

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTÔNIO JOAQUIM GARCIA MOURA

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

.

ARACAJU

2017

ANTÔNIO JOAQUIM GARCIA MOURA

**DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho Silva

ARACAJU

2017

Moura, Antônio Joaquim Garcia.
M929dDimensionamento de vigas de concreto de alto desempenho / Antônio Joaquim
Garcia. – Aracaju, 2017.
63 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
de Sergipe - IFS. Coordenação do Curso de Engenharia Civil.
Orientador: Prof. M. Sc. Marcílio Fabiano Goivinho Silva.

1. Concreto de alto desempenho 2. Dimensionamento de Vigas 3.
Deformações do Concreto I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
de Sergipe – IFS II. Silva, Marcílio Fabiano Goivinho. III. Título.

CDU 691.3

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a deus pelas conquistas.

Aos meus pais e minha família, pelo apoio e dedicação na minha formação, como pessoa e profissional, ao longo da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da Silva, pela orientação, estimo, paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Carla Cristina Nascimento Santos Perreira e Rodolfo Santos da Conceição, pela paciência e conselhos durante o processo de desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas Jobson e Rodrigo pelo companheirismo e estímulo durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

GARCIA MOURA, Antônio Joaquim. **Dimensionamento de Vigas de Concreto de Alto desempenho**. 63 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2017.

Atualmente tem-se aumentado o uso do concreto de alto desempenho (CAD) devido as suas vantagens frente aos concretos convencionais. O CAD apresenta como principais características maior resistência, durabilidade e fragilidade em relação aos concretos convencionais, isso ocorre devido à modificação de sua microestrutura pela aplicação de aditivos na composição do concreto. Embora exista um aumento no uso do concreto de alto desempenho em estruturas de concreto armado, ainda existem poucos estudos sobre sua aplicação em vigas. Desta forma, este trabalho buscou estudar a aplicação do concreto de alto desempenho em vigas de concreto armado visando obter parâmetros adimensionais para o dimensionamento das vigas de concreto de alto desempenho, de acordo com às recomendações NBR 6118 (2014) auxiliando, assim, no dimensionamento de estruturas executadas com CAD. Os procedimentos utilizados no desenvolvimento do estudo de dimensionamento de vigas de CAD, foram a obtenção de dados experimentais para confrontar com o método de dimensionamento analítico da norma e o dimensionamento de vigas em função da variação da resistência e da seção transversal pelo modelo analítico da NBR 6118 (2014). Os resultados obtidos pelo modelo analítico demonstraram-se conservadores em relação aos dados experimentais, apresentando uma menor ductilidade e maior consumo de aço. Os coeficientes adimensionais desenvolvidos para auxiliar no dimensionamento das vigas mostraram-se bastante úteis na aplicação do modelo de dimensionamento analítico, possibilitando verificar os limites de ductilidade para cada resistência e a relação das deformações em função dos esforços solicitantes e da rigidez da seção transversal da viga.

Palavras-Chave: Concreto de alto desempenho; Dimensionamento de Vigas; Deformações do Concreto.

GARCIA MOURA, Antônio Joaquim. **Dimensioning of High Performance Concrete Beams**. 63 páginas. Work of course completion (Bachelor) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2017.

ABSTRACT

Currently there is a increase the use of high-performance concrete (HPC) because of yours advantages against the conventional concrete. HPC presents as main features greater resistance, durability and fragility in relation to conventional concrete, this is due to your microstructure modification by application of additives in concrete composition. Although there is a increase the use of high-performance concrete in reinforced concrete structures, still there are very few studies on your application in beams. In this way, this study sought to study the application of high-performance concrete in reinforced concrete beams with the objective get dimensionless parameters for sizing of high-performance concrete beams, according to the recommendations NBR 6118 (2014) assisting the sizing of the structures executed with HPC. The procedures used in the development of the sizing study of HPC beams, were the acquisition experimental data to confront with analytical standard sizing method and the sizing of beams according to the variation of the resistance and cross-section analytical model NBR 6118 (2014). The results obtained through analytical model demonstrated to be conservatives in relation to the experimental data, showing a lower ductility and higher steel consumption. The dimensionless coefficients developed for assist in the sizing of the beams were very useful in the application of analytical sizing model, enabling check the limits of ductility for each resistance and the relation of the deformations depending on the requesting efforts and the stiffness of the beam cross-section.

Keywords: High-performance Concrete; Dimensioning of beams; Concrete Deformations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Diagrama tensão-deformação do concreto	16
Figura 2-Trajetória de fraturamento no concreto de alto desempenho.....	16
Figura 3-Viga fletida.....	20
Figura 4-Fissuras de deformação em uma viga fletida.....	21
Figura 5-Domínios de estado-limite último de uma seção transversal.....	21
Figura 6-diagrama momento curvatura	22
Figura 7- Diagrama tensão-deformação idealizado.....	26
Figura 8-Deformação da Seção Transversal.....	27
Figura 9-Diagrama Tensão-Deformação Parábola.....	28
Figura 10- Parâmetros λ e α_c	30
Figura 11-Viga ensaiada por Hoffman e Silva.....	36
Figura 12- Correlação Momento x Linha Neutra Analítico e Experimental.....	38
Figura 13- Linha Neutra em função do Momento Solicitante.....	39
Figura 14- Relação da Área de Aço em função do Momento Fletor	40
Figura 15-Redução percentual da área de aço necessária no limite de ductilidade	40
Figura 16-Momento Resistente no limite de ductilidade	41
Figura 17-Aumento percentual do momento resistente no limite de ductilidade	42
Figura 18- Momento x Linha Neutra para vigas de 80MPa.....	43
Figura 19- Momento x Flecha total para vigas de 80MPa.....	44
Figura 20- Momento x Área de aço para vigas de 80MPa.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limite de Ductilidade Estabelecido Pela NBR6118/2014.....	30
Tabela 2 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).	32
Tabela 3-valores do coeficiente ξ em função do tempo	34
Tabela 4- Dados experimentais.....	37
Tabela 5 - Valores dos coeficientes adimensionais e da profundidade da linha neutra das vigas ensaiadas por Hoffman e Silva (2013).....	37
Tabela 6- Dimensionamento pelo método analítico da NBR 6118 (2014).	38
Tabela 7 –Momento resistente no limite de ductilidade da seção para cada resistência.	41
Tabela A1 - Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C55	49
Tabela A2-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C60	50
Tabela A3-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C65	51
Tabela A4- Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C70	52
Tabela A5-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C75	53
Tabela A6-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C80	54
Tabela A7-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C85	55
Tabela A8-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C90	56
Tabela B1-Dimensionamento de viga de C55.....	57
Tabela B2- Dimensionamento de viga de C60.....	57
Tabela B3-Dimensionamento de viga de C65.....	57
Tabela B4-Dimensionamento de viga de C70.....	58
Tabela B5-Dimensionamento de viga de C75.....	58
Tabela B6-Dimensionamento de viga de C80.....	58
Tabela B7-Dimensionamento de viga de C85.....	59
Tabela B8-Dimensionamento de viga de C90.....	59
Tabela C1-Dimensionamento de viga de seção de 20x30cm	60
Tabela C2-Dimensionamento de Viga de Seção de 20x40cm	60
Tabela C3-Dimensionamento de Viga de Seção de 20x50cm	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	JUSTIFICATIVA	10
3	OBJETIVOS	11
3.1	Gerais	11
3.2	Específicos	11
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
4.1	Definições	12
4.1.1	Definição de Concreto de Alto Desempenho	12
4.1.2	Definição de Concreto de Alta Resistência	13
4.2	Principais Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho	13
4.2.1	Propriedades no Estado Fresco	13
4.2.2	Propriedades no Estado Endurecido	14
4.2.3	Propriedades de Desempenho Mecânico	15
4.3	Composição do Concreto de Alto Desempenho	18
4.3.1	Materiais utilizados	18
4.3.2	Dosagem	19
4.4	Comportamento das Estrutura de Concreto Armado	20
5	METODOLOGIA	23
6	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS COM CAD À FLEXÃO SIMPLES-NBR 6118 (2014)	26
7	ANÁLISE E RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	36
7.1	Comparativa do Método de Dimensionamento Analítico com dados Experimentais	36
7.2	Dimensionamento Analítico de Vigas de Concreto de Alto Desempenho com a Variação da Classe do Concreto.	39
7.3	Dimensionamento Analítico de Vigas de Concreto de Alto Desempenho com a Variação da Seção Transversal.	43
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	APÊNDICE A - TABELAS DE COEFICIENTES ADIMENSIONAIS DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DE SEÇÃO RETANGULAR	48
	APÊNDICE B - TABELAS DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DE SEÇÃO RETANGULAR DE 15X30.	57
	APÊNDICE C - TABELAS DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DA CLASSE C80.	60

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com o desenvolvimento da construção civil e do rigor das normas de desempenho, tem-se exigido mais das estruturas de concreto armado. Em vista disso, pesquisadores têm desenvolvido ao longo do tempo concretos que possuam maior resistência, durabilidade e racionalização dos materiais. Sendo assim, foi desenvolvido o concreto de alto desempenho (CAD), resultado de um processo de desenvolvimento tecnológico dos concretos convencionais ao longo das últimas décadas. O CAD é um concreto que apresenta alta resistência, alta durabilidade, baixa porosidade e baixa relação água/cimento, elevado módulo de deformação longitudinal, alta densidade, baixa permeabilidade, maior durabilidade e maior aderência da armadura ao concreto.

Sua classificação está relacionada com sua resistência mecânica à compressão, sendo que o limite de resistência da classificação sofreu modificações ao longo do seu processo de desenvolvimento. Na década de 50, os concretos de resistência à compressão de 35 MPa eram considerados como concretos de alta resistência, já na década de 60 esse valor passou a ser considerado com 60 MPa. Nos dias atuais já é possível obter concretos com resistência acima de 100 MPa.

Com o seu desenvolvimento nas últimas décadas, surgiram várias classificações quanto as categorias, tais como concreto auto adensável, concreto de alta resistência (CAR) ou concretos especiais. A grande maioria dos pesquisadores costuma relacionar o CAD com sua resistência à compressão, devido às inúmeras aplicações e desenvolvimento do concreto de alta resistência em vários países, ainda não existe um consenso quanto ao valor limite da resistência a compressão que classifica o concreto como de alta resistência. O Comitê 363 do American Concrete Institute (ACI-363R, 1992) estipula que concretos com resistências acima de 41 MPa podem ser considerados de alto desempenho. Contudo, o Código Modelo MC-90 do Comité Euro-Internacional du Béton (CEB) estabelece como limite inferior para o CAD uma resistência à compressão de 60 MPa (CEBFIP, 1990), (BORGES, 2002). A norma brasileira ABNT NBR-8953:2015, classifica o concreto em dois grupos de resistência, faz parte do grupo I os concretos de baixa resistência de 20 MPa a 50 MPa e no grupo II os concretos de alta resistência de 55 MPa até 100 MPa.

O processo de desenvolvimento tecnológico, está relacionado a dois fatores principais, a adição de finos e de aditivos plastificantes na mistura do concreto. A aplicação de aditivos

plastificantes e de finos na massa de concreto proporciona um ganho de resistência decorrente da modificação em sua microestrutura. Essas alterações modificam o comportamento mecânico do concreto tornando-o mais resistente e rígido. O aumento da rigidez propicia uma mudança no módulo de elasticidade do concreto tornando-o mais frágil, assim, haverá uma ruptura mais brusca do concreto. A utilização do concreto de alto desempenho tem crescido, devido as suas vantagens face aos concretos convencionais, como a elevada resistência mecânica e a maior durabilidade. O desenvolvimento de técnicas no processo de produção e a ampliação do conhecimento sobre suas propriedades reológicas e mecânicas, torna-o uma opção economicamente viável, o que possibilita uma maior difusão do seu uso nas novas construções.

No decorrer do seu desenvolvimento, o seu uso está relacionado a construção de edifícios altos, como por exemplo, as torres Petronas de Kuala Lumpur, na Malásia, sendo que o concreto utilizado tem resistência à compressão de 60 e 80 MPa e a Mesquita de Hassan, no Marrocos, cuja fundação e superestrutura foram projetadas com um concreto de 92 MPa.

Uma das grandes vantagens no emprego do CAD em edificações é a possibilidade de aplicar maiores carregamentos com seções menores dos elementos estruturais, com isso, a uma redução do peso da estrutura, ganho de área útil e fundações mais econômicas. Um exemplo prático no Brasil é o edifício e-Tower em São Paulo, onde foi utilizado um concreto com 80 MPa na execução de seus pilares desde os quatros subsolos até o terceiro andar, proporcionando uma redução de suas seções e um ganho de quatro vagas de garagem por subsolo do edifício (SILVA, 2003).

O concreto de alto desempenho apresenta vantagens técnicas e econômicas em relação aos concretos convencionais, mas em razão ter uma maior fragilidade sua utilização em elementos estruturais requer maiores investigações sobre o seu comportamento nos estádios de deformação, assim tendo uma quantidade maior de parâmetros que possam auxiliar os projetistas na tomada de decisões, dando maior confiabilidade nas estruturas de concreto armado com a utilização de CAD.

2 JUSTIFICATIVA

O uso do concreto de alto desempenho tem aumentado nos últimos anos em razão de suas vantagens técnicas e econômicas frente aos concretos convencionais. Mas apresenta como desvantagem o seu comportamento mais frágil em comparação aos concretos convencionais, assim, é necessário um maior domínio do conhecimento do seu comportamento nas estruturas.

Sua aplicação está relacionada diretamente aos ganhos de desempenho técnico e econômico. Como à redução das seções dos elementos estruturais e consequentemente a redução do peso próprio da estrutura, alívio das fundações devido ao menor peso da estrutura e uma menor deteriorização da estrutura pela ação dos agentes agressivos. Portanto, sua utilização apresenta-se uma solução vantajosa do ponto de vista técnico como econômico frente às diversidades do mercado da construção e do meio ambiente cada vez mais agressivo.

Estudos demonstram que devido ao seu elevado módulo de rigidez, o CAD apresenta um menor estado de fissuração no seu limite de ruptura, ou seja, antes de se romper apresenta poucos sinais de ruptura, esse número de fissuras é bem menor em relação aos concretos convencionais (BORGES, 2002). Os principais estudos das aplicações estão relacionados aos pilares de edifícios, por conta do seu ganho de área útil em face das reduções das seções dos pilares. Em razão do comportamento frágil, pesquisadores tem estudado mecanismos que possam trazer maior ductilidade aos elementos estruturais.

Apesar da crescente aplicação do CAD nas estruturas das edificações e dos estudos do comportamento dos elementos estruturais, pouco se tem estudado sobre o desempenho em vigas de concreto armado. A maioria das pesquisas tem como foco principal o comportamento dos pilares devido a sua alta resistência a compressão, sendo que as vigas e as lajes apresentam grandes vantagens, como maior rigidez da estrutura e possibilidade de vencer maiores vãos. Em virtude da sua utilização em estruturas de concreto armado é de suma importância o estudo do comportamento das vigas. Portanto, em consequência da fragilidade e da ruptura brusca são necessários, maiores investigações sobre o comportamento em vigas.

