

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DEC**

GUSTAVO AURELIO CIFUENTES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO EM PILARES DE EDIFICAÇÕES COM USO DO SCIA ENGINEER**

**JOINVILLE
2017**

GUSTAVO AURELIO CIFUENTES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO EM PILARES DE EDIFICAÇÕES COM USO DO SCIA ENGINEER**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. MSc. Fernanda dos Anjos

JOINVILLE

2017

GUSTAVO AURELIO CIFUENTES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO EM PILARES DE EDIFICAÇÕES COM USO DO SCIA
ENGINEER**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pela Universidade do Estado de Santa Catarina.

Banca Examinadora:

Orientador:

Professora Msc. Fernanda dos Anjos
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro:

Professora Dra. Carmeane Effting
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro:

Prof. Msc. Sandra Denise Kruger Alves
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 08 de junho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Com toda certeza, Deus esteve presente em todos os momentos de minha vida. Dessa forma, agradeço à Ele por ter me abençoado com todas as oportunidades que me trouxeram até esse momento, bem como por ter me dado forças para superar todas as dificuldades e obstáculos e me tornado uma pessoa melhor durante meu tempo na universidade.

Não poderia deixar de agradecer também aos meus pais, Joselito e Selíria, por todo amor, carinho, compreensão e educação que me deram. Tenham certeza de que nunca me esquecerei de todos os sacrifícios e esforços que vocês dois fazem por mim e por me darem as melhores condições possíveis de crescimento e aprendizado. Pai e mãe, muito obrigado por tudo, amo vocês!

Agradeço ainda à minha irmã, Mariana, por ser minha amiga em todas as horas, além de companheira aqui em Joinville. Ter você aqui comigo tornou tudo mais fácil, além de mais divertido e até mesmo engraçado. Te amo!

Deixo também meu muito obrigado à minha tia Rose e à minha prima Ana Paula, que com certeza são minha segunda mãe e irmã, respectivamente. Vocês sempre estiveram ao meu lado desde que nasci e sou extremamente grato por isso. Amo vocês duas!

Aos meus amigos, agradeço pelos quase dez anos de amizade verdadeira e por todos os momentos que compartilhamos. Saibam que tenho orgulho de poder dizer que tenho amigos como vocês. Um obrigado especial aos meus amigos Gabriel e Vinícius, que estiveram ao meu lado em todos os momentos desde o início da faculdade. Saibam que sua força de vontade e disciplina são exemplos pra mim e estarei sempre aqui quando vocês precisarem.

Agradeço à professora Fernanda dos Anjos, por toda dedicação e disposição na orientação desse trabalho, bem como por ter instigado em mim o gosto pelas disciplinas de estruturas.

Obrigado também a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da UDESC por sua contribuição em minha formação acadêmica.

Por fim, meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para essa conquista. Obrigado, especialmente, à professora Glaucimeri Françosi, que acreditou em meu potencial ainda na oitava série do ensino fundamental e me deu a oportunidade de estudos que mudou minha vida e permitiu que eu ingressasse nesta universidade.

RESUMO

A introdução do concreto de alto desempenho na indústria da construção civil pode contribuir para a execução mais econômica de edifícios de grande altura e pontes de grandes vãos, por exemplo. Entretanto, características como maior durabilidade, menor necessidade de manutenção em longo prazo e ganho de área útil podem justificar seu uso também em construções convencionais, além da redução do consumo de insumos. O presente trabalho visou o comparativo de custos diretos para a produção de pilares de um edifício construído todo em concreto convencional e do mesmo utilizando-se concreto de alto desempenho em todos os seus pilares. Todo o processo de análise e dimensionamento das estruturas foi realizado através do *software* Scia Engineer, desenvolvido pela Nemetschek Scia. Tal programa é uma ferramenta inovadora no ramo de concepção, análise e dimensionamento estrutural, uma vez que é o primeiro *software* de cálculo estrutural que utiliza o *Building Information Modeling* (BIM) a se adaptar às normas brasileiras e receber tradução em português. O estudo de caso demonstrou que, ainda que o custo unitário do concreto de alto desempenho seja maior que do concreto convencional, seu uso nos pilares proporcionou economia de 8,46% na produção dos mesmos, uma vez que permitiu grande redução no consumo de aço e diminuição das seções transversais, gerando economia na própria quantidade de concreto utilizada, bem como no madeiramento para fôrmas.

Palavras-chave: Concreto convencional. Concreto de alto desempenho. Viabilidade econômica. Scia Engineer.

ABSTRACT

The introduction of high-performance concrete in the construction industry can contribute to the more economical execution of high-rise buildings and large-span bridges, for example. However, characteristics such as greater durability, less need for long-term maintenance and gain of useful area can justify its use in conventional constructions, besides the reduction of the consumption of inputs. The present work aimed at comparing materials costs for the production of pillars of a building constructed in conventional concrete and using high-performance concrete in all its pillars. The whole process of analysis and design of the structures was done through the software Scia Engineer, developed by Nemetschek Scia. This program is an innovative tool in the field of structural design, analysis and design, since it is the first structural calculation software that uses Building Information Modeling (BIM) to adapt to Brazilian standards and receive translation into Portuguese. The case study demonstrated that, although the unit cost of high performance concrete is greater than that of the conventional one, its use in the pillars provided savings of 8,46%% in the production of them, since it allowed a great reduction in the consumption of steel and reduction of the cross sections, generating savings in the quantity of concrete used, as well as in the wood for formwork.

Keywords: Conventional concrete. High performance concrete. Economic viability. Scia Engineer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre a relação a/c e a resistência à compressão aos 28 dias	24
Figura 2 – Estrutura porosa em concretos	31
Figura 3 – Ambiente de trabalho do Scia Engineer	37
Figura 4 – Edifícios projetados com auxílio do Scia Engineer	38
Figura 5 – Pontes projetadas com auxílio do Scia Engineer	39
Figura 6 – Obras e plantas industriais projetadas com auxílio do Scia Engineer	40
Figura 7 – Árvore principal de comandos do Scia Engineer	46
Figura 8 – Seleção de funcionalidades no Scia Engineer	47
Figura 9 – Opções de lançamento de elementos estruturais	48
Figura 10 – Opções de lançamento de pilar	49
Figura 11 – Definição de seção transversal	49
Figura 12 – Vista do modelo estrutural da Estrutura B	50
Figura 13 – Opções de cargas a serem lançadas no Scia Engineer	51
Figura 14 – Visualização de cargas horizontais atuando em pilares	52
Figura 15 – Árvore de resultados	53
Figura 16 – Momentos dos pilares do térreo da Estrutura B	54
Figura 17 – Deslocamento 3D da Estrutura B	55
Figura 18 – Guia “concreto 15”	56
Figura 19 – Área de aço necessária para um pilar da Estrutura B	57
Figura 20 – Janela de lançamento de armaduras	58
Figura 21 – Resultado de verificação de armadura de um pilar da Estrutura B	59
Figura 22 – Distribuição de aço dos pilares por pavimento na Estrutura A	61
Figura 23 – Distribuição de aço dos pilares por pavimento na Estrutura B	63
Figura 24 – Quantidade total de aço por diâmetro para os pilares da Estrutura A	64
Figura 25 – Quantidade total de aço por diâmetro para os pilares da Estrutura B	64
Figura 26 – Quantidade de aço total para os pilares de ambas as estruturas	65
Figura 27 – Volumes de concreto necessários para os pilares das Estruturas A e B	66
Figura 28 – Custo com concreto para os pilares de ambas as estruturas	67
Figura 29 – Custos dos pilares da Estrutura A	68
Figura 30 – Custos dos pilares da Estrutura B	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das barras	16
Tabela 2 – Características dos fios	17
Tabela 3 – Classes de resistência de concretos estruturais	19
Tabela 4 – Aditivos minerais e suas características	26
Tabela 5 – Aditivos químicos e suas características	28
Tabela 6 – Traços propostos por Chowdhury	30
Tabela 7 – Características de concretos de alta resistência	34
Tabela 8 – Diferenças entre os pilares das estruturas A e B	42
Tabela 9 – Preço dos insumos para a produção de pilares	45
Tabela 10 – Quantidade de aço por pavimento da Estrutura A (25 MPa)	61
Tabela 11 – Quantidade de aço por pavimento da Estrutura B (50 MPa)	62
Tabela 12 – Comparação de quantidades e custos com aço	65
Tabela 13 – Quantitativos e custos com fôrmas de compensado plastificado para os pilares	66
Tabela 14 – Volumes e custos de concretos para os pilares das duas estruturas	67
Tabela 15 – Custo total para a produção dos pilares nBas Estruturas A e	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1	DEFINIÇÕES GERAIS	12
2.1.1	Desempenho das Estruturas	12
2.1.2	Durabilidade	12
2.1.3	Vida Útil	13
2.1.4	Estados Limites	14
2.1.4.1	Estados Limites Últimos	14
2.1.4.2	Estados Limites de Serviço	15
2.2	AÇO PARA CONCRETO ARMADO	15
2.3	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	17
2.3.1	Definição e Classificação de Concreto de Alto Desempenho	17
2.3.2	Desenvolvimento Histórico	19
2.3.3	Composição	20
2.3.3.1	Cimento	20
2.3.3.2	Agregados	21
2.3.3.2.1	<i>Agregados Graúdos</i>	22
2.3.3.2.2	<i>Agregados Finos</i>	23
2.3.3.3	Água e Relação Água/Cimento	24
2.3.3.4	Aditivos	24
2.3.3.4.1	<i>Aditivos Minerais</i>	25
2.3.3.4.2	<i>Aditivos Químicos</i>	27
2.3.4	Dosagem e Mistura	28
2.3.5	Fases do Concreto de Alto Desempenho e sua Microestrutura	30
2.3.5.1	Fase da Pasta de Cimento Hidratada	31
2.3.5.2	Fase da Zona de Transição	32
2.3.5.3	Fase dos Agregados	33
2.3.6	Principais Características de Concretos de Alto Desempenho	33
2.3.6.1	Resistência	33
2.3.6.2	Ductilidade	34
2.3.6.3	Durabilidade	35

2.3.7	Outras Propriedades	35
2.3.7.1	Consistência	35
2.3.7.2	Retração Autógena	35
2.3.7.3	Retração Térmica	36
2.4	O <i>SOFTWARE</i> SCIA ENGINEER	36
3	METODOLOGIA	41
3.1	ESTUDO DE CASO	41
3.1.1	Caracterização das Estruturas	41
3.1.2	Considerações de Cálculo	42
3.1.2.1	Carregamento nas Lajes	42
3.1.2.2	Carregamentos na Escada	43
3.1.2.3	Carregamentos de Paredes Sobre Vigas	44
3.1.2.4	Carregamento do Reservatório Superior	44
3.1.2.5	Carregamento Devido ao Vento	44
3.1.3	Preço dos Insumos Considerados para a Produção de Pilares	44
3.2	USO DO SCIA ENGINEER	45
4	RESULTADOS	60
4.1	COMPARAÇÃO DAS QUANTIDADES DE MATERIAIS NECESSÁRIAS PARA A EXECUÇÃO DOS PILARES DAS ESTRUTURAS A E B	60
4.1.1	Quantidade de Aço	60
4.1.2	Quantidade de Chapas de Madeira	65
4.1.3	Volume de Concreto	66
4.2	COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DIRETOS PARA A PRODUÇÃO DOS PILARES DAS ESTRUTURAS A E B	67
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	74

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados pelo homem. Estima-se que anualmente cerca de 12 bilhões de toneladas de concreto são consumidas por ano no mundo. Características como sua boa resistência à compressão, baixo custo, fácil lançamento de acordo com as mais diversas necessidades e boa combinação com diversos outros materiais, especialmente o aço, justificam tamanha demanda (SAYED; SADEK; SAMAHY, 2011, tradução nossa).

Entretanto, as exigências para com esse material são cada vez maiores, como ressaltam Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 1283):

[...] cada vez exige-se mais dessa importante opção para estruturas. As notáveis evoluções do cálculo estrutural, principalmente com a disponibilização de programas computacionais, aliados ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto e do aço, permitem que projetistas especifiquem estruturas cada vez mais arrojadas em concreto armado e protendido. Nessas aplicações, muitas vezes, o concreto convencional (CC ou OPC *Ordinary Portland Concrete*) não atende aos requisitos, ou há alternativas que apresentam uma relação técnica e econômica mais favorável. Por isso, foram desenvolvidas misturas especiais, com propriedades superiores aos CC, chamadas de Concretos de Alta Resistência (CAR ou HSC *High Strength Concrete*), Concretos de Alto Desempenho (CAD ou HPC *High Performance Concrete*), e até, de Ultra-Alto Desempenho (CUAD ou UHPC *Ultra-high Performance Concrete*).

Ainda que o conceito de concreto de alto desempenho seja muito mais abrangente, como será exposto adiante, e levando-se em conta os fins deste trabalho, considerar-se-á que um concreto de alta resistência também pode ser enquadrado como de alto desempenho. De fato, de acordo com Britez (2011, p. 55), “destaca-se que o concreto de alta resistência possui muitas qualidades, principalmente relacionadas a durabilidade, e, portanto, pode realmente ser classificado como de alto desempenho”.

A introdução do concreto de alto desempenho na indústria da construção civil pode contribuir para a execução mais econômica de edifícios de grande altura e pontes de grandes vãos, por exemplo. O uso de aditivos superredutores de água e sílica ativa resultou na produção de concretos de alta resistência trabaláveis, tendo f_{ck} (resistência característica à compressão) superior até a 100 MPa (AL.SHEIKH, 2011, tradução nossa).

De acordo com Rana, Tiwari e Srivastava (2016, tradução nossa), o CAD é principalmente utilizado em obras de pontes, pavimentação e edifícios de grande altura. Em pontes, tal uso é justificado devido à possibilidade de se vencer maiores vãos e a capacidade de suportar uma maior carga, além da maior durabilidade, que

possibilita um acréscimo à vida útil da estrutura, por exemplo. Já em edifícios, a principal razão para o uso de tal concreto é a redução do peso próprio da estrutura, além de, novamente, uma maior durabilidade, que significa menores custos de manutenção. Os autores indicam ainda que é cada vez mais comum o uso de concretos de alto desempenho em pavimentações devido aos possíveis ganhos econômicos derivados de características como a alta resistência inicial, a permeabilidade reduzida, a maior resistência à abrasão e aos efeitos causados por congelamento e descongelamento.

Além das melhores características químicas e mecânicas apresentadas por concretos de alta resistência, o uso dos mesmos pode implicar em grandes reduções de custo no processo construtivo. Segundo Darge (2014, tradução nossa), concretos de alta resistência são a maneira mais econômica de se distribuir um carregamento vertical até as fundações de uma edificação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Lima (1997), o concreto de alto desempenho possui um custo inicial de volume unitário maior que o convencional, porém sua alta resistência inicial pode reduzir os custos de construção, uma vez que suas propriedades mecânicas melhoradas reduzem as dimensões dos elementos estruturais e sua maior durabilidade aumenta a vida útil da estrutura.

Os três elementos que mais contribuem para o custo de um pilar, por exemplo, são o concreto, o aço e os materiais para fôrma, normalmente madeira. Ao se utilizar concreto de alta resistência, as dimensões do pilar podem ser reduzidas. Conseqüentemente, menos concreto e menos madeira serão consumidos (DARGE, 2014, tradução nossa).

Araújo (2009) atenta para o fato de que o aumento na resistência à compressão do concreto tem uma influência significativa no dimensionamento dos pilares, que passam a exigir uma menor taxa de armaduras ou até mesmo apenas armadura mínima. Por outro lado, a adoção desse tipo de concreto praticamente não altera as armaduras de vigas e lajes, onde o aço suporta, comumente, esforços de tração.

Entretanto, Araújo (2010, p. 56) faz uma importante observação:

[...] o emprego de um concreto de maior resistência pode resultar em economia da estrutura como um todo, mesmo que haja um aumento do custo do concreto. [...] Por outro lado, o projetista deve levar em conta as condições de desenvolvimento tecnológico da região onde a estrutura será executada. De nada adianta elaborar um projeto com base em um concreto de alta resistência, para uma obra de pequeno porte, que será executada em uma localidade onde não há adequadas condições de produção e controle do concreto. Ao contrário, tal procedimento pode resultar em um verdadeiro desastre.

Assim, existe a necessidade de se avaliar o real impacto do uso de CAD

no orçamento de uma obra, uma vez que, apesar de possuir custo unitário maior, o mesmo permite redução na quantidade de outros materiais, como aço estrutural e madeiramento das fôrmas, além de reduzir o consumo do próprio concreto, se comparado ao concreto convencional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo Geral**

Esse trabalho tem por finalidade determinar as diferenças de custo direto entre o uso de concreto de alto desempenho e convencional na produção de pilares, tomando como base um mesmo projeto arquitetônico.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

- Dimensionar os pilares de uma estrutura, primeiramente com concreto convencional e, em seguida, com concreto de alto desempenho e obter os quantitativos de materiais para ambas as situações com o *software* Scia Engineer;
- Demonstrar o funcionamento do Scia Engineer.
- Analisar as diferenças de custo direto entre o uso de concreto de alto desempenho e concreto convencional em pilares, tomando como base um mesmo projeto arquitetônico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica de diversos assuntos relacionados ao trabalho. São abordadas, primeiramente, definições gerais relacionadas ao dimensionamento e uso de estruturas. Em um segundo momento, apresentam-se conceitos relacionados ao aço utilizado em estruturas de concreto armado. Depois, de maneira mais profunda, tem-se uma revisão sobre concreto de alto desempenho. Por fim, é apresentado o Scia Engineer, software de análise e dimensionamento estrutural utilizado neste trabalho.

2.1 DEFINIÇÕES GERAIS

2.1.1 Desempenho das Estruturas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define desempenho, através da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013), como o comportamento de uma edificação e seus sistemas durante o uso.

Para o caso de estruturas de concreto armado, a ABNT, por meio da NBR 6.118 (ABNT, 2014, p. 13), dispõe que “desempenho em serviço é a capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, sem apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada.”

Borges (2008) cita que uma edificação deve possuir características que a permitam cumprir os objetivos e funções para a qual foi projetada, quando submetida a determinadas condições de exposição e uso.

2.1.2 Durabilidade

De acordo com Araújo (2010), a durabilidade das estruturas de concreto é um dos aspectos de maior importância dentro das normas modernas de projeto. As exigências relativas a essa propriedade são cada vez mais rígidas, seja na fase de projeto ou de execução de uma estrutura, e buscam garantir a conservação das características das mesmas ao longo de toda sua vida útil. Nesse período não devem ser necessárias medidas extras de manutenção ou reparo das estruturas.

A NBR 6.118 (ABNT, 2014) descreve durabilidade como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. De maneira mais ampla, a NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) elenca durabilidade como a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas. Tal norma indica também que durabilidade pode ser entendida como termo qualitativo para expressar a

condição em que a edificação ou seus sistemas mantém seu desempenho requerido durante a vida útil. A NBR 6.118 (ABNT, 2014, p. 15) adverte ainda que “a durabilidade das estruturas de concreto requer cooperação e atitudes coordenadas de todos os envolvidos nos processos de projeto, construção e utilização”.

2.1.3 Vida Útil

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) define vida útil como período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas executam as atividades para as quais foram projetados e construídos, considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

De modo mais particular às estruturas de concreto, A NBR 6.118 (ABNT, 2014, p. 15) caracteriza vida útil de projeto da seguinte forma:

Por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, [...] bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais. [...] O conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo, como, por exemplo, aparelhos de apoio e juntas de movimentação.

Assim, de acordo com Araújo (2010) não se deve confundir vida útil de projeto com vida útil total. O termo vida útil de projeto se refere ao período de tempo em que a estrutura é capaz de desempenhar bem as funções para as quais foi projetada, sem necessidade de reparos adicionais. Já o período de vida útil total corresponde ao período de tempo que vai até a ruptura total ou parcial da estrutura. O autor indica como aumentar a vida útil de projeto de estruturas de concreto armado:

Geralmente, a vida útil de projeto corresponde ao tempo que vai até a despassivação da armadura, momento em que se inicia o processo de corrosão. Normalmente, esse é o tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. Logo, uma das maneiras de se aumentar a vida útil de projeto é retardar a chegada dessas frentes, o que se consegue com o aumento da espessura do cobrimento de concreto, com a redução do fator água-cimento e com o emprego de revestimentos (ARAÚJO, 2010, p. 60).

É importante ressaltar, segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), que a diminuição do fator água/cimento é um dos requisitos fundamentais para obtenção do CAD. Dessa forma, além de ser um concreto de maior resistência, o mesmo também pode apresentar maior vida útil.

2.1.4 Estados Limites

Segundo Araújo (2010), as estruturas de concreto devem atender, além dos aspectos econômicos e estéticos, critérios de qualidade. São eles:

- **Segurança:** dentro de um nível de segurança preestabelecido, a estrutura deve suportar as ações que lhe são impostas durante a sua vida útil (incluindo a fase construtiva), sem a ocorrência de ruptura ou perda do equilíbrio estático;
- **Bom desempenho em serviço:** nas condições normais de utilização, as deformações da estrutura devem ser suficientemente pequenas para não provocar danos inaceitáveis em elementos não estruturais, não afetar o seu uso ou a sua aparência, nem causar desconforto aos usuários; o grau de fissuração não deve afetar o uso ou a aparência da estrutura, nem prejudicar a proteção da armadura;
- **Durabilidade:** a estrutura deve se manter em bom estado de conservação sob as influências ambientais previstas, sem necessidade de reparos de alto custo ao longo de sua vida útil.

Quando um dos requisitos relativos à segurança e bom desempenho em serviço não é atendido, alcançou-se um estado limite (ARAÚJO, 2010).

A NBR 6.118 (ABNT, 2014) classifica os estados limites em estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS).

2.1.4.1 Estados Limites Últimos

Podem ser definidos como estados limites últimos aqueles ligados ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, em parte ou ao todo, do uso da estrutura (ARAÚJO, 2010).

De acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014), os estados limites últimos de estruturas de concreto podem ser classificados em:

- Estado limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais;
- Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;

- Estado limite último provocado por solicitações dinâmicas;
- Estado limite último de colapso progressivo;
- Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo;
- Estado limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas;
- Outros estados limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

2.1.4.2 Estados Limites de Serviço

Para Araújo (2010), os estados limites de serviço, também chamados de estados limites de utilização, referem-se às situações em que a utilização da estrutura torna-se prejudicada por apresentar deformações excessivas ou um nível de fissuração que comprometa sua durabilidade.

