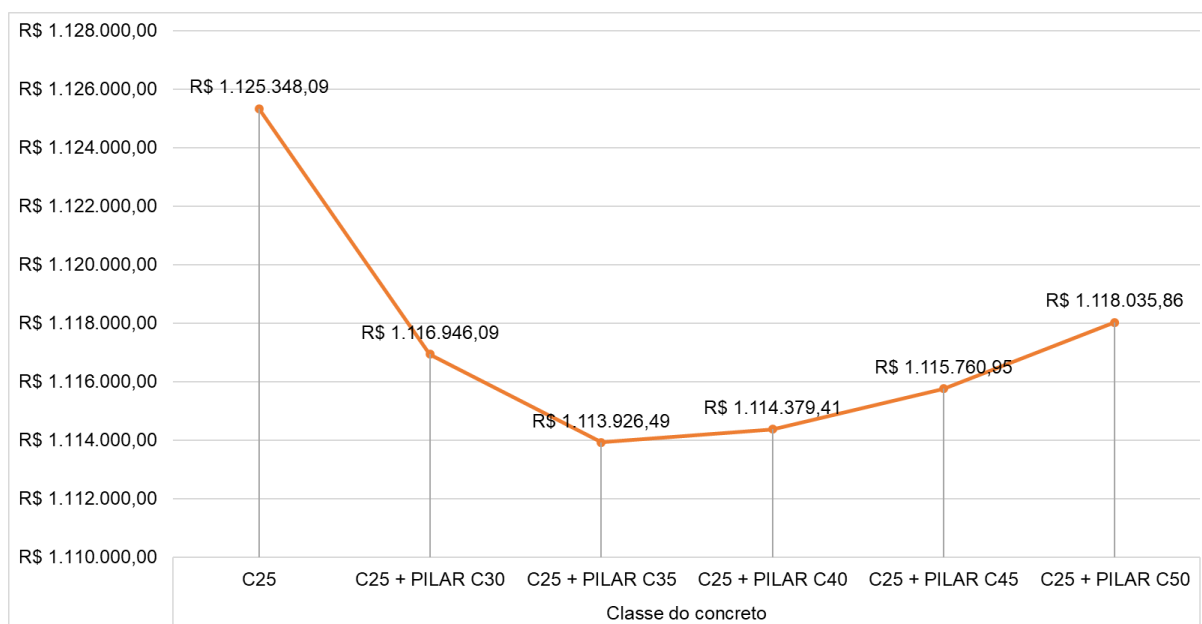
Fonte: Autor (2023)

4.3 OTIMIZAÇÃO DO CUSTO

A partir do exposto no item 4.2, foi proposto a segmentação da estrutura para definição da resistência do concreto. Assim, foi fixado o concreto de classe C25 para as vigas e lajes, e variou-se o concreto dos pilares para todas as classes do Grupo I. Com esses cinco novos modelos, foi realizado o comparativo e análise do orçamento com a condição inicial, ilustrado nas Figuras 10, 11 e 12. Encontrou-se enfim, a configuração de parâmetros ótima para o estudo proposto: o arranjo geométrico L10V40P70/50 e as classes de concreto C25 para lajes e vigas e C35 para pilares, com um custo de R\$ 1.113.926,49 (1% menor do que o menor custo anterior).

Em conclusão, foi elaborado o projeto estrutural da estrutura otimizada, que pode ser conferido no Apêndice B, assim como, seu orçamento discriminado, apresentado no Apêndice C.

Figura 10 - Análise gráfica do custo da estrutura no arranjo L10V40P70/50 e diferentes fcks



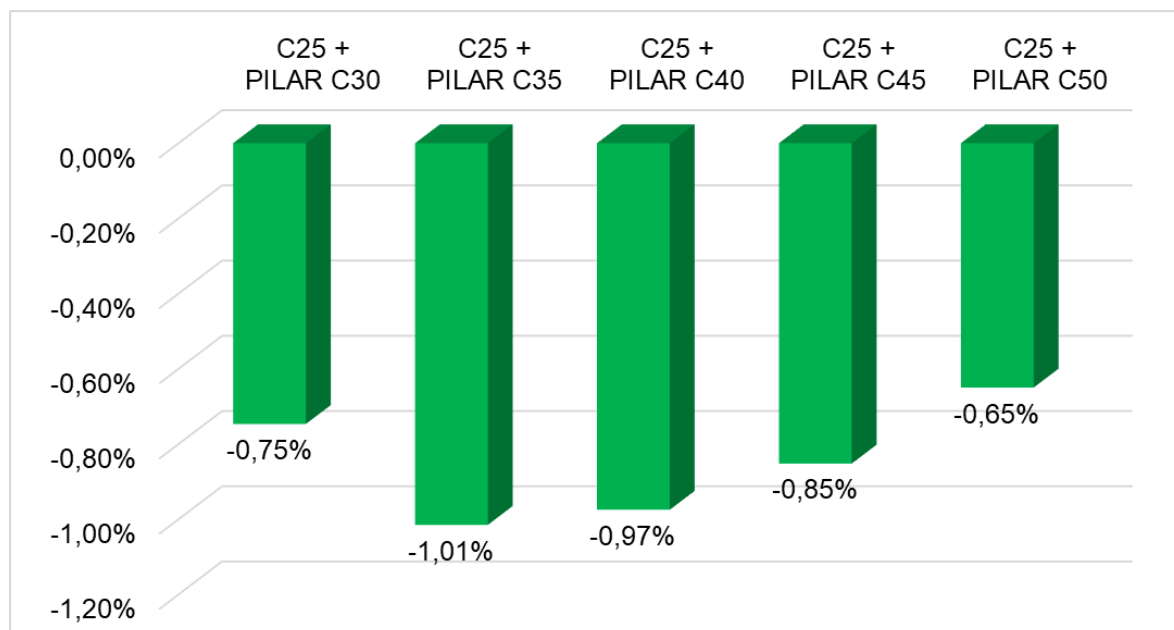
Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Análise numérica do custo da estrutura no arranjo L10V40P70/50 e diferentes fcks

Arranjo geométrico	Custo da estrutura (R\$)					
	Classe do concreto					
	C25	C25 + PILAR C30	C25 + PILAR C35	C25 + PILAR C40	C25 + PILAR C45	C25 + PILAR C50
L10V40P70/50	1.125.348,09	1.116.946,09	1.113.926,49	1.114.379,41	1.115.760,95	1.118.035,86

Fonte: Autor (2023)

Figura 12 - Análise percentual do impacto da variação do fck do arranjo L10V40P70/50 no custo da estrutura



Fonte: Autor (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou conceitos importantes para o conhecimento das principais características dos materiais e para o dimensionamento e projeto de estruturas de concreto armado. Foi baseado em profissionais e estudiosos da área, mas principalmente, fundamentado pelas Normas Brasileiras vigentes (as quais estão sujeitas a revisões, o que deve ser verificado em leituras futuras).

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foi possível verificar a facilidade e eficiência na utilização de *software* de dimensionamento, visto a agilidade na realização dos cálculos e automação dos processos, além do grande detalhamento das informações fornecidas. Isso contribui para um aprimoramento das análises realizadas, que acabam sendo intensificadas no campo analítico, ao passo que menos energia é despendida em atividades operacionais.

A estrutura estudada, apesar de concebida exclusivamente para este trabalho, tem características realistas e facilmente poderia ser tratada como um caso prático. A tipologia respeita todas as normas e é semelhante a estruturas atualmente sendo construídas na região, desconsiderando a arquitetura de geometria padronizada. Isso destaca a aplicabilidade do estudo em situações reais no mercado da construção civil.

Os resultados apresentaram grande relevância para o custo da estrutura, visto que se notou um potencial de redução total de 7,2% a partir da condição de pré-dimensionamento adotada. E mais, a otimização proporcionou ganho de área para o empreendimento com a redução dos elementos, aumento da durabilidade dos pilares com o aumento da resistência do concreto e diminuição do impacto ambiental por conta do menor consumo de materiais. Entretanto, destaca-se a necessidade de avaliar o estado limite de serviço, a fim de validar o dimensionamento. De qualquer forma, a perspectiva frente à situação é economicamente interessante e justifica o trabalho de um profissional para tal.

Por fim, é importante destacar que os objetivos propostos neste trabalho foram integralmente atendidos. Além disso, resultados deveras interessantes foram obtidos na análise, através dos padrões observados e descobertas feitas. Sabe-se que tais resultados são fieis, inicialmente, apenas para o objeto de estudo visto. Contudo, existe a possibilidade de que seja possível desvendar um padrão bem estabelecido e aplicável a outras estruturas de concreto armado, a partir da expansão do estudo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse contexto, fica a sugestão de aprofundamento na investigação, para futuros trabalhos, observando diferentes modelos e tipologias de estruturas em busca de padrões replicáveis. A vida útil da estrutura, que está diretamente ligada a classe do concreto, é uma característica que também pode ser estudada, e ainda ser complementada com a variável de cobrimento dos elementos estruturais. Outro tópico que tem chamado a atenção do mercado atualmente e pode acrescentar à linha de pesquisa é o impacto ambiental relacionado ao consumo de materiais.

Em outra perspectiva, enxerga-se uma oportunidade de negócio, considerando a crescente competitividade no mercado por parte das construtoras. Com os resultados observados é possível afirmar que existe a possibilidade de economia ao analisar e determinar os parâmetros ótimos de dimensionamento para uma estrutura de concreto armado. Essa técnica pode ser aplicada por projetistas estruturais, em busca de maior lucratividade nos empreendimentos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Leandro Silva. **Otimização multiobjetivo aplicada a projetos de lajes maciças e pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2021. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2021.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 1v.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 2v.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 3v.
- ARAÚJO, José Milton de. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande, RS: Editora Dunas, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. 4 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 31 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estrutura de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 3 p.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Pilares de concreto armado**: estruturas de concreto II. São Paulo: UNESP, 2015. (Apostila).

BAZZO, Walter Antonio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia**: conceitos, ferramentas e comportamentos. 4. ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2013. 296 p.

CARVALHO, Michele Tereza Marques; MARCHIORI, Fernanda Fernandes. **Conhecendo o Orçamento de Obras**: Como tornar seu orçamento mais real. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. E-book. ISBN 9788595150768. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595150768/>. Acesso em: 17 mai. 2023.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.

COELHO, Ronaldo Sérgio de Araújo. **Orçamento de obras na construção civil**. São Luís: Edição do Autor, 2016. 354 p.

CORREIA, Rubens Silva; BONO, Giuliana Furtado Franca; BONO, Gustavo. *Optimization of reinforced concrete beams using Solver tool*. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 12. n. 4. p. 910-931. ago. 2019.

COVAS, Nelson. Informática aplicada a projetos: Tecnologia da informação no projeto e modelagem de estruturas de concreto. **Revista Concreto & Construções**. Ed. IBRACON. n. 84. São Paulo, p. 10-23, 2016.

CUNHA, Jesiel. **Estruturas de concreto armado**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, 198 p. Apostila, 2014. (Notas de aula)

GOTO, Hudson; RIBEIRO, João Paulo Caixeta; CENTOFANTE, Roberta. **Materiais da construção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018. E-book. ISBN 9788595027725. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595027725/>. Acesso em: 26 abr. 2023.

FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minouru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Cengage, 2018. 264 p.

MEI, Linfeng; WANG, Qian. *Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review*. **Buildings**. Singapore, 2021. DOI:<https://doi.org/10.3390/buildings11020066>

MILLAN PARAMO, Carlos Andres. **Abordagem metaheurística para otimização estrutural**. 2020. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

NINA, Thais Coimbra. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos planos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2007.

RODRIGUES JÚNIOR, Sandoval José. **Otimização de Pilares de Edifícios Altos de Concreto Armado**. 2005. 154 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

ROSA, Bruno Henrique Costa; SILVEIRA, Marco Antonio Albuquerque; SILVA, Matheus Henrique da. **Otimização de vigas de concreto armado visando redução de custo e impacto ambiental**. TCC. UP. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.up.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3425/1/GRUPO%2023%20-%20TCC2.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2023.

SANTOS, José Sérgio dos. **Desconstruindo o projeto estrutural de edifícios: concreto armado e protendido**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SILVA, Gustavo Ribeiro da. **Estruturas de Concreto Armado II**. Caxias do Sul: UCS, 2022. (Notas de aula)

APÊNDICE A - ORÇAMENTOS ESTRUTURAS

Concreto C25		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682.358,69
Concreto C25	494,65	257.856,10
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3366	28.207,08
Aço CA-50 6,3 mm	14525	135.663,50
Aço CA-50 8,0 mm	77	723,03
Aço CA-50 10,0 mm	5507	48.736,95
Aço CA-50 12,5 mm	3139	24.076,13
Aço CA-50 16,0 mm	2674	20.509,58
Aço CA-50 20,0 mm	230	2.033,20
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.200.164,26
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C25	447,01	233021,84
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3589	30075,82
Aço CA-50 6,3 mm	13799	128882,66
Aço CA-50 8,0 mm	1428	13408,92
Aço CA-50 10,0 mm	6471	57268,35
Aço CA-50 12,5 mm	2469	18937,23
Aço CA-50 16,0 mm	1956	15002,52
Aço CA-50 20,0 mm	166	1467,44
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.185.885,30
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C25	467,28	243588,39
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3290	27570,20
Aço CA-50 6,3 mm	14421	134692,14
Aço CA-50 8,0 mm	21	197,19
Aço CA-50 10,0 mm	5701	50453,85
Aço CA-50 12,5 mm	2486	19067,62
Aço CA-50 16,0 mm	3408	26139,36
Aço CA-50 20,0 mm	998	8822,32
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.153.834,24
L10V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C25	419,64	218754,14
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3257	27293,66

Concreto C30		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682358,69
Concreto C30	494,65	265790,28
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	4140	34693,20
Aço CA-50 6,3 mm	14783	138073,22
Aço CA-50 8,0 mm	20	187,80
Aço CA-50 10,0 mm	6399	56631,15
Aço CA-50 12,5 mm	2335	17909,45
Aço CA-50 16,0 mm	1884	14450,28
Aço CA-50 20,0 mm	64	565,76
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.210.659,83
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C30	447,01	240191,88
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	4149	34768,62
Aço CA-50 6,3 mm	14084	131544,56
Aço CA-50 8,0 mm	1160	10892,40
Aço CA-50 10,0 mm	6362	56303,70
Aço CA-50 12,5 mm	2395	18369,65
Aço CA-50 16,0 mm	1689	12954,63
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.192.845,96
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C30	467,28	251083,56
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2251	18863,38
Aço CA-50 6,3 mm	16504	154147,36
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6120	54162,00
Aço CA-50 12,5 mm	1698	13023,66
Aço CA-50 16,0 mm	2979	22848,93
Aço CA-50 20,0 mm	507	4481,88
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.161.913,94
L10V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C30	419,64	225485,16
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2279	19098,02

Aço CA-50 6,3 mm	14014	130890,76
Aço CA-50 8,0 mm	1319	12385,41
Aço CA-50 10,0 mm	5584	49418,40
Aço CA-50 12,5 mm	2510	19251,70
Aço CA-50 16,0 mm	3654	28026,18
Aço CA-50 20,0 mm	354	3129,36
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.137.914,60
L12V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C25	484,11	252361,70
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3378	28307,64
Aço CA-50 6,3 mm	14167	132319,78
Aço CA-50 8,0 mm	195	1831,05
Aço CA-50 10,0 mm	5662	50108,70
Aço CA-50 12,5 mm	2203	16897,01
Aço CA-50 16,0 mm	2173	16666,91
Aço CA-50 20,0 mm	1726	15257,84
Aço CA-50 25,0 mm	1155	10210,20
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.191.731,08
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C25	436,47	227527,45
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3446	28877,48
Aço CA-50 6,3 mm	13744	128368,96
Aço CA-50 8,0 mm	1423	13361,97
Aço CA-50 10,0 mm	6303	55781,55
Aço CA-50 12,5 mm	1698	13023,66
Aço CA-50 16,0 mm	2531	19412,77
Aço CA-50 20,0 mm	930	8221,20
Aço CA-50 25,0 mm	763	6744,92
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.174.632,86
L12V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C25	456,61	238026,23
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3126	26195,88
Aço CA-50 6,3 mm	14271	133291,14
Aço CA-50 8,0 mm	63	591,57
Aço CA-50 10,0 mm	5597	49533,45
Aço CA-50 12,5 mm	1774	13606,58
Aço CA-50 16,0 mm	3500	26845,00
Aço CA-50 20,0 mm	2332	20614,88
Aço CA-50 25,0 mm	578	5109,52

Aço CA-50 6,3 mm	15919	148683,46
Aço CA-50 8,0 mm	1010	9483,90
Aço CA-50 10,0 mm	6234	55170,90
Aço CA-50 12,5 mm	1530	11735,10
Aço CA-50 16,0 mm	3035	23278,45
Aço CA-50 20,0 mm	287	2537,08
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.144.237,07
L12V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C30	484,11	260126,83
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3832	32112,16
Aço CA-50 6,3 mm	14819	138409,46
Aço CA-50 8,0 mm	65	610,35
Aço CA-50 10,0 mm	5920	52392,00
Aço CA-50 12,5 mm	2150	16490,50
Aço CA-50 16,0 mm	2060	15800,20
Aço CA-50 20,0 mm	1080	9547,20
Aço CA-50 25,0 mm	416	3677,44
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.196.936,38
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C30	436,47	234528,43
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3883	32539,54
Aço CA-50 6,3 mm	14160	132254,40
Aço CA-50 8,0 mm	1230	11549,70
Aço CA-50 10,0 mm	6075	53763,75
Aço CA-50 12,5 mm	2070	15876,90
Aço CA-50 16,0 mm	2127	16314,09
Aço CA-50 20,0 mm	559	4941,56
Aço CA-50 25,0 mm	185	1635,40
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.176.716,67
L12V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C30	456,61	245350,25
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	1937	16232,06
Aço CA-50 6,3 mm	16510	154203,40
Aço CA-50 8,0 mm	26	244,14
Aço CA-50 10,0 mm	5828	51577,80
Aço CA-50 12,5 mm	1411	10822,37
Aço CA-50 16,0 mm	3618	27750,06
Aço CA-50 20,0 mm	914	8079,76
Aço CA-50 25,0 mm	185	1635,40

Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.141.876,56
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	408,97	213191,97
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3192	26748,96
Aço CA-50 6,3 mm	14059	131311,06
Aço CA-50 8,0 mm	1176	11042,64
Aço CA-50 10,0 mm	5674	50214,90
Aço CA-50 12,5 mm	1613	12371,71
Aço CA-50 16,0 mm	3792	29084,64
Aço CA-50 20,0 mm	1456	12871,04
Aço CA-50 25,0 mm	555	4906,20
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.125.348,09

Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.143.957,55
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C30	408,97	219751,85
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	1988	16659,44
Aço CA-50 6,3 mm	15934	148823,56
Aço CA-50 8,0 mm	1151	10807,89
Aço CA-50 10,0 mm	5948	52639,80
Aço CA-50 12,5 mm	1227	9411,09
Aço CA-50 16,0 mm	3333	25564,11
Aço CA-50 20,0 mm	1000	8840,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.126.102,71

Concreto C35		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682358,69
Concreto C35	494,65	273724,47
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2285	19148,30
Aço CA-50 6,3 mm	17037	159125,58
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6200	54870,00
Aço CA-50 12,5 mm	2015	15455,05
Aço CA-50 16,0 mm	2346	17993,82
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.222.675,91
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C35	447,01	247361,92
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2292	19206,96
Aço CA-50 6,3 mm	16727	156230,18
Aço CA-50 8,0 mm	1079	10131,81
Aço CA-50 10,0 mm	6570	58144,50
Aço CA-50 12,5 mm	2147	16467,49
Aço CA-50 16,0 mm	1634	12532,78
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.207.896,16
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)

Concreto C40		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682358,69
Concreto C40	494,65	281653,71
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2294	19223,72
Aço CA-50 6,3 mm	19510	182223,40
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6405	56684,25
Aço CA-50 12,5 mm	2407	18461,69
Aço CA-50 16,0 mm	1581	12126,27
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.252.731,73
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C40	447,01	254527,49
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2282	19123,16
Aço CA-50 6,3 mm	17085	159573,90
Aço CA-50 8,0 mm	919	8629,41
Aço CA-50 10,0 mm	6694	59241,90
Aço CA-50 12,5 mm	1468	11259,56
Aço CA-50 16,0 mm	2283	17510,61
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.217.686,55
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)

Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C35	467,28	258578,73
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2268	19005,84
Aço CA-50 6,3 mm	16668	155679,12
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6169	54595,65
Aço CA-50 12,5 mm	1452	11136,84
Aço CA-50 16,0 mm	3111	23861,37
Aço CA-50 20,0 mm	286	2528,24
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.168.688,97
L10V40P85/60		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C35	419,64	232216,19
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2279	19098,02
Aço CA-50 6,3 mm	16801	156921,34
Aço CA-50 8,0 mm	753	7070,67
Aço CA-50 10,0 mm	6228	55117,80
Aço CA-50 12,5 mm	1434	10998,78
Aço CA-50 16,0 mm	3043	23339,81
Aço CA-50 20,0 mm	199	1759,16
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.155.286,76
L12V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C35	484,11	267891,95
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	1980	16592,40
Aço CA-50 6,3 mm	17137	160059,58
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5836	51648,60
Aço CA-50 12,5 mm	2198	16858,66
Aço CA-50 16,0 mm	2397	18384,99
Aço CA-50 20,0 mm	422	3730,48
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.202.936,91
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C35	436,47	241529,40
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2024	16961,12
Aço CA-50 6,3 mm	16767	156603,78
Aço CA-50 8,0 mm	1100	10329,00
Aço CA-50 10,0 mm	6447	57055,95

Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C40	467,28	266069,23
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2268	19005,84
Aço CA-50 6,3 mm	19129	178664,86
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6135	54294,75
Aço CA-50 12,5 mm	1569	12034,23
Aço CA-50 16,0 mm	2931	22480,77
Aço CA-50 20,0 mm	320	2828,80
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.198.681,65
L10V40P85/60		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C40	419,64	238943,02
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2274	19056,12
Aço CA-50 6,3 mm	16860	157472,40
Aço CA-50 8,0 mm	683	6413,37
Aço CA-50 10,0 mm	6305	55799,25
Aço CA-50 12,5 mm	1369	10500,23
Aço CA-50 16,0 mm	2835	21744,45
Aço CA-50 20,0 mm	290	2563,60
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.161.257,43
L12V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C40	484,11	275652,23
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2085	17472,30
Aço CA-50 6,3 mm	19525	182363,50
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	6266	55454,10
Aço CA-50 12,5 mm	2137	16390,79
Aço CA-50 16,0 mm	1838	14097,46
Aço CA-50 20,0 mm	102	901,68
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.230.102,31
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C40	436,47	248526,02
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2094	17547,72
Aço CA-50 6,3 mm	17065	159387,10
Aço CA-50 8,0 mm	944	8864,16
Aço CA-50 10,0 mm	6570	58144,50

Aço CA-50 12,5 mm	1720	13192,40
Aço CA-50 16,0 mm	2060	15800,20
Aço CA-50 20,0 mm	176	1555,84
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.186.340,60
L12V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C35	456,61	252674,28
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	1994	16709,72
Aço CA-50 6,3 mm	16680	155791,20
Aço CA-50 8,0 mm	2	18,78
Aço CA-50 10,0 mm	5907	52276,95
Aço CA-50 12,5 mm	1438	11029,46
Aço CA-50 16,0 mm	3496	26814,32
Aço CA-50 20,0 mm	407	3597,88
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.146.974,90
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C35	408,97	226311,73
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2021	16935,98
Aço CA-50 6,3 mm	16767	156603,78
Aço CA-50 8,0 mm	844	7925,16
Aço CA-50 10,0 mm	6042	53471,70
Aço CA-50 12,5 mm	1358	10415,86
Aço CA-50 16,0 mm	3098	23761,66
Aço CA-50 20,0 mm	466	4119,44
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.133.150,28

Aço CA-50 12,5 mm	1019	7815,73
Aço CA-50 16,0 mm	2713	20808,71
Aço CA-50 20,0 mm	33	291,72
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.194.698,56
L12V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C40	456,61	259993,73
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2087	17489,06
Aço CA-50 6,3 mm	19036	177796,24
Aço CA-50 8,0 mm	2	18,78
Aço CA-50 10,0 mm	6047	53515,95
Aço CA-50 12,5 mm	1461	11205,87
Aço CA-50 16,0 mm	3032	23255,44
Aço CA-50 20,0 mm	421	3721,64
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.175.059,03
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C40	408,97	232867,52
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2137	17908,06
Aço CA-50 6,3 mm	16746	156407,64
Aço CA-50 8,0 mm	751	7051,89
Aço CA-50 10,0 mm	6338	56091,30
Aço CA-50 12,5 mm	1125	8628,75
Aço CA-50 16,0 mm	2947	22603,49
Aço CA-50 20,0 mm	348	3076,32
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.138.239,94

Concreto C45		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682358,69
Concreto C45	494,65	294296,96
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2285	19148,30
Aço CA-50 6,3 mm	19741	184380,94
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5839	51675,15
Aço CA-50 12,5 mm	3292	25249,64
Aço CA-50 16,0 mm	1579	12110,93
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00

Concreto C50		
L12V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4727,44	682358,69
Concreto C50	494,65	314434,17
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2285	19148,30
Aço CA-50 6,3 mm	21697	202649,98
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5832	51613,20
Aço CA-50 12,5 mm	2810	21552,70
Aço CA-50 16,0 mm	2151	16498,17
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00

Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.269.220,61
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C45	447,01	265953,07
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2282	19123,16
Aço CA-50 6,3 mm	18948	176974,32
Aço CA-50 8,0 mm	981	9211,59
Aço CA-50 10,0 mm	6476	57312,60
Aço CA-50 12,5 mm	2316	17763,72
Aço CA-50 16,0 mm	1566	12011,22
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.246.170,19
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C45	467,28	278012,91
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2268	19005,84
Aço CA-50 6,3 mm	19314	180392,76
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5837	51657,45
Aço CA-50 12,5 mm	2060	15800,20
Aço CA-50 16,0 mm	2776	21291,92
Aço CA-50 20,0 mm	305	2696,20
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.212.160,45
L10V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C45	419,64	249669,01
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2265	18980,70
Aço CA-50 6,3 mm	18707	174723,38
Aço CA-50 8,0 mm	752	7061,28
Aço CA-50 10,0 mm	5849	51763,65
Aço CA-50 12,5 mm	1969	15102,23
Aço CA-50 16,0 mm	2743	21038,81
Aço CA-50 20,0 mm	383	3385,72
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.190.489,78
L12V50P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C45	484,11	288026,09
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00

Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.308.255,21
L10V50P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4765,28	687820,52
Concreto C50	447,01	284150,85
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2282	19123,16
Aço CA-50 6,3 mm	19229	179598,86
Aço CA-50 8,0 mm	1007	9455,73
Aço CA-50 10,0 mm	6140	54339,00
Aço CA-50 12,5 mm	2283	17510,61
Aço CA-50 16,0 mm	2244	17211,48
Aço CA-50 20,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.269.210,20
L12V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4456,86	643303,17
Concreto C50	467,28	297035,88
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2262	18955,56
Aço CA-50 6,3 mm	21252	198493,68
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5905	52259,25
Aço CA-50 12,5 mm	1894	14526,98
Aço CA-50 16,0 mm	2969	22772,23
Aço CA-50 20,0 mm	191	1688,44
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.249.035,19
L10V40P85/60		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4494,7	648765,00
Concreto C50	419,64	266752,56
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2265	18980,70
Aço CA-50 6,3 mm	19045	177880,30
Aço CA-50 8,0 mm	845	7934,55
Aço CA-50 10,0 mm	5954	52692,90
Aço CA-50 12,5 mm	1696	13008,32
Aço CA-50 16,0 mm	2873	22035,91
Aço CA-50 20,0 mm	415	3668,60
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.211.718,84
L12V50P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4626,37	667770,25
Concreto C50	484,11	307734,20
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00

Aço CA-60 5,0 mm	2117	17740,46
Aço CA-50 6,3 mm	19684	183848,56
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5764	51011,40
Aço CA-50 12,5 mm	3241	24858,47
Aço CA-50 16,0 mm	1360	10431,20
Aço CA-50 20,0 mm	96	848,64
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.244.535,06
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C45	436,47	259682,19
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2129	17841,02
Aço CA-50 6,3 mm	18865	176199,10
Aço CA-50 8,0 mm	1009	9474,51
Aço CA-50 10,0 mm	6435	56949,75
Aço CA-50 12,5 mm	1987	15240,29
Aço CA-50 16,0 mm	1676	12854,92
Aço CA-50 20,0 mm	33	291,72
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.221.846,40
L12V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C45	456,61	271664,69
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2113	17706,94
Aço CA-50 6,3 mm	19192	179253,28
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5930	52480,50
Aço CA-50 12,5 mm	1631	12509,77
Aço CA-50 16,0 mm	2979	22848,93
Aço CA-50 20,0 mm	443	3916,12
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.188.442,54
L10V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C45	408,97	243320,79
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2137	17908,06
Aço CA-50 6,3 mm	18569	173434,46
Aço CA-50 8,0 mm	779	7314,81
Aço CA-50 10,0 mm	6027	53338,95
Aço CA-50 12,5 mm	1617	12402,39
Aço CA-50 16,0 mm	2901	22250,67
Aço CA-50 20,0 mm	346	3058,64

Aço CA-60 5,0 mm	2117	17740,46
Aço CA-50 6,3 mm	21651	202220,34
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5821	51515,85
Aço CA-50 12,5 mm	2597	19918,99
Aço CA-50 16,0 mm	2111	16191,37
Aço CA-50 20,0 mm	65	574,60
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.283.666,06
L10V50P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4664,77	673312,90
Concreto C50	436,47	277450,88
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2129	17841,02
Aço CA-50 6,3 mm	19127	178646,18
Aço CA-50 8,0 mm	1007	9455,73
Aço CA-50 10,0 mm	6162	54533,70
Aço CA-50 12,5 mm	2076	15922,92
Aço CA-50 16,0 mm	2185	16758,95
Aço CA-50 20,0 mm	33	291,72
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.244.214,01
L12V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4351,27	628062,31
Concreto C50	456,61	290253,28
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2115	17723,70
Aço CA-50 6,3 mm	21161	197643,74
Aço CA-50 8,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 10,0 mm	5986	52976,10
Aço CA-50 12,5 mm	1492	11443,64
Aço CA-50 16,0 mm	3082	23638,94
Aço CA-50 20,0 mm	443	3916,12
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.225.657,83
L10V40P70/50		
Item	Qty.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C50	408,97	259969,96
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2137	17908,06
Aço CA-50 6,3 mm	18796	175554,64
Aço CA-50 8,0 mm	969	9098,91
Aço CA-50 10,0 mm	6091	53905,35
Aço CA-50 12,5 mm	1427	10945,09
Aço CA-50 16,0 mm	2980	22856,60
Aço CA-50 20,0 mm	341	3014,44

Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.166.633,74

Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.186.858,02

Varição da classe do concreto nos pilares		
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	348,23	181528,82
Concreto C30	60,74	32637,42
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3327	27880,26
Aço CA-50 6,3 mm	13930	130106,20
Aço CA-50 8,0 mm	1095	10282,05
Aço CA-50 10,0 mm	5848	51754,80
Aço CA-50 12,5 mm	1642	12594,14
Aço CA-50 16,0 mm	3525	27036,75
Aço CA-50 20,0 mm	1077	9520,68
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.116.946,09
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	348,23	181528,82
Concreto C35	60,74	33611,69
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3396	28458,48
Aço CA-50 6,3 mm	13842	129284,28
Aço CA-50 8,0 mm	1104	10366,56
Aço CA-50 10,0 mm	5880	52038,00
Aço CA-50 12,5 mm	1869	14335,23
Aço CA-50 16,0 mm	3274	25111,58
Aço CA-50 20,0 mm	632	5586,88
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.113.926,49
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	348,23	181528,82
Concreto C40	60,74	34585,36
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3463	29019,94
Aço CA-50 6,3 mm	13758	128499,72
Aço CA-50 8,0 mm	1104	10366,56
Aço CA-50 10,0 mm	5964	52781,40
Aço CA-50 12,5 mm	1857	14243,19
Aço CA-50 16,0 mm	3186	24436,62
Aço CA-50 20,0 mm	601	5312,84
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00

Teste com outra classe nas vigas e lajes		
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C30	348,23	187114,43
Concreto C35	60,74	33611,69
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	2023	16952,74
Aço CA-50 6,3 mm	15895	148459,30
Aço CA-50 8,0 mm	1151	10807,89
Aço CA-50 10,0 mm	5912	52321,20
Aço CA-50 12,5 mm	1568	12026,56
Aço CA-50 16,0 mm	3103	23800,01
Aço CA-50 20,0 mm	470	4154,80
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.122.853,59

Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.114.379,41
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	348,23	181528,82
Concreto C45	60,74	36137,87
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3463	29019,94
Aço CA-50 6,3 mm	13760	128518,40
Aço CA-50 8,0 mm	1104	10366,56
Aço CA-50 10,0 mm	5901	52223,85
Aço CA-50 12,5 mm	1894	14526,98
Aço CA-50 16,0 mm	3235	24812,45
Aço CA-50 20,0 mm	568	5021,12
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.115.760,95
L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633604,97
Concreto C25	348,23	181528,82
Concreto C50	60,74	38610,60
Aço CA-60 4,2 mm	0	0,00
Aço CA-60 5,0 mm	3464	29028,32
Aço CA-50 6,3 mm	13758	128499,72
Aço CA-50 8,0 mm	1104	10366,56
Aço CA-50 10,0 mm	5895	52170,75
Aço CA-50 12,5 mm	1928	14787,76
Aço CA-50 16,0 mm	3263	25027,21
Aço CA-50 20,0 mm	499	4411,16
Aço CA-50 25,0 mm	0	0,00
Aço CA-50 32,0 mm	0	0,00
TOTAL		1.118.035,86

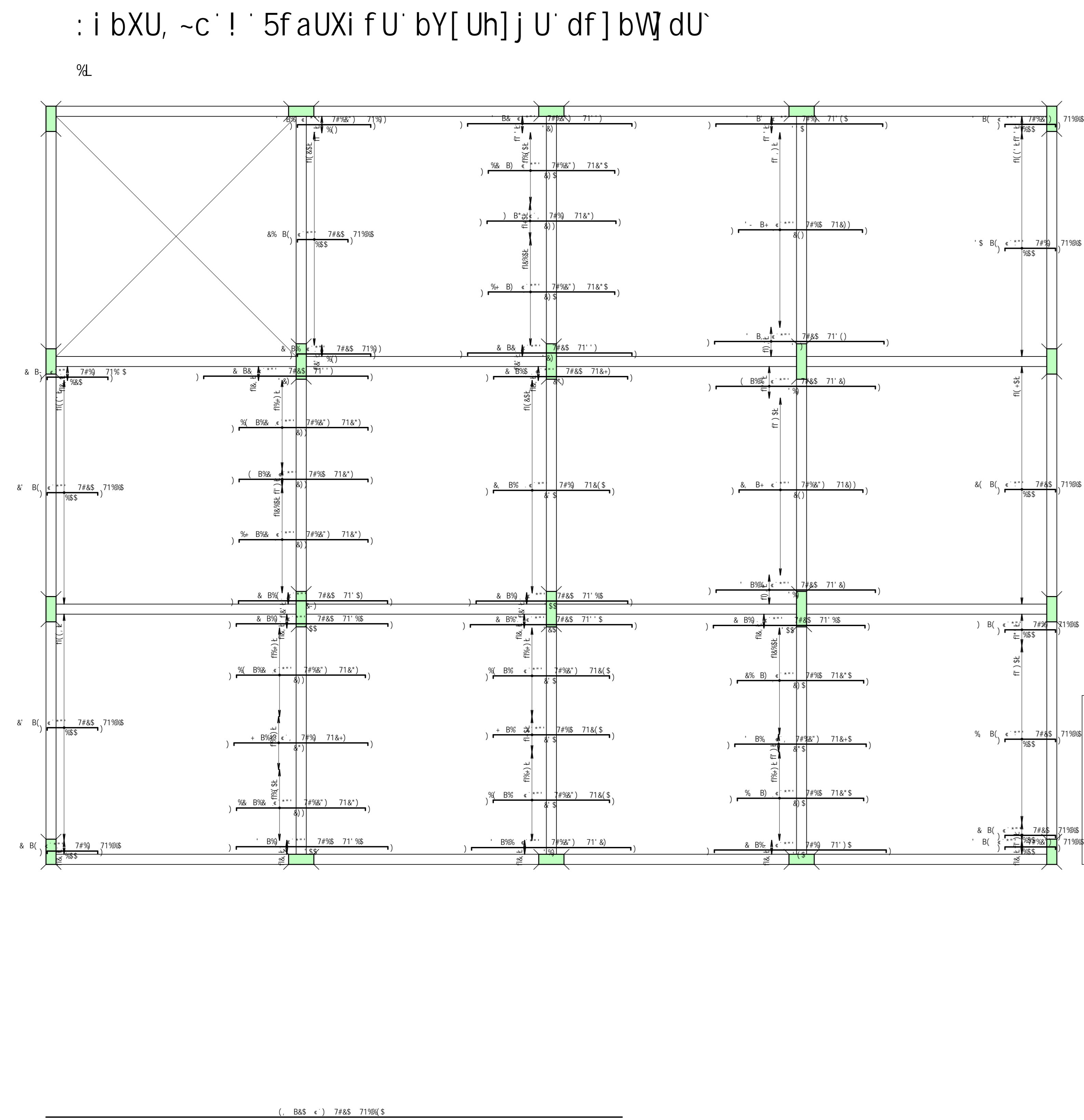
APÊNDICE B - PROJETO ESTRUTURAL OTIMIZADO

9GHI 8C ! · BÈC · 9L97I H5F

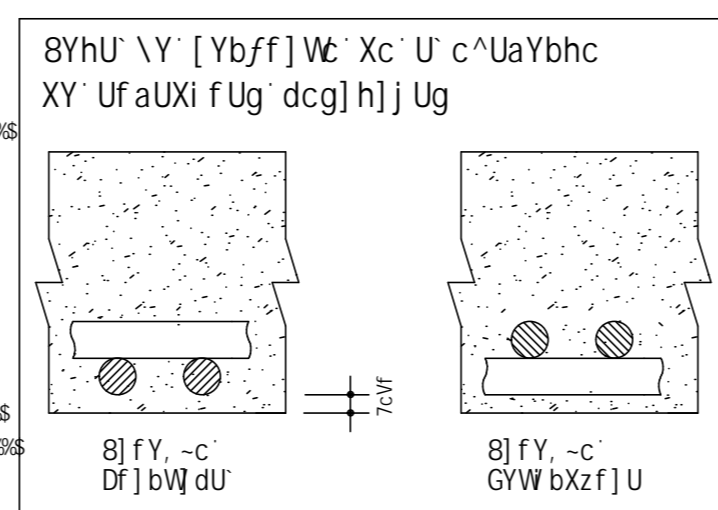
9GHI 8C ! · BÈC · 9L97I H5F

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWUX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WcaYfWU