Em razão da baixa ductilidade e da alta rigidez do CAD, é de fundamental importância obter parâmetros que possam auxiliar os projetistas no dimensionamento das estruturas. No dimensionamento das vigas de concreto de alto desempenho procura-se identificar em que situações sua aplicação é tecnicamente mais vantajosa em relação ao uso dos concretos convencionais.

3 OBJETIVOS

3.1 Gerais

Estudar a aplicação do concreto de alto desempenho em vigas de concreto armado com a variação de sua resistência característica e de suas dimensões, de modo a obter coeficientes que auxiliem no dimensionamento de estruturas executadas com CAD.

3.2 Específicos

- ✓ Obter coeficientes adimensionais para o dimensionamento das vigas de concreto de alto desempenho de acordo com as recomendações NBR 6118 (2014);
- ✓ Estudo analítico do comportamento das vigas de concreto de alto desempenho segundo, a NBR 6118 (2014);
- ✓ Estudo experimental do comportamento das vigas de concreto de alto desempenho;
- ✓ Confrontar os dados experimentais (Hoffman e Silva, 2013) com dados do dimensionamento analíticos;
- ✓ Analisar a correlação da profundidade da linha neutra com o momento fletor resistente da viga;
- ✓ Determinar a curvatura (φ) teórica da seção transversal em função da profundidade da linha neutra;
- ✓ Obter a flecha em função do momento fletor.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Definições

4.1.1 Definição de Concreto de Alto Desempenho

O concreto de alto desempenho é fruto de um processo rigoroso de produção, que começa desde a seleção dos materiais a serem utilizados ao sistema tecnológico da central de dosagem do concreto. O melhoramento do concreto convencional se deu pelo desenvolvimento do processo produtivo e pela aplicação de aditivos plastificantes e de finos na massa de concreto, proporcionando um ganho de resistência devido a modificação na sua microestrutura. Os finos têm as funções de reduzir a porosidade e aumentar a impermeabilidade do concreto, já os aditivos plastificantes tem a função de dar maior trabalhabilidade a massa de concreto, possibilitando reduzir a relação água/cimento.

O concreto de alto desempenho deve ser entendido como um material, cientificamente produzido, que atende às expectativas do cliente do ponto de vista estrutural, da estética, de durabilidade frente ao meio ambiente atual e futuro, para fins pré-determinados. Deve ser econômico (custo/benefício) e propiciar vantagens frente a outras alternativas tecnológicas, (TORRICO, 2010 *APUD* LIBORIO, 2005).

O concreto de alto desempenho é resultado de um processo de desenvolvimento tecnológico dos concretos convencionais ao longo das últimas décadas, ou seja, o CAD nada mais é do que um concreto convencional modificado pela adição de alguns aditivos e finos que tem como objetivo melhoramento das propriedades da massa de concreto no estado fresco e/ou endurecido, atendendo às expectativas do desempenho desejado, esse desempenho pode ser um concreto alto adensável, de alta resistência, de alta durabilidade ou outra característica que se deseje alcançar.

O concreto de alto desempenho apresenta inúmeras vantagens em comparação aos concretos convencionais, mas apesar de todos os benefícios apresentado pelos, sua utilização deve ter um maior cuidado em relação ao concreto convencional devido as alterações de suas propriedades mecânicas, com o aumento da resistência e da rigidez a uma mudança no módulo de elasticidade do concreto o tornando mais frágil, assim, havendo uma ruptura mais brusca dos elementos estruturais. Como desvantagens pode-se citar o comportamento mais frágil do

material, o processo rigoroso de produção, necessidade de maior cuidado com o procedimento de cura do concreto, maior custo econômico e poucos sinais do estado limite último (BORGES, 2002).

4.1.2 Definição de Concreto de Alta Resistência

Concreto de Alta Resistência (CAR) é um tipo de Concreto de Alto Desempenho de elevada resistência mecânica, apresentando como características uma baixa relação água/cimento, baixa porosidade, maior durabilidade, alto módulo de elasticidade e alta resistência à compressão com f_{ck} maior que 50 MPa (NBR 6118 (2014)). Na produção de CAR é necessário ter um alto controle dos materiais a serem utilizados, assim, garantindo um ganho de resistência em relação ao concreto convencional, com isso, os agregados devem ter uma ótima qualidade para que possam diminuir a fragilidade da interface agregado/pasta de concreto. Deve-se utilizar um superplastificante para melhorar a trabalhabilidade e consequentemente uma redução da relação água/cimento e a incorporação de finos diminuindo a porosidade do concreto. A norma brasileira ABNT NBR-8953:2015, classifica como concreto de alta resistência os concretos que possuem resistência característica entre 55 MPa e 100 MPa.

4.2 Principais Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho

4.2.1 Propriedades no Estado Fresco

O desempenho das propriedades do concreto no estado endurecido como resistência, estabilidade e durabilidade são bastante influenciados pelo bom desempenho do concreto no estado fresco, assim, é de extrema importância que a massa de concreto possua uma boa trabalhabilidade, coesão adequada, baixa segregação, baixa exsudação e boa consistência.

Trabalhabilidade pode ser entendido como a capacidade do concreto ser bombeado e adensado com o menor consumo de energia possível para vencer o atrito superficial entre o concreto e o mangote de bombeamento e as fôrmas ou as armaduras. A trabalhabilidade é uma propriedade que está ligada a fluidez da massa de concreto, quanto mais fluida for a massa mais trabalhável ela será, para que o CAD possua boa trabalhabilidade com uma baixa relação água/cimento é necessário a utilização de aditivos plastificantes.

Coesão é essencialmente a capacidade do concreto de manter-se homogêneo sem que ocorra a segregação dos componentes da massa de concreto durante o processo de adensamento. A coesão está diretamente ligada a quantidade de finos e a granulometria dos agregados e suas proporções presentes na mistura do concreto.

Exsudação é uma forma de segregação na qual parte da água da mistura tende a migrar para a superfície do concreto recém-lançado. A ocorrência da exsudação na massa do concreto está ligada ao excesso de água e ou a incapacidade dos constituintes sólidos da mistura de reter toda água de amassamento quando eles se assentam em direção do fundo.

Consistência é a capacidade da massa de concreto ao ser deformada manter-se no estado deformado. Ela pode ser entendida como a relação entre água/materiais secos da massa, ou seja, está relacionado com a mobilidade da massa e da coesão entre seus componentes. A consistência está ligada ao grau de umidade da mistura, pois, quanto maior a quantidade de água no concreto mais esse é trabalhável, no entanto concreto de mesma consistência podem possuir trabalhabilidade diferentes (Pereira, 2016).

4.2.2 Propriedades no Estado Endurecido

As principais propriedades do concreto no estado endurecido são a resistência mecânica, a durabilidade e a permeabilidade, assim para se ter o bom desempenho dessas propriedades é necessário uma adequada escolha e dosagem dos materiais.

A resistência mecânica é muitas vezes considerada a propriedade mais importante do concreto, normalmente dá uma ideia geral de qualidade do concreto por estar ligada à estrutura da pasta de cimento. Resistência mecânica é a capacidade do concreto endurecido de absorver os esforços solicitantes sem que ocorra fissuras excessivas na estrutura ou entre em colapso. A resistência do concreto está ligada tanto a porosidade quanto a fragilidade da interface agregado/pasta de cimento, os poros podem ser considerados como pontos de diminuição de resistência e a interface agregado/pasta como falhas na estrutura do concreto onde ocorrem micro-fissuração (BORGES, 2002).

A permeabilidade é a facilidade com que líquidos ou gases conseguem se movimentar através do concreto, essa propriedade está ligada diretamente ao número de poros existentes no concreto, esses poros tornam-se vias de acesso dos agentes químicos do ambiente externo as armaduras do concreto provocando sua corrosão. Os poros são falhas na microestrutura do

concreto, essas falhas são provocadas pelo excesso de água na mistura da massa que após a evaporação acaba deixando vazios, erros no processo de adensamento do concreto que acabam provocando o acúmulo de ar ou a segregação dos componentes da massa de concreto e vazios provocados pelo processo errôneo da cura do concreto.

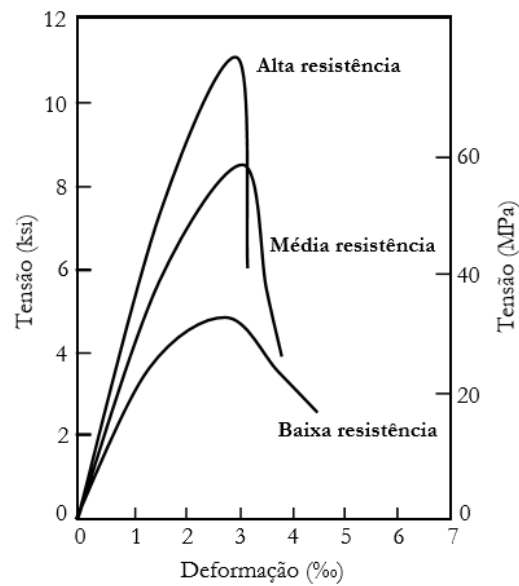
A durabilidade é uma das principais propriedades do concreto senão a mais importante, pois é essencial que o concreto seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida útil da estrutura. A falta de durabilidade pode ocasionar uma estrutura dispendiosa e ineficiente ao longo de sua vida útil. A durabilidade do concreto está relacionada desde as escolhas dos materiais até a cura do concreto, pois ela está ligada ao número de poros. A inadequada escolha e dosagem dos materiais pode ocasionar em um concreto poroso e alta reação com agentes agressivos.

4.2.3 Propriedades de Desempenho Mecânico

Diagrama tensão x deformação

O CAD apresenta uma maior resistência e rigidez em relação ao concreto convencional, com isso, há um aumento do seu módulo de elasticidade, tornando-o mais frágil. Através da análise do diagrama tensão-deformação na figura 1, é possível perceber o comportamento de maior linearidade em relação ao concreto convencional, fazendo com que o módulo de deformação secante do concreto (E_{cs}) se aproxime do módulo de deformação tangente inicial do concreto (E_{ci}) NBR 6118 (2014). Assim, verifica-se que o concreto de alto desempenho possui uma menor deformação comparada a concretos de baixa resistência, como mostrado na figura 1.

Figura 1-Diagrama tensão-deformação do concreto

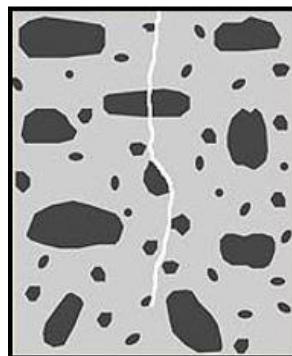


Fonte: Borges 2002, apud Carrasquillo et al, 1981b

Interface Agregado e Argamassa

Nos concretos convencionais a zona da interface agregado/argamassa é uma região de fragilidade, pois nessa região há um grande número de vazios e concentração de partículas de água, assim, a ruptura do concreto ocorre nesta zona de fragilidade. No CAD, devido as adições de finos e aditivos superplastificantes há uma redução dos números de vazios e do acúmulo de partículas de água zona da interface agregado/argamassa, com isso, sua ruptura não ocorre contornando o agregado, mas sim uma ruptura laminar, isso ocorre porque a argamassa é tão ou mais resistente que o agregado, assim a ruptura pode até ser iniciada pela fissuração do agregado, conforme mostrado na figura 2 (BORGES, 2002).

Figura 2-Trajatória de fraturamento no concreto de alto desempenho



Fonte: Borges, 2002

Resistência a Compressão

A resistência à compressão do concreto é o principal parâmetro utilizados na elaboração de projeto de estruturas de concreto armado. As outras propriedades do concreto tais como módulo de elasticidade, resistência a tração e a relação tensão deformação podem ser obtidos através de correlações com a resistência a compressão do concreto. A NBR 6118 (2014) determina que no dimensionamento de vigas de concreto convencional deve-se considerar uma deformação limite de $\varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$ e nos concretos com resistência a partir de 55 MPa a 90 MPa é dada pela relação:

$$\varepsilon_{cu} = 2,6 \text{ ‰} + 35 \text{ ‰} \cdot [(90 - f_{ck}) / 100]^4 \quad (1)$$

A variação da deformação dos concretos de alta resistência está relacionada ao aumento do módulo de rigidez.

4.3 Composição do Concreto de Alto Desempenho

O CAD é um concreto convencional modificado pela adição de finos, de aditivos superplastificantes, por processo rigoroso de selecionamento de todos os seus componentes e pelo processo rígido que vai de dosagem até a cura do concreto. A qualidade dos materiais utilizados é de extrema importância na obtenção de suas propriedades do concreto fresco e endurecido.

4.3.1 Materiais utilizados

Aglomerante: Cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que em contato com a água hidrata-se produzindo uma reação exotérmica e posteriormente o seu endurecimento. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais. O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland (Neville e Books, 2013).

Reagente Hidráulico: A água é o reagente de hidratação do concreto, essencial para que todas as reações físico-químicas na formação do concreto tendo duas funções básicas, uma é dar trabalhabilidade a massa de concreto e a outra como reagente de hidratação do cimento Portland. A água deve apresentar os mesmos requisitos de qualidade exigidos dos concretos convencionais. (Neville e Books, 2013).

Agregado: Agregados são aproximadamente 3/4 do volume de concreto, com isso, sua qualidade é de grande importância para as propriedades do concreto, eles não só limitam a resistência do concreto, como também afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. Os agregados não são materiais inertes, ou seja, suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes químicas influenciam no desempenho do concreto, por exemplo, melhorando sua estabilidade dimensional e durabilidade em relação a pasta de cimento (Neville/ Books, 2013).

Agregado miúdo: A escolha do agregado miúdo é de extrema importância na obtenção das propriedades do concreto, o agregado miúdo mais utilizado é areia natural e essa deve possuir granulometria uniforme e suas partículas os mais arredondados possível, de modo a consumir menor quantidade de água.

Agregado Graúdo: A escolha do agregado graúdo é de extrema importância na obtenção das propriedades de resistência e durabilidade no concreto, tendo em vista a interface agregado-pasta que é uma zona de fragilidade na transição do agregado com massa de cimento, assim, para diminuir a fragilidade da interface agregado-pasta na concretagem do CAD, é aconselhável a utilização de brita zero, que possui uma menor área superficial de contato consequentemente reduzindo a zona de transição.

Adição de Finos: os finos têm as funções de reduzir a porosidade e aumentar a impermeabilidade do concreto. Tendo em vista a redução dos impactos ambientais e a obtenção de novas alternativas de fontes de materiais economicamente viáveis, pesquisadores têm utilizado nos últimos anos o CAD com aditivos finos de materiais alternativos com propriedades pozolânicas, como por exemplo, cinza de casca de arroz, cinza da palha de cana-de-açúcar, sílica ativa, metacaulim e escoria de alto forno.