De forma mais geral, a NBR 6.118 (ABNT, 2014, p.55) identifica estados limites de serviço como “aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas”.

Assim, para estruturas habituais de concreto armado costuma-se considerar principalmente o estado limite de deformações excessivas e o estado limite de abertura de fissuras. Nota-se, então, que o requisito de segurança está mais relacionado aos estados limites últimos, enquanto que os critérios de durabilidade, aparência e conforto estão ligados aos estados limites de serviço (ARAÚJO, 2010).

2.2 AÇO PARA CONCRETO ARMADO

Segundo a NBR 7.480 (ABNT, 2007), os aços utilizados em estruturas de concreto armado são classificados em fios e barras. Os fios são caracterizados por possuírem diâmetro nominal menor ou igual a 10 mm e fabricados a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio. Já as barras são definidas por terem diâmetro nominal maior ou igual a 6,3 mm e serem produzidas exclusivamente por laminação a quente, sem posterior processo de deformação mecânica. Ainda, de acordo com o valor característico da resistência de escoamento, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60.

É interessante notar, entretanto, que assim como na realidade da execução de obras, na nomenclatura usual de projetos tanto fios trefilados quanto barras laminadas são designados simplesmente como barras de armadura (ARAÚJO, 2010).

As características geométricas das barras e fios também são definidas pela NBR 7.480 (ABNT, 2007):

- As barras lisas, da categoria CA-25, devem ter superfície obrigatoriamente lisa, desprovidas de quaisquer tipos de nervuras ou entalhes;
- As barras nervuradas, da categoria CA-50, obrigatoriamente possuem nervuras transversais oblíquas, que devem formar um ângulo entre 45° e 75° com a direção do eixo da barra. Além disso, as barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais, contínuas e diametralmente opostas, que impeçam o giro da barra dentro do concreto, exceto no caso em que as nervuras transversais oblíquas estejam dispostas de forma a se oporem a este giro;
- Os fios, da categoria CA-60, podem ser lisos, entalhados ou nervurados, observando-se apenas que os fios de diâmetro nominal igual a 10,0 mm devem ter obrigatoriamente entalhes ou nervuras.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, de acordo com a NBR 7.480 (ABNT, 2007), características de barras e fios, respectivamente.

Tabela 1 – Características das barras

Diâmetro Nominal (mm)	Área da Seção (mm²)	Perímetro (mm)
6,3	31,2	19,8
8,0	50,3	25,1
10,0	78,5	31,4
12,5	122,7	39,3
16,0	201,1	50,3
20,0	314,2	62,8
22,0	380,1	69,1
25,0	490,9	78,5
32,0	804,2	100,5
40,0	1256,6	125,7

Fonte: NBR 7.480 (ABNT, 2007).

Tabela 2 – Características dos fios

Diâmetro Nominal (mm)	Área da Seção (mm ²)	Perímetro (mm)
2,4	4,5	7,5
3,4	9,1	10,7
3,8	11,3	11,9
4,2	13,9	13,2
4,6	16,6	14,5
5,0	19,6	15,7
5,5	23,8	17,3
6,0	28,3	18,8
6,4	32,2	20,1
7,0	38,5	22,0
8,0	50,3	25,1
9,5	70,9	29,8
10,0	78,5	31,4

Fonte: NBR 7.480 (ABNT, 2007).

Segundo Araújo (2010), a forma do diagrama tensão-deformação dos aços, que pode ser obtido em um ensaio de tração simples, é influenciada pelo processo de fabricação. As barras, fabricadas exclusivamente por laminação a quente, apresentam um patamar de escoamento, enquanto que os fios, produzidos por trefilação, não demonstram ter um patamar bem definido.

2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.3.1 Definição e Classificação de Concreto de Alto Desempenho

Concreto de alto desempenho pode ser entendido como aquele que apresenta melhor comportamento que o concreto convencional durante o uso da construção, atendendo de forma satisfatória as exigências do usuário e em conformidade com as especificações dos projetistas da estrutura. É importante entender desempenho não apenas como a resistência mecânica, mas também outras características, como trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e, principalmente, a durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Patel e Shah (2013, tradução nossa) definem concreto de alto desempenho como aquele que atende características especiais, que não podem ser alcançadas rotineiramente utilizando-se materiais convencionais e técnicas normais de mistura, lançamento e cura.

Mehta e Monteiro (2008) descrevem concreto de alto desempenho como aquele no qual certas características são desenvolvidas para aplicações e ambientes específicos. Exemplos de características que podem ser consideradas críticas para aplicações específicas são: facilidade de aplicação, adensamento sem segregação, resistência nas primeiras idades, resistência de longo prazo e propriedades mecânicas, permeabilidade, densidade, calor de hidratação, tenacidade, estabilidade de volume e longa vida útil em ambientes agressivos.

Seguindo esse mesmo raciocínio, Büyüköztürk e Lau (2007, tradução nossa) apontam que a terminologia “alto desempenho” pode estar relacionada a qualquer propriedade do concreto. Pode significar uma boa trabalhabilidade em concreto fresco ou baixo calor de hidratação em caso de concreto massa, por exemplo. Entretanto, de um ponto de vista estrutural, é usualmente entendido que alta resistência, alta ductilidade e alta durabilidade, que são consideradas as características mais desejadas para um material de construção, são os atributos chave para um CAD.

Dessa forma, ainda que concretos de alto desempenho e concretos de alta resistência possam ser diferentes tipos de concreto, existem casos em que uma maior resistência significa também uma melhor performance (EKOLU; MURUGAN, 2012, tradução nossa).

As normas brasileiras, entretanto, não classificam concretos de alto desempenho, apenas de alta resistência. A ABNT dispõe, por meio da NBR 8.953 (ABNT, 2015), a seguinte classificação, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes de resistência de concretos estruturais

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	100
C50	50		

Fonte: NBR 8.953 (ABNT, 2015).

Outras normas estrangeiras também adotam classificações semelhantes:

[...] O ACI (*American Concrete Institute*) adota o mesmo limite de 55MPa para o concreto a ser um CAR.

[...] O *fib* (CEB-FIP) *Model Code 2010* classifica os concretos na base da sua resistência característica na série C12, C20 e daí, a cada 10MPa, até C120. Também divide os concretos em resistência normal abaixo de C50 e alta resistência acima deste valor (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011, p. 1285).

2.3.2 Desenvolvimento Histórico

Historicamente, conforme as exigências de projeto se tornaram cada vez maiores, houve também o interesse na produção de concretos com maior resistência. Ekolu e Murugan (2012, tradução nossa) destacam que o advento de CAR foi impulsionado pela crescente demanda em infraestrutura, principalmente nas áreas urbanas com grande aumento demográfico. Conseqüentemente, os edifícios de vários andares tornaram-se características indispensáveis nas cidades. Cerca de 30 a 50 anos atrás, a maioria dos arranha-céus eram construídos principalmente com aço. Já nos atuais centros urbanos, o concreto tornou-se o material de construção predominante para estruturas de grande porte, incluindo alguns dos edifícios mais altos do mundo.

Guimarães (2002, p. 21) indica a evolução na resistência dos concretos ao longo dos anos:

[...] Mundialmente, há registros de que em meados da década de 50, resistências de 34 MPa eram consideradas altas. Nos anos 60, já eram

produzidos comercialmente concretos com resistências entre 41 MPa e 52 MPa.

[. . .] No entanto, quando as resistências à compressão chegaram perto dos 60 MPa, houve um obstáculo técnico que impediu a continuação de seu incremento. Tal barreira só foi transposta com a disponibilidade de novos materiais, que tornaram viável reduzir ainda mais o fator água/aglomerante.

A tecnologia que possibilitou a produção de concretos de alta resistência surgiu quando plastificantes e superplastificantes foram desenvolvidos na Alemanha e no Japão, nos anos 1960. Tais aditivos permitem a fabricação de concretos com baixa relação água/cimento, o que aumenta sua resistência, mas mantendo também uma alta trabalhabilidade (EKOLU; MURUGAN, 2012, tradução nossa).

Ainda, de acordo com Guimarães (2002), nos anos 80, com o desenvolvimento tecnológico dos superplastificantes e sua dosagem aliada a produtos com propriedades pozolânicas, foi possível obter-se concretos com resistência próximas e superiores a 100 MPa, com grande redução do fator água/cimento sem perda da trabalhabilidade.

2.3.3 Composição

Os componentes do concreto de alto desempenho são os seguintes: cimento Portland comum (Tipo I) em consumo elevado, normalmente entre 450 e 550 kg/m³; agregados de boa qualidade; sílica ativa com consumo entre 5 e 15% da massa total de material cimentício; aditivos químicos, como superplastificante; e algumas vezes outros materiais cimentícios, como cinza volante ou escória granulada de alto forno. O que torna o concreto de alto desempenho é a baixíssima relação água/cimento, em geral em torno de 0,25. O superplastificante é utilizado em alto teor, para se obter a trabalhabilidade desejada (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.3.3.1 Cimento

Cimento pode ser definido como “material obtido através da moagem do clínquer, que se trata de uma mistura de argila e calcáreo submetida a altas temperaturas” (GUIMARÃES, 2002, p. 26).

Para a produção de CAD os cimentos escolhidos devem ser os mais puros possíveis, uma vez que a quantidade de pozolanas a serem adicionadas na mistura será considerável. Entretanto, essas pozolanas possuem qualidade superior às aquelas incorporadas em cimentos comerciais, como cinza volante e escória de alto forno. Dessa forma, sem considerar o tamanho das partículas, cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Mehta e Monteiro (2008) alertam para o fato de que, dado o grande consumo de aditivos químicos e minerais na produção de concretos de alto desempenho, a

compatibilidade aditivo-cimento é uma questão importante e deve ser profundamente estudada.

De acordo com Nolli (2015), em relação às propriedades mecânicas de resistência, é importante que o cimento Portland desenvolva o gel de silicato de cálcio hidratado (CSH), visto que os silicatos de cálcio são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do concreto. Assim, deve-se optar por cimentos com maiores teores de silicato bicálcico (C_2S) e silicato tricálcico (C_3S), que são responsáveis pelas reações que dão resistência ao concreto. A reação do C_3S com água, além de formar o gel CSH (principal composto responsável pela resistência mecânica do concreto), produz o hidróxido de cálcio (CH), que é consumido na reação pozolânica pelas adições pozolânicas contidas no CAD. O CH da reação pozolânica é transformado em gel CSH, que aumenta a resistência mecânica do CAD.

As partículas de cimento, segundo Guimarães (2002), normalmente possuem entre 1 e 50 μm e sua composição química é baseada em:

- Silicato bicálcico C_2S – 15 a 30 %;
- Silicato tricálcico C_3S – 45 a 60 %;
- Aluminato tricálcico C_3A – 6 a 12%;
- Fluoraluminato tetra cálcico C_4AF – 6 a 8%.

Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 1291) fazem importantes considerações acerca da composição química dos cimentos utilizados na produção de concretos de alto desempenho:

Com relação aos constituintes dos cimentos, devem-se aumentar os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) contidos nesses cimentos, responsáveis pelas resistências finais das misturas. Para isso, reduz-se o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

2.3.3.2 Agregados

Em concretos de alto desempenho a escolha dos agregados é de extrema importância. Características como tamanho, forma, textura superficial, mineralogia e limpeza precisam de atenção especial (RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016, tradução nossa).

Nolli (2015) indica que os agregados usados para fazer o CAD são areia natural e cascalho ou rocha britada. As rochas selecionadas devem ser rochas finamente texturadas que possam ser cominuídas em partículas contendo uma quantidade mínima de microfissuras. Rochas contendo planos de clivagem fracos ou partículas que sofreram a ação severa de intempéries devem ser evitadas.

Darge (2014, tradução nossa) destaca que as propriedades dos agregados são decisivas para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de um CAD, assim o uso de agregados de qualidade na produção de tais concretos deve ser enfatizado. O autor indica ainda que os agregados finos e graúdos ocupam, geralmente, de 60 a 70% do volume do concreto (e de 70 a 85% da massa) e influenciam fortemente suas características tanto no estado fresco quanto no endurecido.

2.3.3.2.1 Agregados Graúdos

No caso do agregado graúdo que se pretende utilizar para produção de um CAD, há uma importante consideração: em concretos convencionais, o agregado possui resistência maior que da pasta. Em concretos de alto desempenho, no entanto, a pasta fica extremamente fortalecida, havendo a necessidade de se adotar um agregado graúdo de altíssima qualidade, para se evitar que o mesmo se transforme no elo mais fraco da mistura (GUIMARÃES, 2002).

Dessa forma, enquanto que em concretos normais as rupturas ocorrem na pasta de cimento ou na zona de transição entre a pasta e os agregados, em concretos de alta resistência a tendência é de que a ruptura ocorra nos agregados em si (DARGE, 2014, tradução nossa).

Tutikian, Isaia e Helene (2011, p.1294) apontam algumas características físicas importantes para a escolha dos agregados a serem utilizados na fabricação de CAD:

Os agregados [...] devem ter a dimensão máxima característica limitada, pois os de maior granulometria apresentam mais falhas na sua microestrutura e retêm mais água de exsudação[...]. É sabido, no entanto, que agregados de dimensão muito reduzida demandam quantidade maior de água de amassamento, devendo-se, novamente, encontrar o equilíbrio que proporcione as melhores propriedades nos estados frescos e endurecidos.

Aïtcin (2000 *apud* TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011) resume as principais características que um agregado deve possuir para ser usado na produção de um concreto de alto desempenho:

- A sua escolha deve ser criteriosa, pois é o fator limitante da resistência última de CAD para patamares acima de 100MPa;
- O agregado graúdo deve possuir, de preferência, módulo de finura entre 2,7 e 3,0, sem partículas finas, descartando-se os grãos inferiores a 5mm;
- Os agregados graúdos devem apresentar a forma mais cúbica possível, podendo ser utilizadas rochas calcárias, dolomíticas, graníticas ou diabásicas;

- Deve-se usar o menor diâmetro possível dos agregados graúdos para diminuir a espessura da zona de transição e torná-la mais homogênea, considerando-se, ainda, que as partículas menores são mais resistentes porque apresentam menos microfissuras, poros menores e menos inclusões de materiais frágeis.

É interessante notar que, a uma dada relação água/cimento, a resistência do concreto pode ser aumentada significativamente com a simples redução da dimensão máxima do agregado graúdo. Quanto mais alta a resistência a ser alcançada, menor deve ser a dimensão máxima do agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para se produzir CAR (na faixa de 100 MPa), deve-se utilizar agregados graúdos de dimensão máxima entre 14 mm e 20 mm. Para concretos com resistência à compressão de mais de 125 MPa deve-se utilizar dimensão máxima de 10 mm a 14 mm (NOLLI, 2015).

Quanto à forma dos agregados, Rohden (2011) enfatiza que aqueles com partículas alongadas, lamelares ou discóides produzem concretos ásperos e por isso devem ser evitados. Agregados graúdos com formas lamelares tendem a se acomodar em uma direção preferencial, alinhando-se e podendo criar planos de fraqueza. Por outro lado, agregados cúbicos ou esféricos resultam em uma melhor trabalhabilidade.

Ainda segundo Rohden (2011), a seleção do agregado graúdo torna-se mais importante à medida que a resistência à compressão esperada aumenta. Rochas duras e densas britadas, tais como calcário, dolomita, e rochas ígneas do tipo plutônico (granito, sienito, diorito, gabro e diabásio) tem sido usadas como agregado graúdo na produção de CAD.

2.3.3.2.2 *Agregados Finos*

Os agregados finos geralmente consistem em areia ou pó de brita, com a maioria das partículas menores de 5mm. Aqueles que possuem partículas arredondadas e textura lisa requerem menos água de amassamento e por essa razão são mais indicados para a produção de concretos de resistência elevada. Como CAD normalmente contém uma quantidade tão elevada de materiais cimentícios finos, a graduação dos agregados finos é relativamente sem importância. Entretanto, areias com módulo de finura de 3,0 são normalmente usadas para produção de tais concretos (DARGE, 2014, tradução nossa).

Mehta e Monteiro (2008, p. 474) justificam o uso de agregados finos com módulo de finura alto (aproximadamente 3,0) pois:

Concretos de alta resistência já possuem grandes quantidades de partículas pequenas de cimento e pozolana; por isso, a presença de partículas muito pequenas no agregado miúdo não é necessária para melhorar a trabalhabilidade. O uso de um agregado miúdo de maior dimensão

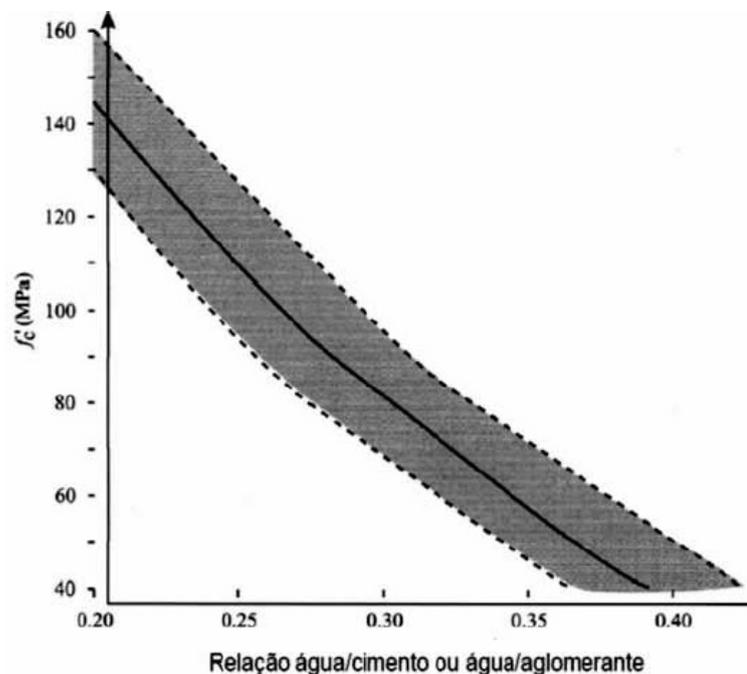
requer menos água para atingir uma mesma trabalhabilidade e durante o processo de mistura, as partículas mais graúdas originarão tensões de cisalhamento mais altas que ajudam a evitar a floculação dos grãos de cimento.

2.3.3.3 Água e Relação Água/Cimento

Tutikian, Isaia e Helene (2011) indicam que para a produção de CAD com resistências de até 120MPa, a relação água/cimento (a/c) deve ser inferior a 0,30 em massa. Já Darge (2014, tradução nossa) afirma que concretos de alta resistência, produzidos com tecnologias tradicionais de mistura, são preparados com relação a/c entre 0,22 e 0,44, alcançando resistências à compressão aos 28 dias que variam de 60 a 130MPa. Observa-se também que os critérios de qualidade da água não diferem daqueles empregados na produção de concretos convencionais e que a mesma deve ser potável.

A Figura 1 relaciona o fator a/c com a resistência à compressão aos 28 dias, baseada em uma série de resultados obtidos em pesquisas :

Figura 1 – Relação entre a relação a/c e a resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Tutikian; Isaia; Helene (2011).

2.3.3.4 Aditivos

Os aditivos foram inseridos na mistura do concreto visando ajustar as características reológicas às necessidades de projeto. Busca-se, por exemplo, aumentar a plasticidade, reduzir a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução de

calor ou aumentar a durabilidade em condições específicas. Na produção de CAD são utilizados, normalmente, aditivos minerais e líquidos superplastificantes (GUIMARÃES, 2002).

2.3.3.4.1 *Aditivos Minerais*

Segundo Rana, Tiwari e Srivastava (2016, tradução nossa), aditivos minerais, como por exemplo cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno são necessários para a produção de concretos de alto desempenho, uma vez que o ganho em resistência obtido através de seu uso não seria possível usando apenas cimento adicional.

Outros materiais que servem como aditivos minerais, ou seja, possuem atividade pozolânica, são as pozolanas naturais, a cinza da casca de arroz e o metacaulim. O uso de uma adição mineral pode ser dado por adição ao cimento, retirando-se parte dos agregados, ou por substituição ao cimento, com retirada de parte do mesmo. É essencial que, ao se adicionar um novo material, outros deverão sair da mistura para manter a mesma unidade de volume (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Nolli (2015, p. 13):

A utilização de adições minerais no concreto pode influenciar favoravelmente suas propriedades. O efeito físico é associado à presença de partículas muito finas das adições, preenchendo os poros do concreto (efeito fíler) e o efeito químico é associado às reações pozolânicas ou cimentícias. Esses efeitos resultam na redução do tamanho dos poros do concreto e no adensamento dos grãos. Dentre as propriedades que são favoravelmente afetadas estão o comportamento reológico da mistura do concreto fresco, a resistência mecânica e durabilidade do concreto endurecido (resistência a ataques químicos e fissuras térmicas). Em geral, devido ao melhor empacotamento das partículas e menor demanda de água, o concreto fresco contendo adições minerais apresenta redução da tendência de segregação e exsudação, resultando em melhor coesão, trabalhabilidade, bombeamento e acabamento.

Mehta e Monteiro (2008) observam que adições pozolânicas, como a cinza volante, reagem com o hidróxido de cálcio para formar um produto de reação que é semelhante ao CSH em composição e propriedades. A reação pozolânica é acompanhada também por uma redução no volume total e tamanho dos poros capilares, um efeito que é igualmente importante para o aumento da resistência. Além da redução de custo e um produto final mais homogêneo, outro benefício da substituição do cimento por adições pozolânicas é a diminuição do calor de hidratação. Devido ao alto consumo de cimento, costuma-se observar fissurações térmicas em elementos estruturais de grande porte. Assim, em certos casos, a redução das fissurações térmicas é, por si só, justificativa suficiente para a substituição parcial do cimento por uma pozolana.

Patil e Kumbhar (2012, tradução nossa) observam ainda que as preocupações ambientais em termos de danos causados pela extração da matéria-prima e de emis-

sões de dióxido de carbono durante a fabricação do cimento podem ter alavancado a utilização de materiais suplementares em substituição ao mesmo.

Hoje, as adições minerais normalmente utilizadas provém de resíduos industriais que seriam, usualmente, descartados em grandes quantidades em lugares inadequados, gerando o risco de contaminação do solo e fontes de água. A utilização de minerais na produção de concreto, substituindo de forma parcial o cimento, além de diminuir os danos ambientais causados pelos resíduos de outras indústrias, também reduz o volume de exploração de matérias-primas necessárias na indústria da construção civil, preservando assim recursos naturais limitados. A incorporação de adições minerais na produção de cimentos pode reduzir ainda o consumo energético. O uso de escórias e pozolanas, por exemplo, pode diminuir o uso de energia em até 80%, uma vez que permite a produção de cimentos sem a calcinação da matéria prima (NOLLI, 2015).