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWUX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WcaYfWU



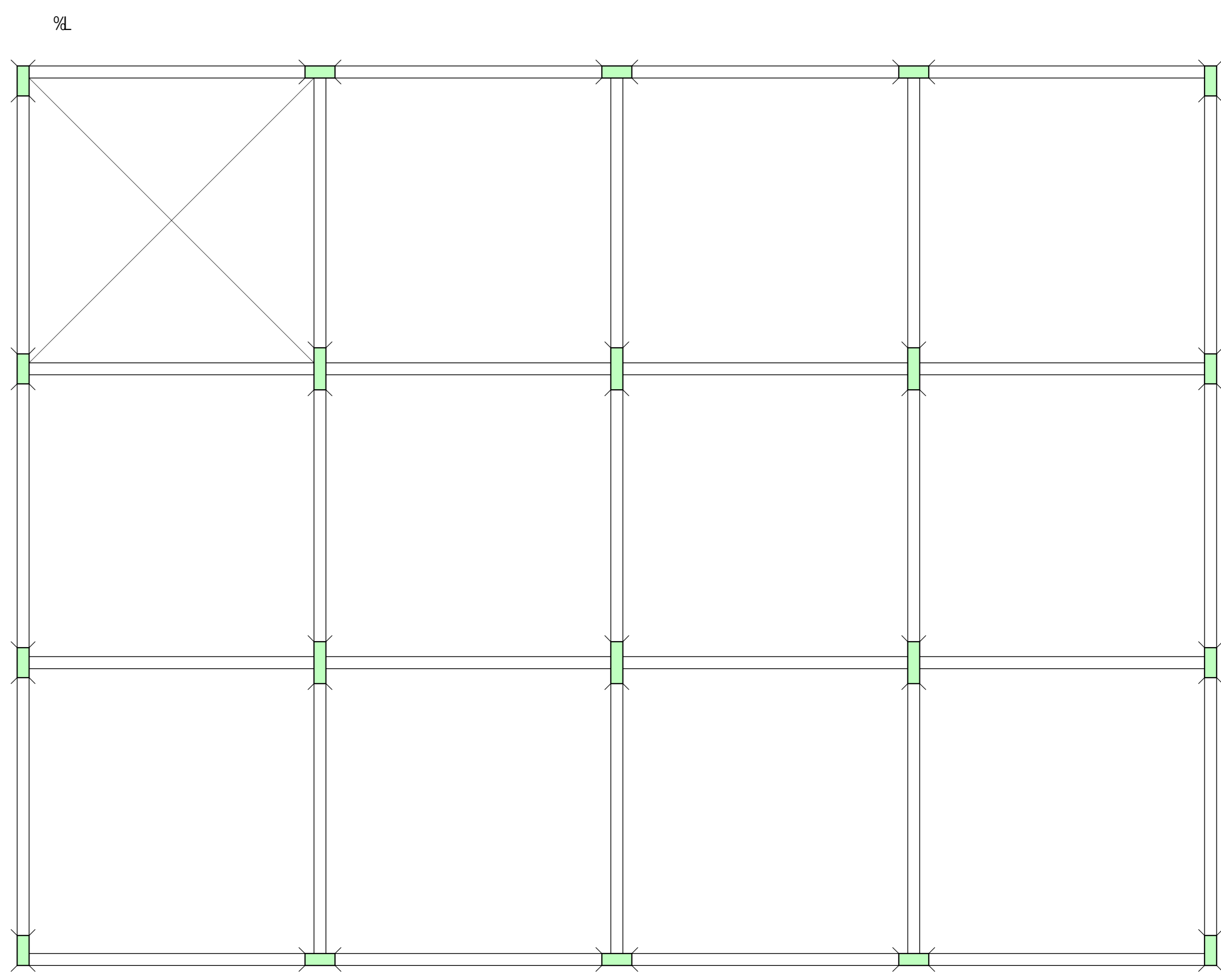
: i bXU, ~c' ! ' 5faUXi fU' bY[Uh] j U' df] bW] dU'



9GHI 8C ! · BÈC · 9L97I H5F

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWUX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WcaYfWU

: i bXU, ~c' ! ' 5faUXi fU' XY' di b, ~c



SUC	DOG	6-H	ET 5BH	7CADF	8BHC
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25

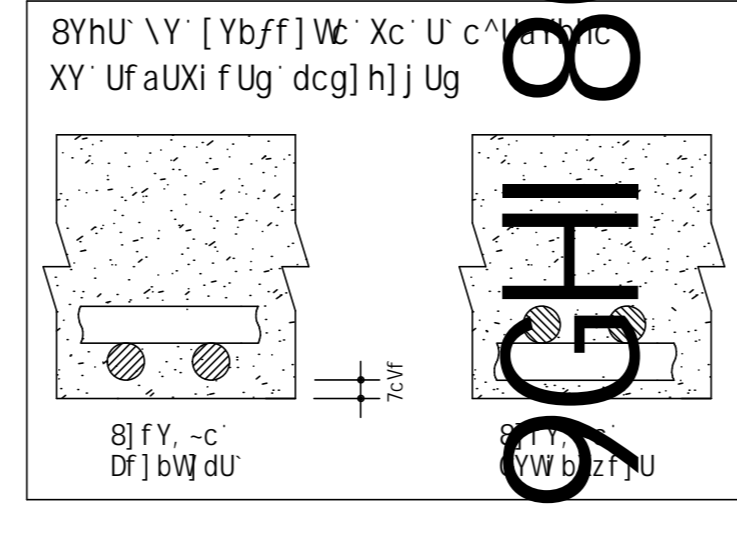
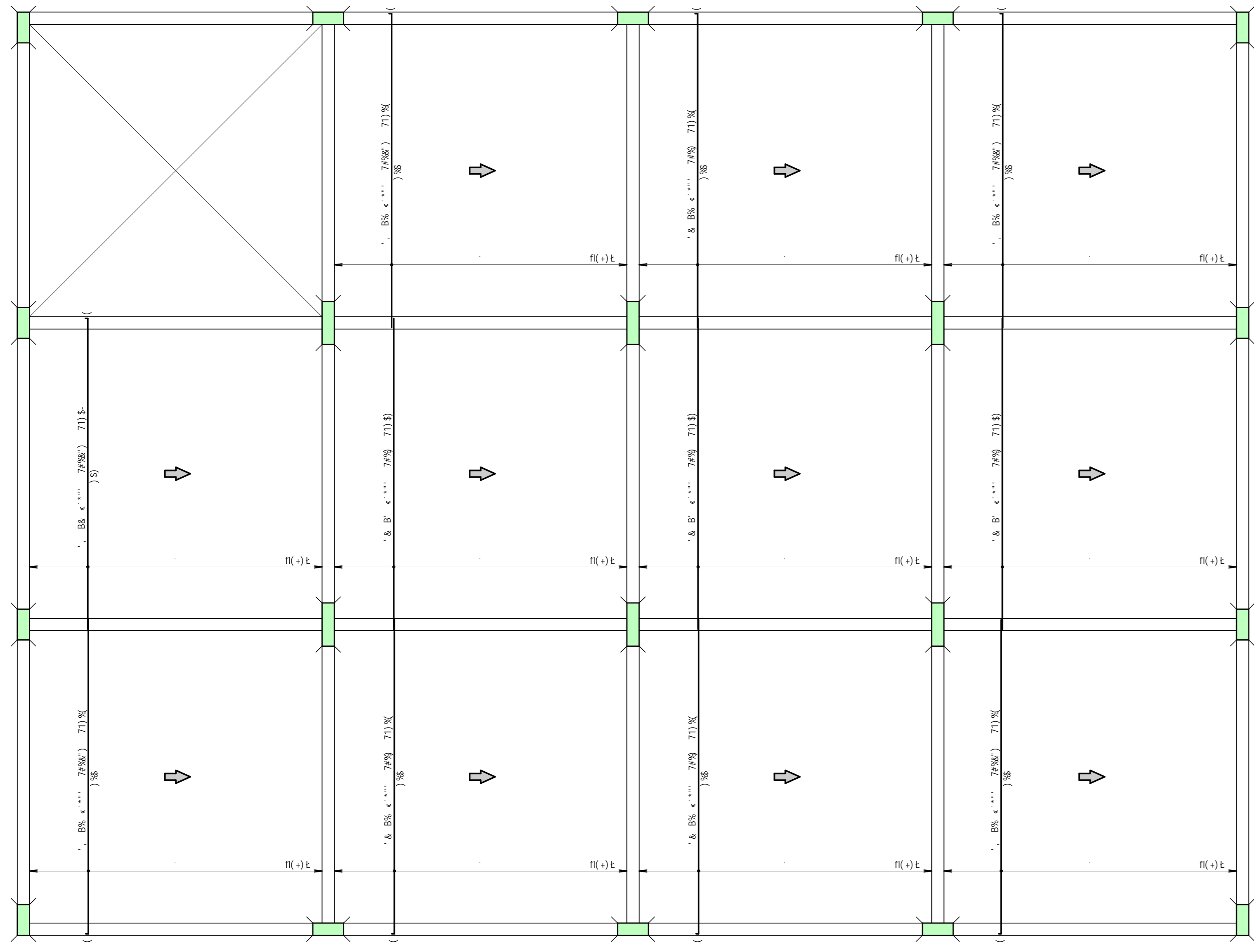
SUC	6-H	7CADF	8BHC
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25

SCIENTIFIC ZW 1 AO ADU 978 1 M/S S ADU 74489	\$\$\$% \$\$\$) \$\$\$ \$\$\$
TCC Laje Fundacão	\$\$\$) \$\$\$
: i bXU, -c' ! ' 5faUXi fU' XY' di b, -c : i bXU, -c' ! ' 5faUXi fU' bY[Uh] j U' df] bW] dU'	\$\$\$

9GHI 8C i . BĒC . 9L 97I H5F

: i bXU, ~c ! ' 5f aUXi f U' dcg] h] j U' gYW bXUf] U

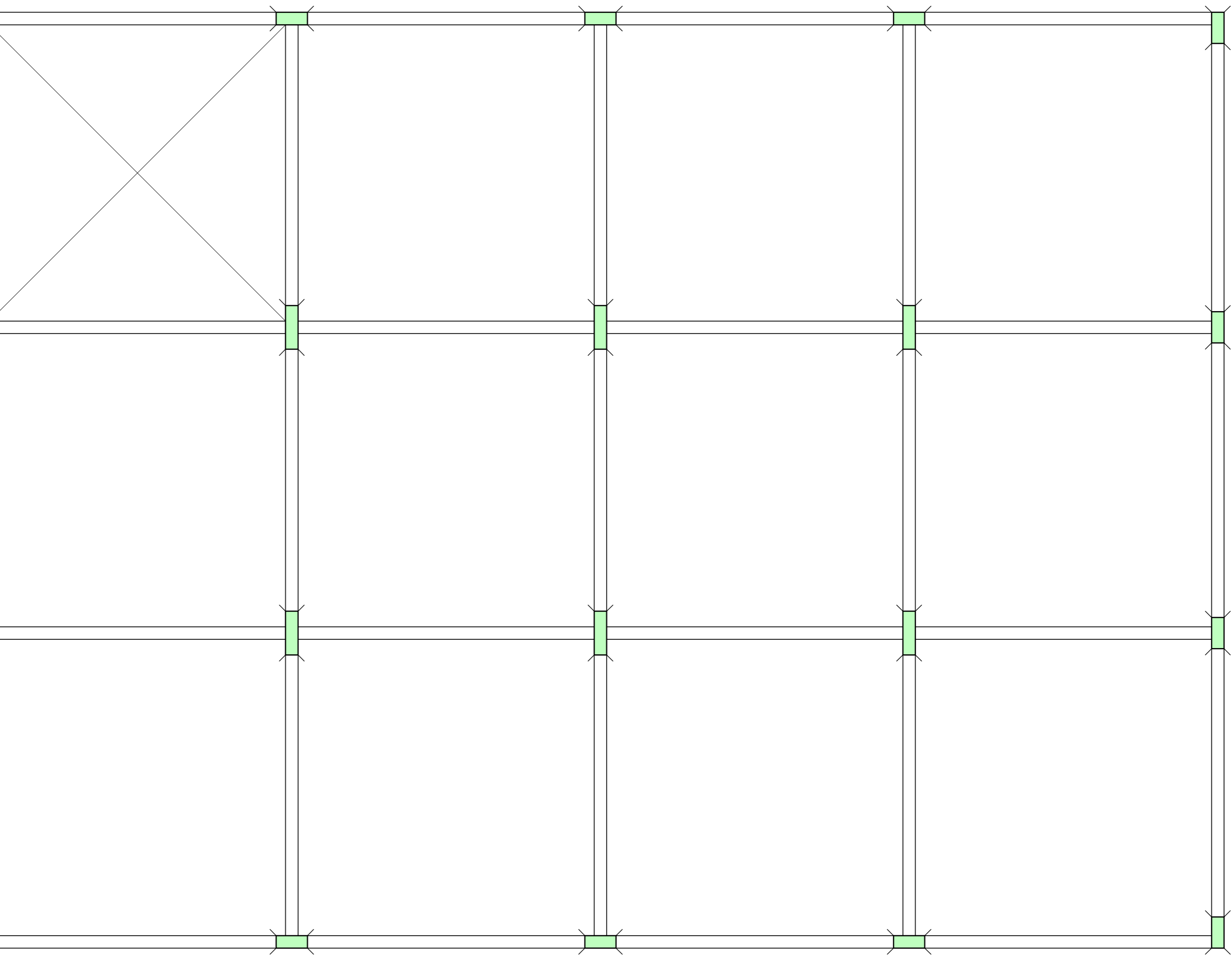
8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg~c' UWX.a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' W6aYFw U



9GHI 8C i . BĒC . 9L 97I H5F

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg~c' UWX.a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' W6aYFw U

: i bXU, ~c ! ' 5f aUXi f U' XY' WgU \UaYbhc



SUC	DOG	6-H	ET SBH	7CABF-A9BHC
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
7	7	7	7	7
8	8	8	8	8
9	9	9	9	9
10	10	10	10	10
11	11	11	11	11
12	12	12	12	12
13	13	13	13	13
14	14	14	14	14
15	15	15	15	15
16	16	16	16	16
17	17	17	17	17
18	18	18	18	18
19	19	19	19	19
20	20	20	20	20
21	21	21	21	21
22	22	22	22	22
23	23	23	23	23
24	24	24	24	24
25	25	25	25	25
26	26	26	26	26
27	27	27	27	27
28	28	28	28	28
29	29	29	29	29
30	30	30	30	30
31	31	31	31	31
32	32	32	32	32
33	33	33	33	33
34	34	34	34	34
35	35	35	35	35
36	36	36	36	36
37	37	37	37	37
38	38	38	38	38
39	39	39	39	39
40	40	40	40	40
41	41	41	41	41
42	42	42	42	42
43	43	43	43	43
44	44	44	44	44
45	45	45	45	45
46	46	46	46	46
47	47	47	47	47
48	48	48	48	48
49	49	49	49	49
50	50	50	50	50
51	51	51	51	51
52	52	52	52	52
53	53	53	53	53
54	54	54	54	54
55	55	55	55	55
56	56	56	56	56
57	57	57	57	57
58	58	58	58	58
59	59	59	59	59
60	60	60	60	60
61	61	61	61	61
62	62	62	62	62
63	63	63	63	63
64	64	64	64	64
65	65	65	65	65
66	66	66	66	66
67	67	67	67	67
68	68	68	68	68
69	69	69	69	69
70	70	70	70	70
71	71	71	71	71
72	72	72	72	72
73	73	73	73	73
74	74	74	74	74
75	75	75	75	75
76	76	76	76	76
77	77	77	77	77
78	78	78	78	78
79	79	79	79	79
80	80	80	80	80
81	81	81	81	81
82	82	82	82	82
83	83	83	83	83
84	84	84	84	84
85	85	85	85	85
86	86	86	86	86
87	87	87	87	87
88	88	88	88	88
89	89	89	89	89
90	90	90	90	90
91	91	91	91	91
92	92	92	92	92
93	93	93	93	93
94	94	94	94	94
95	95	95	95	95
96	96	96	96	96
97	97	97	97	97
98	98	98	98	98
99	99	99	99	99
100	100	100	100	100

TCC		\$\$\$%
Laje Fundação		\$\$+
: i bXU, ~c ! ' 5f aUXi f U' XY' WgU \UaYbhc		\$\$
: i bXU, ~c ! ' 5f aUXi f U' dcg] h] j U' gYW bXUf] U		\$\$