Aditivos Superplastificantes: os aditivos plastificantes são utilizados com o propósito de se obter um concreto com melhor desempenho em relação ao concreto convencional, atendendo as necessidades da indústria da construção civil na obtenção de concretos de maior resistência e durabilidade. Os principais componentes desses aditivos são os agentes tensoativos que alteram as forças físico-químicas nas interfaces imiscíveis da massa de concreto, esses agentes são adsorvidos pelas partículas de cimento, dando a ela cargas negativas, causando repulsão, assim, liberando as partículas de água aprisionada no sistema de floculado, tornando-as disponíveis para lubrificar a mistura e aumentar a trabalhabilidade da massa de concreto.

4.3.2 Dosagem

O concreto de alta resistência apresenta grandes vantagens em relação ao concreto convencional, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, mas para isso é necessário o máximo aproveitamento das propriedades do concreto, com isso, é necessário a ideal proporcionalidade dos materiais, através da adoção de métodos específicos de dosagem de concretos de alta resistência.

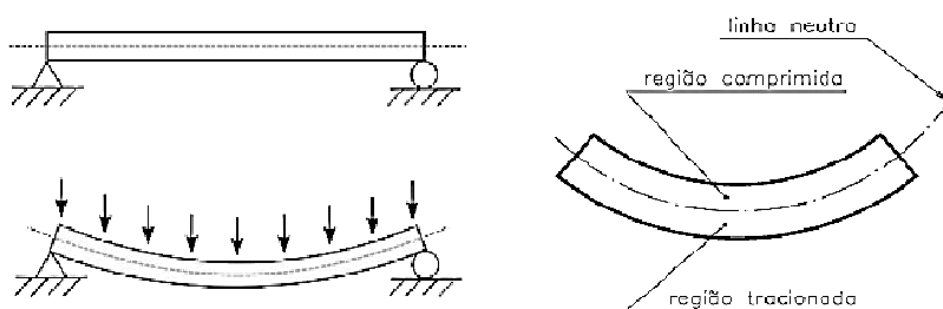
Dosagem é o processo de determinação da combinação correta dos materiais componentes que irão produzir um concreto com as características desejadas e com o menor custo possível. Os métodos de dosagem de concretos convencionais não são adequados no desenvolvimento de concretos de alto desempenho, já que não consideram a utilização de

parâmetros que são essenciais para a dosagem de concreto de alta resistência, como, baixa relações água/cimento, utilização de materiais finos e aditivos superplastificantes, ocasionando consumos excessivos de cimento sem ganho de resistência. Assim, no desenvolvimento de concreto de alto desempenho é essencial a escolha de materiais de boa qualidade, selecionados na localidade os melhores disponíveis e utilizando um método de dosagem que possibilite a devida proporcionalidade dos materiais na obtenção do concreto de alta resistência.

4.4 Comportamento das Estrutura de Concreto Armado

O concreto é um material que resiste bem aos esforços de compressão, mas por ser um material frágil resiste pouco aos esforços de tração, embora este tipo de solicitação esteja quase sempre presente nas estruturas das construções usuais. Um exemplo clássico é a viga fletida em que uma seção transversal está submetida aos esforços de tração e compressão ao mesmo tempo, conforme mostra a figura 3, os esforços de tração geram fissuras na parte inferior da viga fazendo com que sua resistente seja pequena, com isso, é necessário a utilização do aço para resistir aos esforços de tração atuantes na estrutura, assim aumentando a resistência da viga. Portanto, a estrutura de concreto armado é obtida pela união da massa de concreto com a armação de aço, de maneira que os dois materiais trabalhem solidariamente se comportando como material estrutural, isso é possível graças as forças de aderência existente entre as superfícies do concreto e do aço.

Figura 3-Viga fletida

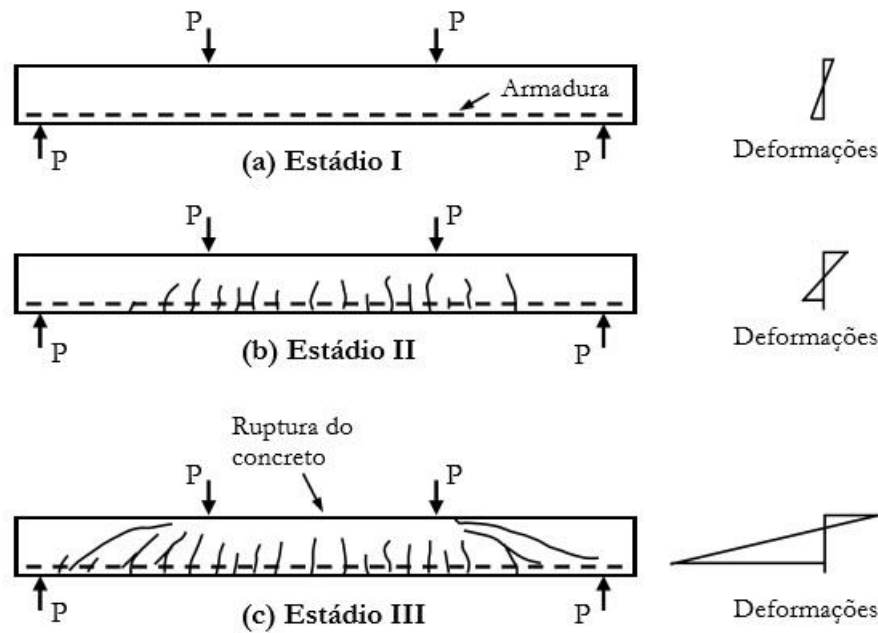


Fonte: Autor 2017

Pode-se caracterizar as estruturas de concreto armado em três estádio de deformação de uma viga na flexão normal simples, sendo a linha neutra a região onde as tensões de compressão e tração são nulas. O estágio I (estado elástico) onde as tensões de tração não ultrapassam sua resistência característica do concreto à tração, o estágio II (estado de fissuração) onde as tensões de tração na maioria dos pontos abaixo da linha neutra terão valores superiores ao da resistência

característica do concreto à tração e o estágio III onde a peça está bastante fissurada, com as fissuras se aproximando da linha neutra, fazendo com que sua profundidade diminua e, conseqüentemente, redução da região de concreto comprimido. Os estádios I e II, correspondem às situações de serviço, enquanto o estágio III corresponde ao estado limite último, conforme mostra a figura 4.

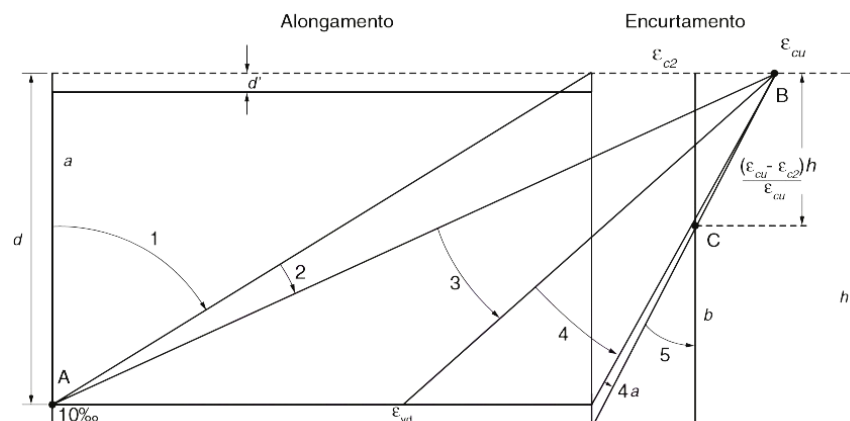
Figura 4-Fissuras de deformação em uma viga fletida



Fonte: Borges 2002

O estado-limite último é caracterizado pelos diversos casos possíveis de distribuição das deformações do concreto e do aço na seção transversal definem os domínios de deformação, conforme mostrado na figura 4, NBR 6118 (2014).

Figura 5-Domínios de estado-limite último de uma seção transversal



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Ruptura convencional por deformação plástica excessiva:

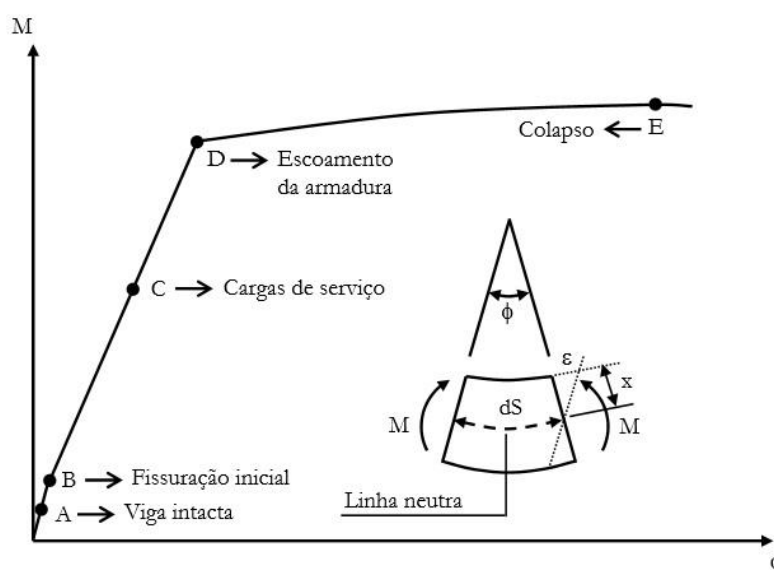
- Reta a: tração uniforme;
- Domínio 1: tração não uniforme, sem compressão;
- Domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto ($\epsilon_c < \epsilon_{cu}$ e com o máximo alongamento permitido).

Ruptura convencional por encurtamento-limite do concreto:

- Domínio 3: flexão simples (seção subarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço ($\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$);
- Domínio 4: flexão simples (seção superarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e aço tracionado sem escoamento ($\epsilon_s < \epsilon_{yd}$);
- Domínio 4a: flexão composta com armaduras comprimidas;
- Domínio 5: compressão não uniforme, sem tração;
- Reta b: compressão uniforme.

As deformações podem ser utilizadas para calcular a curvatura ϕ da seção transversal do meio do vão para cada estágio de carregamento, definida como a mudança de ângulo sobre um determinado comprimento pela expressão $\phi = \epsilon/x$, conforme mostra a figura 6 onde ϵ é a deformação da fibra mais comprimida e x é a altura da linha neutra, (BORGES, 2002).

Figura 6-diagrama momento curvatura



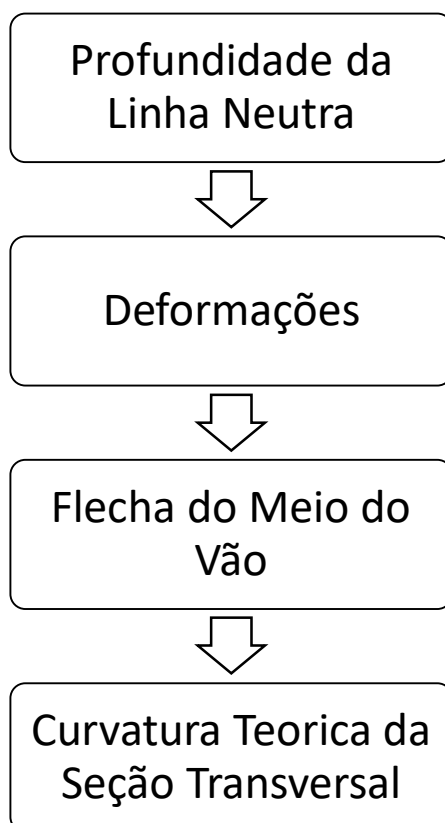
Fonte: Borges 2002

5 METODOLOGIA

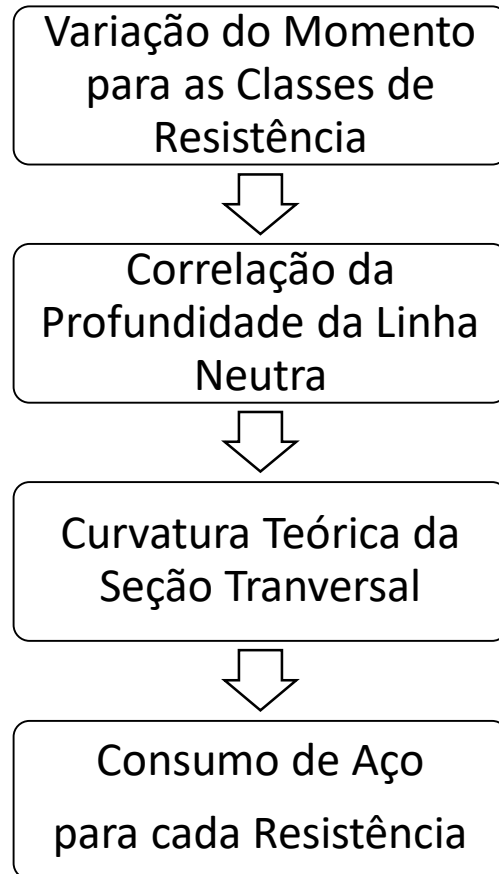
No desenvolvimento da análise de dimensionamento de vigas de concreto de alto desempenho, foram realizados estudos analíticos comparando-os com dados experimentais. Em virtude das limitações impostas pela falta de estrutura para realizar a modelagem experimental, foram utilizados dados experimentais de (Hoffman e Silva, 2013). O estudo analítico foi realizado segundo as recomendações da norma da ABNT NBR 6118 (2014). Para auxiliar no dimensionamento das vigas de CAD foram desenvolvidas em acordo com a norma, tabelas adimensionais do momento resistente, da relação da linha neutra com a altura útil da seção transversal da viga e da relação do braço de alavanca do momento resistente com a altura útil da seção transversal da viga.

Os parâmetros observados no dimensionamento foram as variações da resistência do concreto e das dimensões das vigas, onde foram realizados três estudos de caso.