A Tabela 4 apresenta os principais aditivos minerais utilizados na produção de CAD, bem como suas características:

Tabela 4 – Aditivos minerais e suas características

Aditivo Mineral	Classificação	Características das Partículas
Escória granular de alto forno	Cimentício e pozolânico	Partículas granulares e de textura aspera, geralmente menores que 45 μm .
Cinza Volante	Cimentício e pozolânico	A parte pulverulenta consiste de partículas menores que 45 μm . De 10 a 15% das partículas são maiores que 45 μm e apresentam-se como esferas sólidas e regulares.
Sílica Ativa	Pozolana altamente ativa	Pó fino que consiste em esferas sólidas com diâmetro médio de 0,1 μm .
Cinza de Casca de Arroz	Pozolana altamente ativa	As partículas são menores que 45 μm e possuem estrutura celular e porosa.

Fonte: Patel; Shah (2013).

2.3.3.4.2 Aditivos Químicos

Os principais aditivos químicos utilizados na produção de CAD são os superplastificantes, que aumentam a resistência do concreto através da redução da quantidade de água de amassamento necessária sem diminuição da trabalhabilidade, além de promover uma melhor dispersão das partículas de cimento, permitindo que a hidratação ocorra de forma mais eficiente (DARGE, 2014, tradução nossa).

Tutikian, Isaia e Helene (2011, p. 1292) elencam as características essenciais dos aditivos químicos:

[...] As características relevantes para os aditivos são a compatibilidade com o cimento, o tempo de ação e grau de elevação de trabalhabilidade no concreto para os materiais utilizados.

[...] Aspecto de grande importância é a compatibilidade química entre a composição do cimento utilizado no CAD e a do aditivo superplastificante, pois para cada tipo deste último existe um ponto de saturação para um dado cimento. O ensaio mais utilizado para essa finalidade é a determinação do tempo de fluxo da pasta de cimento que passa no cone de Marsh. O ponto de saturação é aquele em que, nas condições experimentais utilizadas, não há incremento e diminuição do tempo de fluxo da pasta pelo cone de Marsh. O ensaio é geralmente realizado após 5 e 60 min da mistura dos materiais, para levar em conta a ação do aditivo em obra real, considerando-se o tempo de descarga do caminhão betoneira e a respectiva perda de trabalhabilidade com o decorrer do tempo.

De acordo com Nolli (2015), os superplastificantes podem também ser chamados de redutores de água de alta eficiência, uma vez que diminuem o consumo da mesma na mistura em até 40%, enquanto os aditivos plastificantes reduzem apenas 5%. Além disso, quando a quantidade inicial de água da mistura é mantida constante, possibilitam um aumento de fluidez significativo. Os aditivos plastificantes e superplastificantes são utilizados com as seguintes finalidades:

- Reduzir consumo de água (para uma mesma consistência) – aumentando a durabilidade e resistência mecânica do concreto;
- Aumentar a fluidez do concreto sem alterar o consumo de água;
- Reduzir a quantidade de cimento do concreto;
- Reduzir a retração, fluência e tensões térmicas.

No Brasil, os aditivos químicos são normalizados pela NBR 11.768 (ABNT, 2011) e classificados da seguinte forma:

- Aditivo redutor de água/plastificante (PR, PA, PN);

- Aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I N);
- Aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II (SP-II R, SP-II A, SP-II N);
- Aditivo incorporador de ar (IA);
- Aditivo acelerador de pega (AP);
- Aditivo acelerador de resistência (AR);
- Aditivo retardador de pega (RP).

Nesta classificação, R significa aditivo retardador, A refere-se aditivo acelerador e N a aditivo de pega normal.

A Tabela 5 apresenta as características dos principais aditivos químicos utilizados na produção de concreto.

Tabela 5 – Aditivos químicos e suas características

Aditivo Químico	Função
Superplastificante	Reduzir a necessidade água de 15 a 20% sem afetar a trabalhabilidade, resultando em um concreto denso e de alta resistência.
Acelerador	Reduzir o tempo de pega do concreto, possibilitando, por exemplo, que a desforma ocorra mais rapidamente.
Retardador	Aumentar o tempo de pega através da diminuição da velocidade da reação de hidratação do cimento.
Incorporador de Ar	Incorporar minúsculas bolhas de ar esféricas, uniformemente distribuídas entre os partículas de agregados e aglomerantes, aumentando a trabalhabilidade e permitindo a redução da água de amassamento.

Fonte: Patel; Shah (2013).

2.3.4 Dosagem e Mistura

A dosagem pode ser definida como o processo de escolha de ingredientes adequados para o concreto e determinação de suas relativas quantidade com objetivo de produzir, da maneira mais econômica possível, concreto com certas propriedades mínimas, como resistência, durabilidade e consistência requerida (ZHANG et al., 2015, tradução nossa).

Segundo Kumbhar e Murnal (2014, tradução nossa), para concretos de resistência normal, a dosagem é baseada principalmente na lei da relação água/cimento, proposta por Abrams em 1918. Entretanto, para concretos de alto desempenho existem outros fatores a serem considerados, conseqüentemente, a escolha e proporção de materiais utilizados se torna mais complexa. Dessa forma, as maneiras de dosagem tradicionalmente utilizadas em concretos convencionais não podem ser diretamente usadas para CAD, especialmente devido ao uso de adições minerais. As principais razões da diferença entre a dosagem de concretos convencionais e de alto desempenho são:

- A relação água/cimento é muito baixa;
- CAD geralmente contém aditivos minerais que substituem parte do cimento e mudam drasticamente suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no endurecido;
- O abatimento ou a compactação podem ser alterados através de aditivos superplastificantes sem a necessidade de se modificar o consumo de água.

Os autores indicam ainda que o traço de um concreto de alto desempenho não deve ser baseado apenas em tabelas ou gráficos, mas sim desenvolvido para a aplicação específica a que se destina, levando-se em conta os materiais disponíveis.

As exigências de alta resistência e pequena dimensão do agregado significam que o teor de materiais cimentícios no concreto de alto desempenho é alto, comumente acima dos 400 kg/m³. Teores de materiais cimentícios de 600 kg/m³ ou até mais altos não são desejáveis por causa do alto custo, da retração térmica e da retração por secagem. Ainda, maiores quantidades de cimento no concreto levam a um patamar de resistência, dificilmente havendo algum ganho de resistência acima de certo consumo de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Tabela 6 apresenta o traço de concretos de alto desempenho propostos por Chowdhury (2014).

Tabela 6 – Traços propostos por Chowdhury

Materiais utilizados	Unidades	40 MPa (/m³)	80 MPa (/m³)	100 MPa (/m³)
Cimento	kg	451	683	513
Sílica ativa	kg	-	-	43
Agregado graúdo (10 mm)	kg	895	861,8	1080
Agregado fino (areia)	kg	794	650.2	685
Água	kg	230	200	130
Superplastificante	L	-	-	9,88
Peso total	kg	2370	2395	2451
Fator a/c	-	0,51	0,29	0,25

Fonte: Chowdhury (2014).

2.3.5 Fases do Concreto de Alto Desempenho e sua Microestrutura

De forma acadêmica, costuma-se separar o concreto em três fases: a pasta de cimento hidratada, a zona de transição e os agregados. Na realidade, a mistura é um todo e tais fases interagem entre si (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Já Büyükköztürk e Lau (2007, tradução nossa) enunciam que a microestrutura do concreto pode ser entendida também em três partes e as nomeiam de pasta de cimento hidratada, estrutura de poros e zona de transição interfacial. A pasta de cimento hidratada é o produto da hidratação do cimento quando este reage com água. A estrutura de poros refere-se aos poros capilares, aos poros de gel, os vazios e suas conexões no interior do concreto endurecido. Já a zona de transição interfacial caracteriza-se como a região situada na interface entre pasta e agregados ou partículas de aditivos.

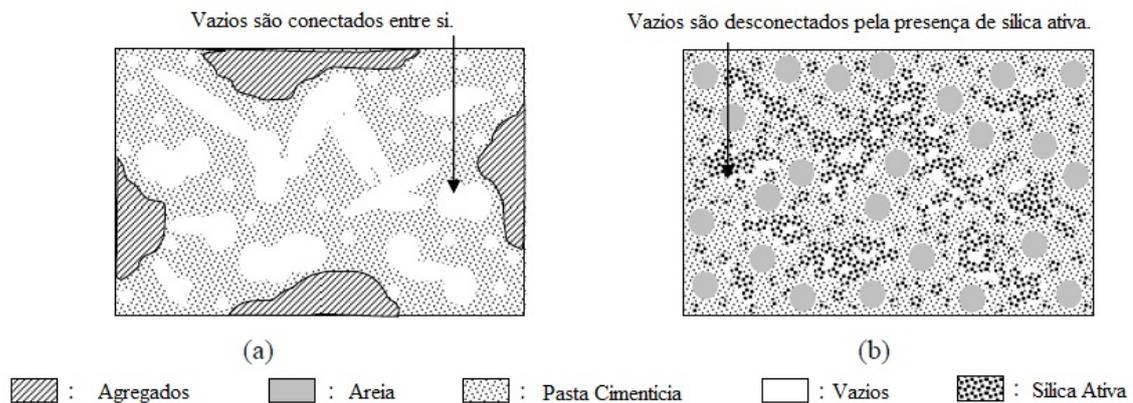
Tutikian, Isaia e Helene (2011) destacam que o princípio básico para obtenção de concretos de alto desempenho está na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação da estrutura de poros. Tal objetivo é alcançado através da diminuição da relação água/aglomerante; da otimização da granulometria dos agregados a fim de se obter maior compacidade e pelo reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre partículas, que pode ser obtido pelo uso de aditivos minerais que causam o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado.

[...] As consequências diretas dessas ações se traduzem pela obtenção de microestrutura com poros de menor tamanho (refinamento das dimensões), diminuição da interconexão entre os poros (bloqueio dos

canais), maior oposição à passagem de fluidos e, por fim, maior fixação de agentes dissolvidos pelo aumento das forças de superfície. O resultado final dessas ações simultâneas se traduz em aumento da compactidade, da resistência mecânica, da durabilidade e, portanto, do desempenho. (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011, p. 1287).

A Figura 2 mostra a diferença entre a estrutura de poros de um concreto normal (a) e de um concreto de alto desempenho (b).

Figura 2 – Estrutura porosa em concretos



Fonte: Büyüköztürk; Lau (2007).

Mehta e Monteiro (2008) elencam que, devido a sua zona de transição mais porosa, concretos normais muitas vezes apresentam fissuras, que impedem a transferência eficiente de carga entre o agregado graúdo e a argamassa. Devido a materiais e dosagens utilizados para concretos de alto desempenho, sua microestrutura é relativamente livre de tais inomogeneidades. Com agregados resistentes e zona de transição também resistente devido ao refinamento de poros e grãos, a microestrutura de concretos de alto desempenho permite uma transferência de carga eficiente entre a argamassa e o agregado graúdo. Assim, o alto módulo de elasticidade e outras propriedades mecânicas do material são diretamente atribuíveis à sua microestrutura.

2.3.5.1 Fase da Pasta de Cimento Hidratada

De acordo com Büyüköztürk e Lau (2007, tradução nossa), a pasta de cimento hidratada é composta de um gel cimentício de CSH, que é o produto principal da hidratação do cimento com a água. Em concretos normais, a pasta de cimento é dominada pela forma amorfa de CSH, que é intrinsecamente porosa. Como já citado anteriormente, a porosidade do concreto é composta por poros de gel, porosidade capilar e vazios. Para concretos com resistências menores que 50 MPa, o aumento na resistência se dá apenas diminuindo-se a porosidade capilar. Entretanto, para produzir-

se concretos com resistências superiores a 50 MPa, a porosidade de gel também deve ser reduzida, de modo que haja uma diminuição no volume total de poros.

Assim, para reduzir-se a porosidade da pasta e aumentar sua resistência, deve-se diminuir a água e o ar aprisionados na mistura. A resistência da pasta depende ainda da quantidade de compostos hidratados no tempo, que é função de sua idade e da temperatura ambiente (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Tutikian, Isaia e Helene (2011) ressaltam também que as características da pasta cimentícia dependem das adições minerais, que melhoram as propriedades reológicas da mesma, diminuem a exsudação e proporcionam o refinamento dos vazios. Esses efeitos provocam o aumento da compactidade e da resistência mecânica em intensidade equivalente à de redução da relação a/c ou aumento do consumo de cimento.

Ainda que a porosidade tenha um papel fundamental na resistência à compressão do concreto, ela também tem um impacto significativo na permeabilidade. A alta permeabilidade implica, geralmente, em baixa durabilidade, uma vez que a parte interior do concreto está mais sujeita a ataques químicos do ambiente (Büyükköztürk; Lau, 2007, tradução nossa).

2.3.5.2 Fase da Zona de Transição

No concreto, a região de pasta cimentícia adjacente à superfície dos agregados é chamada de zona de transição e caracteriza-se por ser ainda mais porosa que a matriz da pasta. Esse elevado número de vazios está sujeito à acumulação de água, o que leva a um aumento local da relação água/cimento. Dessa forma, em concretos normais, a zona de transição é a parte mais fraca da mistura e nela ocorre a ruptura das ligações entre pasta e agregado quando o concreto é submetido a carregamentos externos (Büyükköztürk; Lau, 2007, tradução nossa).

Tutikian, Isaia e Helene (2011) ressaltam ainda que a zona de transição apresenta microfissuras, limita a resistência mecânica e aumenta a deformabilidade do CAD. Os autores indicam que os fatores que mais influem na formação da zona de transição são:

- Relação a/c ou água/agregado (a/ag) porque quanto maior mais água disponível para exsudar e formar o efeito parede;
- Dimensão máxima característica do agregado, pois estabelece a espessura da zona de transição, uma vez que quanto menor o tamanho do grão, maior área deverá ser molhada e, para a mesma quantidade de água, menor será a sua espessura;

- A natureza mineralógica do agregado ou ainda a sua deformabilidade, pois agregados mais resistentes apresentam curvas tensão-deformação com menor resíduo de deformação plástica.

Büyüköztürk e Lau (2007, tradução nossa) indicam que para tornar a zona de transição mais resistente é necessária a diminuição da relação água/cimento e a melhora do empacotamento das partículas dessa região. Tais objetivos podem ser alcançados através do uso de aditivos superplastificantes e adições minerais, respectivamente.

2.3.5.3 Fase dos Agregados

Ao se aumentar a resistência da pasta cimentícia e da zona de transição, os agregados tornam-se o elo fraco da mistura do concreto. Nada pode ser feito para aumentar a resistência natural dos agregados, então para a produção de CAD é de fundamental importância selecionarem-se as rochas mais resistentes e sãs, conhecendo-se sua petrografia e superfície de fratura. Agregados com melhores propriedades mecânicas interferem não apenas na resistência à compressão, mas também na resistência à abrasão, ao impacto, no módulo de elasticidade e nas deformações instantâneas e de longa duração (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.3.6 Principais Características de Concretos de Alto Desempenho

O CAD deve ter uma melhor performance quando comparado a concretos convencionais. Büyüköztürk e Lau (2007, tradução nossa) indicam que resistência, ductilidade e durabilidade são os principais atributos relacionados a um concreto de alto desempenho, uma vez que essas são as características mais importantes que um material de construção deve possuir.

Laskar (2011, tradução nossa) ressalta que ainda que concretos de alto desempenho requeiram uma pasta cimentícia densa e sem vazios, a trabalhabilidade da mistura não pode ser prejudicada, de forma que ela possa ser facilmente vibrada e fluida o suficiente para ser lançada em peças com alta taxa de armaduras. O autor elenca como características principais de um CAD a alta resistência, a alta durabilidade e alta trabalhabilidade, indicando um *slump* mínimo de 100 mm. Já os conceitos de durabilidade e alta resistência estão intimamente ligados à baixa porosidade.

2.3.6.1 Resistência

Na prática, concretos com menos de 50 MPa de resistência à compressão são considerados concretos de resistência normal, enquanto que aqueles com resistência maior que 50 MPa são considerados de alta resistência. Em geral, o uso de adições químicas e minerais melhoram não apenas a resistência, mas também a ductilidade e a

durabilidade e por isso concretos de alta resistência também podem ser considerados de alto desempenho (RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016, tradução nossa).

A Tabela 7 identifica as características de diferentes tipos de concreto de alta resistência com composições variadas:

Tabela 7 – Características de concretos de alta resistência

	Normal	Resistência Alta	Resistência Muito Alta
Resistência à Compressão (MPa)	<50	50 a 100	100-150
Fator a/c	>0,45	0,45 a 0,30	0,30 a 0,25
Aditivos Químicos	Não requer	Aditivo redutor de água ou superplastificante	Superplastificante
Aditivos Minerais	Não requer	Cinza volante	Sílica ativa
Permeabilidade (m/s)	$>10^{-12}$	10^{-13}	<10

Fonte: Büyükoztürk; Lau (2007).

Um estudo realizado por Singla (2012, tradução nossa) demonstrou que traços de concreto em que 15% da massa de cimento é substituída por 10% de cinzas volantes e 5% de sílica ativa possuem a melhor performance em termos de resistência. Nos traços analisados pela autora, visando-se uma resistência à compressão de 80 MPa aos 28 dias, tal combinação já apresentava resistência de 85 MPa nesse período, enquanto outras amostras com diferentes aditivos apresentavam, em média, 80 MPa. O ganho de resistência ao longo de sua idade, porém, foi ainda maior: após um ano, enquanto outros traços tinham resistências em torno de 84 MPa, o mesmo já possuía 90 MPa de resistência à compressão.

2.3.6.2 Ductilidade

Geralmente concretos de alto desempenho são mais frágeis que concretos normais, principalmente quando alta resistência à compressão é o foco principal da performance. Sabe-se que a ductilidade pode ser melhorada através da aplicação de uma pressão confinante durante a produção do CAD ou através da introdução de fibras no traço da mistura. Tais concretos são conhecidos como concretos reforçados com fibras (CRF) (RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016, tradução nossa).

2.3.6.3 Durabilidade

Tratando-se de concreto, a permeabilidade é o fator chave na durabilidade. A permeabilidade do concreto depende daquela de cada material que o constitui, bem como de seu arranjo geométrico. A permeabilidade da pasta de cimento está essencialmente relacionada com a estrutura dos poros, que inclui porosidade, tamanho dos poros e sua conectividade, e é uma função da proporção de água/cimento e do grau de hidratação. Já os agregados têm uma permeabilidade muito mais baixa do que a pasta. Para se obter um concreto durável, três critérios devem ser considerados durante o desenvolvimento do seu traço: resistência à compressão, permeabilidade e resistência à fissuração. O critério de resistência à compressão deve garantir que o concreto possa resistir às tensões de projeto de maneira adequada. O critério de permeabilidade exige que o material tenha um índice de penetração de fluidos baixo, de modo a minimizar a vulnerabilidade à água e ataques químicos de íons durante a vida útil de projeto. Já o critério de resistência à fissuração deve garantir que o concreto tenha uma capacidade mínima de resistir a fissuras causadas por condições ambientais, como dilatação e expansão térmicas, por exemplo (RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016, tradução nossa).

Já Büyükköztürk e Lau (2007, tradução nossa) elencam que ainda que a diminuição da relação a/c e o uso de aditivos minerais, como sílica ativa, diminuam drasticamente a permeabilidade do concreto, existe a possibilidade do CAD não ser tão durável devido ao aparecimento de trincas por retração, por exemplo. Assim, além de um bom traço e um bom processo de mistura, boas práticas construtivas devem ser adotadas para a produção de um concreto durável.

2.3.7 Outras Propriedades

2.3.7.1 Consistência

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), usando-se uma alta dosagem de superplastificante, é possível obter concretos com *slump* da ordem de 200 a 500 mm com um teor muito baixo de água e um alto consumo de cimento e adições minerais. A presença de grandes quantidades de agregado miúdo ajuda a reduzir a tendência à exsudação e à segregação nessas dosagens de alta fluidez. A construção *in loco* de elementos estruturais densamente armados e de alta resistência seria difícil sem a existência de concretos com alta trabalhabilidade.

2.3.7.2 Retração Autógena

A deformação medida na pasta de cimento em um sistema fechado é chamada de retração autógena, que pode ser definida como a redução macroscópica do volume de materiais cimentícios quando o cimento hidrata após a pega inicial. A retração

autógena não inclui alteração de volume devido à perda ou ao ingresso de substâncias, variação de temperatura e aplicação de uma resistência externa e restrição. Essa retração se desenvolve internamente no volume total do concreto e, às vezes, é denominada retração de auto dessecação. Há uma certa retração autógena em todos os tipos de concreto, no entanto, é muito alta para se ignorar no caso do concreto de alta resistência que tipicamente possui um consumo alto de cimento e baixa relação água/cimento. A magnitude dessa retração aumenta ainda mais se sílica ativa for adicionada à mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3.7.3 Retração Térmica

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p. 483):

Além da retração autógena, membros estruturais de grande porte feitos de concreto de alta resistência geralmente são vulneráveis a fissuras nas primeiras idades resultantes da retração térmica, que pode ser muito alta quando o concreto fresco lançado é exposto a um ambiente com temperatura baixa poucos dias após a moldagem. Devido ao alto consumo de cimento, o aumento da temperatura é considerável no caso de misturas de concretos de alta resistência.

Ainda segundo os autores, experiências relatam um aumento de 50 a 58° C em pares térmicos instalados no centro de corpos de prova cúbicos de 1220 mm dentro de um período de 30 a 50 horas após a moldagem.