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

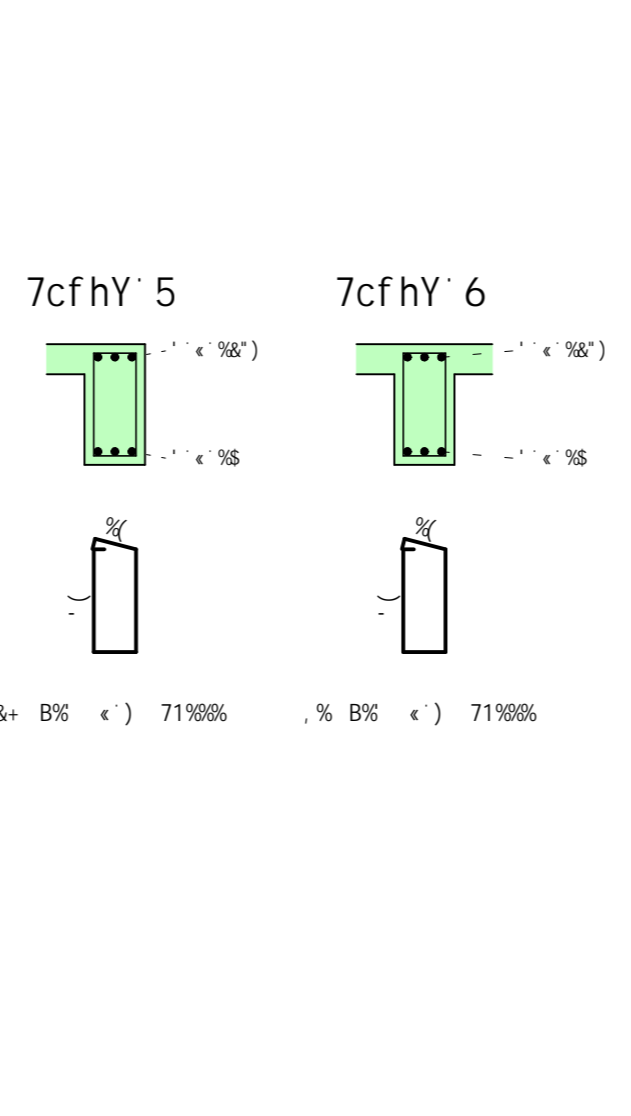
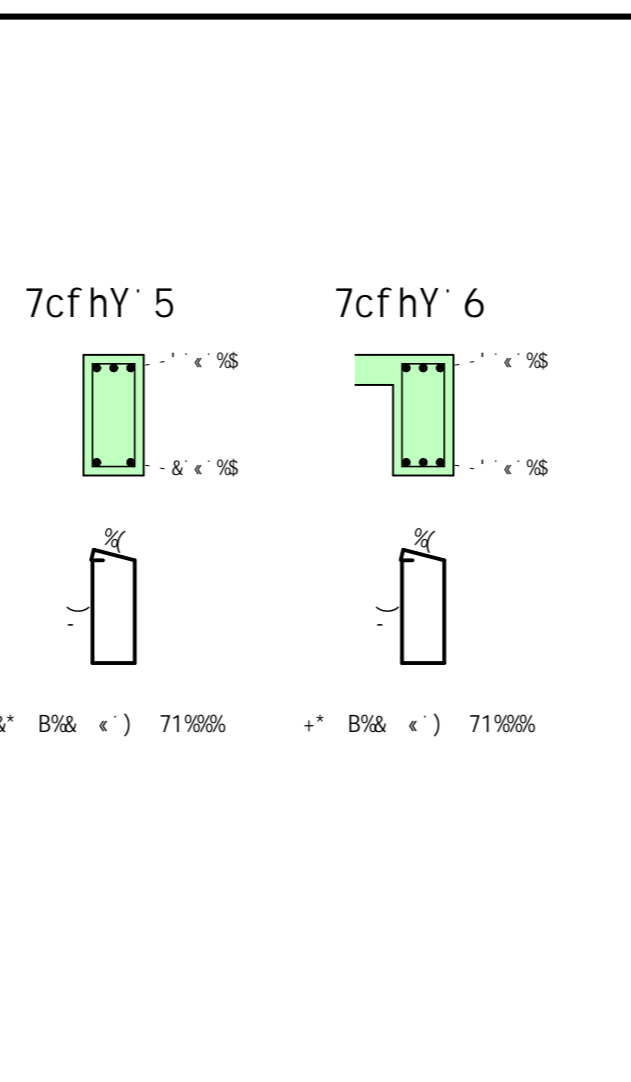
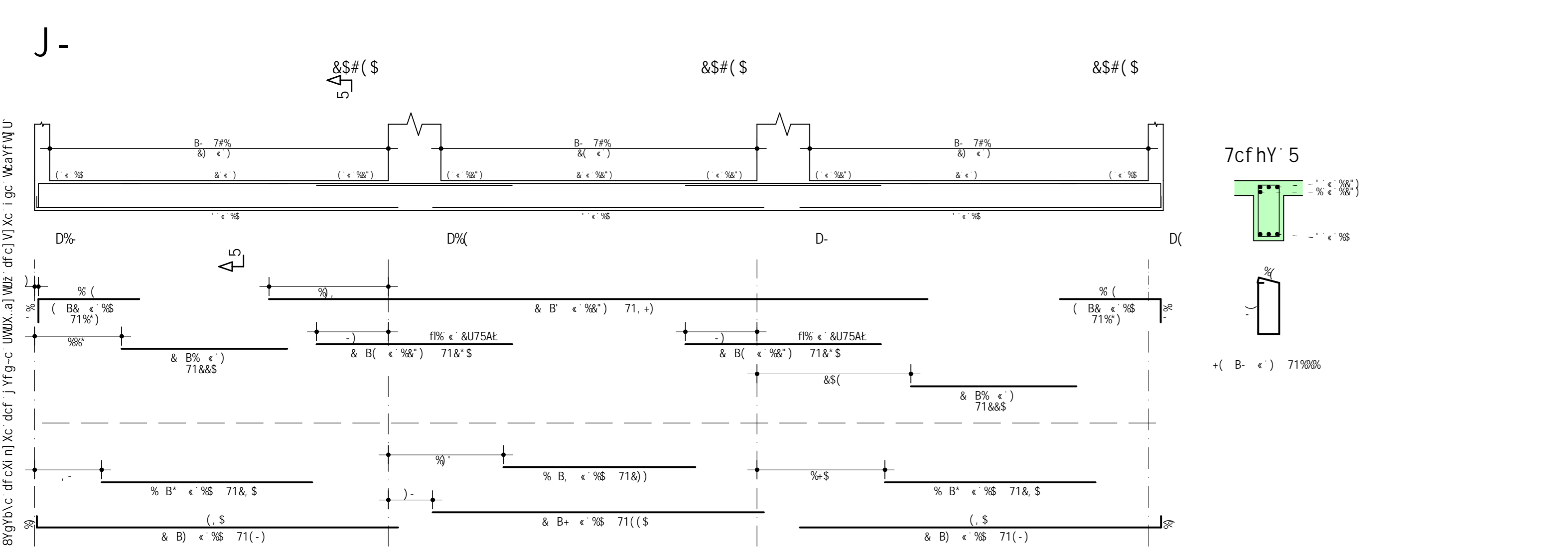
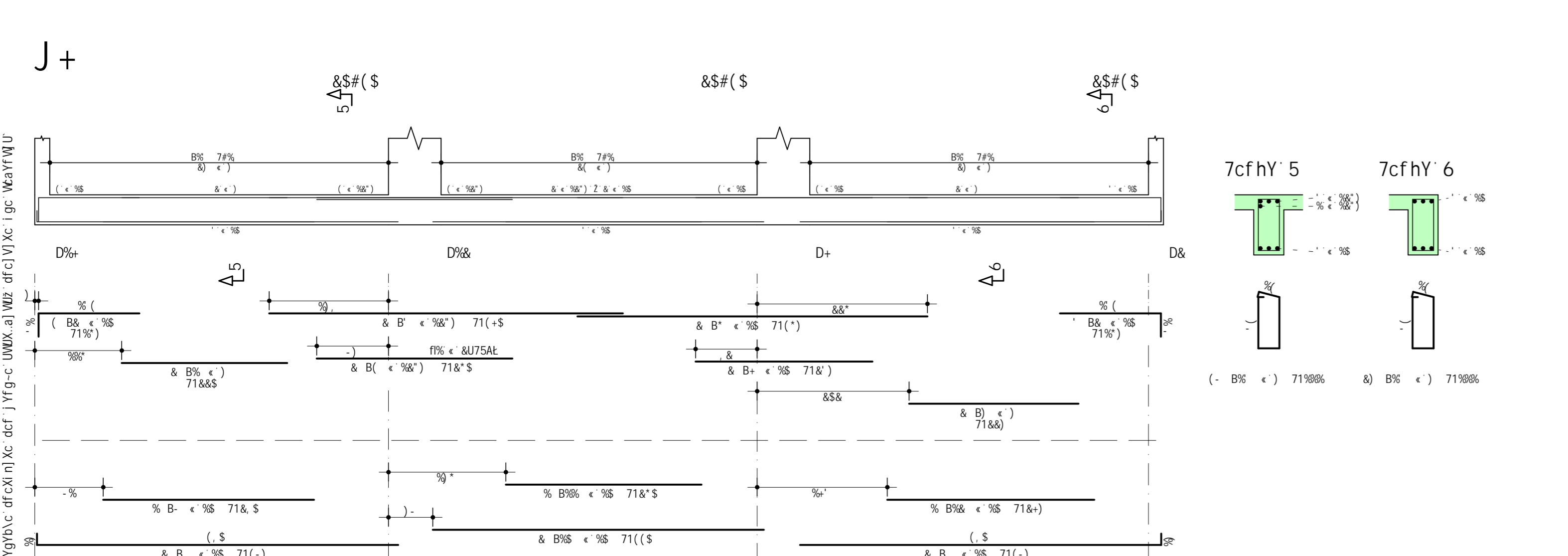
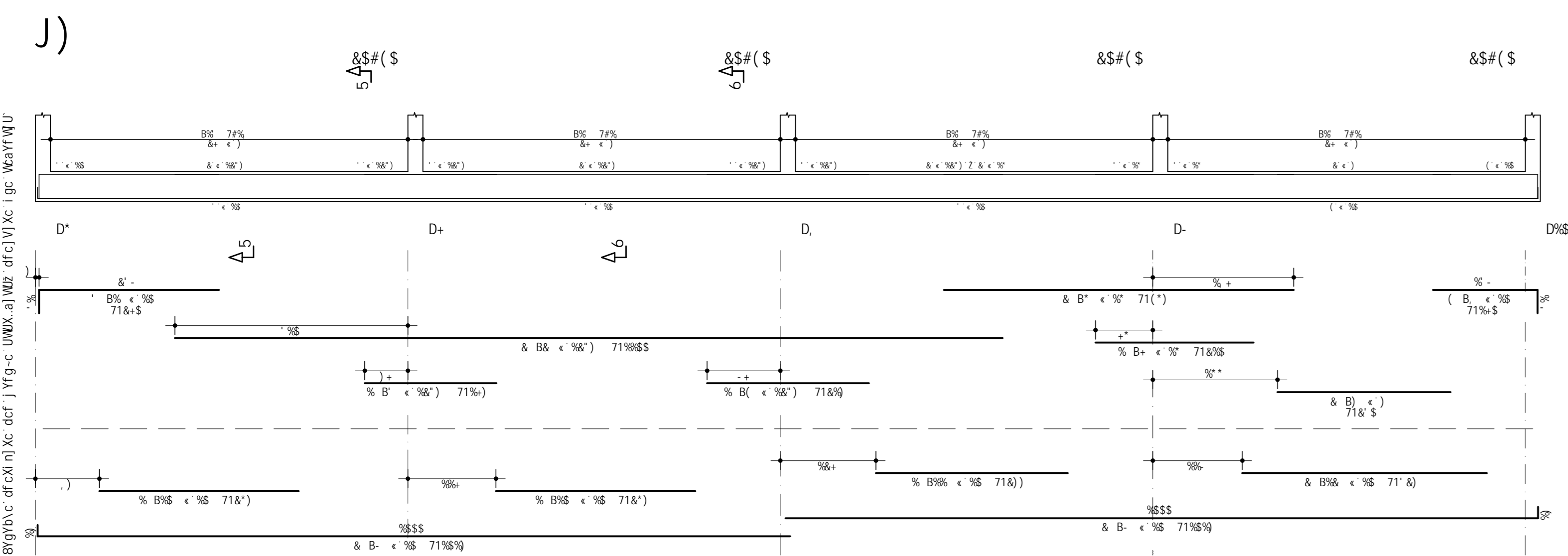
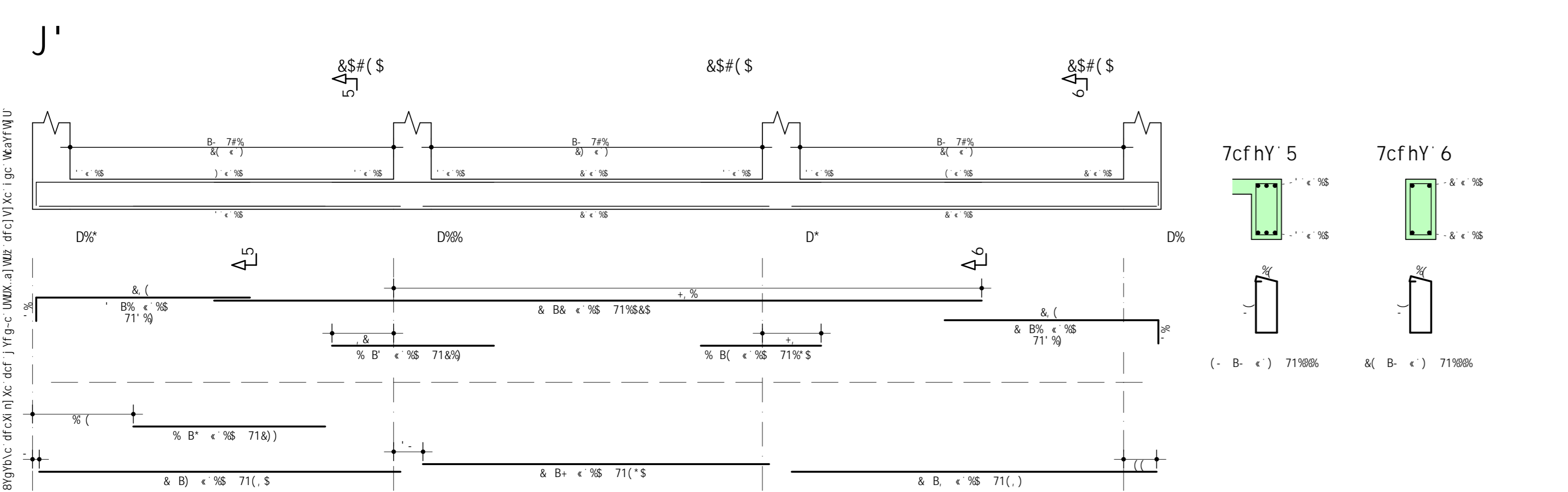
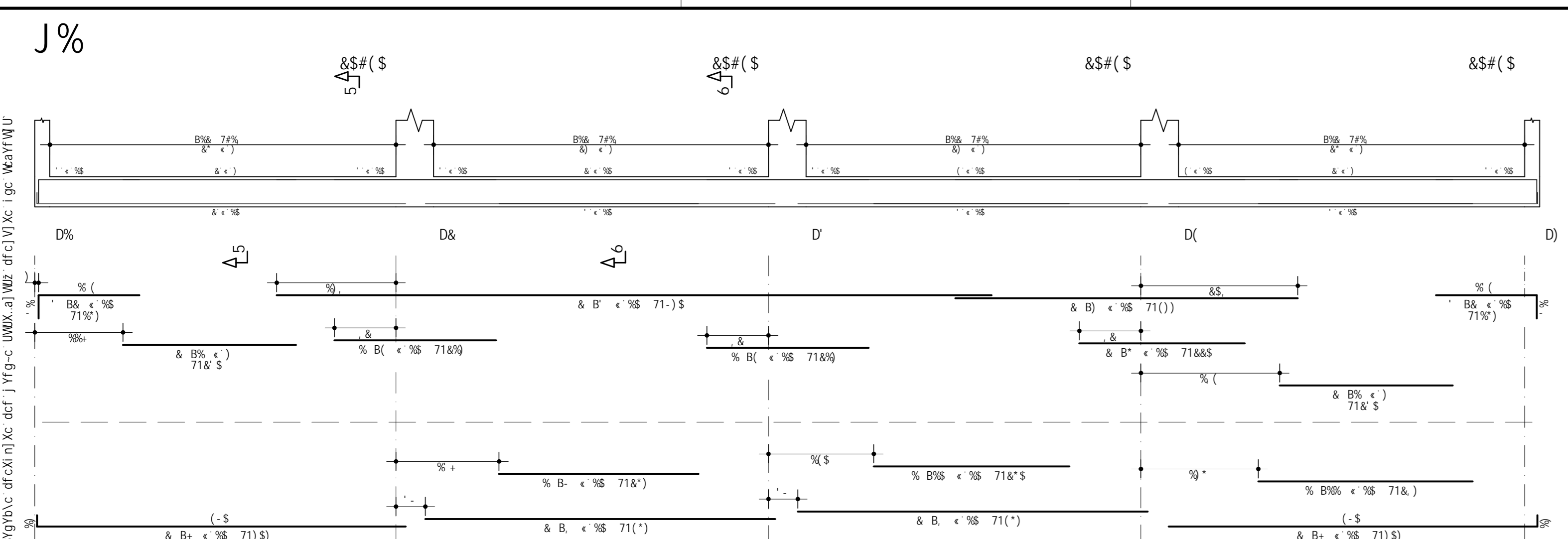
9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F