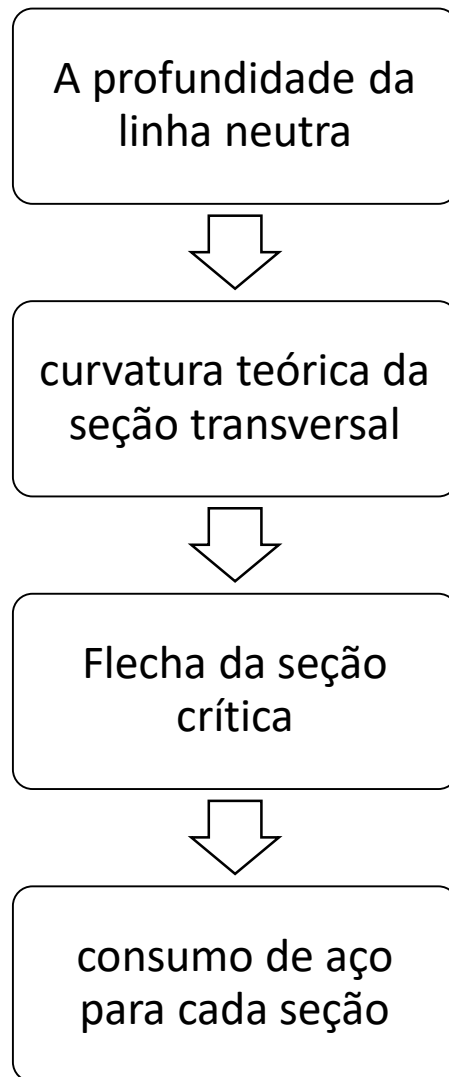
No primeiro caso foi realizado uma análise comparativa dos resultados das vigas ensaiadas por (Hoffman e Silva 2013), com os dados do dimensionamento analítico da NBR 6118 (2014) utilizando os dados experimentais dessas vigas. Onde foram realizadas as seguintes análises do comportamento das vigas em função da variação do momento solicitante:



No segundo caso foi realizado uma aplicação teórica do dimensionamento vigas de concreto de alto desempenho pelo método analítico, nessa aplicação foram dimensionadas vigas de seção retangular (15x30cm) com a variação da resistência a cada 5MPa das classes C55 à C90. Foram observados no dimensionamento os seguintes parâmetros:



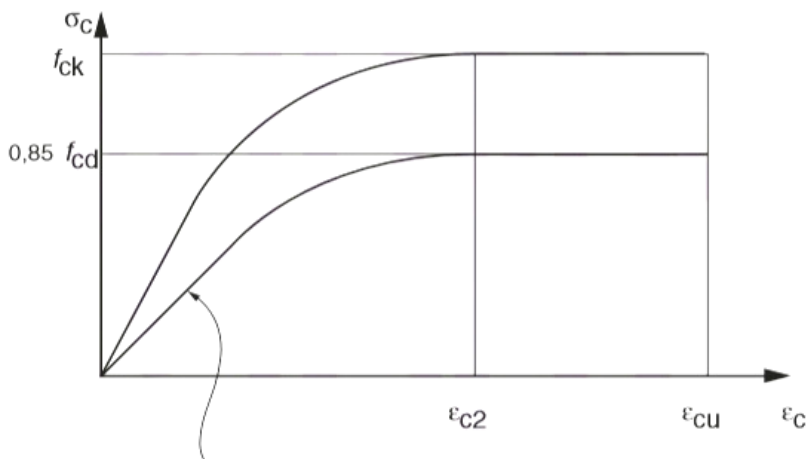
O desempenho estrutural das vigas de concreto armado não está apenas relacionado com a resistência à compressão, com isso, no terceiro estudo de caso busca-se analisar a influência das dimensões das vigas em relação ao desempenho do CAD. Dessa forma, no dimensionamento das vigas de concreto armado foram variadas as dimensões da seção transversal mantendo-se a resistência do concreto com 80 MPa.



6 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS COM CAD À FLEXÃO SIMPLES- NBR 6118 (2014)

No dimensionamento de vigas de concreto de alto desempenho a NBR 6118 (2014) determina que para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas, a posição da linha neutra no estado limite último deve obedecer ao seguinte limite de $x/d \leq 0,35$, para concretos das classes C55 à C90. Para analisar o comportamento do concreto no estado-limite último, pode ser empregado o diagrama de tensão-deformação idealizado, mostrado na figura 7, sendo que a distribuição de tensões no concreto pode ser feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo.

Figura 7- Diagrama tensão-deformação idealizado.



$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

Para $f_{ck} \leq 50$ MPa: $n=2$
 Para $f_{ck} > 50$ MPa:
 $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Para dimensionar a viga, admite-se que a seção transversal permanece plana após o início da deformação até o estado limite último, sendo que as deformações em cada ponto, são proporcionais à distância até a da linha neutra da seção. A ruína da seção transversal, para qualquer tipo de flexão no estado limite último, fica caracterizado pelas deformações específicas do concreto e do aço, conforme mostrado na figura 5 (CARVALHO, 2007).

Conforme a NBR 6118 (2014), os valores a serem adotados para as deformações do concreto são, os parâmetros ϵ_{c2} (deformação específica de encurtamento do concreto no início

do patamar plástico) e ε_{cu} (deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura) que são definidos para concretos de classes C55 até C90, da seguinte forma:

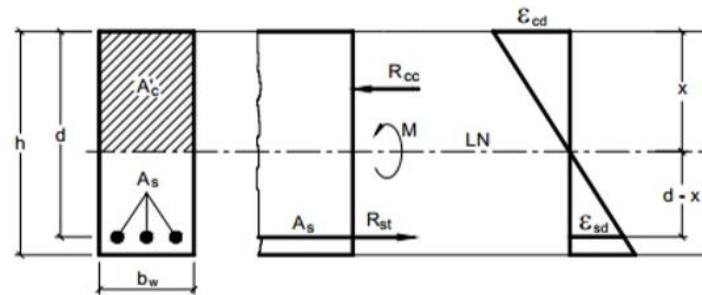
$$\varepsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 35\text{‰} \cdot [(90 - f_{ck})/100]^4 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{c2} = 2,0 \text{‰} + 0,085\text{‰} \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (2)$$

Para o aço o alongamento máximo permitido ao longo da armadura tracionada é de $\varepsilon_s = 10\text{‰}$, para prevenir deformações plásticas excessivas.

Com as deformações teóricas do concreto e do aço ao longo da altura da seção transversal, conforme mostra a figura 8, é possível definir a profundidade da linha neutra da seção através da relação da semelhança de triângulos.

Figura 8-Deformação da Seção Transversal



Fonte: Adaptação de Brusco.

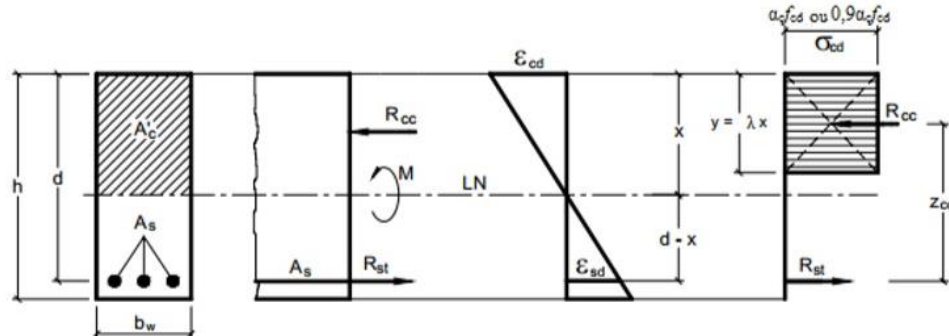
$$\frac{x}{\varepsilon_c} = \frac{d}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \Rightarrow x = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \right) \cdot d \quad (3)$$

No diagrama de tensão-deformação idealizado, a parábola pode ser substituída, pelo retângulo de profundidade $y = \lambda x$, mostrado na figura 9, o valor do parâmetro λ pode ser tomado igual a:

$$\lambda = 0,8 - [(f_{ck} - 50)/400], \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (4)$$

Onde λ é o parâmetro que diminuir a magnitude de redução da posição da linha neutra com o aumento da resistência do concreto.

Figura 9-Diagrama Tensão-Deformação Parábola



Fonte: BRUSCO.

Onde a tensão constante atuante até a profundidade y pode ser tomada igual a: $\alpha_c \cdot f_{cd}$, no caso da largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não diminuir a partir desta para a borda comprimida, conforme mostra a figura 9. Para concretos de classes de C55 até C90, o valor do parâmetro α_c pode ser tomado igual a:

$$\alpha_c = 0,85 \cdot [1,0 - (f_{CK} - 50)/200] \quad (5)$$

Onde α_c é o parâmetro que aumentar a redução da tensão resistente de cálculo com o aumento da resistência do concreto.

O cálculo da quantidade da armadura longitudinal para seção transversal retangular é realizado com o equilíbrio dos esforços da seção transversal, onde a força atuante no concreto (R_{cc}) deve ser igual a força atuante no aço (R_{st}), figura 9.

$$R_{cc} = R_{st} \quad (6)$$

E o momento das forças internas em relação a qualquer ponto deve ser igual ao momento externo de cálculo, M_d (CARVALHO, 2007).

$$M_d = R_{cc} \cdot Z_{cc} \quad (7)$$

$$M_d = R_{st} \cdot Z_{cc} \quad (8)$$

Conhecendo a posição da linha neutra da seção é possível determinar o domínio onde a seção está trabalhando, conforme mostra a figura 5, e calcular a resultante das forças de compressão no concreto pela equação 9 e do braço de alavanca (Z_{cc}) pela equação 10, conforme mostra figura 7.

$$R_{cc} = (\alpha_c \cdot f_{cd}) \cdot (b_w \cdot \lambda \cdot x) \quad (9)$$

$$Z_{cc} = d - 0,5 \cdot \lambda \cdot x \quad (10)$$

É possível obter a área de aço necessária de armadura (A_s) da seção transversal pela igualdade $R_{st} \cdot Z_{cc} = M_d$, onde a força do aço atuante na seção pode ser substituída por $R_{st} = f_{yd} \cdot A_s$, isolando a área de aço obtém-se que a área de aço da armadura da seção transversal é dada por:

$$A_s = M_d / (f_{yd} \cdot Z_{cc}) \quad (11)$$

Para obter as fórmulas adimensionais para o dimensionamento de seções retangulares é necessário substituir na equação 7 a expressão da força dada pela equação 9 e seu braço de alavanca dado pela equação 10, assim temos:

$$M_d = R_{cc} \cdot Z_{cc} = (\alpha_c \cdot f_{cd}) \cdot (bw \cdot \lambda \cdot x) \cdot (d - 0,5 \cdot \lambda \cdot x) = f_{cd} \cdot bw (\alpha_c \cdot \lambda \cdot d \cdot x - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot x^2) \quad (12)$$

Dividindo toda a equação 12 pela expressão $f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2$, temos que

$$\frac{M_d}{f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot \frac{x}{d} - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \frac{\lambda^2 x^2}{d^2} \quad (13)$$

E substituindo x/d por K_x e $M_d / (f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2)$ por K_M , logo temos que:

$$K_M = \alpha_c \cdot \lambda \cdot K_x - 0,5 \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot K_x^2 \quad (14)$$

Sendo K_x a relação da profundidade da linha neutra com a altura útil da seção. Dividindo a equação 10, por d temos:

$$\frac{Z_{cc}}{d} = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot kx \quad (15)$$

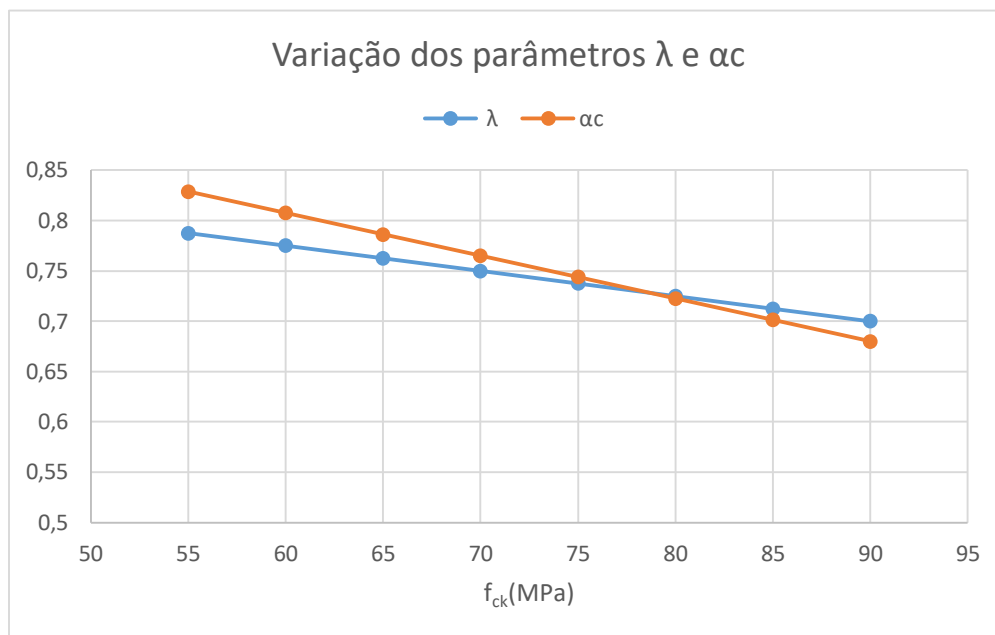
E substituindo Z_{cc}/d por K_Z temos a equação adimensional do braço de alavanca:

$$K_Z = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot kx \quad (16)$$

Com os valores das deformações do concreto e do aço na seção transversal e dos parâmetros λ e α_c , pode-se obter tabelas de coeficientes adimensionais para o dimensionamento de uma seção retangular que estão no apêndice A. Em virtude da variação dos parâmetros λ e α_c em função da resistência característica do concreto para as classes C55 à C90, conforme mostra figura 10, é necessária uma tabela para cada resistência, assim, foi desenvolvido uma

tabela para cada resistência com intervalos de 5MPa a partir da classe C55 até a C90 (ver apêndice A). Para auxiliar no desenvolvimento das tabelas adimensionais e obter parâmetros do limite entre os domínios 2 e 3 e do limite de ductilidade ($x/d \leq 0,35$) das vigas foi construída a tabela 1 com o limite de ductilidade estabelecido pela NBR 6118 (2014).

Figura 10- Parâmetros λ e α_c



Fonte: Autor 2017

Tabela 1- Limite de Ductilidade Estabelecido Pela NBR6118/2014.

f_{ck} (MPa)	ϵ_{cu} (‰)	λ	α_c	KX_{2-3}	KZ_{2-3}	KM_{2-3}	KX_{LIM}	KZ_{LIM}	KM_{LIM}	ϵ_s LIM (‰)
55	3,125	0,788	0,829	0,238	0,906	0,141	0,35	0,862	0,197	5,804
60	2,884	0,775	0,808	0,224	0,913	0,128	0,35	0,864	0,189	5,355
65	2,737	0,763	0,786	0,215	0,918	0,118	0,35	0,867	0,182	5,082
70	2,656	0,750	0,765	0,210	0,921	0,111	0,35	0,869	0,174	4,933
75	2,618	0,738	0,744	0,207	0,923	0,105	0,35	0,871	0,167	4,861
80	2,604	0,725	0,723	0,207	0,925	0,100	0,35	0,873	0,160	4,835
85	2,600	0,713	0,701	0,206	0,926	0,096	0,35	0,875	0,153	4,829
90	2,600	0,700	0,680	0,206	0,928	0,091	0,35	0,878	0,146	4,829

Fonte: Autor (2017)

Na verificação da flecha no estado-limite de deformação foi utilizado o modelo estabelecido na NBR 6118 (2014) para a deformação da estrutura, mais propriamente deslocamentos em elementos estruturais lineares, analisados isoladamente conforme a NBR

6118 (2014), as verificações foram realizadas através de modelos que consideram a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto e as deformações diferidas no tempo.