2.4 O SOFTWARE SCIA ENGINEER

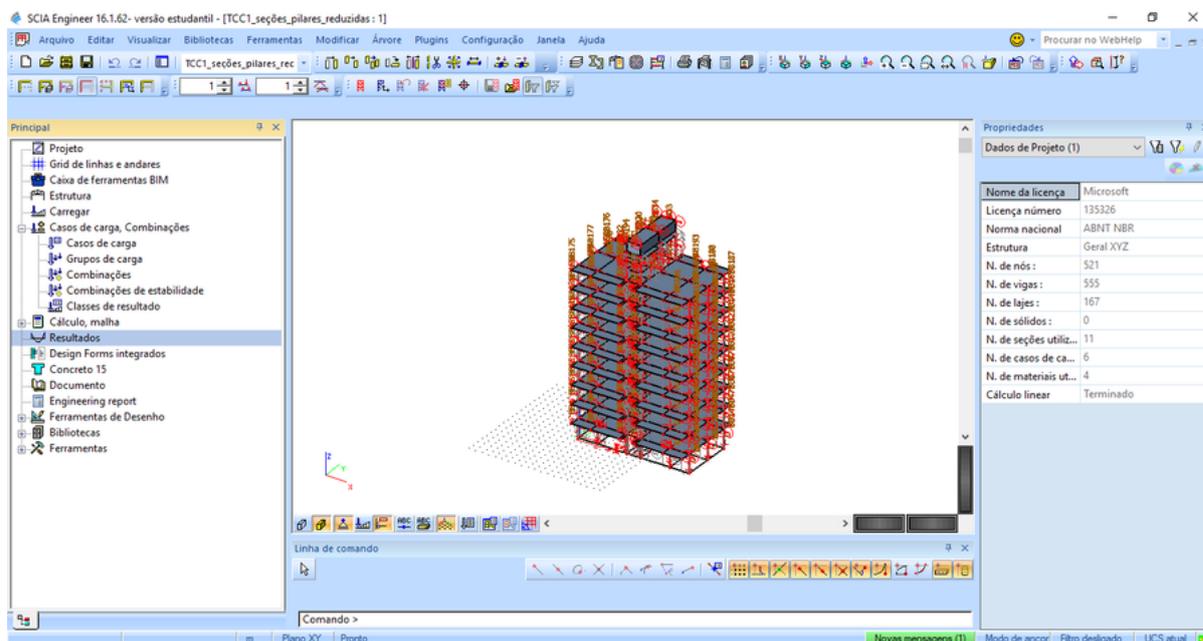
O Scia Engineer é um *software* desenvolvido pela Nemetschek Scia, braço belga do grupo alemão Nemetschek. É um sistema *Building Information Modeling* (BIM) que auxilia o engenheiro a analisar, calcular e dimensionar estruturas conforme especificações de normas, baseando-se no método dos elementos finitos (PINHO, 2013).

De acordo com Pinho (2013) o sistema não trabalha diretamente com elementos finitos, mas explora os elementos estruturais para gerar automaticamente a malha dos elementos finitos. Pode ser utilizado para o cálculo de elementos finitos 1D, como as vigas e pilares, e 2D, como muros e lajes, inclusive curvas.

A grande justificativa de estudar o Scia Engineer é porque ele se tornou o primeiro programa de cálculo estrutural que utiliza o BIM a se adaptar às normas brasileiras e receber tradução em português. Além disso, a desenvolvedora do programa disponibiliza uma licença gratuita para professores e estudantes matriculados em uma instituição de ensino superior precisando de uma ferramenta dedicada ao projeto e análise de estruturas ao longo de seu período de estudos (PINHO, 2013).

A Figura 3 mostra o ambiente de trabalho do *software*.

Figura 3 – Ambiente de trabalho do Scia Engineer



Fonte: Elaborado pelo autor.

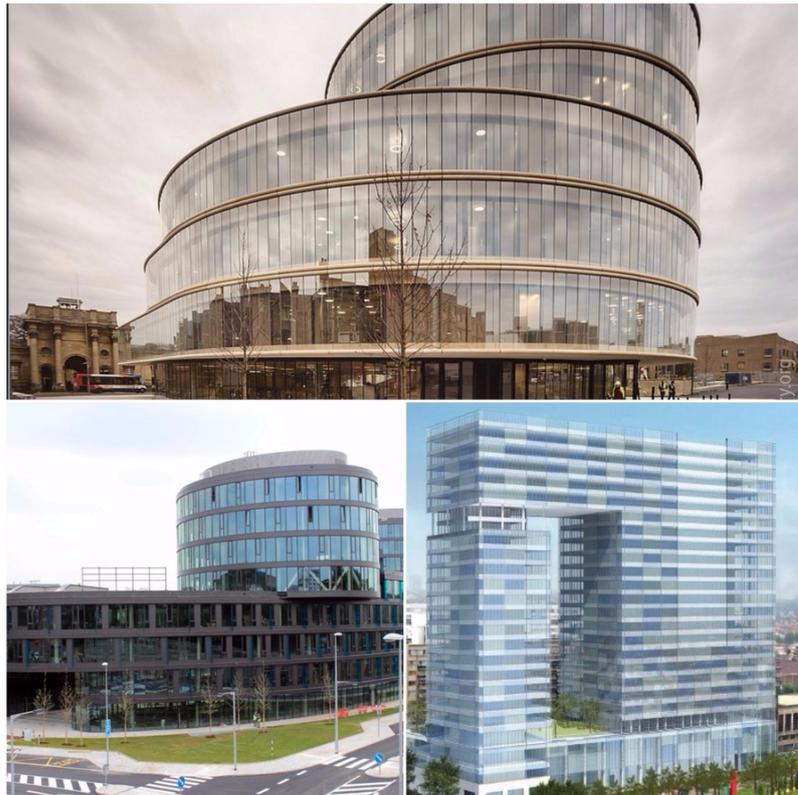
O Scia Engineer é conhecido como um dos grandes *softwares* de cálculo estrutural da atualidade e já possui consolidação em diversos países, com mais de 300.000 usuários no mundo todo. Ainda que seu uso no Brasil seja baixo, já existem estruturas brasileiras que foram calculadas com o *software* e foram destaques no concurso *Internacional Nemetscheck Structural User Contest 2013: Inspirations in Engineering*, como o prédio da Federação Gaúcha de Futebol, em Porto Alegre (PINHO, 2013).

De acordo com o Scia & Allplan User Contest (2015, tradução nossa), o programa também já foi utilizado em outras obras brasileiras, como na ampliação do Aeroporto Internacional do Galeão, no Rio de Janeiro e no Sports Hall, em Brasília, além de ter auxiliado na análise de tensões ocorridas durante processos construtivos, como no içamento de megablocos utilizados na produção de navios de perfuração, na Bahia. Ainda segundo o autor, o Scia Engineer também tem sido usado em projetos inovadores no exterior, seja em edifícios, como no Blavatnik School of Government, em Oxford, na Inglaterra; no Aviatica, em Praga, na República Tcheca e no TRB Brussels Tower, em Bruxelas, na Bélgica; em obras de arte, como a Pedestrian Bridge, em Wenduine, na Bélgica; na reconstrução da ponte OA401, entre Grevenmacher, Luxemburgo e Wellen, na Alemanha e na Verlengde Waalbrug, em Lent, na Holanda e em obras e plantas industriais, como a hidrelétrica Nant de Drance, na Suíça; o centro de distribuição NIKE ELC New DC ‘Wings’, em Ham, na Bélgica e na ampliação do Eurosilo, em Ghent, também na Bélgica.

A Figura 4 mostra o Blavatnik School of Government (topo), o Aviatica (canto

inferior esquerdo) e o TRB Brussels Tower (canto inferior direito).

Figura 4 – Edifícios projetados com auxílio do Scia Engineer



Fonte: Adaptado de Nemetschek Scia (2015).

A Figura 5 ilustra a Pedestrian Bridge (topo), a OA401 Bridge (canto inferior esquerdo) e a Verlengde Waalbrug (canto inferior direito).

Figura 5 – Pontes projetadas com auxílio do Scia Engineer



Fonte: Adaptado de Nemetschek Scia (2015).

Já a Figura 6 mostra o centro de distribuição NIKE ELC New DC ‘Wings’ (topo), o Eurosilo (canto inferior esquerdo) e a barragem da hidrelétrica Nant de Drance (canto inferior direito).

Figura 6 – Obras e plantas industriais projetadas com auxílio do Scia Engineer



Fonte: Adaptado de Nemetschek Scia (2015).

3 METODOLOGIA

3.1 ESTUDO DE CASO

3.1.1 Caracterização das Estruturas

Neste trabalho foram analisadas duas estruturas. A primeira delas, chamada de Estrutura A, possui concreto convencional em todos os seus elementos estruturais, enquanto a segunda, chamada de Estrutura B, possui concreto de alto desempenho nos pilares e convencional nas vigas e lajes. O *layout* estrutural de ambas é baseado no projeto apresentado por Araújo (2009) que, ainda que tenha arquitetura simplória, possui todos os elementos estruturais básicos presentes em edifícios residenciais.

Dessa forma, Araújo (2009, p. 1) descreve sua estrutura:

O edifício analisado é composto por um pavimento térreo mais oito pavimentos tipo. O pavimento térreo possui estacionamento para oito carros, além da entrada para os andares superiores. Em cada pavimento tipo, há dois apartamentos idênticos. No topo do edifício, encontram-se a casa de máquinas e o reservatório superior.

A estrutura é caracterizada por lajes maciças apoiadas em vigas de seção transversal retangular. As vigas transferem as cargas para pilares cujas seções também são retangulares. O contraventamento é feito por pórticos (ARAÚJO, 2009).

Ainda de acordo com Araújo (2009), procurou-se adotar larguras de vigas que permitissem que as mesmas ficassem escondidas dentro das paredes. Dessa forma, definiu-se que vigas embutidas em paredes de 15 cm de espessura possuiriam largura de 12 cm e altura de 40 cm, já que os vãos máximos são de 4 a 5 m e as mesmas fazem parte da subestrutura contraventada, absorvendo apenas parte dos esforços verticais do edifício. Já vigas embutidas em paredes de 25 cm deveriam ter 20 cm de largura e 60 cm de altura, uma vez que essas participam da subestrutura de contraventamento. As vigas de amarração dos pilares, no térreo, possuem altura uniforme de 30 cm e larguras predominantes de 15 e 20 cm. As seções dos pilares foram pré-dimensionadas através de área de influência a partir de estimativas preliminares de carregamento, buscando-se não causar grande interferência no projeto arquitetônico. Dessa forma, adotou-se pilares com seção de 20x50 cm, com exceção daqueles que também sustentam o reservatório superior, para os quais a seção escolhida foi de 20x70cm. Por fim, definiu-se espessura de 10 cm para todas as lajes da edificação.

As pranchas presentes no Apêndice mostram a planta baixa do pavimento tipo e as fôrmas do térreo, do pavimento tipo, da cobertura e piso da casa de máquinas, da mesa de motores do elevador, do teto da casa de máquinas e do reservatório superior.

Para os dois projetos estruturais em estudo neste trabalho, foram mantidas as

dimensões de todas as vigas e lajes conforme indicadas acima, bem como a locação de todos os pilares.

Quanto às dimensões dos pilares é preciso ressaltar: para a Estrutura A mantiveram-se as dimensões propostas por Araújo. Já para a estrutura B, houve redução na seção dos mesmos: os pilares que sustentam o reservatório superior passaram a medir 20x60 cm, enquanto os demais passaram a medir 20x40 cm do térreo ao quarto pavimento e 20x30 cm do quinto ao oitavo.

A Tabela 8 mostra as diferenças entre os pilares das duas estruturas:

Tabela 8 – Diferenças entre os pilares das estruturas A e B

Estrutura	Estrutura A	Estrutura B
Resistência do concreto (MPa)	25	60
Pilares que sustentam o reservatório superior (cm)	20x70	20x60
Demais pilares (cm)	20x50	20x40 (térreo até 4º pavimento) 20x30 (5º até 8º pavimento)

Fonte: elaborado pelo autor.

Resumidamente: tanto a estrutura A quanto B são baseadas no mesmo projeto arquitetônico, proposto por Araújo (2009). Enquanto a Estrutura A configura-se de forma semelhante ao adotado por Araújo (2009) em todos os aspectos, a Estrutura B possui diferenças com relação à original no concreto utilizado em seus pilares, bem como na dimensão dos mesmos.

3.1.2 Considerações de Cálculo

3.1.2.1 Carregamento nas Lajes

Para o cálculo das lajes dos pavimentos tipo foram consideradas ações de peso próprio, revestimento, alvenarias e cargas acidentais. Como todas as lajes são maciças, possuem espessura de 10 cm e considerando o peso específico do concreto igual a 25 kN/m³, seu peso próprio é de 2,5 kN/m². Para o revestimento adotou-se a carga de 0,8 kN/m² em todas as lajes.

Para as lajes L202=L215, L207=L212 e L209, considerou-se ainda o carregamento devido às paredes que nelas se apoiam. Os pesos específicos das alvenarias de tijolos cerâmicos considerados foi de:

- Alvenaria de tijolos cerâmicos furados: 13 kN/m³;

- Alvenaria de tijolos cerâmicos maciços: 18 kN/m³.

A altura das paredes sobre essas lajes é de 270 cm. Como tais lajes seriam armadas em cruz, adotou-se uma carga equivalente uniforme, obtida dividindo-se o peso total da parede pela área da laje. A parede que separa o hall de entrada da escada enclausurada é considerada de tijolos maciços, enquanto as demais são de tijolos furados. Vale ressaltar que as cargas de parede foram calculadas desconsiderando-se as aberturas de portas e janelas.

De acordo com a NBR 6.120 (ABNT, 1980), as cargas acidentais tem os seguintes valores:

- Área de serviço (lajes L208=L213): 2,0 kN/m³;
- Hall (laje L209): 2,5 kN/m³;
- Demais lajes do pavimento tipo: 1,5 kN/m³.

Já os carregamentos considerados na laje de cobertura foram o peso próprio, o revestimento, o peso do telhado e as cargas acidentais. Novamente, para o peso próprio e o revestimento foram considerados 2,5 kN/m² e 0,8 kN/m², respectivamente. O telhado de fibrocimento, incluindo sua estrutura de sustentação, tem carga de 0,5 kN/m². Conforme a NBR 6.120 (ABNT, 1980), a carga acidental na laje sob o telhado é de 0,5 kN/m². Para a laje do piso da casa de máquinas (laje L309), considerou-se uma carga acidental de 2,0 kN/m³.

Por fim, algumas lajes do edifício tem cargas especiais: para a laje L401, sobre a caixa de corrida do elevador, consideram-se o peso próprio de 2,5 kN/m², o revestimento de 0,8 kN/m² e uma carga acidental de 14 kN/m², conforme indicação do fabricante do elevador. Para as lajes L501 e L502 do teto da casa de máquinas, lavam-se em conta o peso próprio de 2,5 kN/m², o revestimento de 0,8 kN/m² e a carga acidental uniformemente distribuída de 0,5 kN/m². Além disso, deve-se prever a colocação de dois ganchos de içamento na laje L501. Cada gancho deve suportar 20 kN, conforme recomendação do fabricante do elevador. Para a laje L101, no fundo do poço do elevador, considerou-se a carga acidental de 27 kN/m².

3.1.2.2 Carregamentos na Escada

No patamar da escada levou-se em conta a ação do peso próprio de 2,5 kN/m², do revestimento de 0,8 kN/m² e a carga acidental de 2,5 kN/m², conforme a NBR 6.120 (ABNT, 1980).

Já no trecho inclinado, além do peso próprio, do revestimento e do carregamento acidental, considerou-se ainda a ação de um parapeito em alvenaria de tijolos cerâmicos furados, com 1,5 m de altura e 15 cm de espessura. Dessa forma, a carga linear do

parapeito é de 1,95 kN/m. Entretanto, a NBR 6.120 (ABNT, 1980) recomenda ainda uma carga acidental vertical de 2,0 kN/m ao longo do parapeito.

3.1.2.3 Carregamentos de Paredes Sobre Vigas

Para as paredes da escada enclausurada, considerou-se o peso específico de 18 kN/m³, corresponde à parede de alvenaria de tijolos cerâmicos maciços. Para as demais paredes, o peso específico considerado foi de 13 kN/m³, equivalente à alvenaria de tijolos cerâmicos furados. O cálculo do carregamento de paredes levou em conta a espessura das mesmas, bem como sua altura equivalente, calculada desconsiderando-se a parte da viga que fica embutida na parede. Além disso, não foram consideradas as aberturas de portas e janelas.

3.1.2.4 Carregamento do Reservatório Superior

Na tampa do reservatório atuam o peso próprio de 2,5 kN/m², o revestimento equivalente a 0,5 kN/m² e uma sobrecarga acidental de 0,5 kN/m². Já no fundo do reservatório, além do peso próprio e do revestimento, existe também a carga hidrostática de 13 kN/m². Deve-se considerar ainda a pressão hidrostática nas paredes, de geometria triangular e com ordenada máxima de 13 kN/m².

3.1.2.5 Carregamento Devido ao Vento

O cálculo dos esforços causados pelo vento baseou-se nas recomendações da NBR 6.123 (ABNT, 1988). A velocidade básica do vento adotada é de 40 m/s e o edifício foi caracterizado como pertencente à categoria IV e classe B. Os coeficientes S_1 e S_3 são considerados iguais a 1,0, enquanto o coeficiente S_2 foi calculado em intervalos de 2,8 m, correspondentes ao pé direito de cada andar.

3.1.3 Preço dos Insumos Considerados para a Produção de Pilares

Os principais materiais de construção utilizados na produção de pilares são o concreto, os aços CA-50 e CA-60 e as chapas de madeira para fôrmas. Para os pilares da Estrutura A considerou-se o uso de concreto com resistência à compressão de 25 MPa, enquanto que aqueles da Estrutura B foram dimensionados com concreto de 60 MPa de resistência à compressão.

Os preços de todos esses insumos foi retirado do Relatório de Insumos e Composições para Santa Catarina de Abril de 2017 (CAIXA, 2017) e estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Preço dos insumos para a produção de pilares

Concreto usinado 25 MPa (inclui bombeamento) - (m ³)	R\$ 286,57
Concreto usinado 60 MPa (inclui bombeamento) - (m ³)	R\$ 545,17
Aço CA-60 - Ø5,0 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 3,82
Aço CA-50 - Ø6,3 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 4,32
Aço CA-50 - Ø8,0 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 4,32
Aço CA-50 - Ø10,0 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 4,13
Aço CA-50 - Ø12,5 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 3,92
Aço CA-50 - Ø16,0 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 3,92
Aço CA-50 - Ø20,0 mm (cortado e dobrado) - (kg)	R\$ 3,92
Chapa de madeira compensada plastificada - 2,20 x 1,80 m - espessura 18 mm - (m ²)	R\$ 23,73

Fonte: Caixa (2017).

3.2 USO DO SCIA ENGINEER

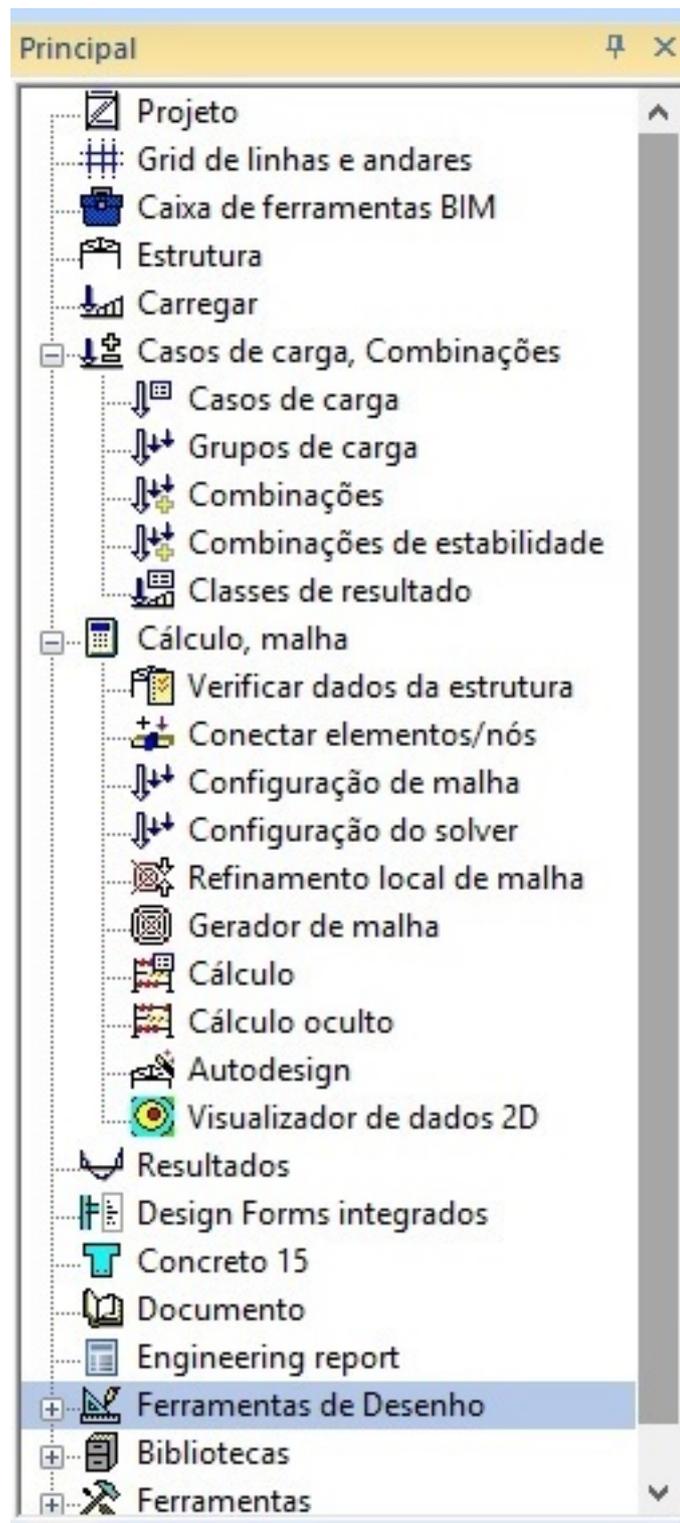
O Scia Engineer é um programa que analisa, dimensiona e verifica estruturas de concreto armado, protendido, aço ou mistas de acordo com normas brasileiras e internacionais. É importante ressaltar que o *software* não faz o detalhamento ou a geração das plantas de fôrmas das estruturas, sendo necessária a utilização de outro programa para tais tarefas. Por se tratar de um sistema BIM, entretanto, a exportação das informações geradas no Scia Engineer é bastante simples.

Por outro lado, o programa apresenta um ambiente de desenho de fácil utilização e totalmente em três dimensões (3D). Dessa forma, outros programas de desenho não são necessários no lançamento da estrutura.

A forma de utilização do Scia Engineer segue a lógica habitual de lançamento e dimensionamento de estruturas: em um primeiro momento define-se os materiais que serão utilizados, lança-se a estrutura e são estabelecidos os carregamento atuantes. Em seguida, são consideradas as combinações de cargas e a estrutura é calculada. Com base nos resultados dos cálculos, os elementos estruturais podem ser dimensionados e verificados de acordo com os critérios desejados.

A Figura 7 ilustra a árvore de comandos principal do Scia Engineer 16.0, versão utilizada neste trabalho.