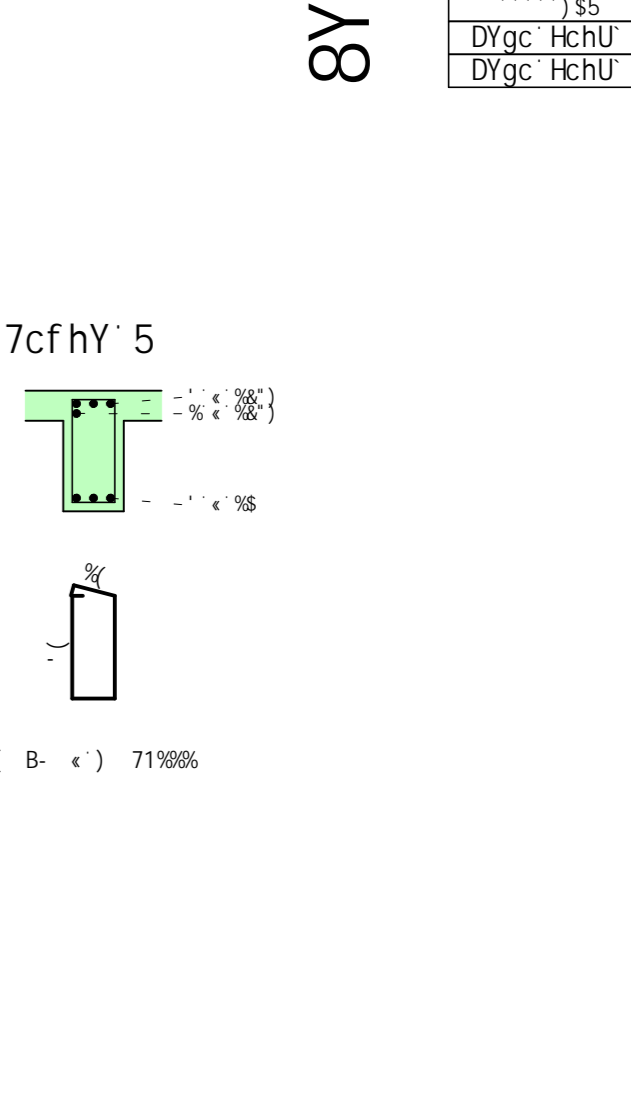
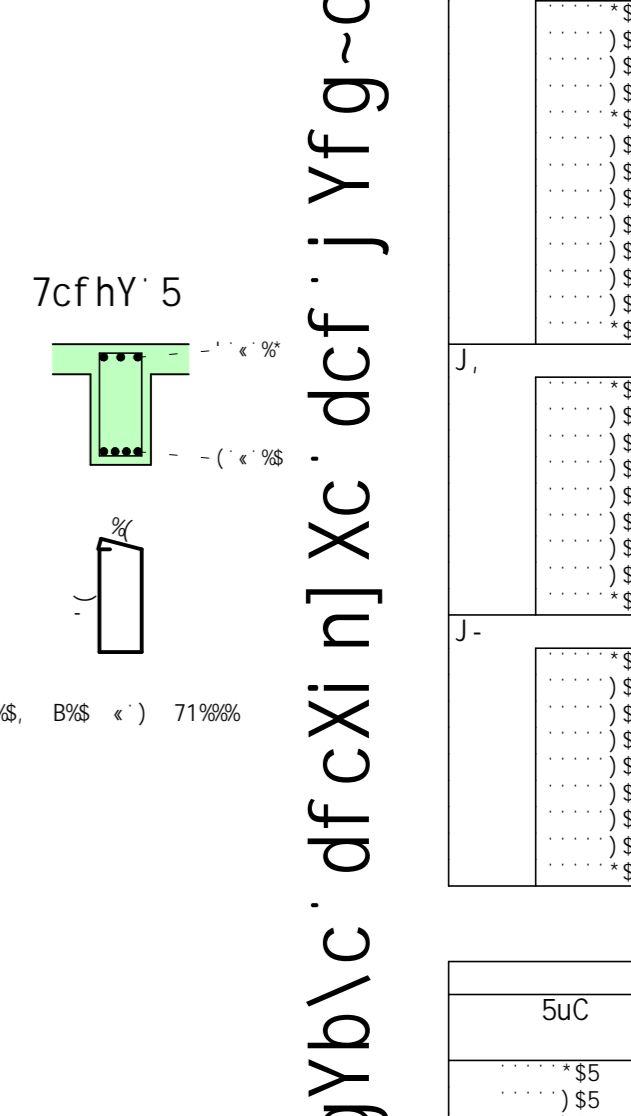
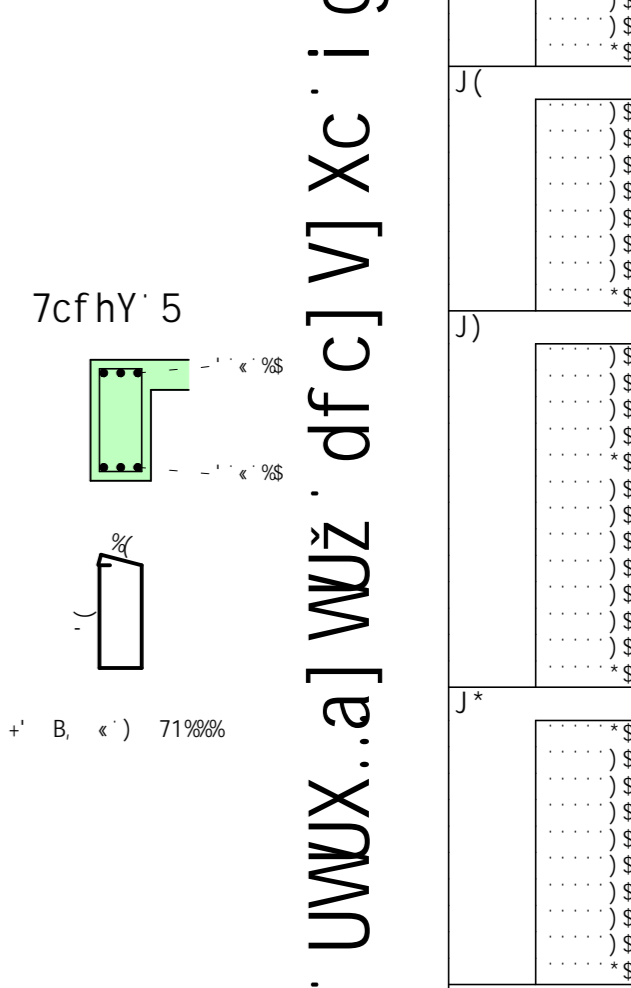
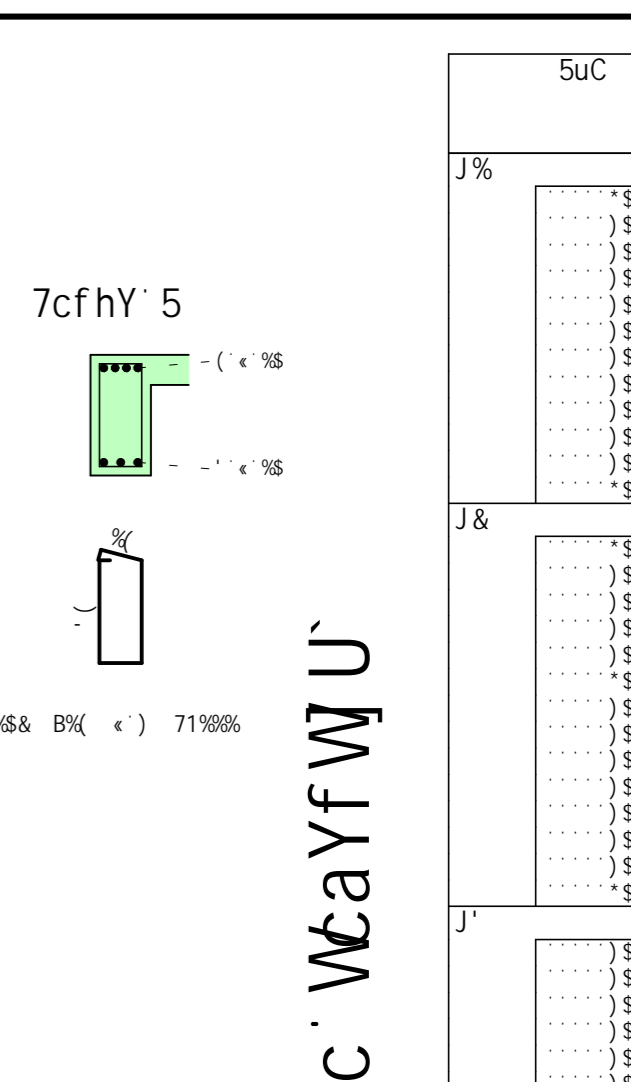
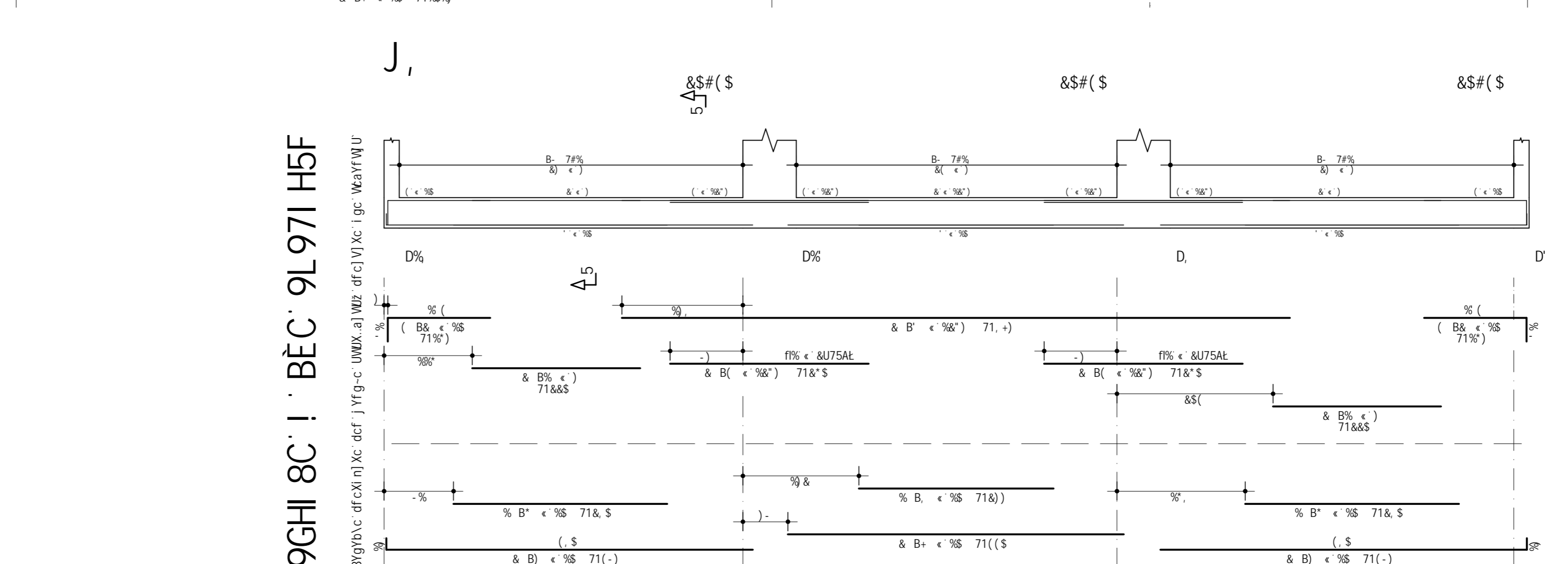
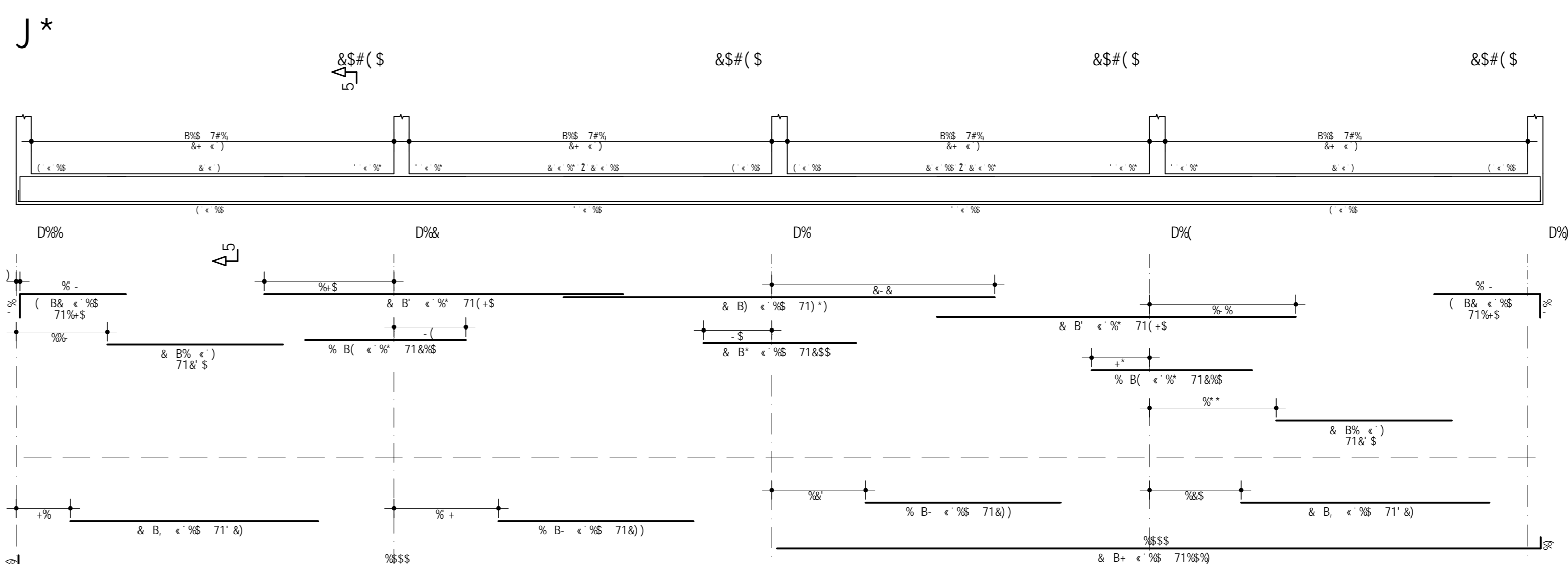
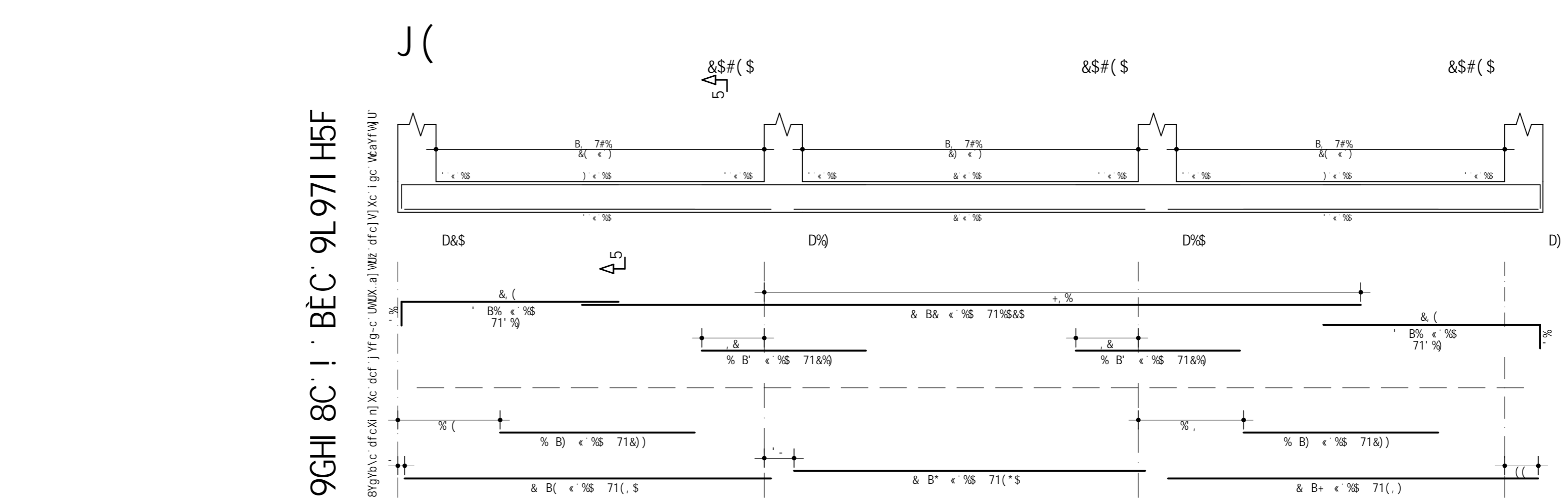
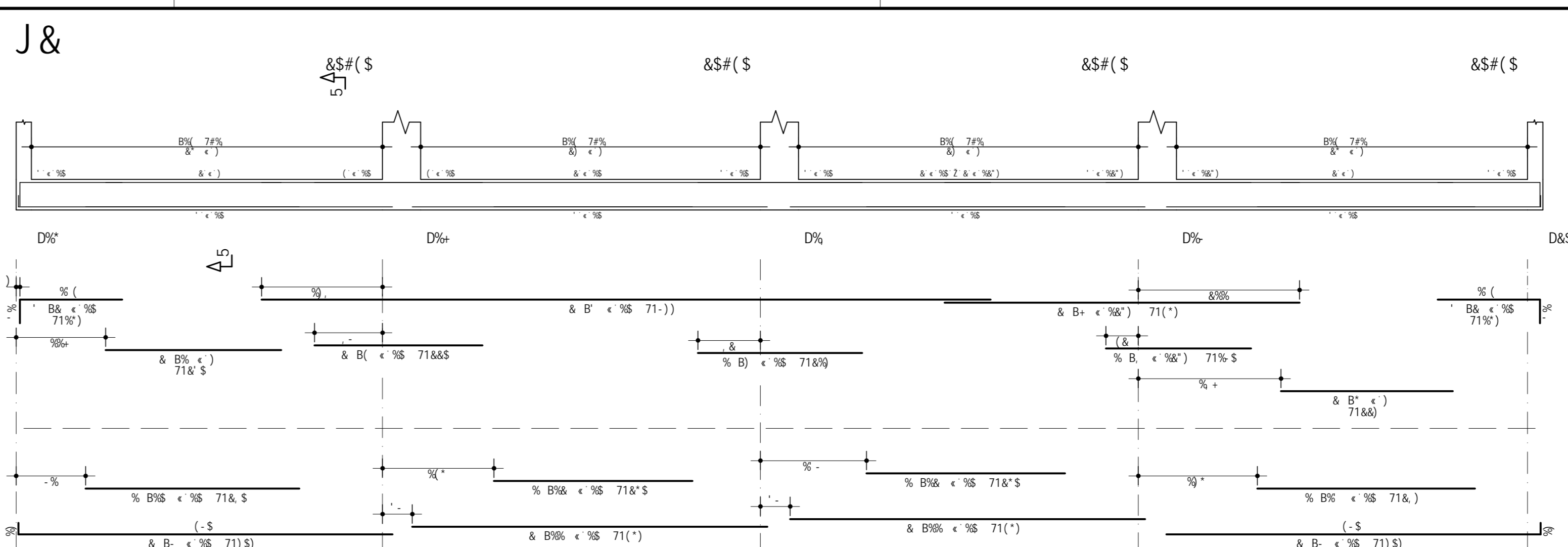
9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F