A deformação real da estrutura depende também do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais (principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração) no momento de sua efetiva solicitação. Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos prescritos (NBR 6118, 2014).

De acordo com a NBR 6118 (2014), o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522 (2008), sendo considerado nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade. Quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando as expressões a seguir:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa.} \quad (17)$$

E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa) e α_E parâmetro em função da natureza do agregado. O módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522 (2008), ou estimado pela expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (18)$$

Sendo

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (19)$$

A NBR 6118 (2014) fornece uma tabela, cujos valores estão apresentados na tabela 2, com os valores arredondados que podem ser usados no projeto estrutural.

Tabela 2 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).

F_{ck} (MPa)	55	60	65	70	75	80	85	90
E_{ci} (GPa)	40,632	41,611	42,547	43,443	44,303	45,132	45,931	46,703
E_{cs} (GPa)	38,092	39,530	40,951	42,357	43,749	45,132	45,931	46,703
α_i	0,937	0,95	0,962	0,975	0,987	1	1	1

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal, pode ser adotado módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de deformação secante E_{cs} . Na avaliação aproximada da flecha em vigas a NBR 6118 (2014) determina que o modelo de comportamento da estrutura pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico e linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no estágio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, e no estágio II, em caso contrário. Deve ser utilizado no cálculo o valor do módulo de elasticidade secante E_{cs} , sendo obrigatória a consideração do efeito da fluência.

No cálculo da flecha imediata em vigas de concreto armado utiliza-se a expressão de rigidez equivalente dada a seguir, (NBR 6118, 2014):

$$(EI)_{eq, t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M} \right)^3 \right] \cdot I_2 \right\} \leq E_{cs} \cdot I_c \quad (20)$$

Onde

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_2 é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha_e = E_s/E_{cs}$;

M é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, ou seja, o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

Nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre essas duas partes é definida pelo momento de

fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada, (NBR 6118, 2014).

$$Mr = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (21)$$

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, para seções Retangulares $\alpha = 1,5$.

A resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$, ou, na falta de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, pode ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das seguintes equações, (NBR 6118, 2014):

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{fct,m} \quad (22)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ct,m} \quad (23)$$

Para concretos de classes C55 até C90, (NBR 6118, 2014):

$$f_{ct,m} = 2,12 \cdot \ln \cdot (1 + 0,11 \cdot f_{ck}) \quad (24)$$

Onde

$f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em megapascal (MPa).

O momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II pode ser calculado pela equação 25, (CARVALHO, 2007).

$$I_2 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad (25)$$

Onde

b é a largura da seção transversal;

A_s é a área de aço da seção retangular;

d é a altura útil da seção retangular;

x é a profundidade da linha neutra.

A flecha pode ser calculada pela expressão a seguir, (CARVALHO, 2007):

$$a_i = \frac{5}{384} \cdot \frac{P \cdot l^4}{E \cdot I_{eq}} \quad (26)$$

Onde

a_i é a flecha no meio do vão

P é a carga atuante no vão

I_{eq} é a inercia equivalente

E é o módulo de elasticidade do concreto

A flecha diferida no tempo para vigas de concreto armado, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão, (NBR 6118, 2014):

$$\alpha_f = \Delta\xi / (1 + 50 \cdot \rho') \quad (27)$$

onde

$$\rho' = A_s' / bd$$

ξ é um coeficiente função do tempo, que pode ser obtido diretamente na tabela 3 ou ser calculado pelas expressões seguintes:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (28)$$

$$\xi(t) = 0,68 (0,996t)^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses}$$

Tabela 3-valores do coeficiente ξ em função do tempo

Tempo(t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Sendo:

t o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 a idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração. No caso de parcelas da carga de longa duração serem aplicadas em idades diferentes, pode-se tomar para t_0 o valor ponderado a seguir:

$$t_0 = \frac{\sum P_i \cdot t_{0i}}{\sum P_i} \quad (29)$$

Onde

P_i representa as parcelas de carga;

t_{0i} é a idade em que se aplicou cada parcela P_i , expressa em meses.

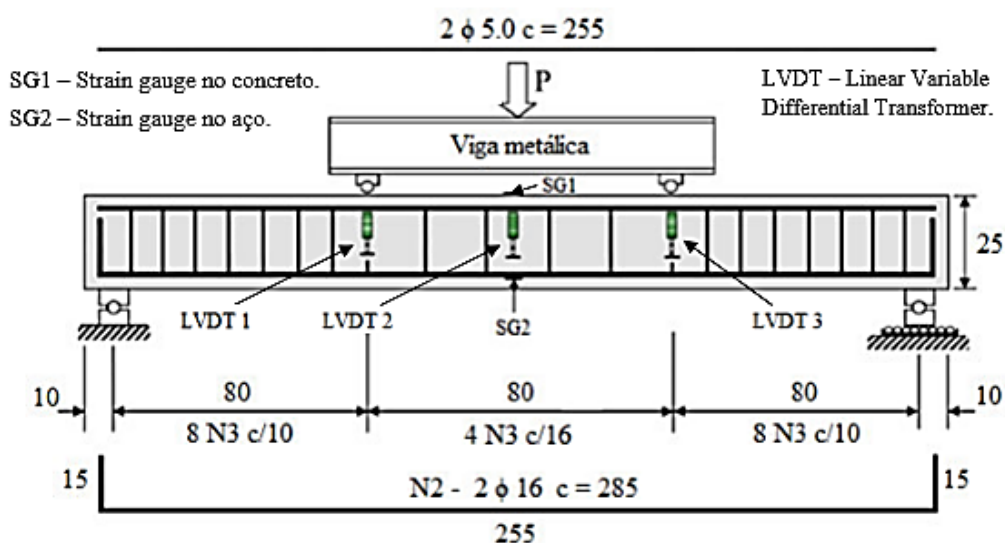
O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata por $(1 + \alpha_f)$.

7 ANÁLISE E RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

7.1 Comparativa do Método de Dimensionamento Analítico com dados Experimentais

Para analisar o método de dimensionamento proposto pela NBR 6118 (2014), para concretos de alto desempenho, foi realizada uma análise comparativa com os dados experimentais de HOFFMAN e SILVA (2013). Hoffman e Silva (2013) analisaram experimentalmente as deformações específicas de vigas confeccionadas com concretos de três classes de resistência: C30, C70 e C90. Foram dimensionadas nove vigas de seção retangular de 12cm x 25cm, sendo realizadas as leituras das deformações em três delas (V3, V6 e V9), através de STRAIN GAUGES (figura 11). Para realizar a análise comparativa foram utilizadas apenas as vigas de concreto de alto desempenho, a tabela 4 apresenta os dados das vigas ensaiadas por Hoffman.

Figura 11-Viga ensaiada por Hoffman e Silva



Fonte: Hoffman e Silva (2013).

Tabela 4- Dados experimentais.

Classe	Viga	f_{ck} (MPa)	M_u (KN·m)	d	A_s (cm ²)	$\epsilon_{cu}\%$	$\epsilon_s\%$	1/r (mm ⁻¹)
C90	V1	98,18	46,8	21,2	4,021	-	-	
	V2	89,7	46,6	21,2	4,021	-	-	
	V3	93,7	44,5	21,2	4,021	2,240	8	1,83E-05
C70	V4	72,6	43,6	21,2	4,021	-	-	
	V5	79,3	42,6	21,2	4,021	-	-	
	V6	71,8	43,4	21,2	4,021	2,460	7,8	1,95E-05

Fonte: adaptado de Hoffman e Silva (2013).

Com os dados das deformações do concreto e do aço das vigas ensaiadas por Hoffman e Silva (2013), é possível obter os valores dos coeficientes adimensionais pelo método do equilíbrio dos esforços da seção transversal. Assim, pode-se determinar a profundidade da linha neutra das vigas ensaiadas por Hoffman e Silva apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes adimensionais e da profundidade da linha neutra das vigas ensaiadas por Hoffman e Silva (2013).

	V6-C70	V3-C90
ϵ_{cu}	2,4600	2,2400
ϵ_s	7,8000	8,0000
d	21,2000	21,2000
x	5,0830	4,6375
A_s	4,0212	4,0212

Fonte: Autor (2017)

Para realizar dimensionamento das vigas pelo método analítico da NBR 6118 (2014), foram utilizados os valores das dimensões da seção da viga e do momento solicitante de Hoffman. Aplicando esses dados nas equações do método analítico foram obtidos os valores apresentados na tabela 6. Comparando os dados das tabelas 5 e 6, é possível constatar que os dados obtidos pelo método analítico são conservadores em comparação aos valores experimentais, pois as áreas de aço e as profundidades de linha neutra são maiores.

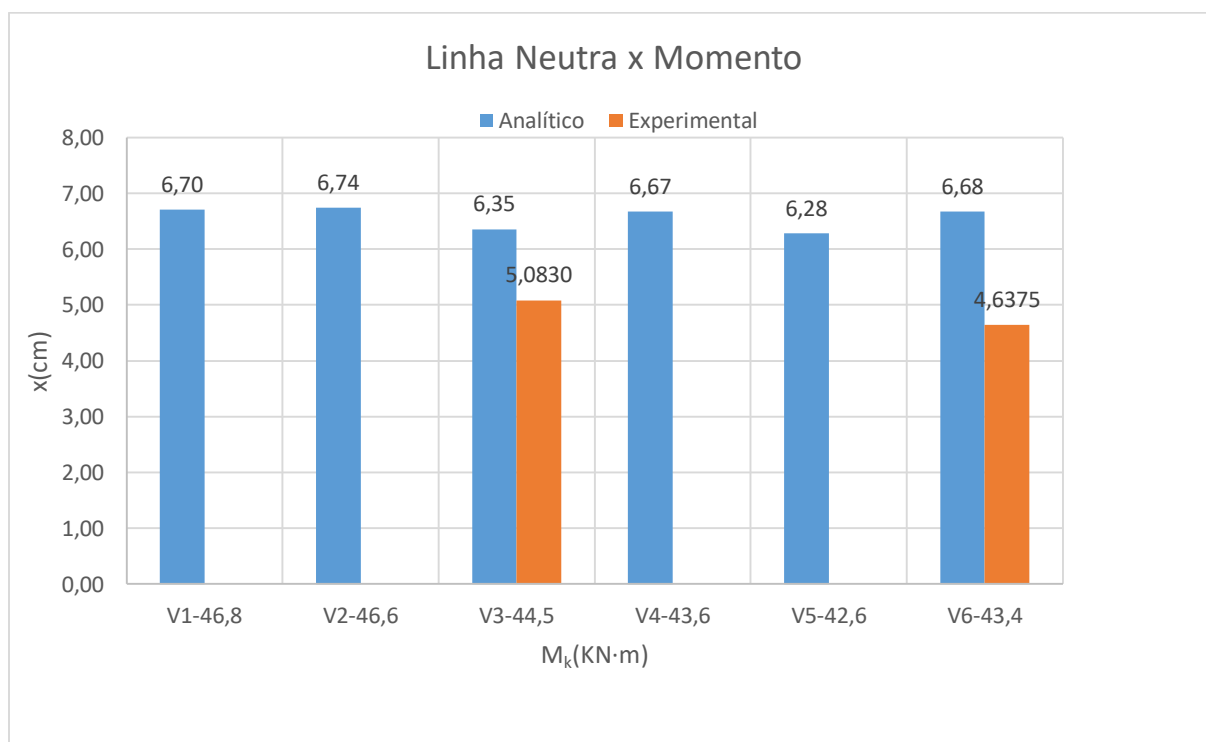
Tabela 6- Dimensionamento pelo método analítico da NBR 6118 (2014).

Viga	V1	V2	V3	V4	V5	V6
f_{ck} (MPa)	98,18	89,7	93,7	72,6	79,3	71,8
M_u (KN·m)	46,8	46,6	44,5	43,6	42,6	43,4
λ	0,67955	0,70075	0,69075	0,7435	0,72675	0,7455
α_c	0,645235	0,681275	0,664275	0,75395	0,725475	0,75735
KM	0,124	0,135	0,123	0,156	0,139	0,157
KX	0,316	0,318	0,300	0,315	0,296	0,315
KZ	0,893	0,889	0,896	0,883	0,892	0,883
d	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
x	6,703	6,739	6,354	6,678	6,284	6,675
A_s (cm ²)	5,688	5,689	5,385	5,358	5,180	5,335
$1/r$ (mm ⁻¹)	3,88E-05	3,86E-05	4,09E-05	3,94E-05	4,14E-05	3,95E-05

Fonte: Autor (2017)

Uma análise comparativa dos valores analíticos com os dados experimentais é apresentada na figura 12, que correlaciona a profundidade da linha neutra em função do momento último resistente da seção das vigas. Os resultados apresentados na figura 12, demonstram que as vigas experimentais apresentam uma menor deformação do concreto que os valores sugeridos pela NBR 6118 (2014).