Figura 7 – Árvore principal de comandos do Scia Engineer

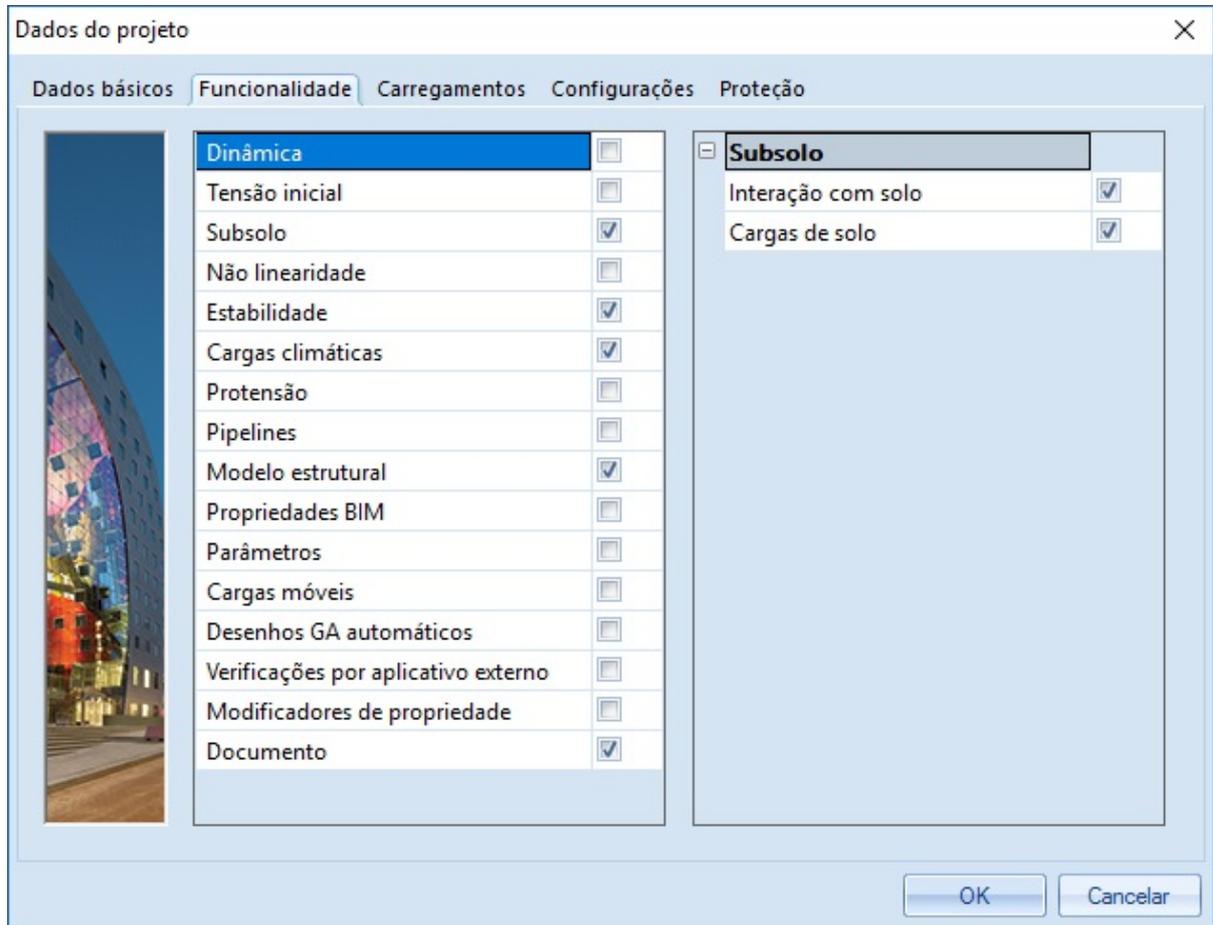


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na guia "Projeto" define-se os materiais utilizados e as funcionalidades que serão utilizadas na análise da estrutura em estudo. Dessa forma, o programa pode ser otimizado, uma vez que fará apenas as considerações estabelecidas pelo usuário.

A Figura 8 mostra a seleção de funcionalidades do Scia Engineer.

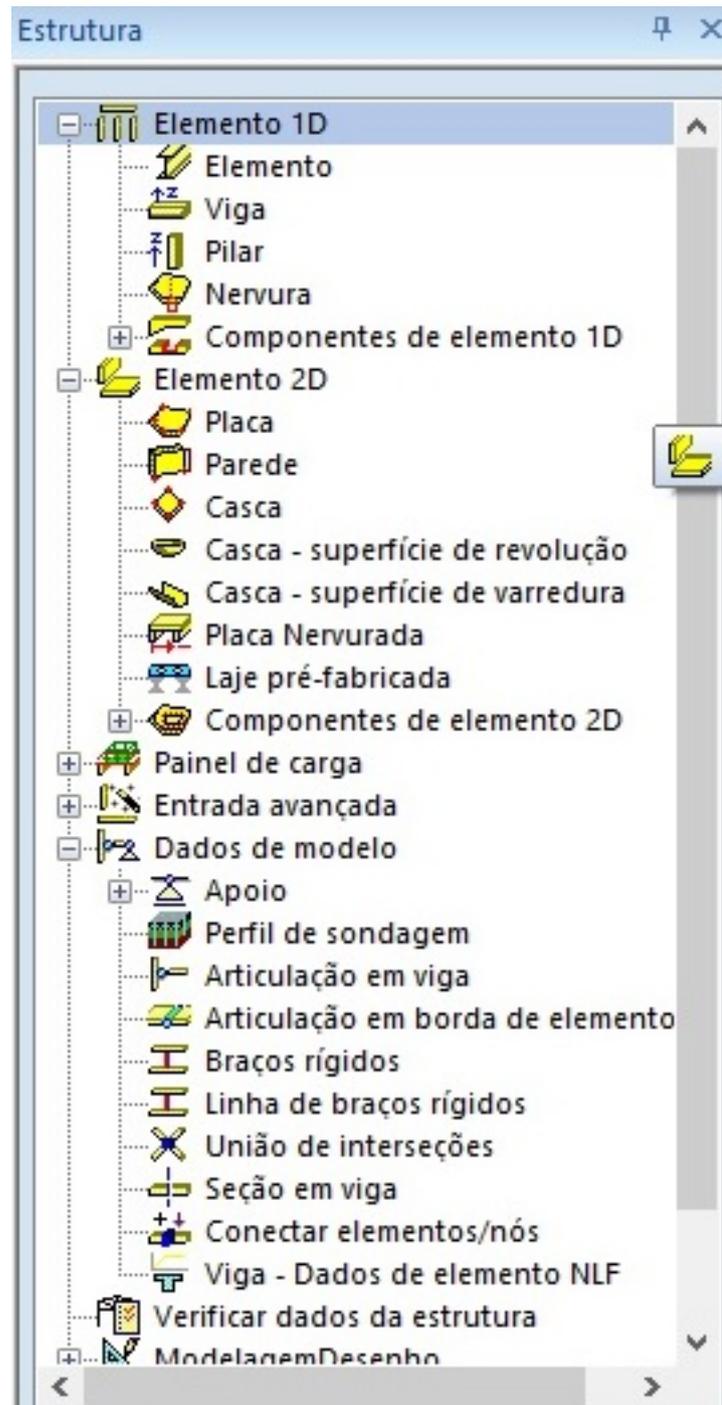
Figura 8 – Seleção de funcionalidades no Scia Engineer



Fonte: Elaborado pelo autor.

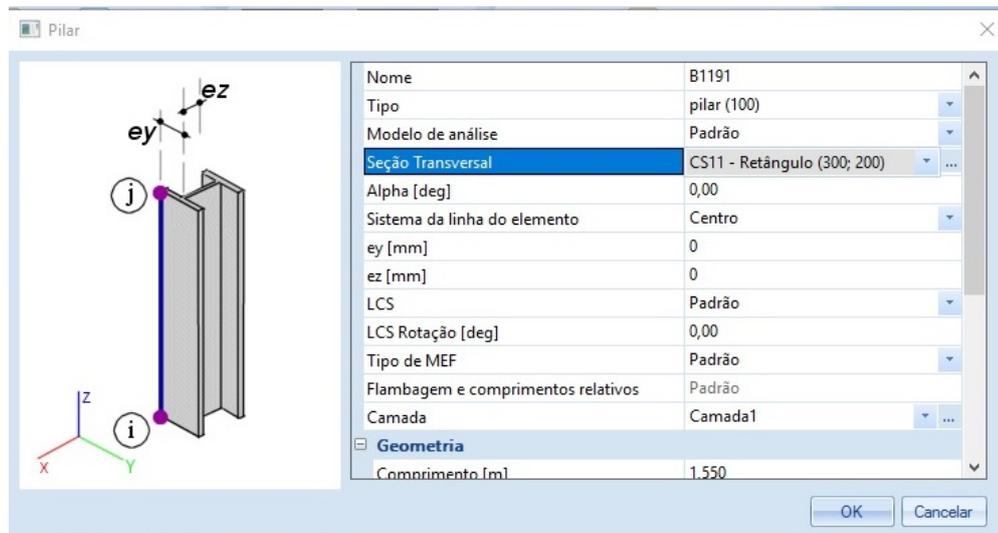
Na guia “Estrutura” encontram-se as ferramentas para o lançamento da estrutura em si. É nela que o usuário seleciona os elementos estruturais que farão parte da estrutura e define seus mais diversos parâmetros. A Figura 9 mostra os diversos elementos que podem ser lançados na guia “Estruturas”. A Figura 10 demonstra as opções de lançamento de um pilar, enquanto a Figura 11 ilustra a definição de uma seção transversal utilizada na Estrutura B.

Figura 9 – Opções de lançamento de elementos estruturais



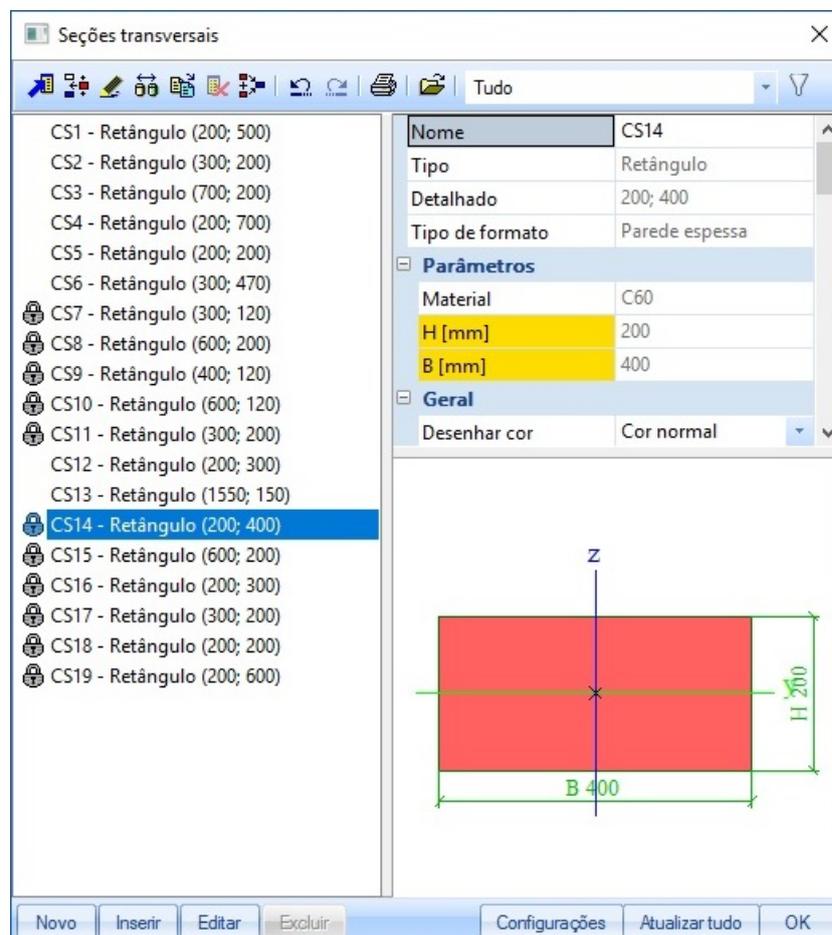
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Opções de lançamento de pilar



Fonte: Elaborado pelo autor.

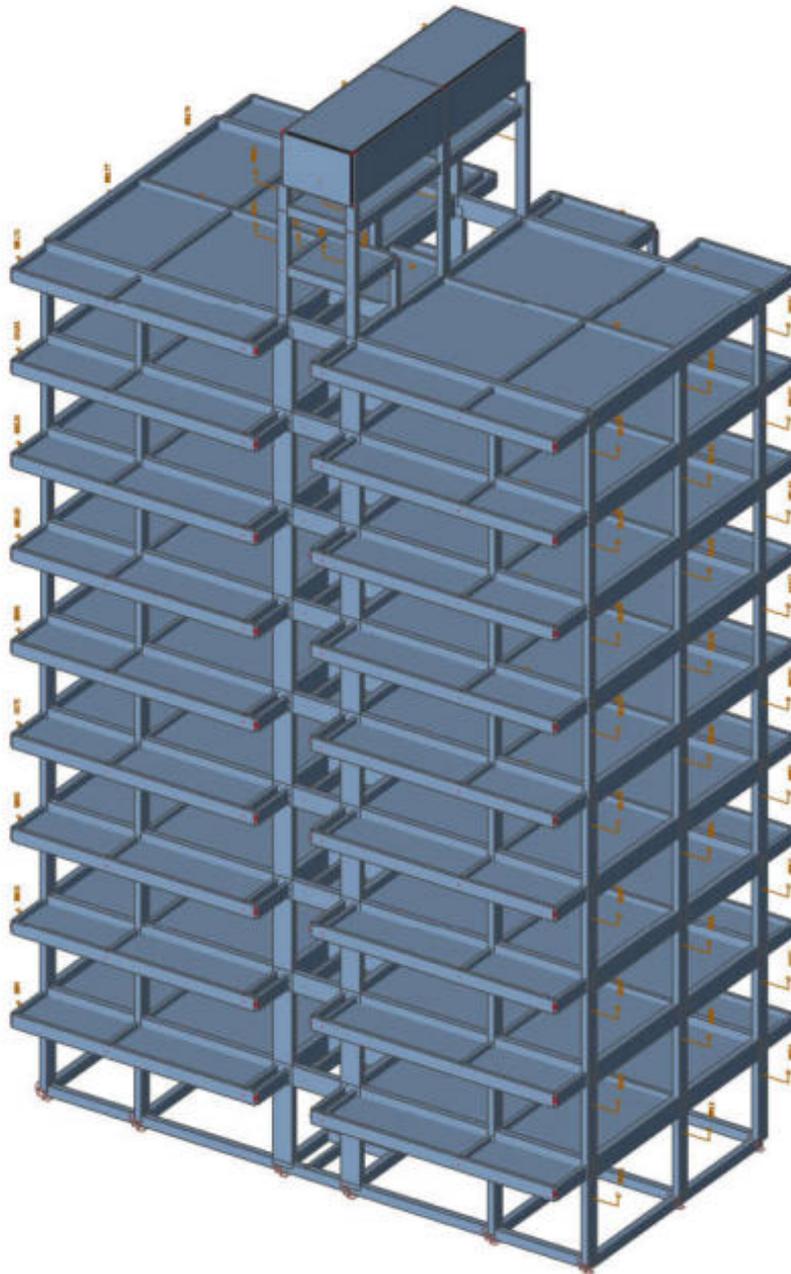
Figura 11 – Definição de seção transversal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 12 mostra o modelo estrutural finalizado da Estrutura B.

Figura 12 – Vista do modelo estrutural da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Scia Engineer permite o lançamento de variados tipos de carga, como pontuais, lineares, e em superfície. Como o programa pode calcular qualquer tipo de estrutura, não apenas de edifícios, é preciso que o usuário calcule as cargas atuantes.

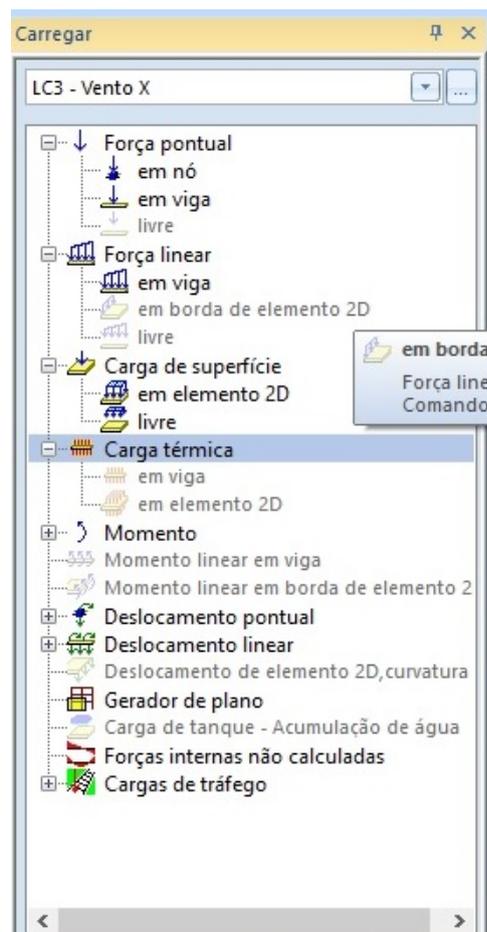
tes previamente. Ou seja, o Scia Engineer não calcula de maneira automática as cargas de paredes, por exemplo, como fazem outros *softwares* do mercado, mais voltados para o cálculo estrutural de edifícios.

É necessário, antes de lançar os carregamentos, criar no Scia Engineer categorias de carga que o próprio programa chama de “casos de carga”, que servem para que o *software* faça as combinações de carregamento automaticamente, de acordo com as normas. Entretanto, também é possível que o usuário defina os coeficientes de ponderação para combinações como desejar.

A possibilidade de seleção e exibição de apenas um elemento ou grupo de elementos desejados facilita o lançamento das cargas. Além disso, o *software* demonstra graficamente os carregamentos atuantes na estrutura.

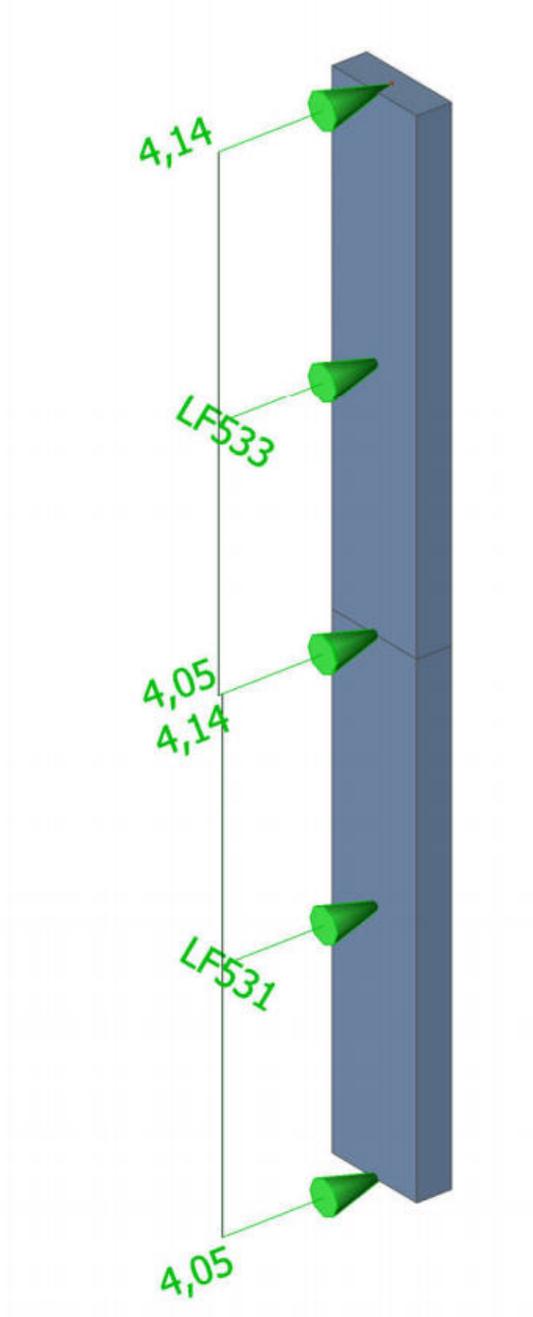
A Figura 13 mostra a guia de comandos “Carregar”, enquanto na Figura 14 pode-se observar alguns carregamentos horizontais atuantes em pilares consecutivos da estrutura B.

Figura 13 – Opções de cargas a serem lançadas no Scia Engineer



Fonte: Elaborado pelo autor.

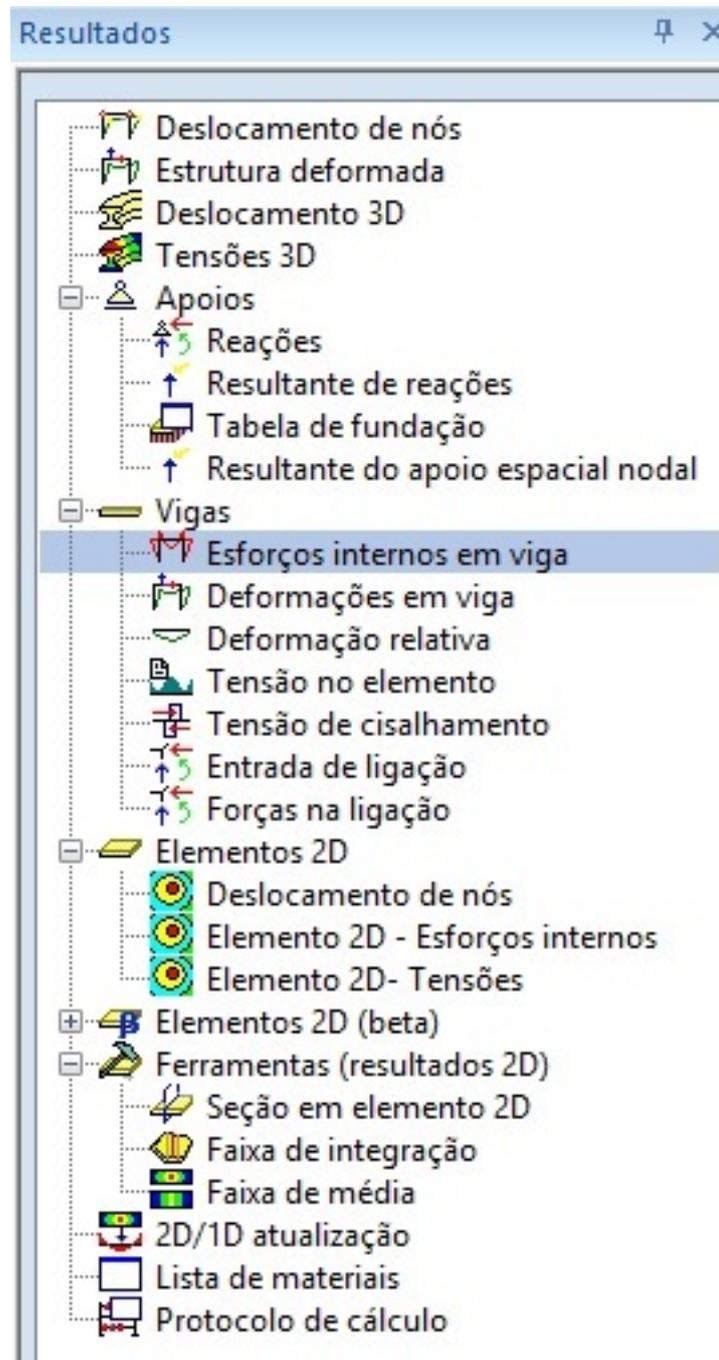
Figura 14 – Visualização de cargas horizontais atuando em pilares



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois que a estrutura é calculada, os resultados ficam disponíveis na árvore de comandos principal. O Scia Engineer demonstra todos os seus resultados no próprio ambiente de desenho. Dessa forma, a visualização é clara e simples, sendo possível rotacionar o modelo 3D ou selecionar um elemento em particular para analisar seus resultados separadamente. O programa fornece diversos dados para análise, como pode ser visto na Figura15.