9GHI 8C ! BÈC 9L97I H5F



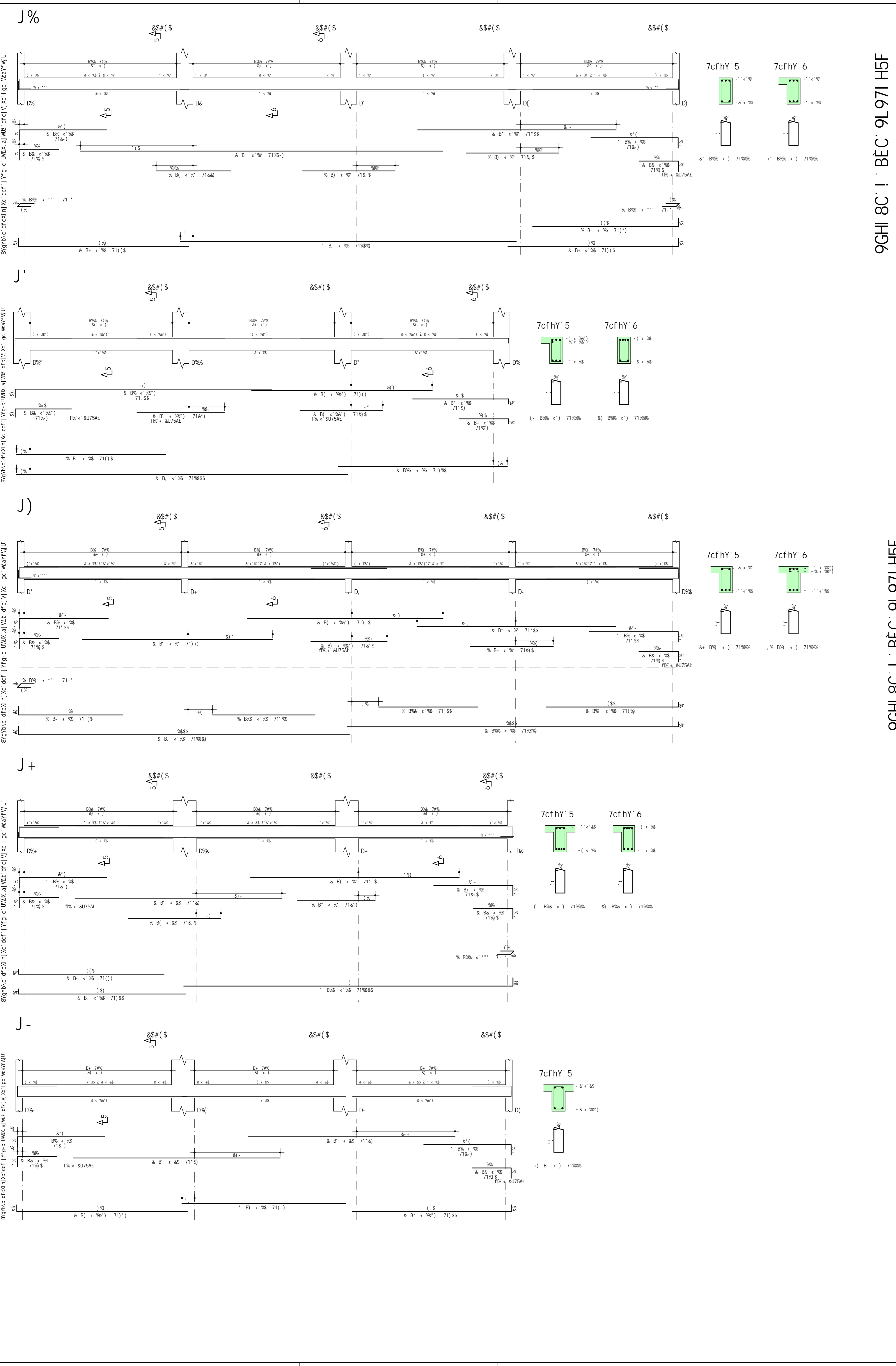
8YgYb\c df cXi n] Xc dcf j Yfg~c UWUX~a] WUz dfc] V] Xc i gc WcaYf W] U

SUC	DWG	6-H	EI SBH	7CADF-A9HC	HCHG
J%
J&
J(...
J)
J*
J,
J+
J-

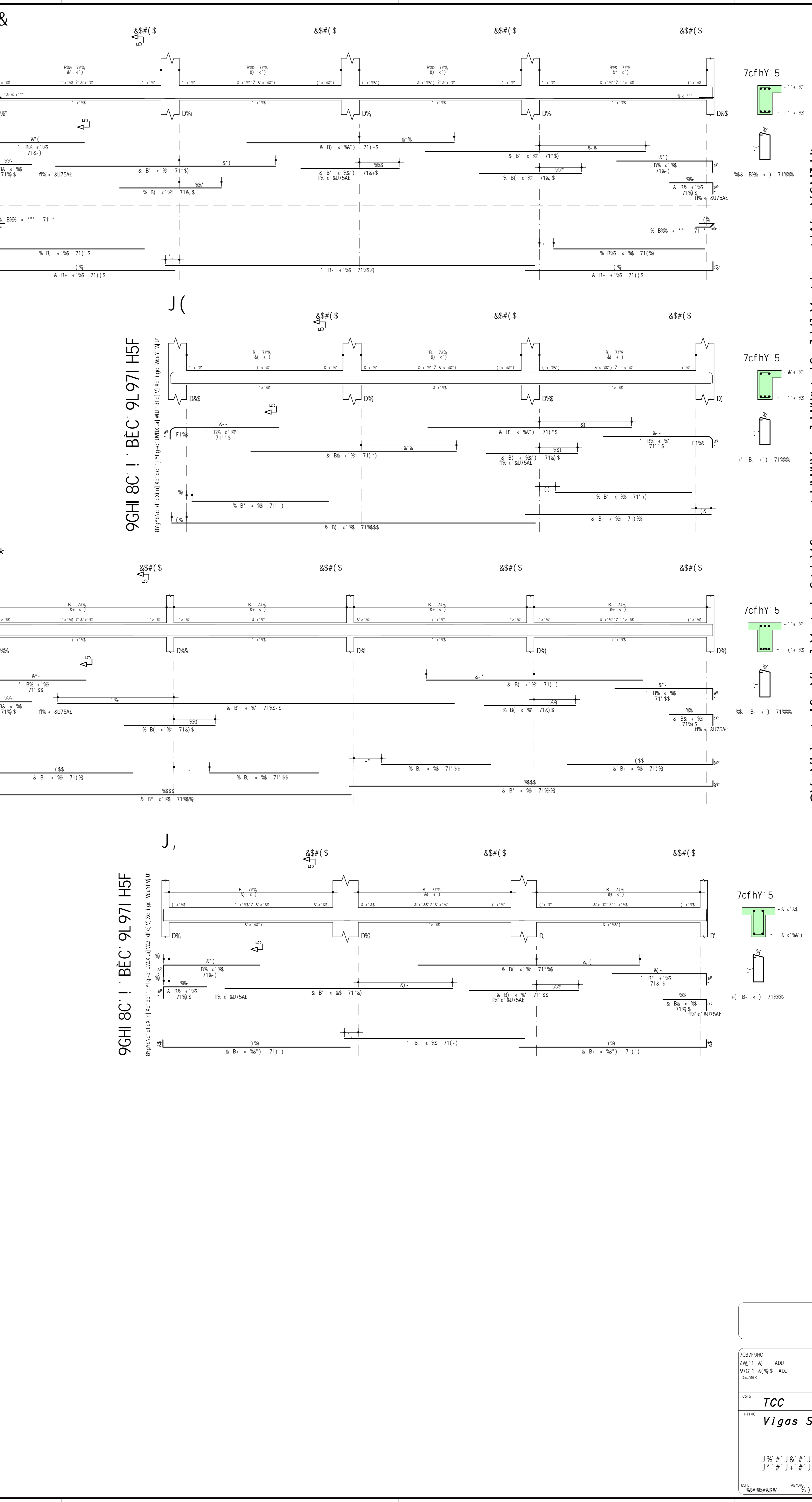
F9G AC 89 5UC			
SUC	6-H	7CADF	D9CC
...
...
...

TCC
 Vigas Fundaçõ
 \$\$\$
 \$\$\$
 \$\$\$

9GHI 8C ! BÈC 9L971 H5F



9GHI 8C ! BÈC 9L971 H5F



8Ygy\b' c' d' f' c' X' i' n']' X' c' d' c' f' j' Y' f' g' ~' c' U' W' U' X' .a] W' U' Z' ' d' f' c']' V']' X' c' i' g' c' W' a' Y' W' U']

SUC	DGG	6-H	EI SBH	7CADF-A9HC	HCHSP
J%					
J&					
J'					
J(
J)					
J'					
J+					
J,					
J-					

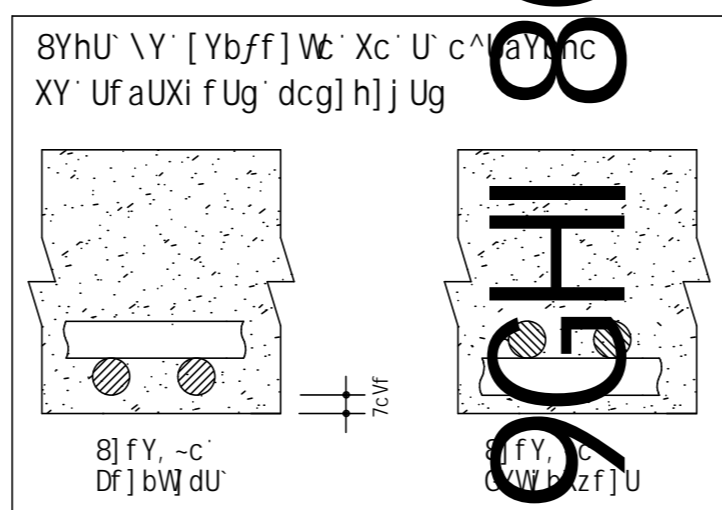
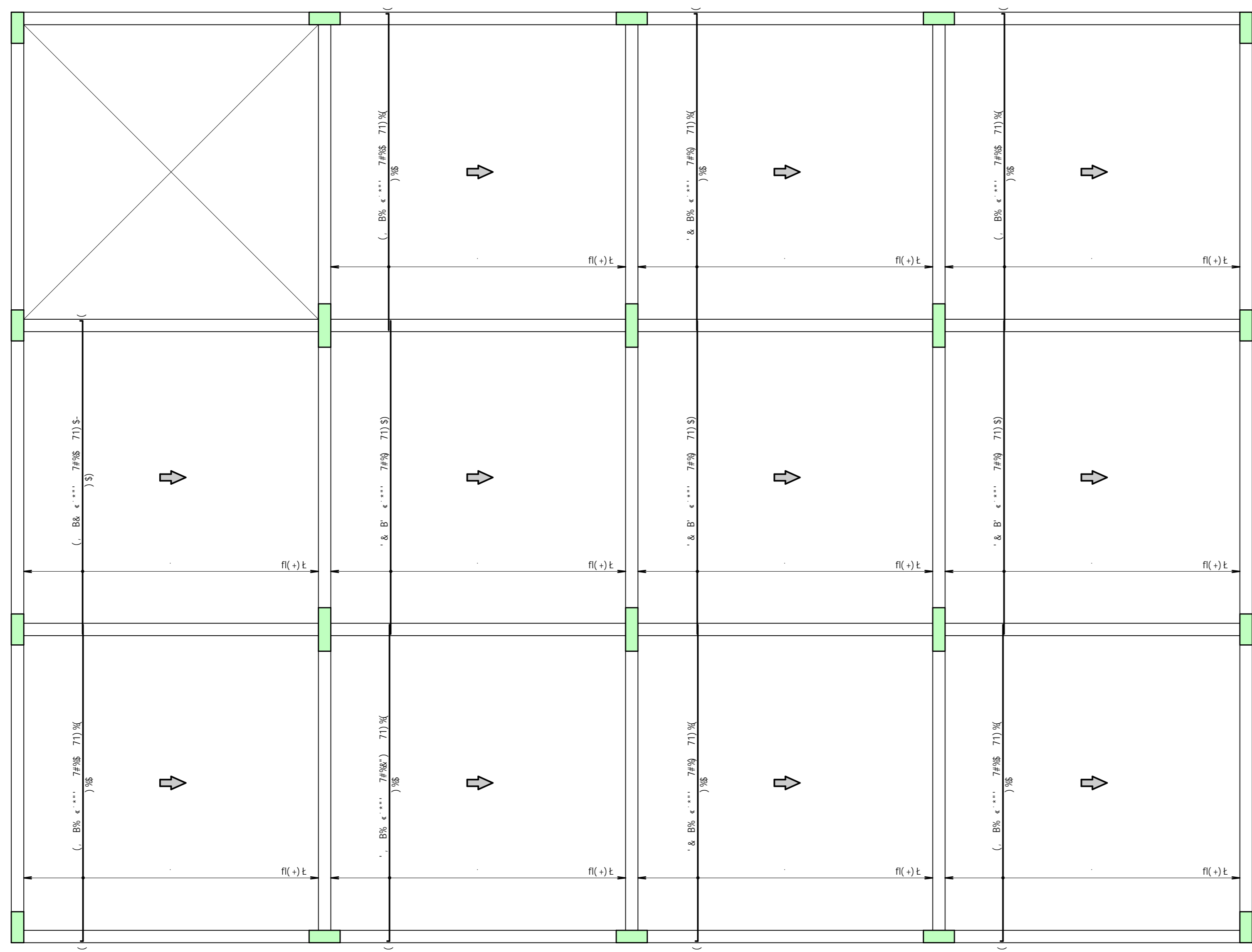
SUC	6-H	7CADF	DGGC
J%			
J&			
J'			
J(
J)			
J'			
J+			
J,			
J-			

7CADF-A9HC 7GHI 1 A] ADU 7GHI 1 A] 9] S ADU 7GHI 1 A]	GHS # ' c' \$\$\$% GHS # ' c' %& F#U # ' c' \$\$
GHS TCC 7GHI 1 A] ADU Vigas Subsolo 2	J% # J& # J' # J(# J) # J' # J+ # J, # J- # J
7GHI 1 A] ADU 7GHI 1 A] 9] S ADU 7GHI 1 A]	7GHI 1 A] ADU 7GHI 1 A] 9] S ADU 7GHI 1 A]

9GHI 8C i . BÈC . 9L 97I H5F

Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' dçg] h] j U' gYW bXUf] U

8YgYb\c' dFcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WëaYfWU

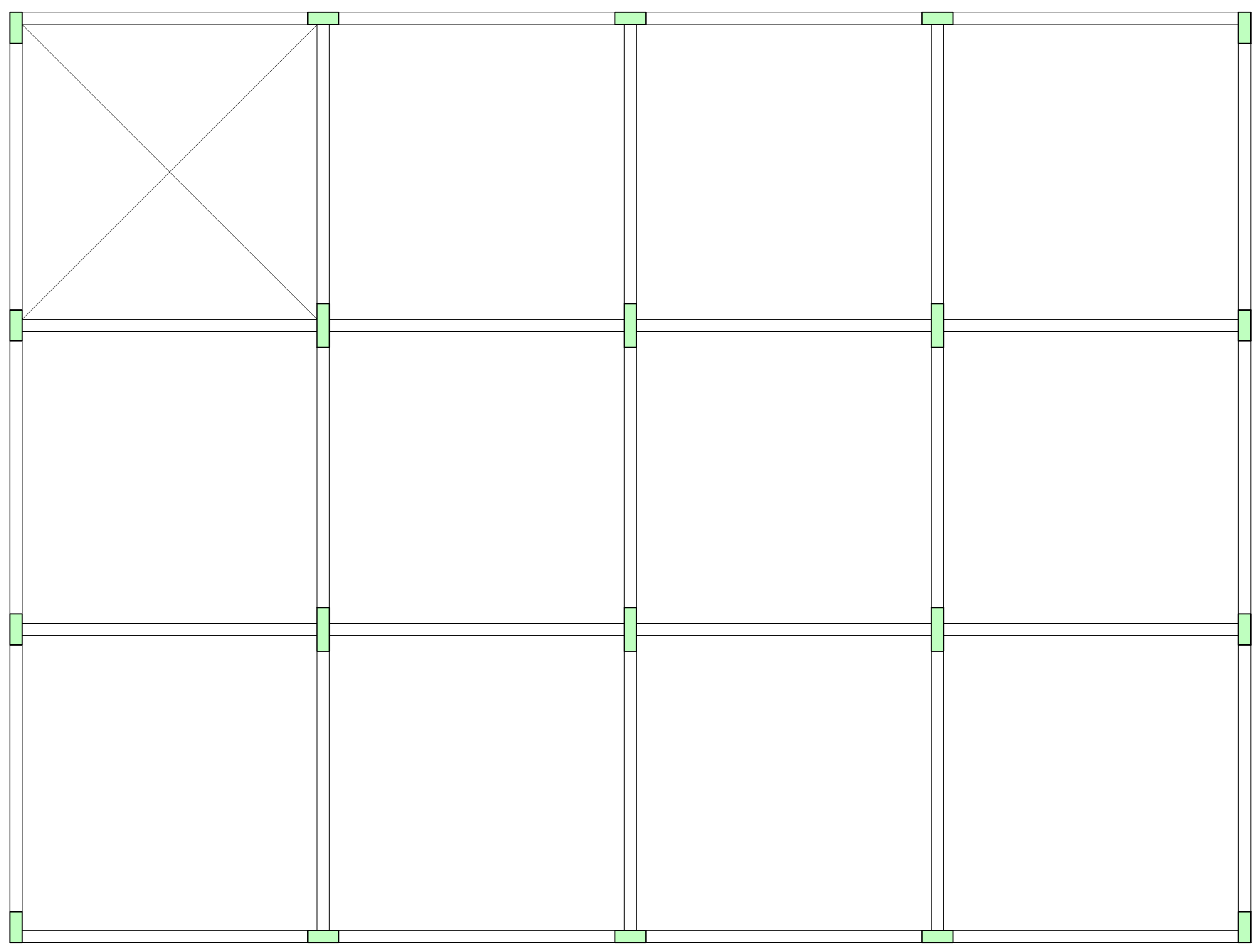


9GHI 8C i . BÈC . 9L 97I H5F

8YgYb\c' dFcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WëaYfWU

Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' XY' WgU' \UaYbhc

%L



SUC	DOG	6-H	ET SBH	TCADF-A08HC
Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' dçg] h] j U' gYW bXUf] U		35	5	12
Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' dçg] h] j U' gYW bXUf] U		35	5	12