Figura 12- Correlação Momento x Linha Neutra Analítico e Experimental

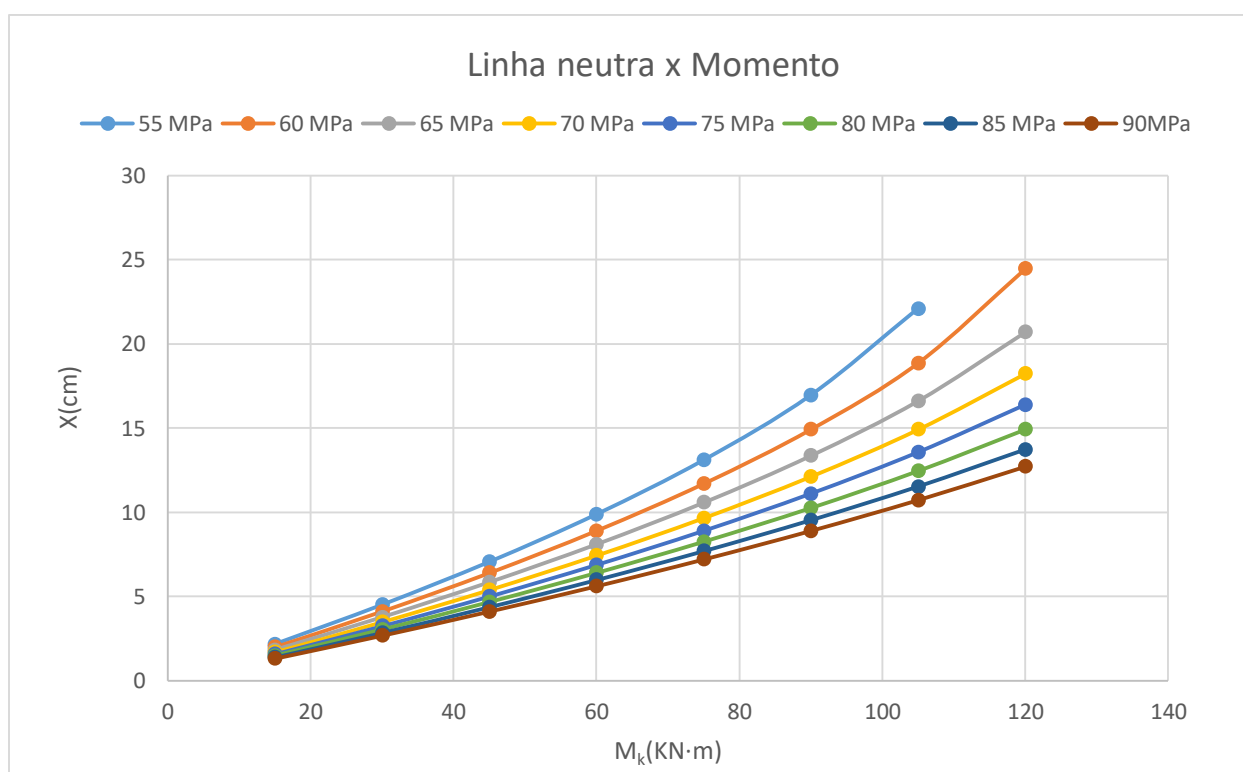


Fonte: Autor (2017)

7.2 Dimensionamento Analítico de Vigas de Concreto de Alto Desempenho com a Variação da Classe do Concreto.

Na aplicação do método analítico da NBR 6118 (2014) para o dimensionamento de vigas de concreto de alto desempenho, foi utilizado uma viga de seção retangular constante de 15 x30 cm, com a variação à cada 5 MPa da resistência do concreto da classe C55 até a C90. Para realizar as análises na viga foram calculados os coeficientes adimensionais (apêndice A), em função da variação do momento fletor na seção transversal da viga, assim, sendo calculados a profundidade da linha neutra, a área de aço longitudinal e a curvatura da seção transversal, apresentados nas tabelas do apêndice B. No dimensionamento da seção da viga para cada resistência foi realizada a análise da profundidade da linha neutra em função do momento fletor apresentados na figura 13.

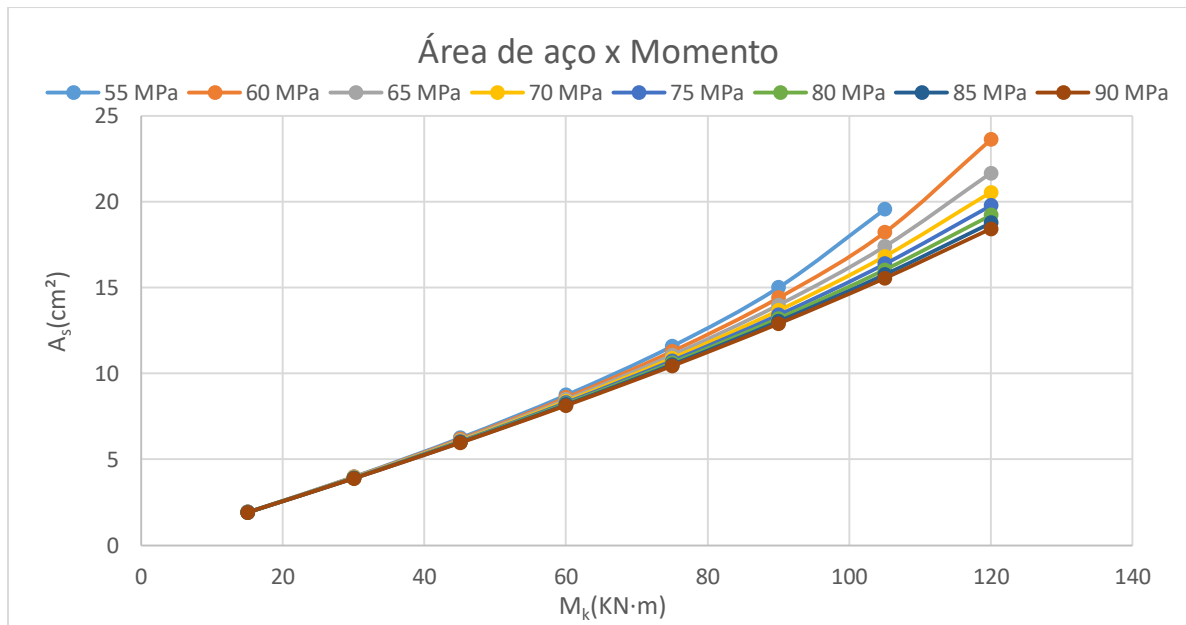
Figura 13- Linha Neutra em função do Momento Solicitante



Analisando os resultados apresentados na figura 13 é possível concluir que há uma redução da profundidade da linha neutra com o aumento da resistência à compressão, isso ocorre devido ao aumento da rigidez da seção transversal fazendo com que haja uma redução da área de concreto necessária para resistir à compressão na flexão.

Para cada classe de resistência foi realizada uma análise da área de aço longitudinal da viga em função do acréscimo do momento fletor, apresentado na figura 14.

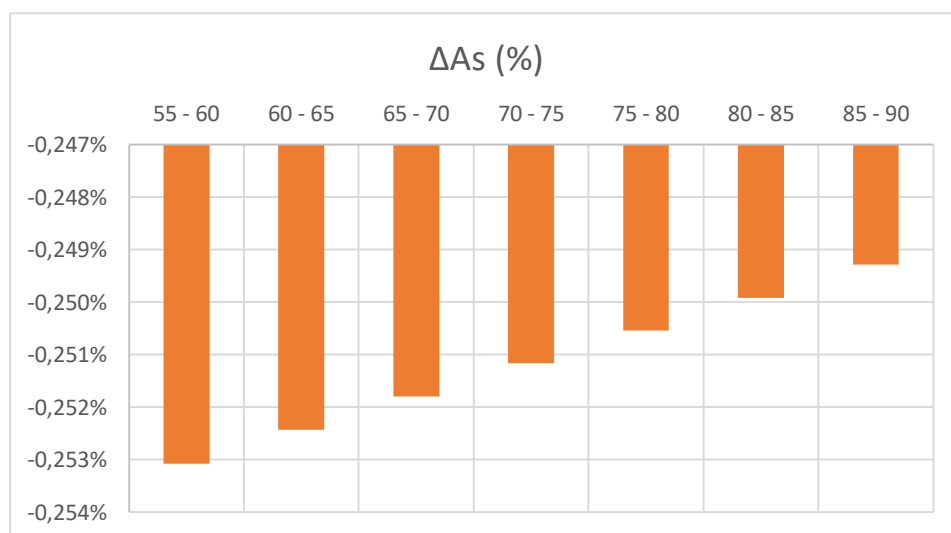
Figura 14- Relação da Área de Aço em função do Momento Fletor



Fonte: Autor 2017

Na figura 15 é observada a redução da área de aço longitudinal devido ao aumento da resistência do concreto, isso ocorre em função do aumento da rigidez da seção transversal fazendo com que a seção suporte maiores carregamento com menores deformações, assim necessitando de menos aço para resistir aos esforços, esse aumento torna-se mais suave com o aumento classe do concreto.

Figura 15-Redução percentual da área de aço necessária no limite de ductilidade



Fonte: Autor 2017.

A NBR 6118 (2014) recomenda que para a viga ter um comportamento dúctil a posição da linha neutra no estado limite último deve obedecer ao limite de $x/d \leq 0,35$ para concreto de alta resistência e para concretos de baixa resistência deve obedecer ao limite de $x/d \leq 0,45$, com isso, foi determinado, para cada resistência, o momento do limite de ductilidade da seção transversal, apresentado na tabela 7.

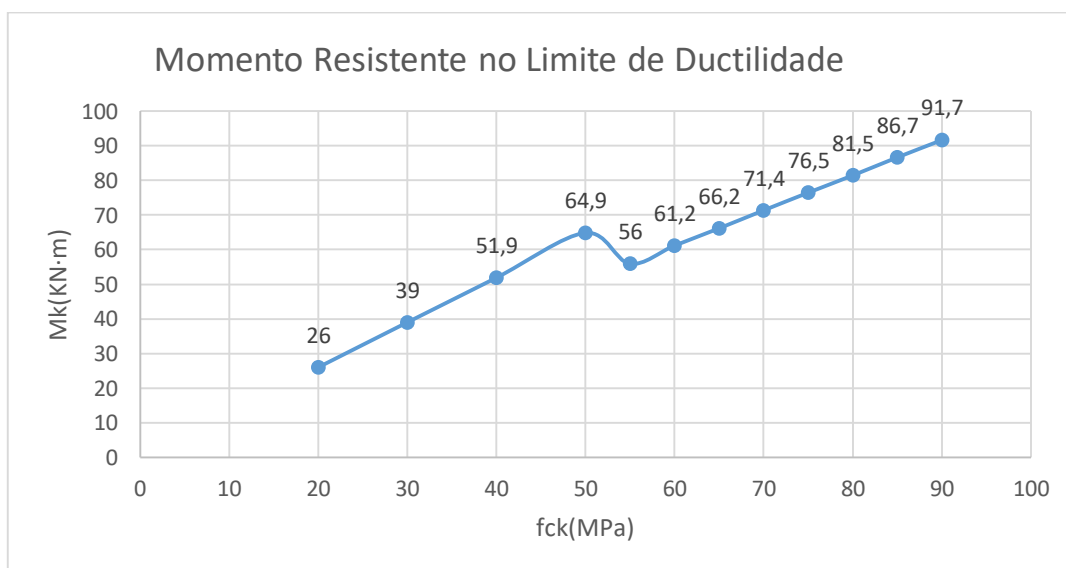
Tabela 7 –Momento resistente no limite de ductilidade da seção para cada resistência.

f_{ck} (MPa)	M_k (KN·m)	d	KM	KX	KZ	x	1/r (mm ⁻¹)	A_s (cm ²)
20	26	26	0,25	0,45	0,82	11,72	2,99E-05	3,93
30	39	26	0,25	0,45	0,82	11,72	2,99E-05	5,89
40	51,9	26	0,251	0,45	0,820	11,693	2,99E-05	7,837
50	64,9	26	0,251	0,450	0,820	11,699	2,99E-05	9,802
55	56	26	0,20	0,35	0,86	9,09	3,44E-05	8,04
60	61,2	26	0,20	0,35	0,86	9,11	3,17E-05	8,79
65	66,2	26	0,20	0,35	0,86	9,10	3,01E-05	9,51
70	71,4	26	0,20	0,35	0,86	9,11	2,91E-05	10,26
75	76,5	26	0,20	0,35	0,86	9,11	2,87E-05	10,99
80	81,5	26	0,20	0,35	0,86	9,10	2,86E-05	11,71
85	86,7	26	0,20	0,35	0,86	9,11	2,85E-05	12,46
90	91,7	26	0,20	0,35	0,86	9,10	2,86E-05	13,17

Fonte: Autor 2017

Foi realizada uma análise comparativa do momento resistente no limite de ductilidade da seção da viga entre o concreto de alta resistência com concreto de baixa resistência, apresentado na figura 16.

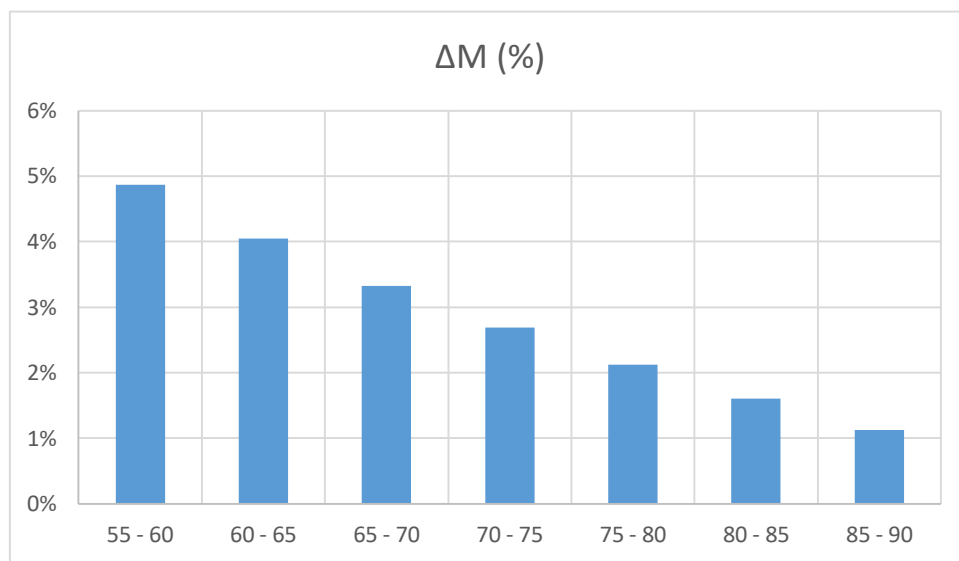
Figura 16-Momento Resistente no limite de ductilidade



Fonte: Autor 2017

Verifica-se na figura 16 uma descontinuidade com mudança do limite de ductilidade entre os concretos de baixa e alta resistência, esse comportamento ocorre devido as considerações que a norma faz sobre o aumento da fragilidade dos concretos de maior resistência e isso pode ser entendido como contradição porque as vigas de 50MPa possui momento resistente maior do o que das vigas de 55 e 60MPa no limite de ductilidade da seção. Há uma mudança de comportamento observada na curva. Com o aumento da resistência a variação do momento se torna mais suave, conforme mostra a figura 17.