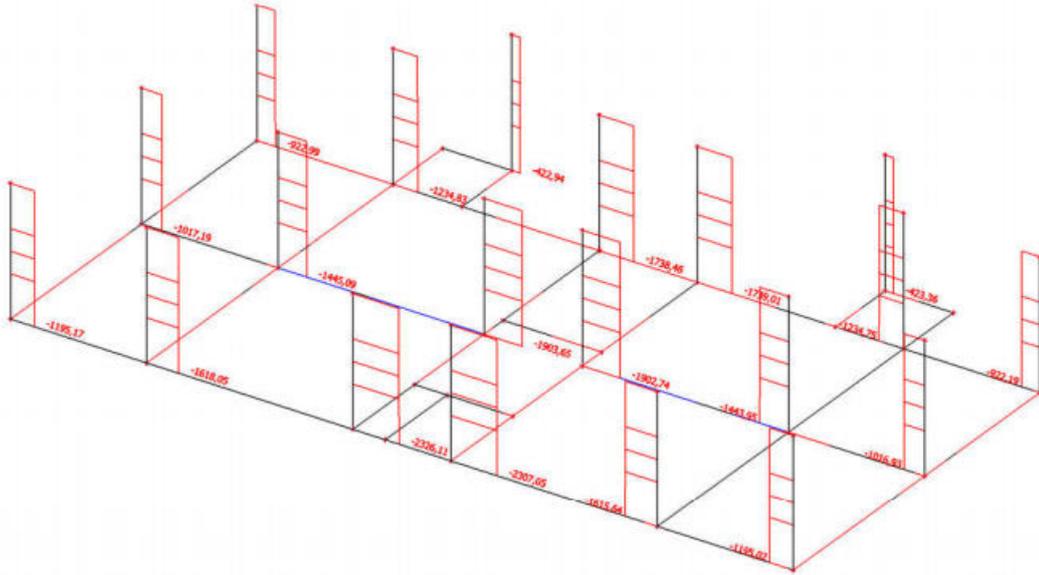
Figura 15 – Árvore de resultados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 16 mostra os esforços de momento considerados para o cálculo de armaduras dos pilares do térreo da Estrutura B.

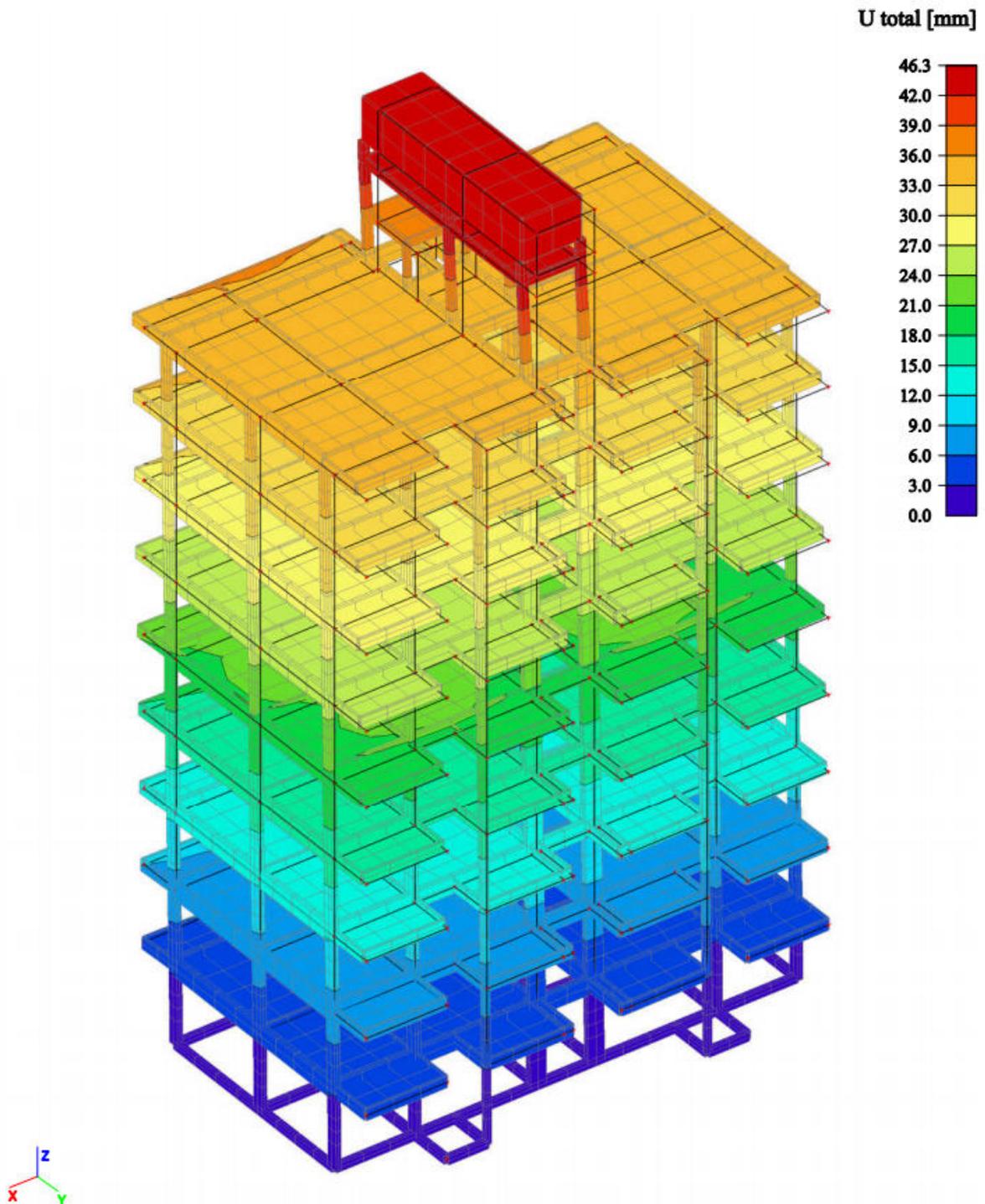
Figura 16 – Momentos dos pilares do térreo da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 mostra o resultado chamado de “Deslocamento 3D” para a Estrutura B.

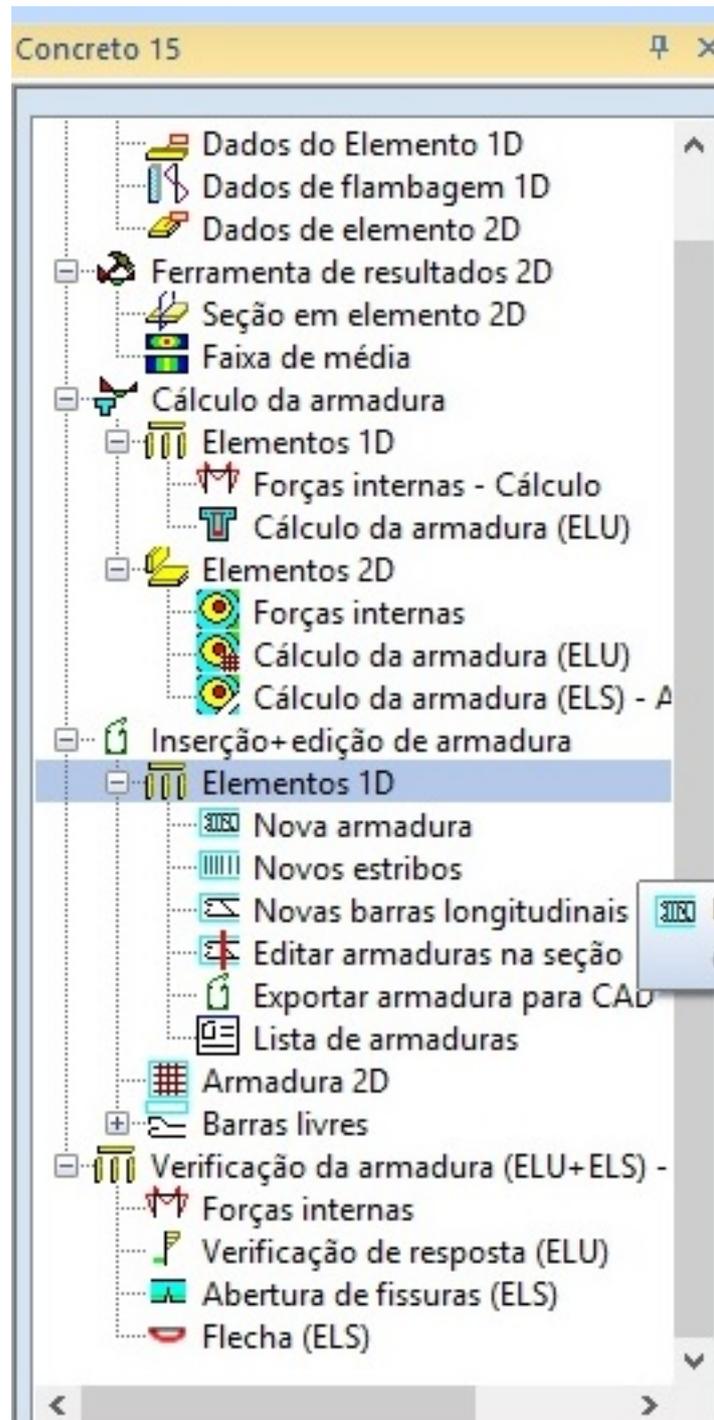
Figura 17 – Deslocamento 3D da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

O dimensionamento das armaduras é feito na guia “Concreto 15”. Nela, é possível visualizar-se a quantidade de aço necessária, fazer a inserção das armaduras nos elementos estruturais e verificá-los para os Estados Limites Último e de Serviço. A Figura 18 demonstra as opções da aba “Concreto 15”.

Figura 18 – Guia “concreto 15”

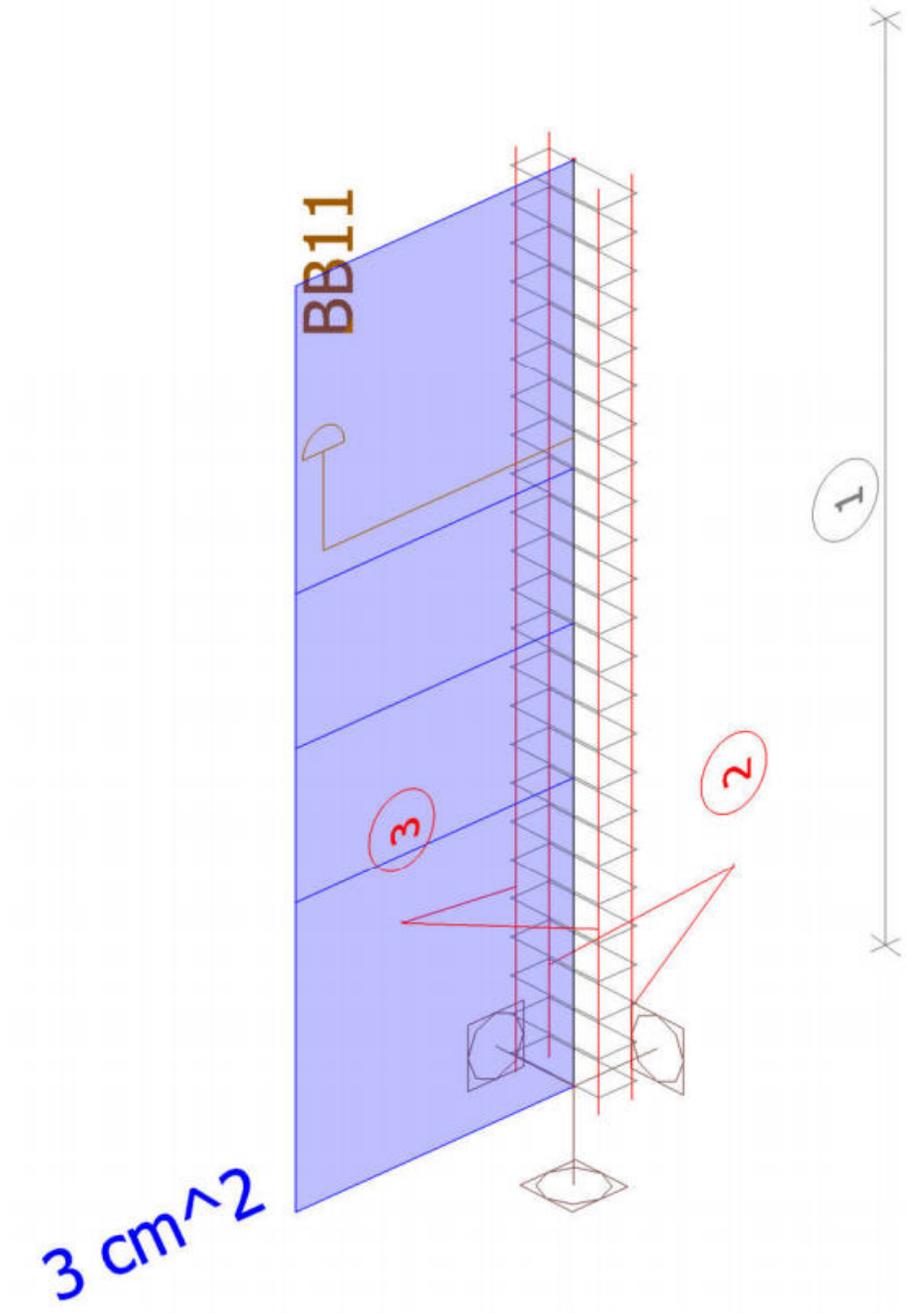


Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante deixar claro que o programa informa a área de aço necessária para o Estado Limite Último, mas cabe ao usuário definir como será a disposição da armadura pela seção transversal, bem como as bitolas utilizadas. O Scia Engineer, entretanto, checa o espaçamento entre as barras longitudinais. A Figura 19 mostra a interface do *software* informando a área de aço necessária para um pilar da Estrutura

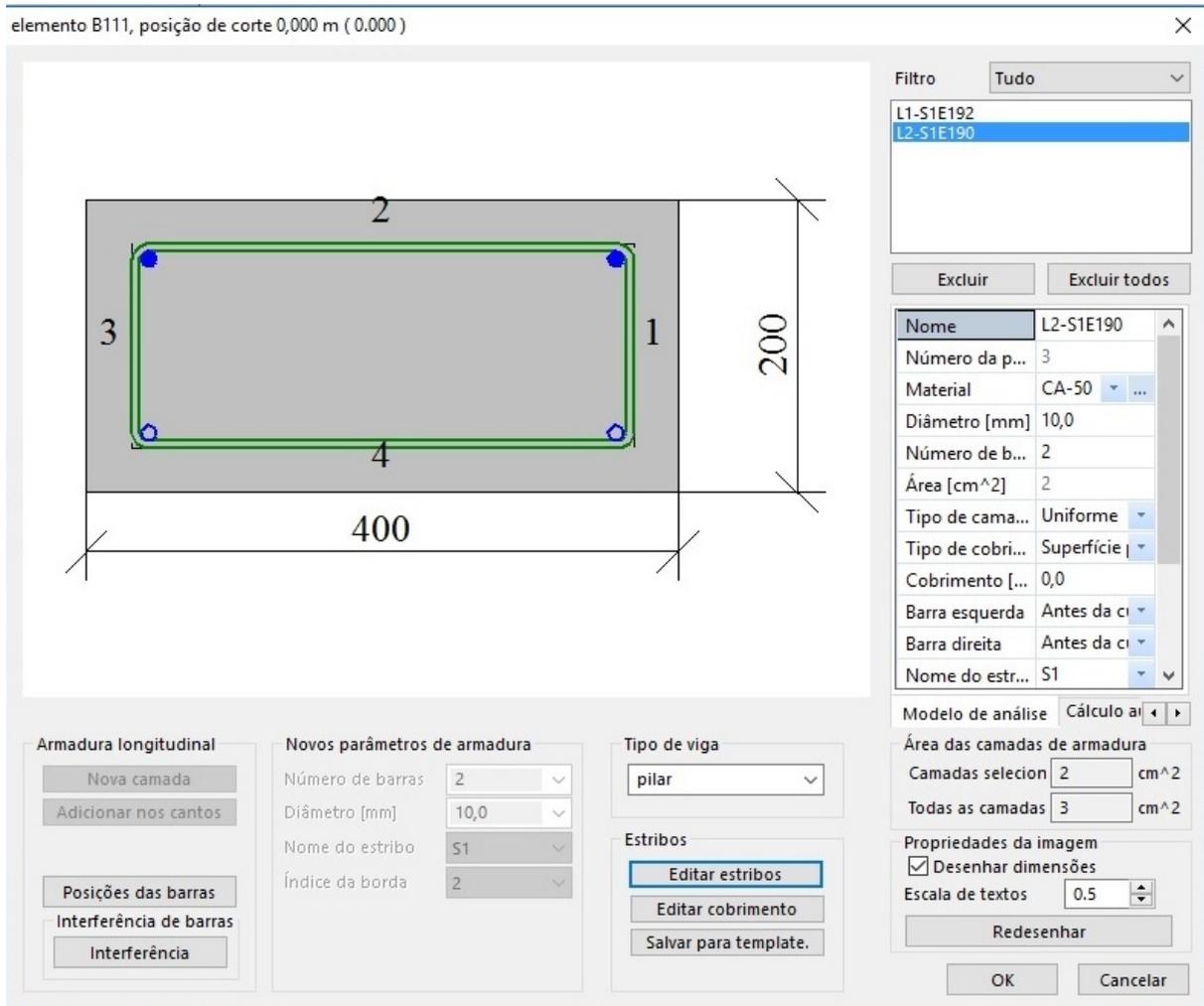
B. Já a Figura 20 demonstra a janela de lançamento de armadura do Scia Engineer.

Figura 19 – Área de aço necessária para um pilar da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Janela de lançamento de armaduras



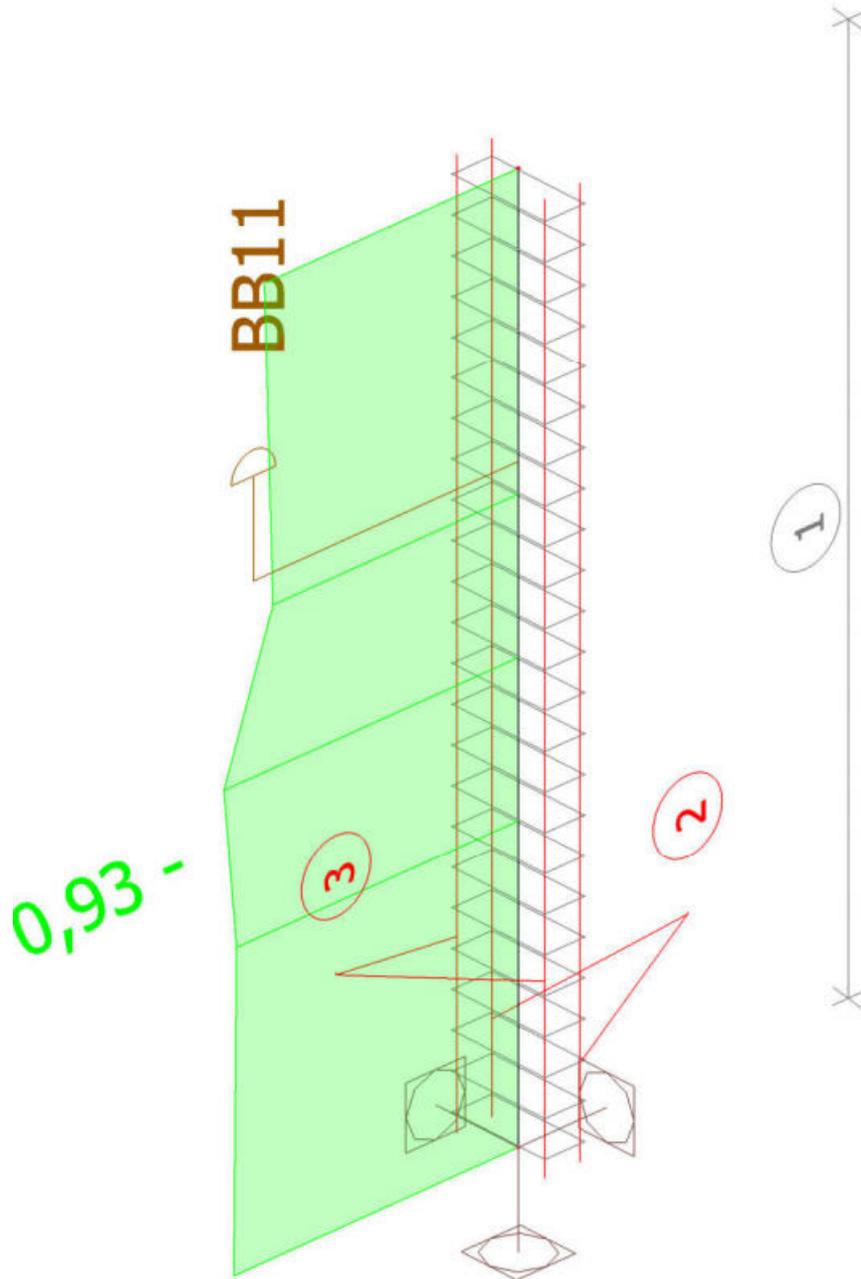
Fonte: Elaborado pelo autor.