SUC	6-H	TCADF	DOG
35	5	12	12
DYgc HERU	35 1	AKS	12

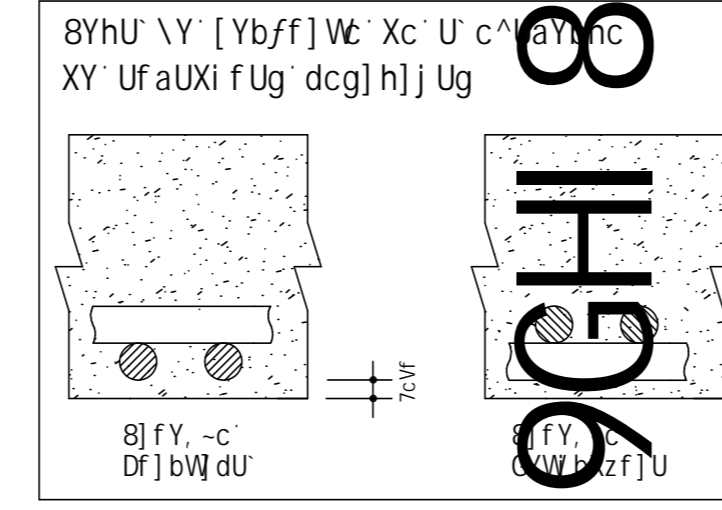
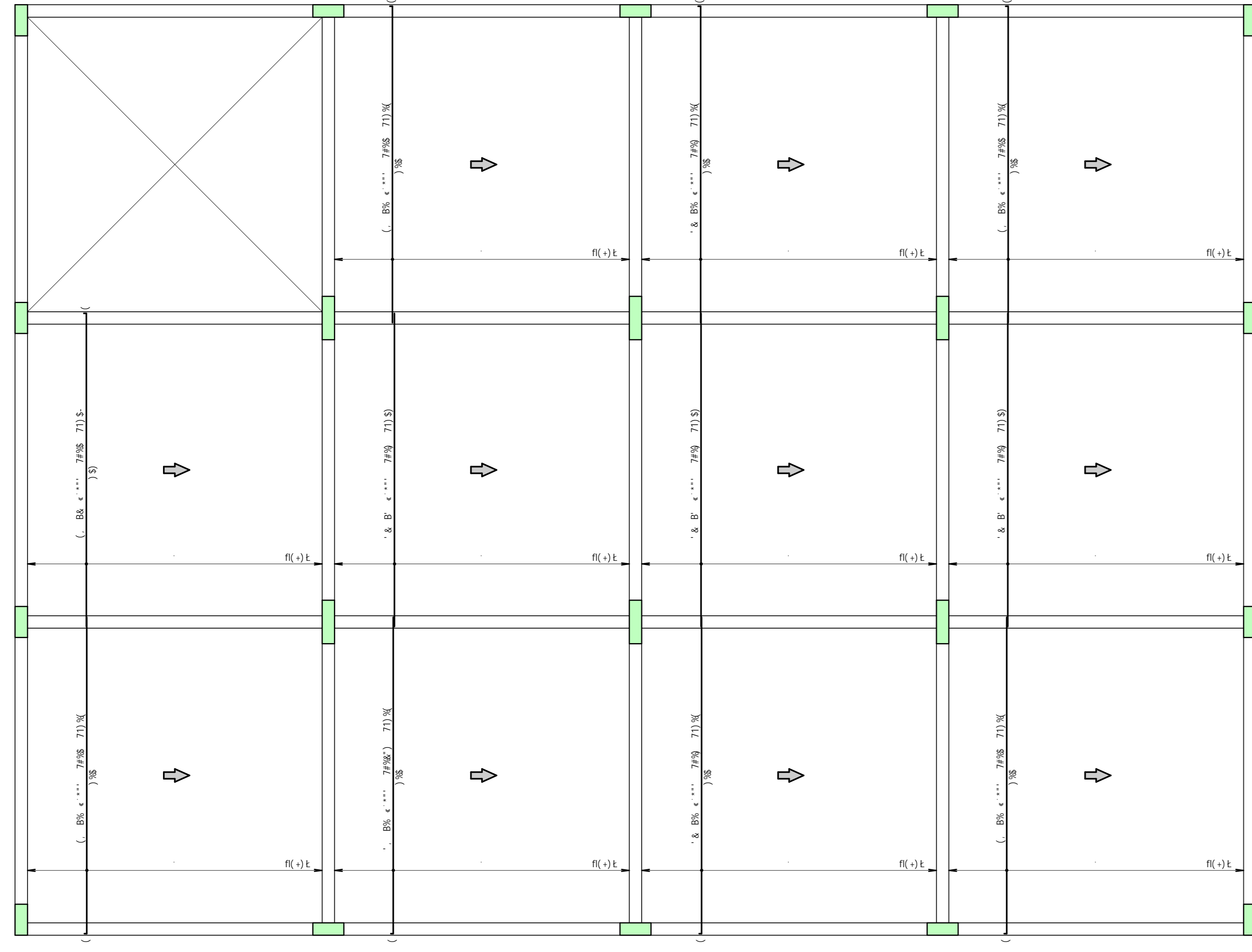
TCC		\$\$\$%
Laje Térreo		\$/%
Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' XY' WgU' \UaYbhc Hff fYc' ! ' 5faUXi fU' dçg] h] j U' gYW bXUf] U		\$\$

9GHI 8C i · BÈC · 9L 97I H5F

H] dc ! ' 5faUXi fU' dcg] h] j U' gYW bXUf] U

(L

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WèaYfWU

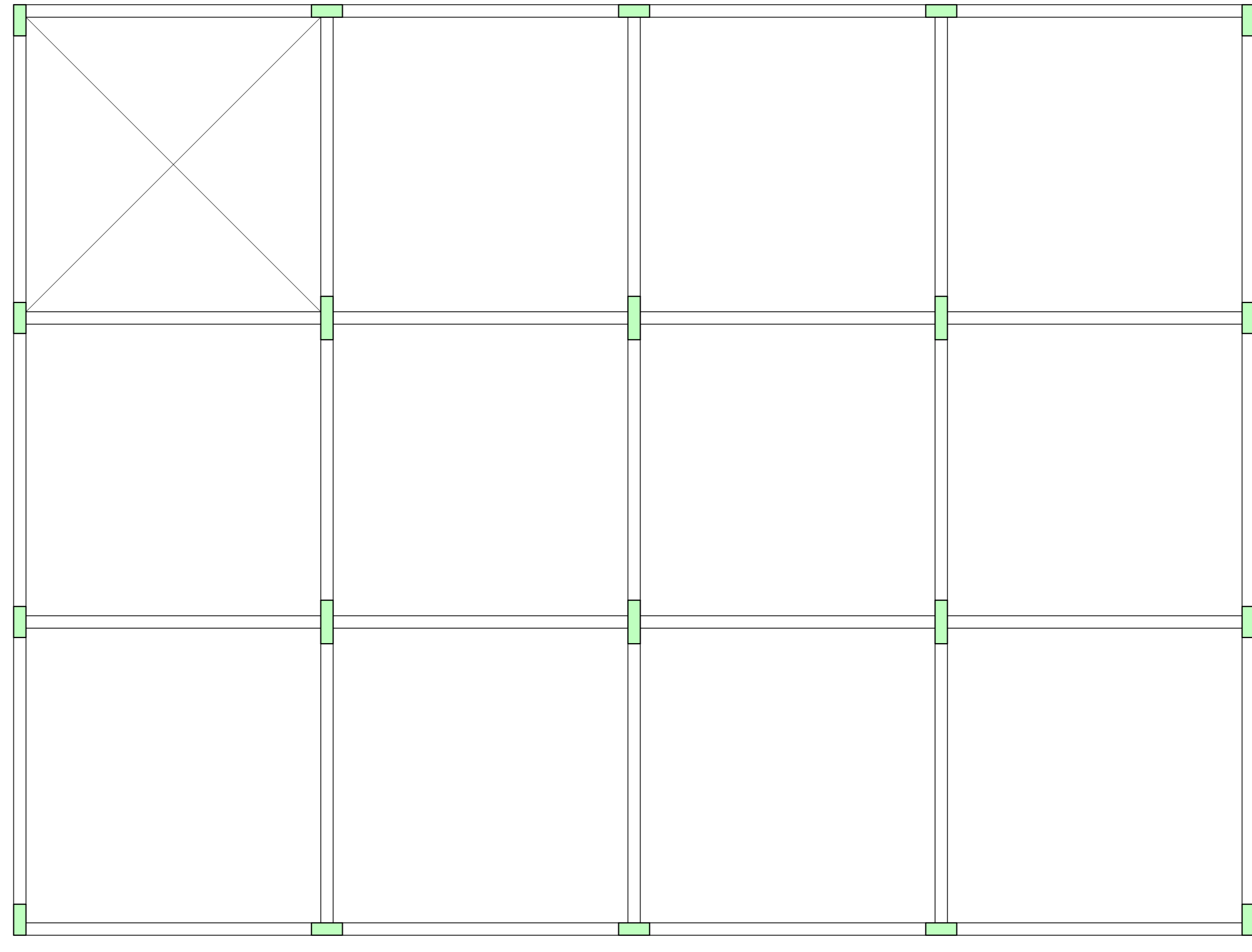


9GHI 8C i · BÈC · 9L 97I H5F

H] dc ! ' 5faUXi fU' XY' W] gU' \UaYbhc

(L

8YgYb\c' dfcXi n] Xc' dcf' j Yfg-c' UWX..a] WUz' dfc] V] Xc' i gc' WèaYfWU

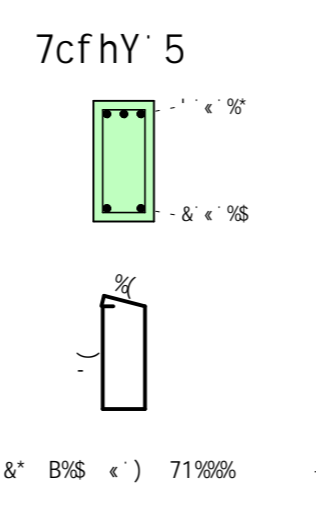
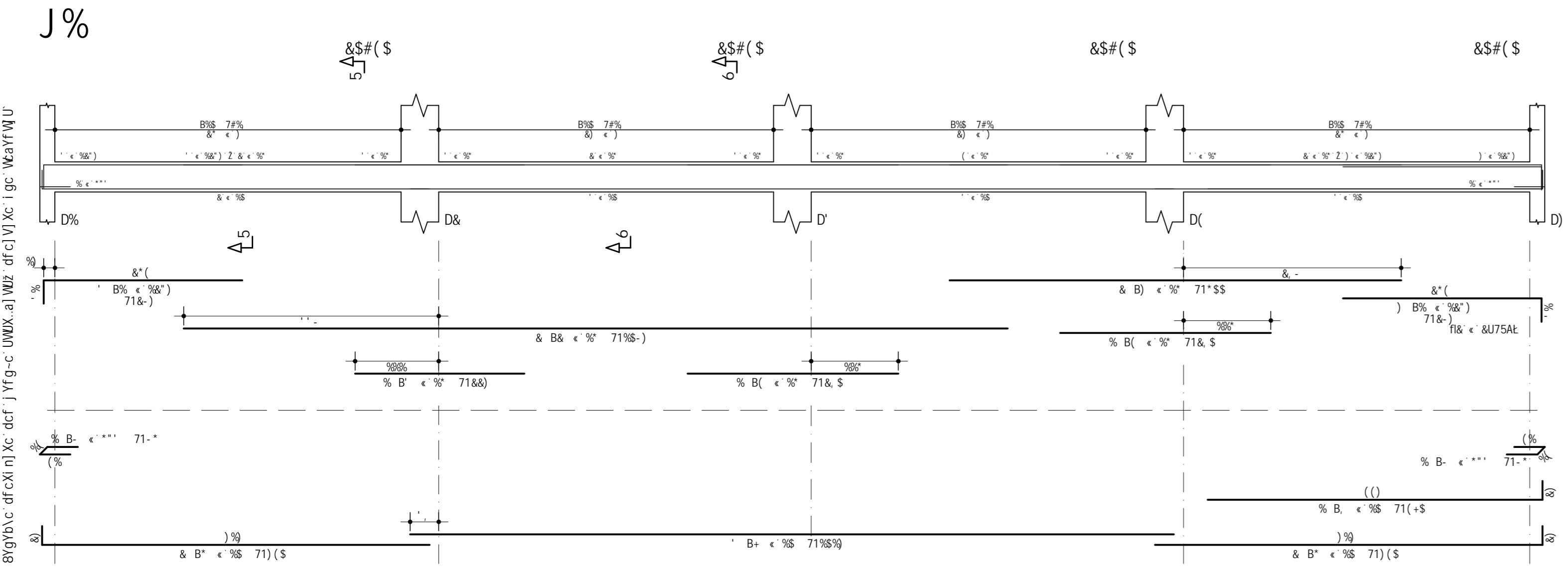


SUC	DOG	6-H	ET SBH	7CABF-A98HC
H] dc ! ' 5faUXi fU' dcg] h] j U' gYW bXUf] U	aa			1B-H HQ6#
...	...	...	...	W
H] dc ! ' 5faUXi fU' XY' W] gU' \UaYbhc				

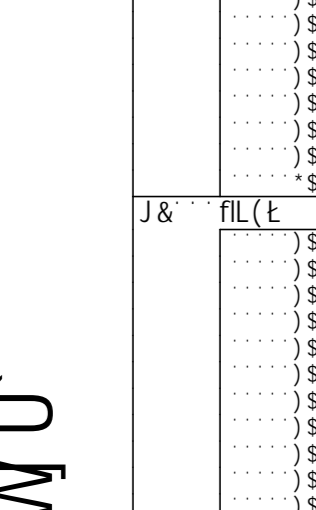
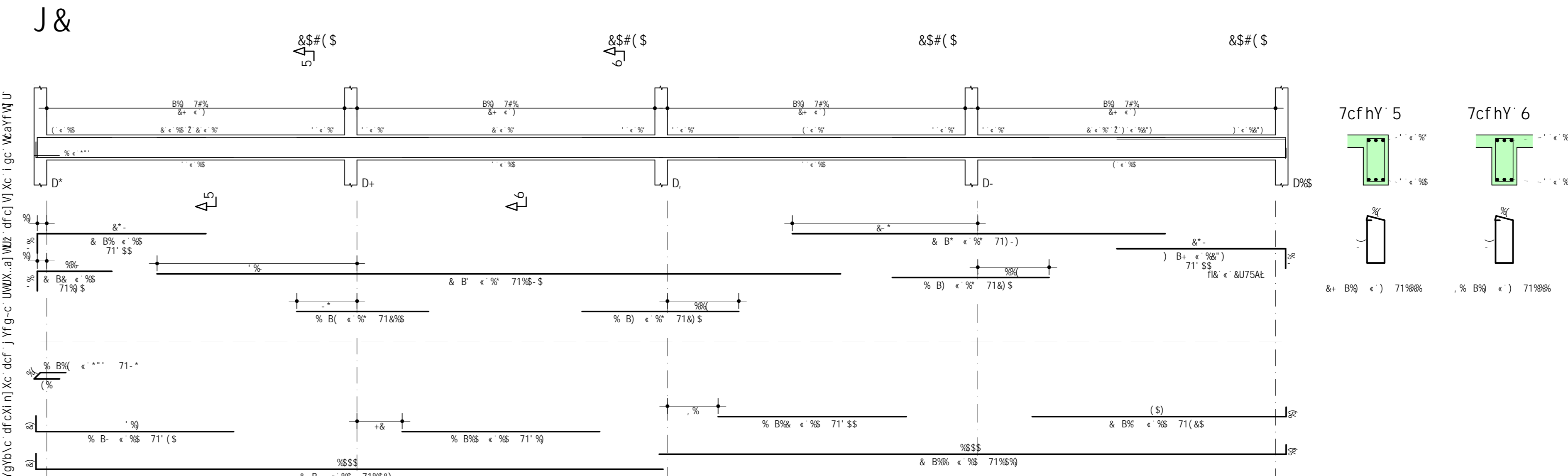
F9QAC 89 SUC		DOG	
SUC	6-H	7CABF	DOG
...
DYgc HERU	35 1	8%	12

TCC		\$\$\$%	
Laje Tipo		\$&'	
H] dc ! ' 5faUXi fU' XY' W] gU' \UaYbhc		\$\$	
H] dc ! ' 5faUXi fU' dcg] h] j U' gYW bXUf] U			

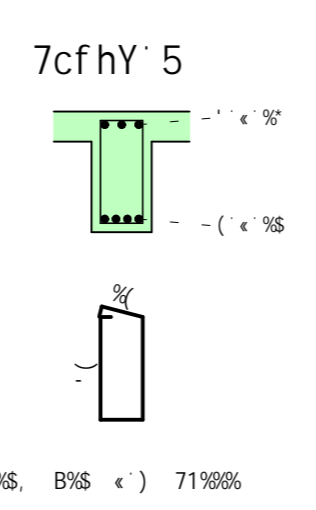
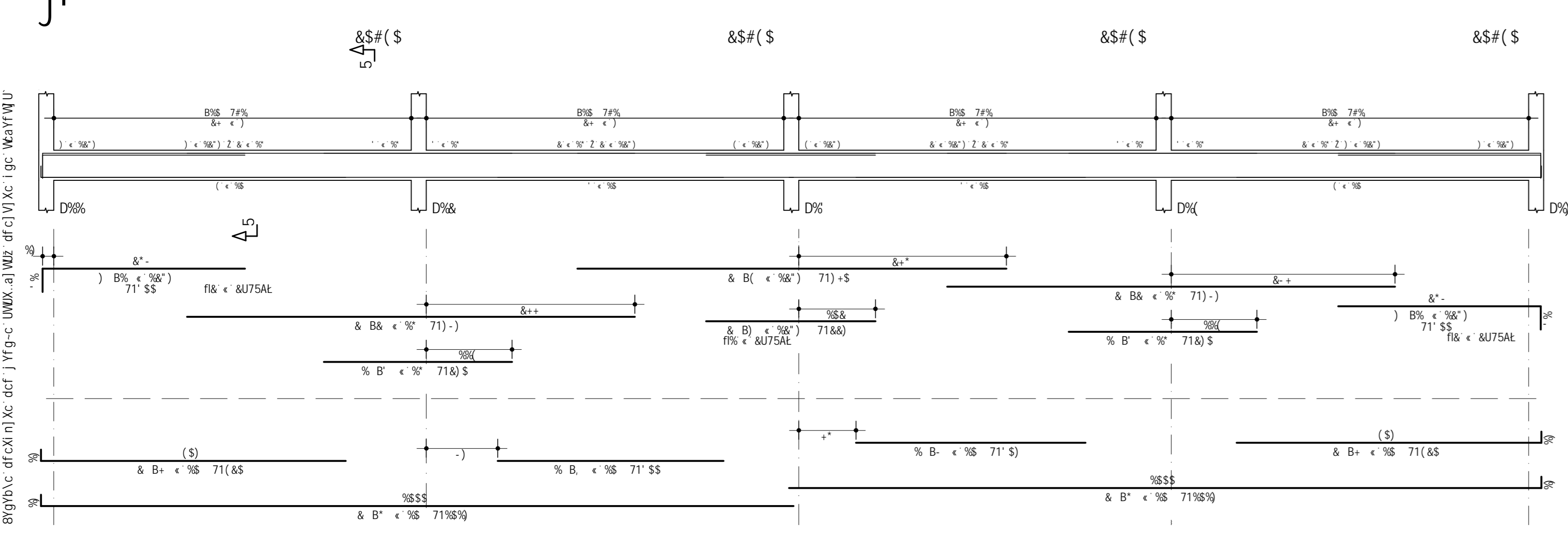
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