Figura 17-Aumento percentual do momento resistente no limite de ductilidade

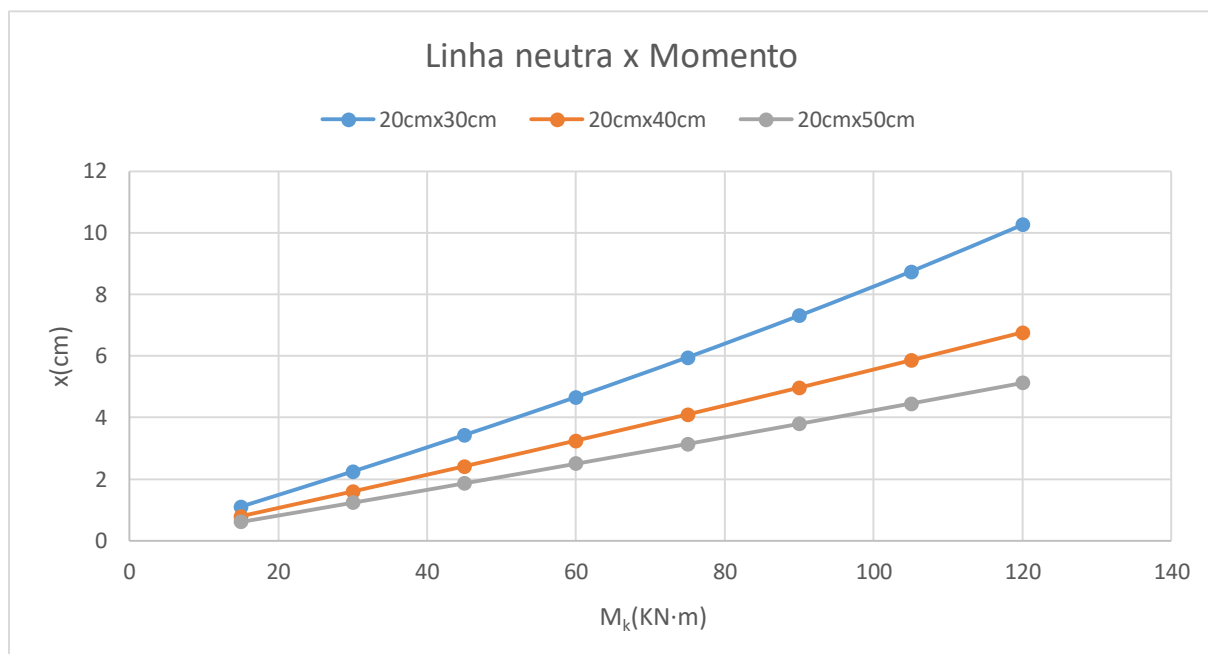


Fonte: Autor 2017

7.3 Dimensionamento Analítico de Vigas de Concreto de Alto Desempenho com a Variação da Seção Transversal.

Na aplicação do método analítico no terceiro estudo de caso foram dimensionadas três vigas de seção retangular (20x30cm, 20x40cm e 20x50cm) sendo mantida a resistência característica do concreto em 80MPa (tabelas apêndice C). Os resultados apresentados na figura 18 representa a variação da profundidade da linha neutra em função do momento solicitante para cada dimensão da seção transversal da viga, há redução da profundidade da linha neutra ocorre por conta do aumento da rigidez da seção da viga.

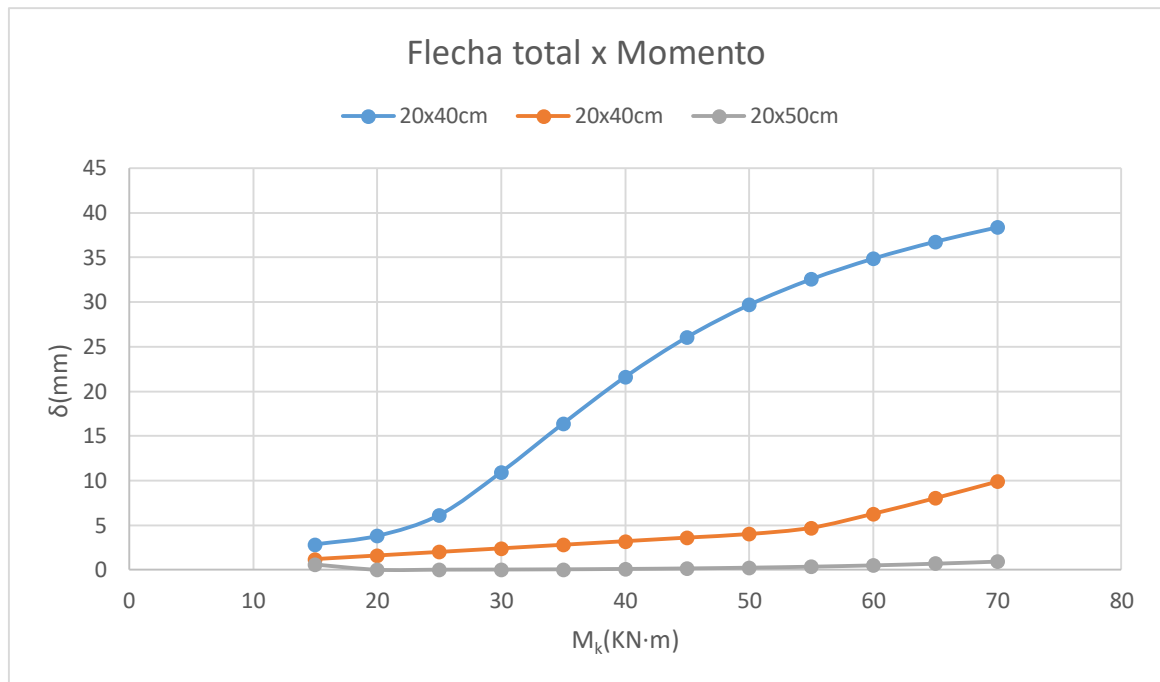
Figura 18- Momento x Linha Neutra para vigas de 80MPa



Fonte: Autor 2017

Como o aumento da seção transversal há redução das deformações da flecha ao longo do tempo, conforme mostra a figura 19, os resultados apresentados demonstram que quanto maior é a rigidez da seção menores serão as deformações do concreto, fazendo com que a viga mude de domínio de deformação e resistindo a maiores solicitações.

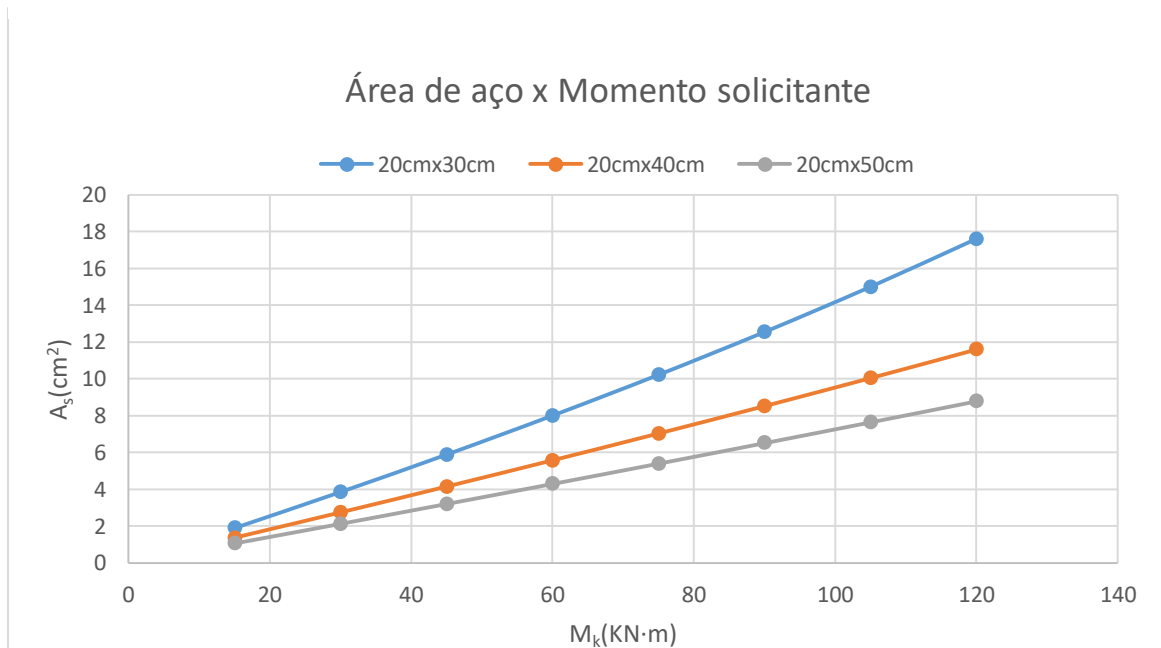
Figura 19- Momento x Flecha total para vigas de 80MPa.



Fonte: Autor 2017

O aumento da seção transversal e a consequente redução das deformações do concreto provoca uma diminuição no consumo de aço pelas vigas, isso ocorre devido ao aumento da inércia das vigas e da redução das deformações fazendo com que seja necessária uma menor área de aço para resistir aos mesmos esforços solicitantes, conforme mostra a figura 20.

Figura 20- Momento x Área de aço para vigas de 80MPa



Fonte: Autor 2017

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo da aplicação do concreto de alto desempenho em vigas, foi desenvolvido tabelas com coeficientes adimensionais para auxiliar no dimensionamento pelo método analítico da NBR 6118 (2014). As tabelas foram elaboradas respeitando o limite de ductilidade da seção com $x/d \leq 0,35$. Sendo realizado três estudos de caso para analisar o comportamento das vigas. O primeiro realizando uma análise comparativa com dados experimentais, o segundo e o terceiro uma aplicação direta do método analítico da NBR 6118 (2014) utilizando os coeficientes adimensionais das tabelas do apêndice A.

Analisando o primeiro estudo de caso pode-se concluir que no dimensionamento das vigas ensaiadas pelo método da NBR 6118 (2014) apresentou resultados conservadores em comparação aos dados experimentais de Hoffman e Silva (2013). As vigas experimentais apresentaram um comportamento mais dúctil e com um menor consumo de aço em relação aos dados analíticos. Pelo baixo número de ensaios realizados por Hoffman e Silva (2013), não é possível garantir a confiabilidades dos seus resultados e conservadorismo da norma é favorável a segurança no dimensionamento da estrutura.

No segundo estudo de caso, as vigas de maior resistência apresentaram maior eficiência, isso ocorre em razão das menores deformações dos concretos de maior resistência fazendo com que seja necessária uma menor a área de concreto para resistir aos esforços solicitantes. Analisando a tabela 1 é possível verificar que com o aumento da resistência do concreto o momento adimensional sofre uma redução no limite de ductilidade da seção estabelecido pela NBR 6118 (2014), isso acontece em função do aumento da fragilidade do concreto para maiores resistências. No terceiro estudo de caso do dimensionamento de vigas pode-se confirmar que o aumento da rigidez da seção transversal da viga ocasiona uma menor deformação da viga com um menor consumo de aço e com um menor aproveitamento da área de concreto da viga.

Conclui-se que as tabelas dos coeficientes adimensionais se apresentaram bastantes úteis no dimensionamento e na análise das vigas de CAD atendo ao modelo de dimensionamento sugerido pela NBR 6118 (2014). A norma apresenta uma incoerente na determinação do limite de ductilidade da seção com o aumento da resistência do concreto, em razão da mudança brusca entre os concretos de baixa e alta resistência, assim, seria necessário maiores investigações experimentais na determinação dos parâmetros de ductilidade dos concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6118-2014- **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.**

ABNT NBR-8953:2015- **Concretos para fins estruturais—Classificação pela Massa específica, por grupos de resistência e consistência.**

AGUIRRE TORRICO, Francisco (Catálogo USP) -2010-**Análise teórica e experimental do comportamento de modelos de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade.** Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BARBOZA, Flávio de Lima. **Pilares de Concreto de Alto Desempenho: fundamentos e experimentação.** Tese Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1997.

BORGES, José Umberto Arnaud. **Análise do comportamento de vigas de concreto de alto desempenho por meio da Mecânica da Fratura.** São Paulo, 2002. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

BRUSCO, Gustavo Largura. **Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova norma NBR 6118 e a norma americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas.** Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

CARVALHO, Roberto Chust. **Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003/Roberto Chust Carvalho, Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho-** 3º ed.- São Carlos: EdUFCAR, 2007.

CORDEIRO, Guilherme Chagas, 2001- **Concreto de Alto Desempenho com Metaulinita.** Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2001.

CREMONINI, R.A.; Dal Molin, D.C.C.; Ceccatto, D.M.; Mancio, M.; Goulart, J. **Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento.** NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação na Edificação -UFRGS.

HADADE, Maria Ângela Simões. **Comportamento de vigas levemente armadas em concreto de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2008.

HOFMANN, Mateus de Assunção; SILVA, Bruno do Vale. **Análise de vigas de concreto de alta resistência submetidas à flexão simples.** Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense - como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil, 2013.

JACOMASSI, Luciana Marques da Costa. **Avaliação do Comportamento de Pilares de Concreto de Alta Resistência: Simulação Numérica Utilizando o Código de Cálculo CASTEM-2000**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia (FEIS), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, 2008.

MEDINA, Engler Apaza, 2011 - **Pozolanicidade do Metacaulim em Sistemas Binários com Cimento Portland e Hidróxido de Cálcio**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

NEVILLE, A.M. **Tecnologia do Concreto/ A. M. Neville, J. J. Brooks**; Tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 2. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEREIRA, C.N.S. **Nota de aula da disciplina Materiais Alternativos para Construção Civil**, Aracaju 2016.

SILVA, Alexandre Leandro Da. **Concreto de Alto Desempenho-Estudo de Caso: E-Tower**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Anhembí Morumbi no âmbito do curso de Engenharia Civil com ênfase na área ambiental, São Paulo 200.

APÊNDICE A - TABELAS DE COEFICIENTES ADIMENSIONAIS DE VIGAS DE
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DE SEÇÃO RETANGULAR

Tabela 8Tabela A1 - Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C55

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 2	0,000	0,000	1,000	0,000	10
	0,004	0,006	0,998	0,056	10
	0,007	0,011	0,996	0,112	10
	0,011	0,017	0,993	0,170	10
	0,014	0,022	0,991	0,228	10
	0,018	0,028	0,989	0,288	10
	0,022	0,034	0,987	0,348	10
	0,025	0,039	0,985	0,410	10
	0,029	0,045	0,982	0,472	10
	0,032	0,051	0,980	0,535	10
	0,036	0,057	0,978	0,600	10
	0,040	0,062	0,975	0,665	10
	0,043	0,068	0,973	0,732	10
	0,047	0,074	0,971	0,800	10
	0,051	0,080	0,969	0,869	10
	0,054	0,086	0,966	0,940	10
	0,058	0,092	0,964	1,011	10
	0,061	0,098	0,961	1,084	10
	0,065	0,104	0,959	1,159	10
	0,069	0,110	0,957	1,234	10
	0,072	0,116	0,954	1,312	10
	0,076	0,122	0,952	1,390	10
	0,079	0,128	0,950	1,470	10
	0,083	0,134	0,947	1,552	10
	0,087	0,141	0,945	1,636	10
	0,090	0,147	0,942	1,721	10
	0,094	0,153	0,940	1,808	10
	0,097	0,159	0,937	1,896	10
	0,101	0,166	0,935	1,987	10
	0,105	0,172	0,932	2,079	10
	0,108	0,179	0,930	2,173	10
	0,112	0,185	0,927	2,270	10
	0,116	0,191	0,925	2,368	10
	0,119	0,198	0,922	2,469	10
	0,123	0,205	0,919	2,572	10
	0,126	0,211	0,917	2,678	10
	0,130	0,218	0,914	2,786	10
	0,134	0,225	0,912	2,896	10
	0,137	0,231	0,909	3,009	10
	0,141	0,238	0,906	3,125	10

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 3	0,141	0,238	0,906	3,125	10
	0,144	0,245	0,904	3,125	9,634
	0,148	0,252	0,901	3,125	9,285
	0,152	0,259	0,898	3,125	8,953
	0,155	0,266	0,895	3,125	8,636
	0,159	0,273	0,893	3,125	8,333
	0,162	0,280	0,890	3,125	8,044
	0,166	0,287	0,887	3,125	7,767
	0,170	0,294	0,884	3,125	7,501
	0,173	0,301	0,881	3,125	7,246
	0,177	0,309	0,878	3,125	7,001
	0,181	0,316	0,876	3,125	6,766
	0,184	0,323	0,873	3,125	6,540
	0,188	0,331	0,870	3,125	6,322
	0,191	0,338	0,867	3,125	6,112
	0,195	0,346	0,864	3,125	5,910
	0,197	0,350	0,862	3,125	5,801