Um fato que chama a atenção, entretanto, é que o Scia Engineer não define o espaçamento dos estribos automaticamente, de acordo com a norma desejada. O programa informa o usuário sobre o espaçamento nos resultados de cálculo, mas cabe ao projetista definir na aba de dimensionamento se adotará os valores indicados pelo *software* ou lançará essas armaduras com espaçamentos diferentes, de acordo com outros critérios.

É preciso deixar claro também que o Scia Engineer testa os elementos estruturais com armaduras para os Estados Limites Último e de Serviço, mas não dá avisos ou impede o usuário de lançar armaduras com diâmetros inferiores aos mínimos exigidos pela norma brasileira. Ou seja, a área total de aço é verificada, mas não se a escolha da armadura é adequada. Cabe ao projetista conhecimento técnico de norma e atenção no dimensionamento. A Figura 21 mostra a interface de verificação do programa. Quando o resultado é verde, significa que a armadura atende aos requisitos dos Estados Limites. Além disso, quanto mais próximo de 1,0 o coeficiente mostrado, mais econômica é a

armadura escolhida.

Figura 21 – Resultado de verificação de armadura de um pilar da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do dimensionamento dos pilares das Estruturas A e B, bem como compara as quantidades e custos dos materiais de construção necessários para a produção dos mesmos. Todos os dados relativos ao dimensionamento e à quantidade de materiais foram obtidos no Scia Engineer.

4.1 COMPARAÇÃO DAS QUANTIDADES DE MATERIAIS NECESSÁRIAS PARA A EXECUÇÃO DOS PILARES DAS ESTRUTURAS A E B

4.1.1 Quantidade de Aço

O uso de concreto de alto desempenho nos pilares da Estrutura B possibilitou uma drástica redução no volume de aço necessário no dimensionamento dos mesmos, quando comparados com os pilares da Estrutura A, dimensionados com concreto convencional.

Um dos papéis do aço no comportamento estrutural dos pilares é o de auxiliar o concreto na absorção dos esforços normais de compressão. Ao se aumentar a resistência à compressão do concreto de 25 MPa (Estrutura A) para 60 MPa (Estrutura B), era natural que houvesse diminuição da quantidade de aço necessária nos pilares.

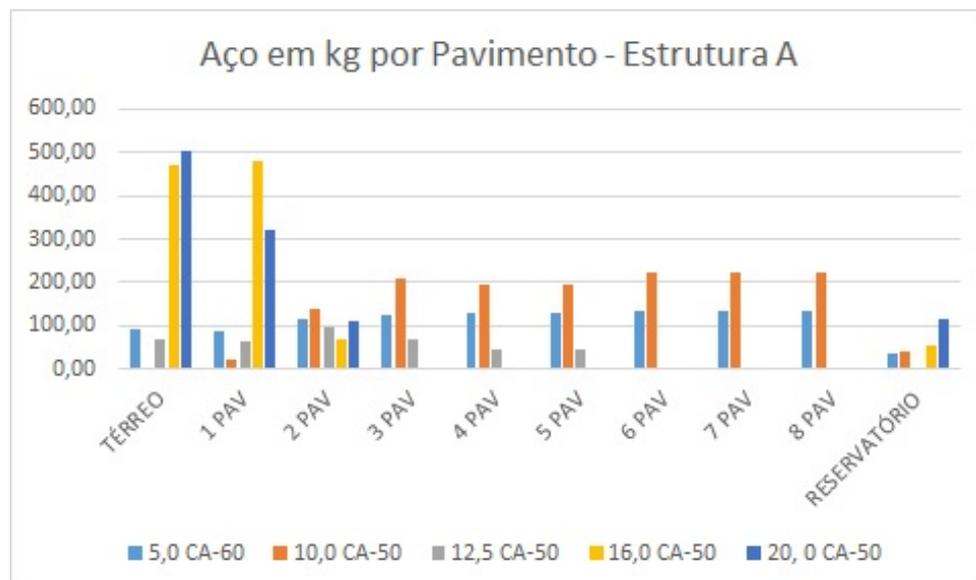
A Tabela 10 apresenta a quantidade de aço dos pilares, por pavimento, da Estrutura A.

Tabela 10 – Quantidade de aço por pavimento da Estrutura A (25 MPa)

	Ø5,0 CA-60	Ø10,0 CA-50	Ø12,5 CA-50	Ø16,0 CA-50	Ø20,0 CA-50	Total por pavto (kg)
Pavto. Térreo (kg)	90,8	-	70,5	472,7	505,1	1139,1
1º Pavto. (kg)	87,8	20,7	63,6	479,3	319,6	971,0
2º Pavto. (kg)	116,2	138,1	97,1	70,7	110,5	532,6
3º Pavto. (kg)	124,4	207,2	70,7	-	-	402,3
4º Pavto. (kg)	128,5	193,3	43,2	-	-	365,0
5º Pavto. (kg)	128,5	193,3	43,2	-	-	365,0
6º Pavto. (kg)	132,6	221,0	-	-	-	353,6
7º Pavto. (kg)	132,6	221,0	-	-	-	353,6
8º Pavto. (kg)	132,6	221,0	-	-	-	353,6
Reservatório (kg)	34,5	41,9	-	53,7	117,4	247,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 ilustra a distribuição de aço, por diâmetro, em cada pavimento da Estrutura A.

Figura 22 – Distribuição de aço dos pilares por pavimento na Estrutura A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da análise da Tabela 10 e da Figura 22 pode-se concluir, como era esperado, que os pavimentos que mais requerem aço, na Estrutura A, são os dois primeiros, já que estão submetidos aos maiores carregamentos normais. Nota-se ainda que a partir do sexto pavimento os pilares exigem apenas armadura mínima.

A Tabela 11 mostra a quantidade de aço dos pilares, por pavimento, da Estrutura B.

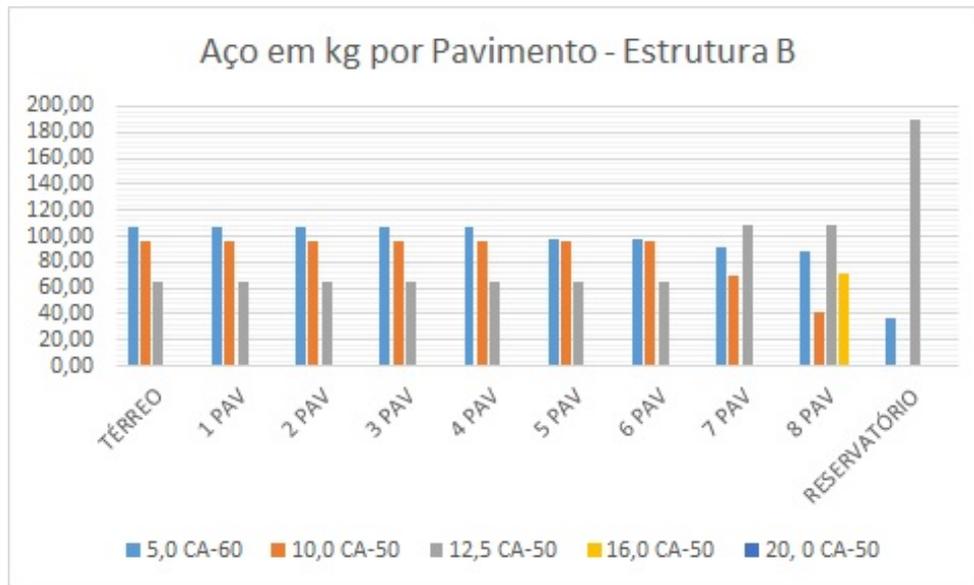
Tabela 11 – Quantidade de aço por pavimento da Estrutura B (50 MPa)

	Ø5,0 CA-60	Ø10,0 CA-50	Ø12,5 CA-50	Ø16,0 CA-50	Ø20,0 CA-50	Total por pavto (kg)
Pavto. Térreo (kg)	107,7	96,7	64,7	-	-	269,1
1º Pavto. (kg)	107,7	96,7	64,7	-	-	269,1
2º Pavto. (kg)	107,7	96,7	64,7	-	-	269,1
3º Pavto. (kg)	107,7	96,7	64,7	-	-	269,1
4º Pavto. (kg)	107,7	96,7	64,7	-	-	269,1
5º Pavto. (kg)	97,7	96,7	64,7	-	-	259,7
6º Pavto. (kg)	97,7	96,7	64,7	-	-	259,7
7º Pavto. (kg)	90,8	69,1	107,9	-	-	267,8
8º Pavto. (kg)	88,0	41,4	107,9	70,7	-	308,0
Reservatório (kg)	37,6	-	190,0	-	-	227,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 23 mostra a distribuição de aço, por diâmetro, em cada pavimento da Estrutura B.

Figura 23 – Distribuição de aço dos pilares por pavimento na Estrutura B

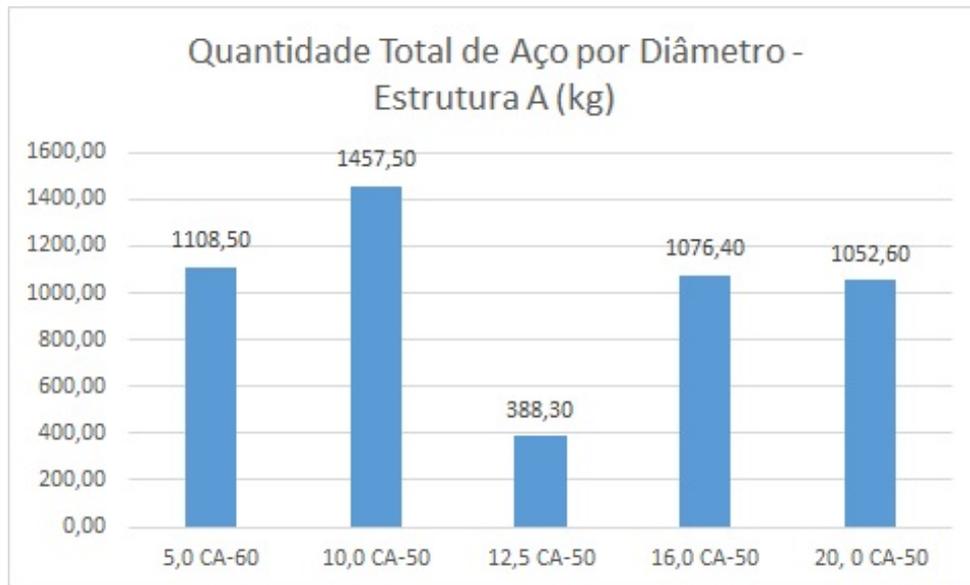


Fonte: Elaborado pelo autor.

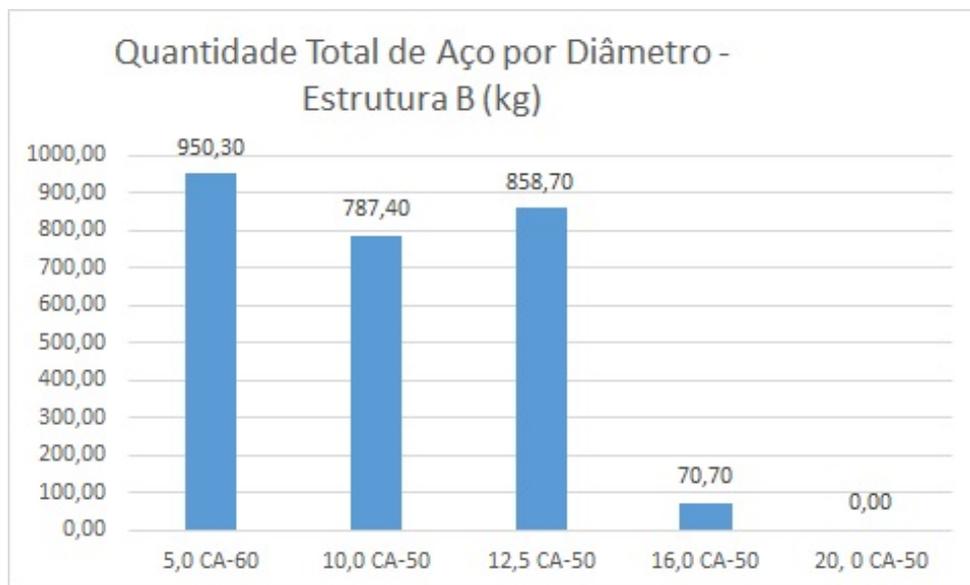
A análise da Tabela 11 e da Figura 23 indica que o uso de concreto de alto desempenho permitiu a adoção de armadura mínima em todos os pilares do térreo ao sexto pavimento, mesmo com a redução das seções transversais. Um fenômeno interessante ocorre, entretanto, no sétimo e no oitavo pavimento: há um aumento na quantidade de aço necessária quando comparados aos andares imediatamente inferiores a eles. Esse fato, entretanto, não ocorre na Estrutura A. Isso pode ser explicado pois os pilares dos últimos pavimentos, em ambas as estruturas, recebem os maiores esforços horizontais causados pelo vento. Porém, por possuírem menores dimensões, os pilares dos últimos pavimentos da Estrutura B precisam de maior área de aço para suportar tais esforços horizontais.

É possível ainda observar-se que a quantidade de aço requerida tornou-se semelhante em ambos os casos nos últimos pavimentos. Isso pode ser explicado pelo fato de a NBR 6.118 (ABNT, 2014) recomendar, além da área mínima de aço, o número mínimo de barras longitudinais (quatro, para pilares de seção retangular) e também o diâmetro mínimo de 10 mm para tais barras em pilares.

As Figuras 24 e 25 mostram a quantidade total de aço, por diâmetro, para as Estruturas A e B, respectivamente. Através das imagens, percebe-se a grande diminuição do consumo de barras de aço CA-50 de 10, 16 e 20 mm.

Figura 24 – Quantidade total de aço por diâmetro para os pilares da Estrutura A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Quantidade total de aço por diâmetro para os pilares da Estrutura B

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 26 mostra a diferença total no consumo de aço entre as duas estruturas analisadas no trabalho.

Figura 26 – Quantidade de aço total para os pilares de ambas as estruturas

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 traz um resumo comparativo de quantidades e custos com aço para os dois casos analisados nesse trabalho, tendo como base os preços mostrados anteriormente na Tabela 9.

Tabela 12 – Comparação de quantidades e custos com aço

Quantidade de aço dos pilares da Estrutura A (kg)	5083,3
Quantidade de aço dos pilares da Estrutura B (kg)	2667,10
Redução na quantidade de aço (%)	47,53
Custo de aço dos pilares da Estrutura A (R\$)	20121,86
Custo de aço dos pilares da Estrutura B (R\$)	10525,36
Economia nos custos com aço (%)	47,69

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Quantidade de Chapas de Madeira

O uso de concreto de alto desempenho nos pilares da Estrutura B permitiu a redução das seções transversais dos mesmos, quando comparados com aqueles da Estrutura A. Assim, haveria menor consumo de chapas de madeira para a produção das fôrmas desses pilares.

A Tabela 13 apresenta os quantitativos e custos com fôrmas de madeira, bem como uma comparação dos mesmos para os pilares das duas situações estudadas

nesse trabalho.

Tabela 13 – Quantitativos e custos com fôrmas de compensado plastificado para os pilares

Área de fôrmas total dos pilares da Estrutura A (m ²)	764,1
Área de fôrmas total dos pilares da Estrutura B (m ²)	646,5
Redução na área de fôrmas (%)	15,39
Custo das fôrmas dos pilares da Estrutura A (R\$)	18132,09
Custo das fôrmas dos pilares da Estrutura B (R\$)	15341,45
Economia nos custos com fôrmas (%)	15,39

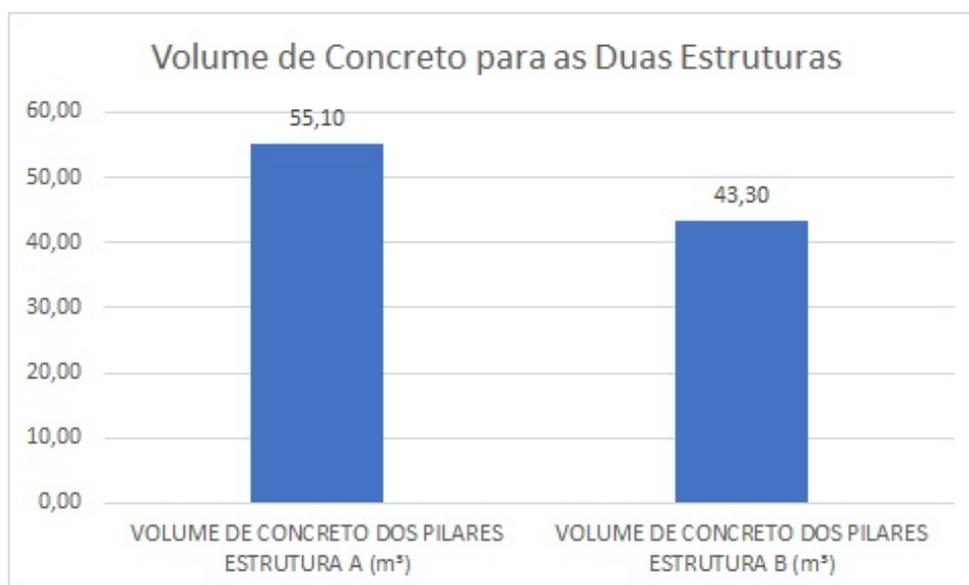
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Volume de Concreto

A redução das seções transversais dos pilares da Estrutura B permite um menor consumo de concreto para a produção dos mesmos, em comparação com aqueles da Estrutura A. Entretanto, isso não se reflete em redução dos custos com concreto, já que o CAD é consideravelmente mais caro que o concreto convencional.

A Figura 27 ilustra a diferença no consumo de concreto entre as Estruturas A e B.

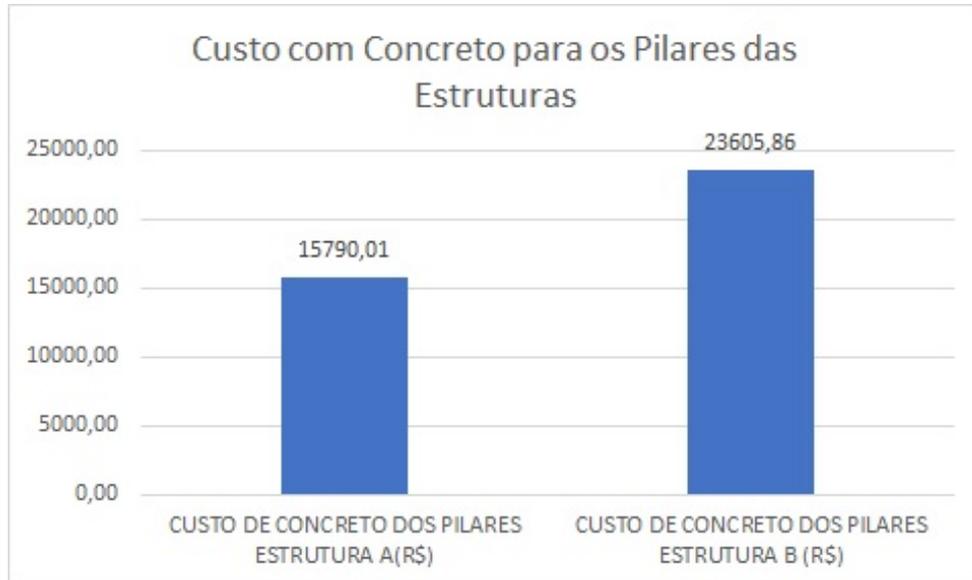
Figura 27 – Volumes de concreto necessários para os pilares das Estruturas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 28 mostra o aumento nos gastos com concreto quando opta-se pela utilização de CAD.

Figura 28 – Custo com concreto para os pilares de ambas as estruturas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 14 resume as diferenças de consumo e custos com concreto entre os pilares da Estrutura A e da Estrutura B.

Tabela 14 – Volumes e custos de concretos para os pilares das duas estruturas

Volume de concreto dos pilares da Estrutura A (m ³)	55,1
Volume de concreto dos pilares da Estrutura B (m ³)	43,3
Redução no volume dos pilares (%)	21,4
Custo com concreto dos pilares da Estrutura A (R\$)	15790,0
Custo com concreto dos pilares da Estrutura B (R\$)	23605,9
Aumento nos gastos com concreto (%)	33,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

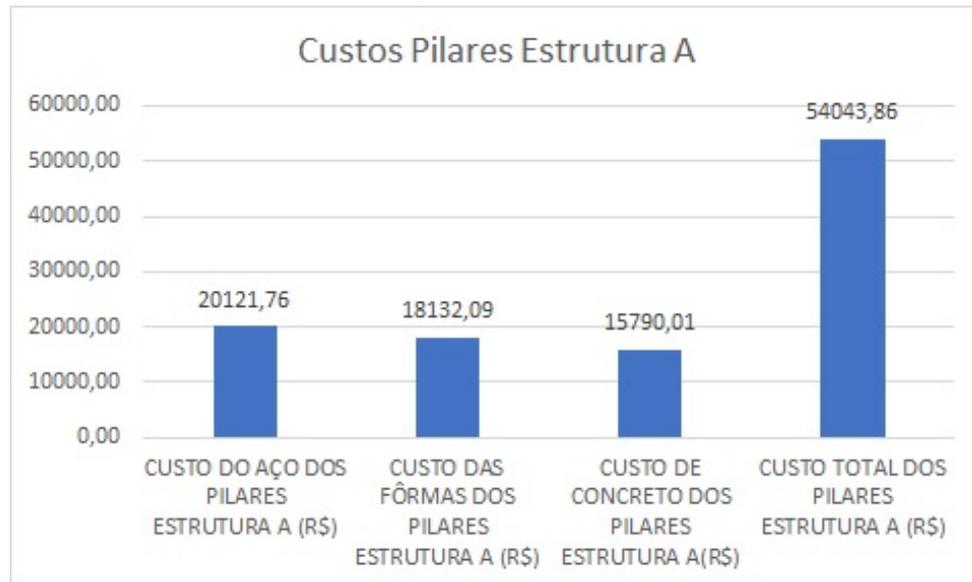
4.2 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DIRETOS PARA A PRODUÇÃO DOS PILARES DAS ESTRUTURAS A E B

Apesar do uso de concreto de alto desempenho em pilares permitir a redução no consumo dos materiais necessários, o custo de produção dos mesmos nas duas estruturas analisadas neste trabalho apresenta apenas uma pequena diferença.