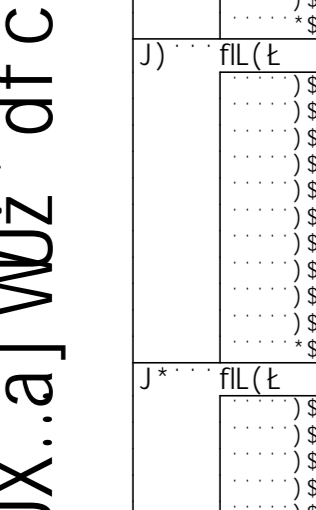
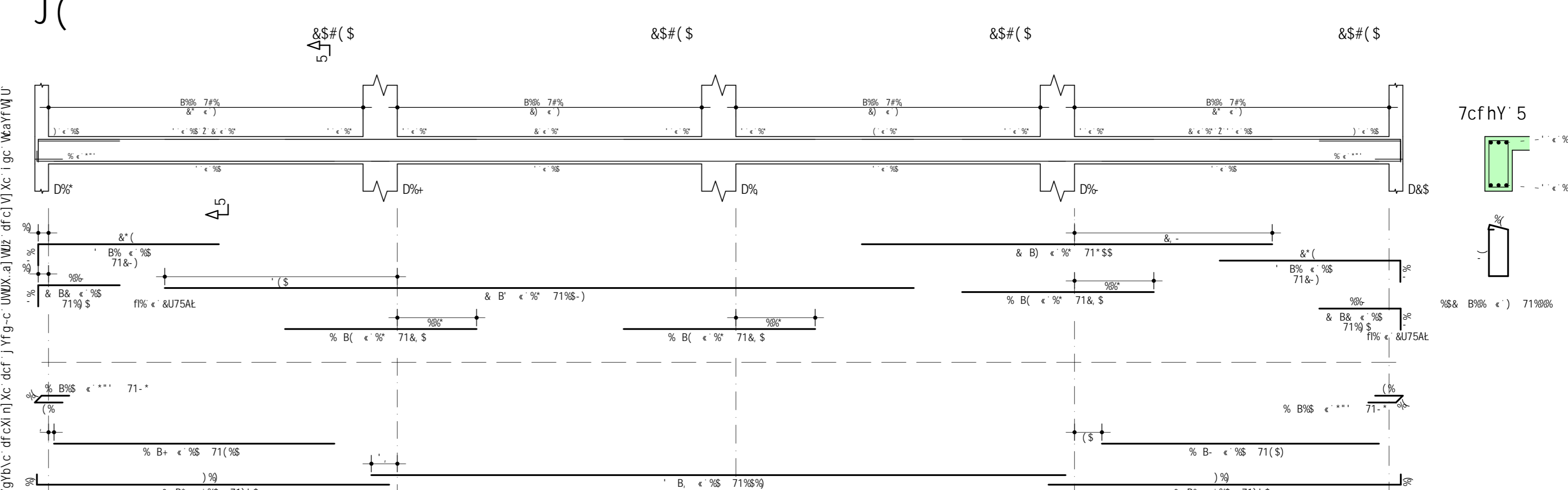
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



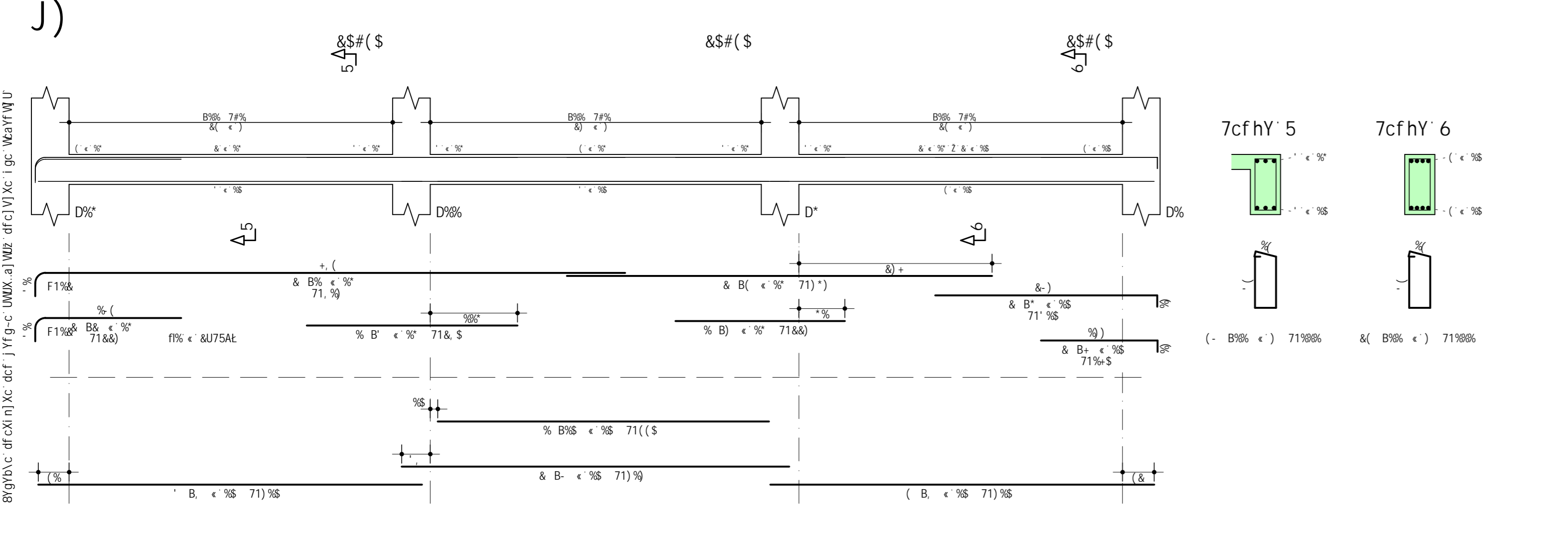
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



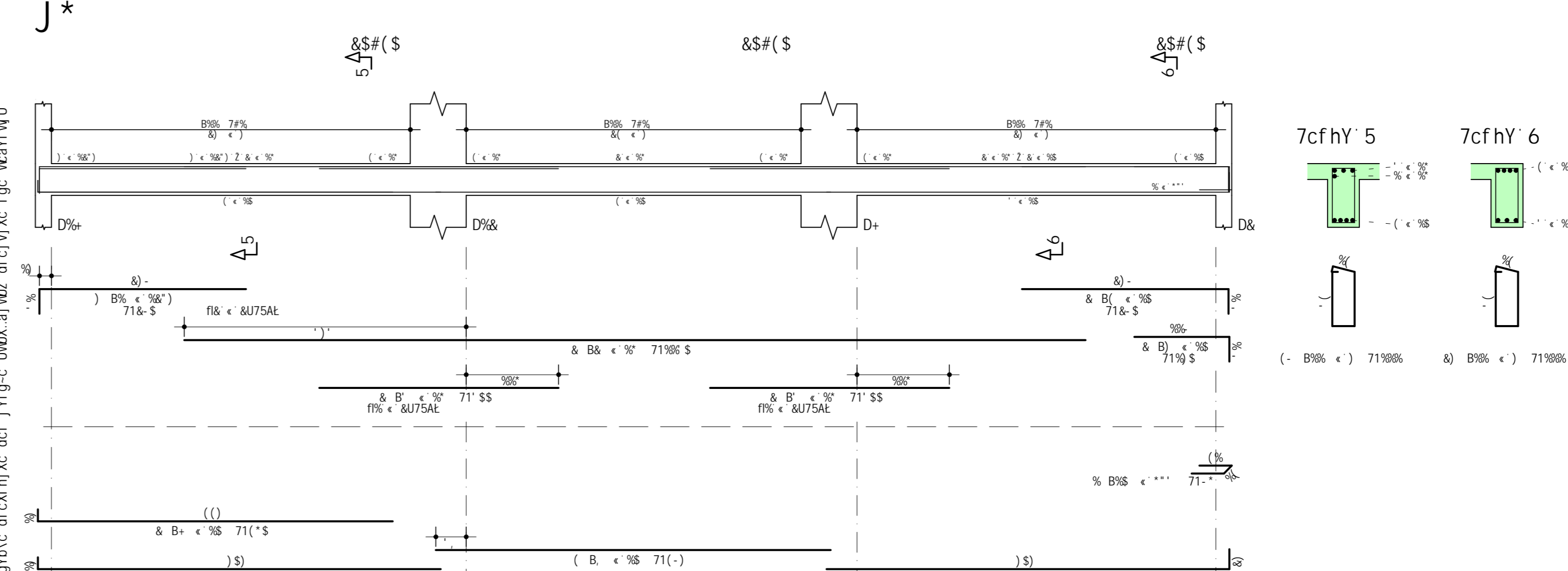
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



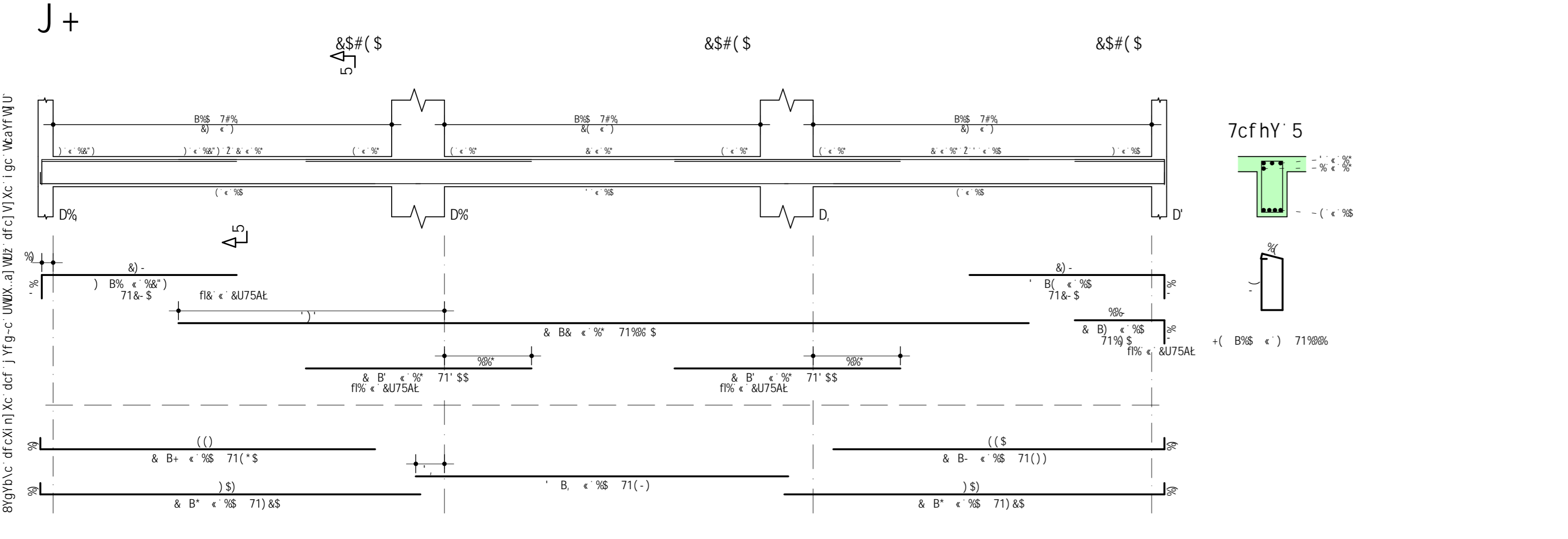
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



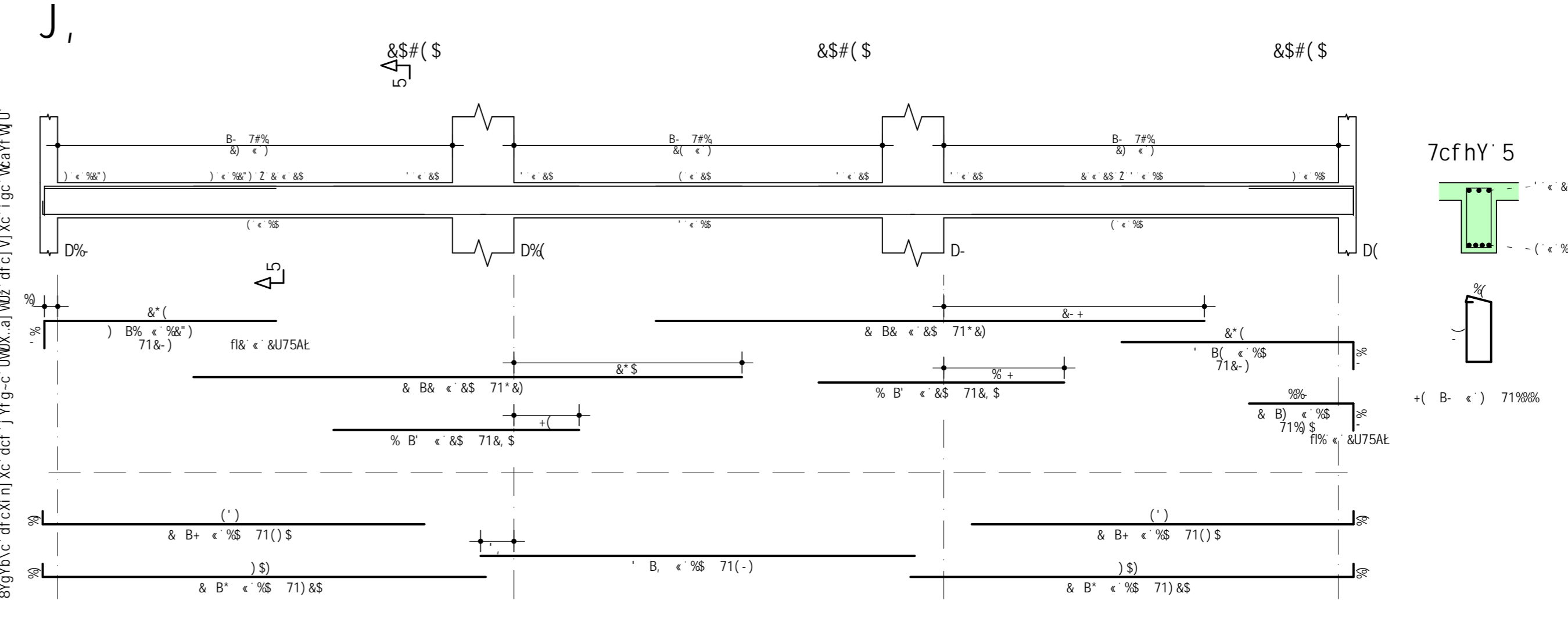
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



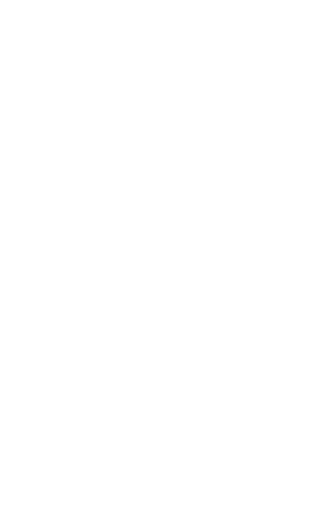
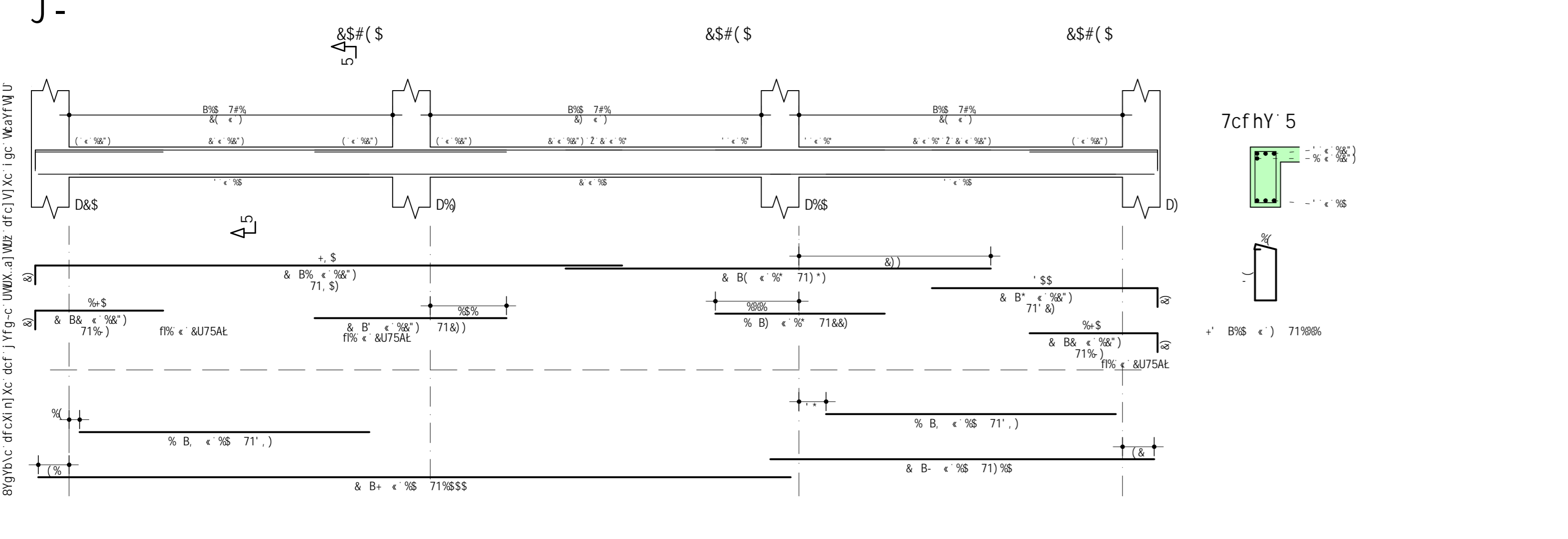
9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



9GHI 8C ! BEC 9L971 H5F



8YgY\c df cXI n] Xc dcf j Yfg~c UWUX..a] WUJ df c] V] Xc i gc WtaYfWU U

SUC	DOG	6-H	EI SBH	7CADF-A9BHC	HCHG#
J%	FILE	...	...	...	...
J&	FILE	...	...	...	...
J'	FILE	...	...	...	...
J(	FILE	...	...	...	...
J)	FILE	...	...	...	...
J* J,	FILE	...	...	...	...
J- J,	FILE	...	...	...	...

T9G AC 89 UC			
SUC	6-H	7CADF	D9CC
...
D9cc MENU	SS 1		1
D9cc MENU	SS 1		1

TCC
 Vigas Tipo

\$\$\$%
 \$&(
 \$\$\$

APÊNDICE C - ORÇAMENTO ESTRUTURA OTIMIZADA

L10V40P70/50		
Item	Qtd.	Custo (R\$)
Fôrma	4389,67	633.604,97
Concreto C25	348,23	181.528,82
Concreto C35	60,74	33.611,69
Aço CA-60 5,0 mm	3396	28.458,48
Aço CA-50 6,3 mm	13842	129.284,28
Aço CA-50 8,0 mm	1104	10.366,56
Aço CA-50 10,0 mm	5880	52.038,00
Aço CA-50 12,5 mm	1869	14.335,23
Aço CA-50 16,0 mm	3274	25.111,58
Aço CA-50 20,0 mm	632	5.586,88
TOTAL		1.113.926,49