Isso se deve ao fato do preço do CAD ser ainda muito maior que aquele do concreto convencional.

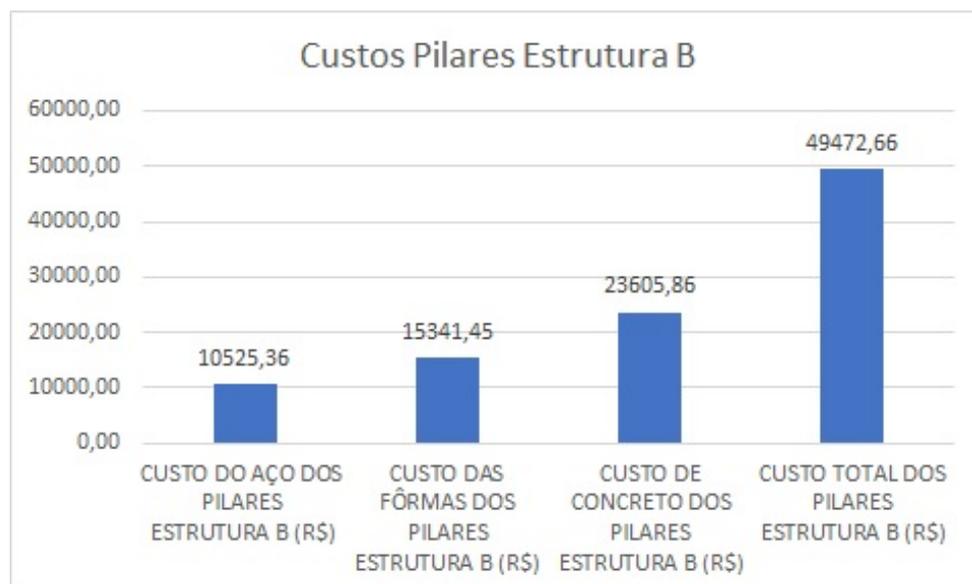
A Figura 29 mostra os custos relativos aos pilares da Estrutura A, enquanto a Figura 30 demonstra os custos relacionados aos pilares da Estrutura B.

Figura 29 – Custos dos pilares da Estrutura A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Custos dos pilares da Estrutura B



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 apresenta os valores totais de custo para produção de pilares para cada uma das situações apresentadas no trabalho. A economia gerada pelo uso de

concreto de alto desempenho em substituição ao concreto convencional nos pilares foi de 8,46%.

Tabela 15 – Custo total para a produção dos pilares nBas Estruturas A e

Custo dos pilares da Estrutura A (R\$)	54043,86
Custo dos pilares da Estrutura B (R\$)	49472,66
Diferença (R\$)	4571,20
Economia total no custo dos pilares (%)	8,46

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

O Scia Engineer revelou-se uma poderosa ferramenta para a análise de esforços e dimensionamento de elementos estruturais. Sua interface é simples, o ambiente de trabalho é organizado e altamente personalizável, além de possuir uma árvore de comandos que segue a ordem lógica de concepção de um projeto. Ainda que o edifício em estudo neste trabalho possa ser considerado de baixa complexidade, o programa já demonstrou toda sua capacidade nos mais diversos empreendimentos ao redor do mundo.

Além disso, o Scia Engineer foi de grande valia para a realização deste trabalho pois sua desenvolvedora, a Nemetschek, é uma das poucas empresas desse gênero, senão a única, a fornecer uma versão completa e totalmente gratuita do programa para estudantes e professores de engenharia.

O *software*, porém, exige conhecimento das normas técnicas, já que dá liberdade ao usuário para que o mesmo adote alguns critérios próprios no dimensionamento das estruturas. Por outro lado, o fato de não possuir ferramentas de detalhamento pode também ser considerada uma desvantagem do programa.

Já os resultados obtidos no dimensionamento dos pilares com concreto convencional comparados com aqueles com CAD justificam o uso do último e comprovam que atualmente este é um material cuja utilização já é economicamente viável não apenas em obras de grandes dimensões, mas também em obras de médio porte. Além disso, o material ainda possui vantagens técnicas, como maior durabilidade.

Com o uso de CAD, a quantidade de aço necessária foi reduzida substancialmente, além das próprias dimensões dos pilares terem sido diminuídas. Dessa forma, houve também menor consumo de madeira e de concreto. Entretanto, o preço unitário do concreto de alto desempenho ainda é muito maior que o do concreto convencional, por isso a diferença nos custos não foi tão significativa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7.480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11.768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.575-1: Edificações habitacionais - Desempenho parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6.118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6.120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6.123: Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8.953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

ARAUJO, J. M. de. **Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado.** 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2009.

ARAUJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado.** 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010.

AL SHEIKH, S. A. Mechanical properties for high performance concrete exposed to high temperature. **International Journal Of Civil And Structural Engineering**, Deli, v. 2, n. 2, p. 435 – 444, 2011. Disponível em: <<http://www.ipublishing.co.in/ijcserarticles/twelve/articles/voltwo/EIJCSE3035.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2016.

BORGES, C. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil.** 2008. 263f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas.** 2011. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-31052011-170216/pt-br.php>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

BUYUKOZTURK, O.; LAU, D. **High Performance Concrete: Fundamentals and Application**. Cambridge: Massachusetts Institute Of Technology, 2007. Disponível em: <http://bccw.cityu.edu.hk/denvid.lau/documents/HPC_Fundamentals_and_Application.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.

CHOWDHURY, S. Effect of elevated temperature on mechanical properties of high strength concrete. In: 23RD AUSTRALASIAN CONFERENCE ON THE MECHANICS OF STRUCTURES AND MATERIALS. **Proceedings...** Byron Bay: Southern Cross University, 2014. p. 1077 – 1082. Disponível em: <<http://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1182&context=acmsm23>>. Acesso em: 10 out. 2016.

DAMAS, A. P.; CAMPOS FILHO, A.; REAL, M. de V. Confiabilidade de pilares de concreto de alta resistência projetados de acordo com a NBR-6118:2014. In: **XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. Rio de Janeiro: ABMEC, 2015. p. 1 – 6. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/140091/000981670.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 out. 2016.

DARGE, H. **Effect of using high strength concrete columns on the structural behaviors of building frame**. 2014. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Addis Ababa Institute Of Technology, Addis Ababa, 2014. Disponível em: <<http://etd.aau.edu.et/bitstream/123456789/5310/1/HawisoDarge.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

EKOLU, S. O.; MURUGAN, S. Durability index performance of high strength concretes made based on different standard portland cements. **Advances In Materials Science And Engineering**, Cairo, p. 111 - 117, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2012/319285>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

GUIMARAES, J. P. Z. **Estudo experimental das propriedades do concreto de alto desempenho**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?trSecao=resultado&nrSeq=3937@1>. Acesso em: 10 ago. 2016.

KUMBHAR, P. D.; MURNAL, P. B. A new mix design method for high performance concrete under tropical conditions. **Asian Journal Of Civil Engineering**, Teerã, v. 15, n. 3, p. 467 – 483, 2014. Disponível em: <<http://site.bhrc.ac.ir/portal/Portals/2/pdf/asianjornal/June2014/467.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2016.

LASKAR, A. I. Mix design of high-performance concrete. **Materials Research**, São Carlos, v. 14, n. 4, p. 429 – 433, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v14n4/aop_0065-08.pdf>. Acesso em: 16 out. 2016.

LIMA, F. B. de. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Escola de

Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997. Disponível em:

<http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1997DO_FlavioBarbozadeLima.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

NEMETSCHEK SCIA. **Scia & Allplan user context 2015 – The art of structural design**. Herk-de-Stat: Nemetschek, 2015. Disponível em: <[http://notesweb.scia-online.com/WWW/Contest2015.nsf/dc5906ff4594c6d2c12573710053e6af/deb6f5cb1b44b18bc1257e6d00326076/\\$FILE/UC2015-book-Ir.pdf](http://notesweb.scia-online.com/WWW/Contest2015.nsf/dc5906ff4594c6d2c12573710053e6af/deb6f5cb1b44b18bc1257e6d00326076/$FILE/UC2015-book-Ir.pdf)>. Acesso em: 13 fev. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOLLI, P. R. **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada**. 2015. 95 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-A9TJ5E/106._ufmg_demc_paulo_nolli.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 ago. 2016.

PATEL, V.; SHAH, N. A survey of high performance concrete developments in civil engineering field. **Open Journal Of Civil Engineering**, Wuhan, China, p. 69 - 79, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2013.32007>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

PATIL, B. B.; KUMBHAR, P. D. Strength and durability properties of high performance concrete incorporating high reactivity metakaolin. **International Journal of Modern Engineering Research**, Los Angeles, v. 2, n. 3, p. 1099 – 1104, 2012. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.641.4048&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 10 out. 2016.

PINHO, B. R. de. **Estudo, aplicação e impacto do software Scia Engineer no cálculo estrutural do Brasil**. 2013. 92 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Católica de Pelotas, Pelotas. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/3423918-Universidade-catolica-de-pelotas-bruno-ruas-de-pinho-estudo-aplicacao-e-impactos-do-html>>. Acesso em: 19 out. 2016.

RANA, N.; TIWARI, A.; SRIVASTAVA, A. K. High performance concrete and its applications in the field of civil engineering construction. **International Journal Of Current Engineering And Technology**, Valley Village, p. 982 - 985, 2016. Disponível em: <<http://inpressco.com/wp-content/uploads/2016/06/Paper45982-985.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. 2011. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do

Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/55436/000838111.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 out. 2016.

SAYED, W. S. E.; SADEK, D. M.; SAMAHY, A. B. I. A. Behavior and durability of high and ultrahigh strength concrete manufactured by local materials. **Journal Of Engineering Sciences**, Assiut, p. 811 – 826, 2011. Disponível em: <http://www.aun.edu.eg/journal_files/82_J_5507.pdf>. Acesso em: 13 out. 2016.

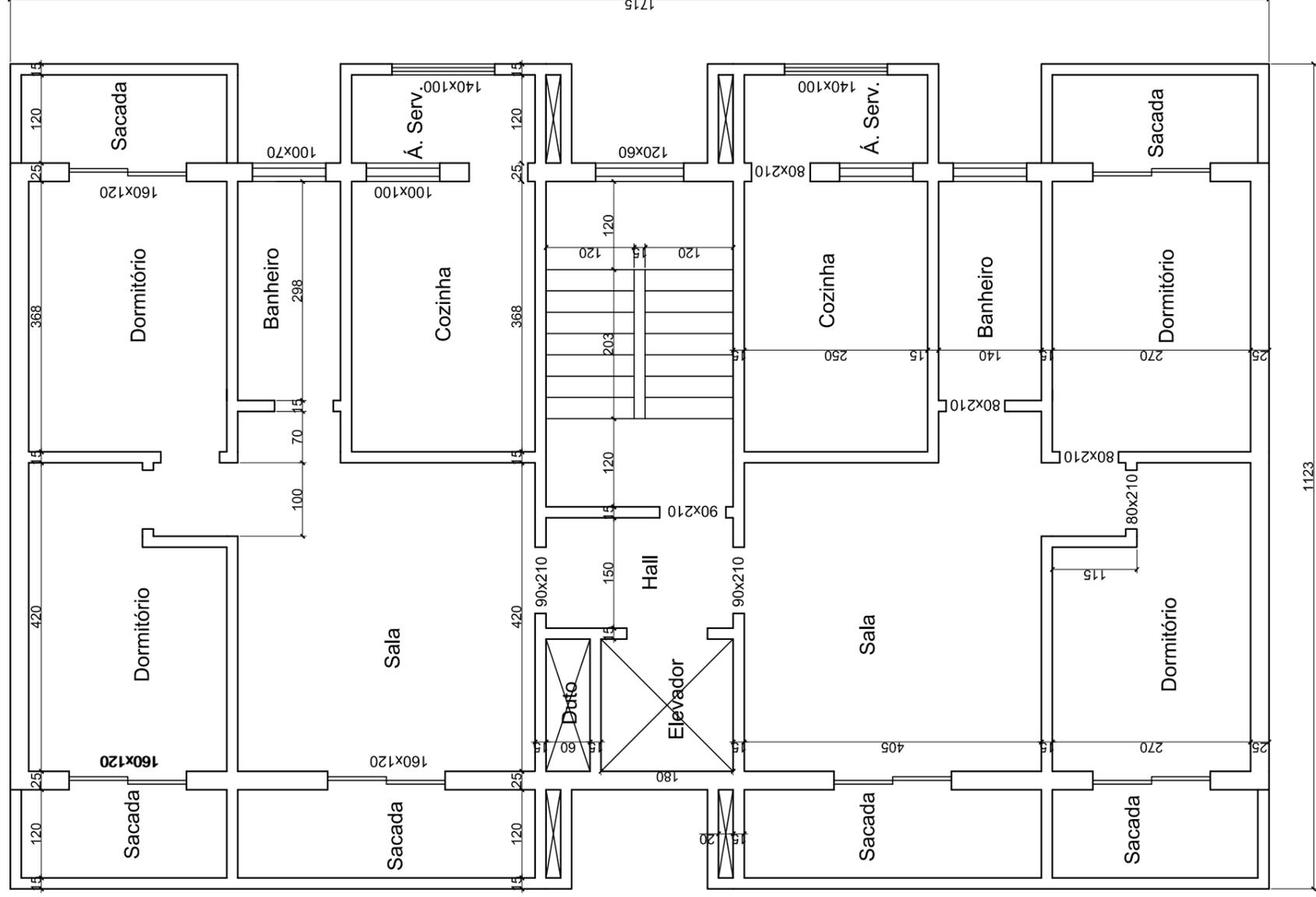
SINGLA, S. Mechanical properties of high strength high performance concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN DESIGN AND CONSTRUCTION OF STRUCTURES - ADCS 201. **Proceedings...** Deli: ACEE, 2012. p. 169 – 172. Disponível em: <<http://searchdl.org/index.php/conference/downloadPDF/633>>. Acesso em: 13 out. 2016.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI. **Relatório de Insumos e Composições para Santa Catarina de Abril de 2017**. Caixa Econômica Federal, 2017. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_662>. Acesso em: 20 maio 2017.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2, cap. 36, p.1283 -1325.

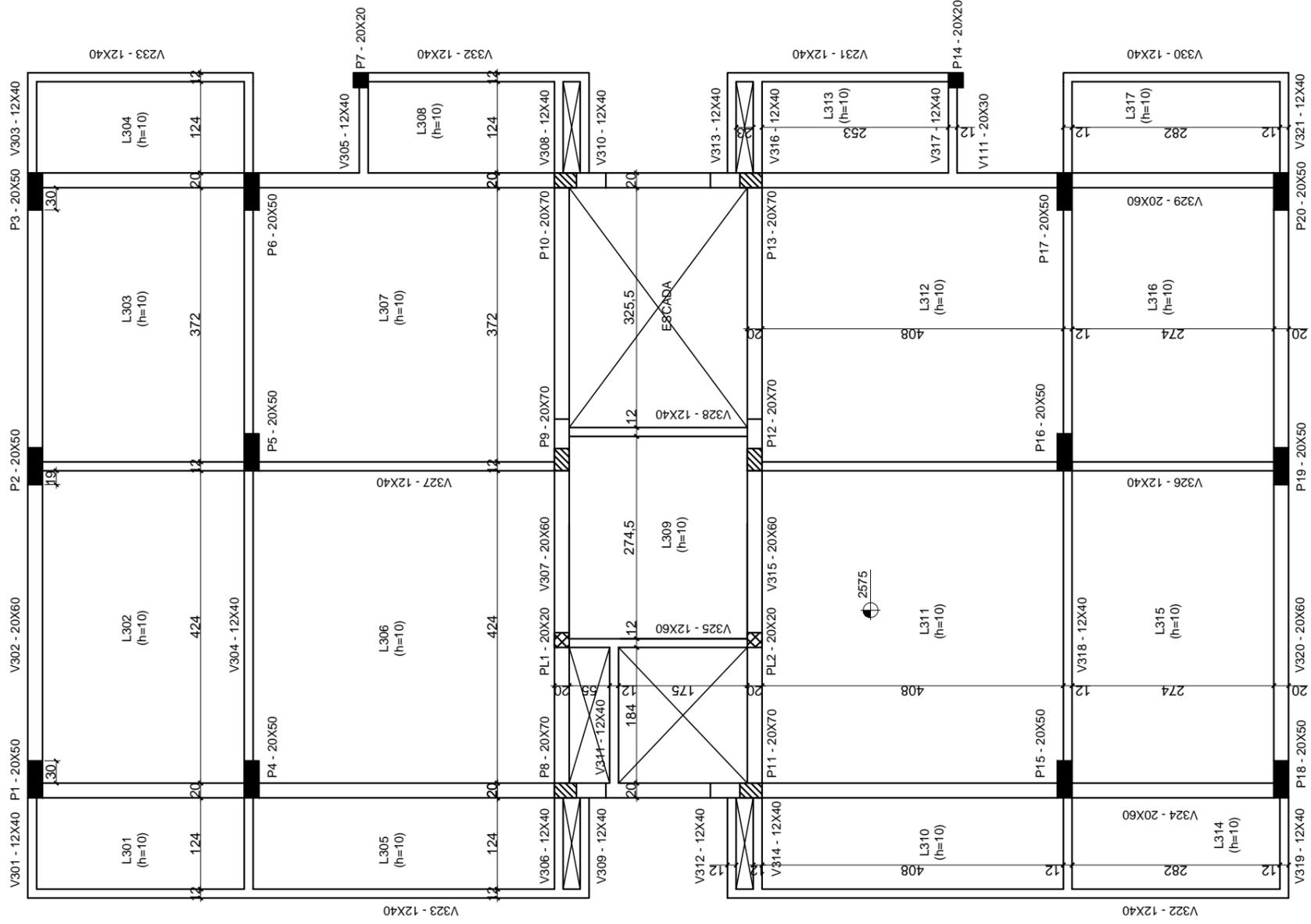
ZHANG, H. et al. Mixture design methods for high performance concrete: a review. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ENGINEERING MATERIALS AND TECHNOLOGY (AEMT 15). **Proceedings...** Guangzhou: Atlantis Press, 2015. p. 647 – 653. Disponível em: <<http://www.atlantis-press.com/php/paper-details.php?from=author+index&id=25839291&querystr=authorstr=Z>>. Acesso em: 13 out. 2016.

APÊNDICES



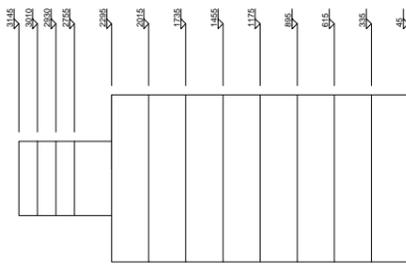
PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO

TÍTULO:	PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO	ALUNO:	GUSTAVO AURELIO CIFUENTES
ASSUNTO:	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	ORIENTADORA:	PROF. MSC. FERNANDA DOS ANJOS
INSTITUIÇÃO:	UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA	PRANCHA:	01
		ESCALA:	1/75
		DATA:	08/06/2017



FÔRMAS DA COBERTURA E PISO DA CASA DE MÁQUINAS

DESENHO ESQUEMÁTICO



TÍTULO: FÔRMAS DA COBERTURA E PISO DA CASA DE MÁQUINAS

ALUNO: GUSTAVO AURELIO CIFUENTES

ASSUNTO: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

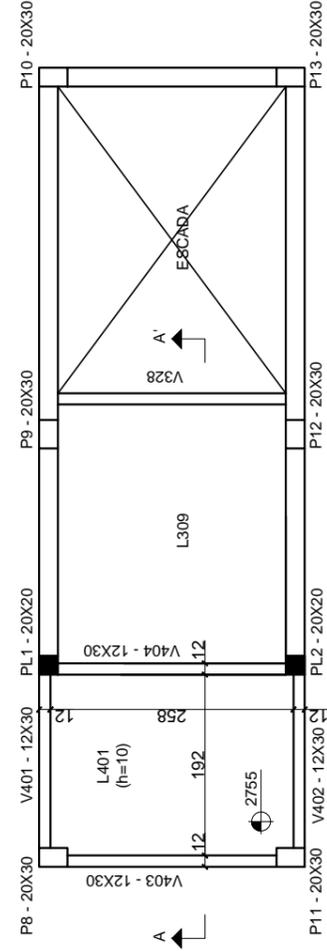
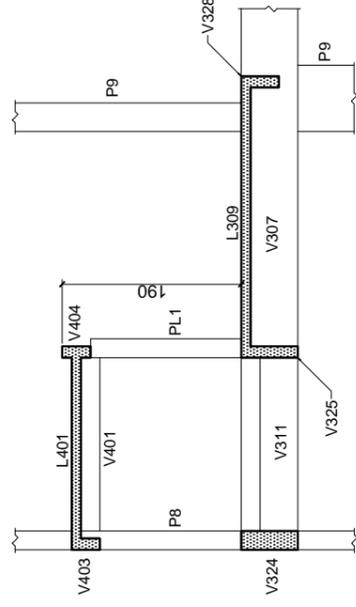
ORIENTADORA: PROF. MSC. FERNANDA DOS ANJOS

FRANCHA: 04

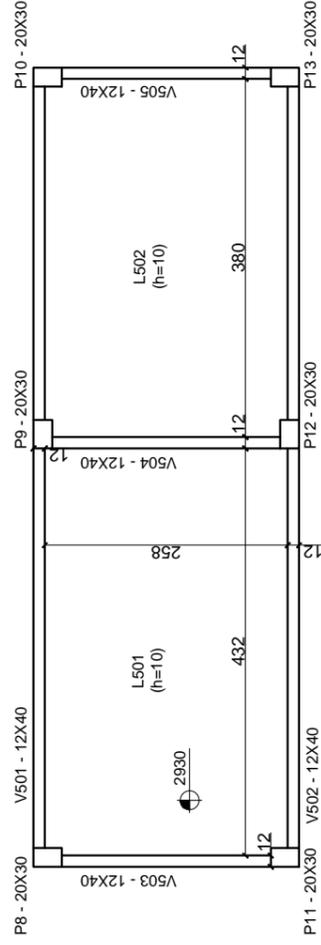
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

ESCALA: 1/75

DATA: 08/06/2017



FÔRMAS DA MESA DE MOTORES



FÔRMAS DO TETO DA CASA DE MÁQUINAS

DESENHO ESQUEMÁTICO

□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