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 9 Tabela A2-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C60

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 2	0,000	0,000	1,000	0,000	10
	0,003	0,005	0,998	0,053	10
	0,007	0,011	0,996	0,106	10
	0,010	0,016	0,994	0,161	10
	0,013	0,021	0,992	0,216	10
	0,016	0,026	0,990	0,272	10
	0,020	0,032	0,988	0,329	10
	0,023	0,037	0,986	0,387	10
	0,026	0,043	0,983	0,445	10
	0,030	0,048	0,981	0,505	10
	0,033	0,054	0,979	0,565	10
	0,036	0,059	0,977	0,627	10
	0,039	0,065	0,975	0,690	10
	0,043	0,070	0,973	0,753	10
	0,046	0,076	0,971	0,818	10
	0,049	0,081	0,969	0,883	10
	0,052	0,087	0,966	0,950	10
	0,056	0,092	0,964	1,018	10
	0,059	0,098	0,962	1,087	10
	0,062	0,104	0,960	1,158	10
	0,066	0,109	0,958	1,229	10
	0,069	0,115	0,955	1,302	10
	0,072	0,121	0,953	1,376	10
	0,075	0,127	0,951	1,452	10
	0,079	0,133	0,949	1,529	10
	0,082	0,138	0,946	1,607	10
	0,085	0,144	0,944	1,687	10
	0,089	0,150	0,942	1,768	10
	0,092	0,156	0,939	1,851	10
	0,095	0,162	0,937	1,936	10
	0,098	0,168	0,935	2,022	10
	0,102	0,174	0,932	2,110	10
	0,105	0,180	0,930	2,200	10
	0,108	0,186	0,928	2,291	10
	0,112	0,193	0,925	2,385	10
	0,115	0,199	0,923	2,480	10
	0,118	0,205	0,921	2,578	10
	0,121	0,211	0,918	2,678	10
	0,125	0,217	0,916	2,779	10
	0,128	0,224	0,913	2,883	10

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 3	0,128	0,224	0,913	2,884	10
	0,131	0,230	0,911	2,884	9,644
	0,134	0,237	0,908	2,884	9,305
	0,138	0,243	0,906	2,884	8,982
	0,141	0,249	0,903	2,884	8,674
	0,144	0,256	0,901	2,884	8,380
	0,148	0,263	0,898	2,884	8,099
	0,151	0,269	0,896	2,884	7,829
	0,154	0,276	0,893	2,884	7,571
	0,157	0,282	0,891	2,884	7,324
	0,161	0,289	0,888	2,884	7,086
	0,164	0,296	0,885	2,884	6,858
	0,167	0,303	0,883	2,884	6,638
	0,171	0,310	0,880	2,884	6,427
	0,174	0,317	0,877	2,884	6,223
	0,177	0,324	0,875	2,884	6,027
	0,180	0,331	0,872	2,884	5,838
	0,184	0,338	0,869	2,884	5,655
	0,187	0,345	0,866	2,884	5,479
	0,189	0,350	0,864	2,884	5,348

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 10 Tabela A3-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C65

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	DOMÍNIO 2						DOMÍNIO 3				
	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)		KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
	0,000	0,000	1,000	0,000	10		0,118	0,215	0,918	2,737	10
	0,003	0,005	0,998	0,051	10		0,121	0,221	0,916	2,737	9,650
	0,006	0,010	0,996	0,103	10		0,124	0,227	0,913	2,737	9,317
	0,009	0,015	0,994	0,155	10		0,127	0,233	0,911	2,737	9,000
	0,012	0,020	0,992	0,208	10		0,130	0,239	0,909	2,737	8,698
	0,015	0,026	0,990	0,262	10		0,133	0,246	0,906	2,737	8,409
	0,018	0,031	0,988	0,317	10		0,136	0,252	0,904	2,737	8,133
	0,021	0,036	0,986	0,372	10		0,139	0,258	0,902	2,737	7,868
	0,024	0,041	0,984	0,429	10		0,143	0,264	0,899	2,737	7,615
	0,027	0,046	0,982	0,486	10		0,146	0,271	0,897	2,737	7,372
	0,030	0,052	0,980	0,544	10		0,149	0,277	0,894	2,737	7,139
	0,033	0,057	0,978	0,603	10		0,152	0,284	0,892	2,737	6,915
	0,036	0,062	0,976	0,663	10		0,155	0,290	0,889	2,737	6,699
	0,039	0,067	0,974	0,724	10		0,158	0,297	0,887	2,737	6,492
	0,042	0,073	0,972	0,786	10		0,161	0,303	0,884	2,737	6,292
	0,045	0,078	0,970	0,848	10		0,164	0,310	0,882	2,737	6,100
	0,049	0,084	0,968	0,912	10		0,167	0,316	0,879	2,737	5,914
	0,052	0,089	0,966	0,977	10		0,170	0,323	0,877	2,737	5,735
	0,055	0,094	0,964	1,043	10		0,173	0,330	0,874	2,737	5,562
	0,058	0,100	0,962	1,110	10		0,176	0,337	0,872	2,737	5,395
	0,061	0,105	0,960	1,178	10		0,179	0,343	0,869	2,737	5,233
	0,064	0,111	0,958	1,247	10		0,182	0,350	0,866	2,737	5,077
	0,067	0,116	0,956	1,318	10						
	0,070	0,122	0,953	1,390	10						
	0,073	0,128	0,951	1,463	10						
	0,076	0,133	0,949	1,537	10						
	0,079	0,139	0,947	1,613	10						
	0,082	0,145	0,945	1,690	10						
	0,085	0,150	0,943	1,768	10						
	0,088	0,156	0,941	1,848	10						
	0,091	0,162	0,938	1,929	10						
	0,094	0,167	0,936	2,012	10						
	0,097	0,173	0,934	2,096	10						
	0,100	0,179	0,932	2,183	10						
	0,103	0,185	0,929	2,270	10						
	0,106	0,191	0,927	2,360	10						
	0,109	0,197	0,925	2,451	10						
	0,112	0,203	0,923	2,544	10						
	0,115	0,209	0,920	2,640	10						
	0,118	0,215	0,918	2,737	10						

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 11 Tabela A4- Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C70

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	DOMÍNIO 2						DOMÍNIO 3				
	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)		KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
	0,000	0,000	1,000	0,000	10		0,111	0,210	0,921	2,656	10
	0,003	0,005	0,998	0,050	10		0,114	0,216	0,919	2,656	9,654
	0,006	0,010	0,996	0,101	10		0,117	0,222	0,917	2,656	9,325
	0,009	0,015	0,994	0,152	10		0,119	0,228	0,915	2,656	9,011
	0,011	0,020	0,993	0,204	10		0,122	0,234	0,912	2,656	8,712
	0,014	0,025	0,991	0,257	10		0,125	0,240	0,910	2,656	8,426
	0,017	0,030	0,989	0,310	10		0,128	0,246	0,908	2,656	8,152
	0,020	0,035	0,987	0,364	10		0,131	0,252	0,906	2,656	7,891
	0,023	0,040	0,985	0,420	10		0,134	0,258	0,903	2,656	7,640
	0,026	0,045	0,983	0,475	10		0,137	0,264	0,901	2,656	7,400
	0,028	0,051	0,981	0,532	10		0,139	0,270	0,899	2,656	7,169
	0,031	0,056	0,979	0,590	10		0,142	0,277	0,896	2,656	6,948
	0,034	0,061	0,977	0,648	10		0,145	0,283	0,894	2,656	6,735
	0,037	0,066	0,975	0,708	10		0,148	0,289	0,892	2,656	6,530
	0,040	0,071	0,973	0,768	10		0,151	0,295	0,889	2,656	6,332
	0,043	0,077	0,971	0,829	10		0,154	0,302	0,887	2,656	6,142
	0,046	0,082	0,969	0,891	10		0,156	0,308	0,884	2,656	5,959
	0,048	0,087	0,967	0,954	10		0,159	0,315	0,882	2,656	5,782
	0,051	0,092	0,965	1,019	10		0,162	0,321	0,880	2,656	5,611
	0,054	0,098	0,963	1,084	10		0,165	0,328	0,877	2,656	5,445
	0,057	0,103	0,961	1,150	10		0,168	0,334	0,875	2,656	5,286
	0,060	0,109	0,959	1,217	10		0,171	0,341	0,872	2,656	5,131
	0,063	0,114	0,957	1,286	10		0,174	0,348	0,870	2,656	4,981
	0,065	0,119	0,955	1,355	10		0,175	0,350	0,869	2,656	4,930
	0,068	0,125	0,953	1,426	10						
	0,071	0,130	0,951	1,498	10						
	0,074	0,136	0,949	1,572	10						
	0,077	0,141	0,947	1,646	10						
	0,080	0,147	0,945	1,722	10						
	0,082	0,152	0,943	1,799	10						
	0,085	0,158	0,941	1,878	10						
	0,088	0,164	0,939	1,958	10						
	0,091	0,169	0,936	2,040	10						
	0,094	0,175	0,934	2,123	10						
	0,097	0,181	0,932	2,207	10						
	0,100	0,187	0,930	2,294	10						
	0,102	0,192	0,928	2,382	10						
	0,105	0,198	0,926	2,471	10						
	0,108	0,204	0,924	2,563	10						
	0,111	0,210	0,921	2,656	10						

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 12 Tabela A5-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C75

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	DOMÍNIO 2						DOMÍNIO 3				
	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)		KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
	0,000	0,000	1,000	0,000	10		0,105	0,207	0,923	2,618	10
	0,003	0,005	0,998	0,049	10		0,108	0,213	0,921	2,618	9,656
	0,005	0,010	0,996	0,100	10		0,110	0,219	0,919	2,618	9,329
	0,008	0,015	0,995	0,150	10		0,113	0,225	0,917	2,618	9,017
	0,011	0,020	0,993	0,202	10		0,116	0,231	0,915	2,618	8,719
	0,013	0,025	0,991	0,254	10		0,119	0,237	0,913	2,618	8,435
	0,016	0,030	0,989	0,307	10		0,121	0,243	0,910	2,618	8,163
	0,019	0,035	0,987	0,361	10		0,124	0,249	0,908	2,618	7,903
	0,022	0,040	0,985	0,415	10		0,127	0,255	0,906	2,618	7,654
	0,024	0,045	0,983	0,471	10		0,129	0,261	0,904	2,618	7,415
	0,027	0,050	0,982	0,527	10		0,132	0,267	0,902	2,618	7,186
	0,030	0,055	0,980	0,584	10		0,135	0,273	0,899	2,618	6,966
	0,032	0,060	0,978	0,642	10		0,137	0,279	0,897	2,618	6,754
	0,035	0,065	0,976	0,700	10		0,140	0,286	0,895	2,618	6,551
	0,038	0,071	0,974	0,760	10		0,143	0,292	0,892	2,618	6,355
	0,040	0,076	0,972	0,820	10		0,146	0,298	0,890	2,618	6,166
	0,043	0,081	0,970	0,882	10		0,148	0,304	0,888	2,618	5,983
	0,046	0,086	0,968	0,944	10		0,151	0,311	0,885	2,618	5,807
	0,049	0,092	0,966	1,007	10		0,154	0,317	0,883	2,618	5,638
	0,051	0,097	0,964	1,072	10		0,156	0,324	0,881	2,618	5,473
	0,054	0,102	0,962	1,137	10		0,159	0,330	0,878	2,618	5,315
	0,057	0,107	0,960	1,203	10		0,162	0,337	0,876	2,618	5,161
	0,059	0,113	0,958	1,271	10		0,164	0,343	0,873	2,618	5,013
	0,062	0,118	0,956	1,340	10		0,167	0,350	0,871	2,618	4,869
	0,065	0,124	0,954	1,409	10						
	0,067	0,129	0,952	1,480	10						
	0,070	0,134	0,950	1,553	10						
	0,073	0,140	0,948	1,626	10						
	0,075	0,145	0,946	1,701	10						
	0,078	0,151	0,944	1,777	10						
	0,081	0,156	0,942	1,854	10						
	0,084	0,162	0,940	1,933	10						
	0,086	0,168	0,938	2,013	10						
	0,089	0,173	0,936	2,094	10						
	0,092	0,179	0,934	2,178	10						
	0,094	0,184	0,932	2,262	10						
	0,097	0,190	0,930	2,349	10						
	0,100	0,196	0,928	2,437	10						
	0,102	0,202	0,926	2,526	10						
	0,105	0,207	0,923	2,618	10						

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 13 Tabela A6-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C80

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	DOMÍNIO 2						DOMÍNIO 3				
	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)		KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
	0,000	0,000	1,000	0,000	10		0,100	0,207	0,925	2,604	10
	0,003	0,005	0,998	0,049	10		0,103	0,212	0,923	2,604	9,657
	0,005	0,010	0,996	0,099	10		0,105	0,218	0,921	2,604	9,331
	0,008	0,015	0,995	0,150	10		0,108	0,224	0,919	2,604	9,020
	0,010	0,020	0,993	0,201	10		0,110	0,230	0,917	2,604	8,723
	0,013	0,025	0,991	0,253	10		0,113	0,236	0,915	2,604	8,440
	0,015	0,030	0,989	0,306	10		0,116	0,242	0,912	2,604	8,169
	0,018	0,035	0,987	0,360	10		0,118	0,248	0,910	2,604	7,910
	0,021	0,040	0,986	0,414	10		0,121	0,254	0,908	2,604	7,662
	0,023	0,045	0,984	0,469	10		0,123	0,260	0,906	2,604	7,424
	0,026	0,050	0,982	0,525	10		0,126	0,266	0,904	2,604	7,195
	0,028	0,055	0,980	0,582	10		0,128	0,272	0,901	2,604	6,976
	0,031	0,060	0,978	0,640	10		0,131	0,278	0,899	2,604	6,765
	0,033	0,065	0,976	0,698	10		0,133	0,284	0,897	2,604	6,562
	0,036	0,070	0,974	0,757	10		0,136	0,290	0,895	2,604	6,367
	0,039	0,076	0,973	0,817	10		0,139	0,296	0,893	2,604	6,178
	0,041	0,081	0,971	0,879	10		0,141	0,303	0,890	2,604	5,997
	0,044	0,086	0,969	0,941	10		0,144	0,309	0,888	2,604	5,822
	0,046	0,091	0,967	1,004	10		0,146	0,315	0,886	2,604	5,652
	0,049	0,096	0,965	1,068	10		0,149	0,322	0,883	2,604	5,489
	0,051	0,102	0,963	1,133	10		0,151	0,328	0,881	2,604	5,331
	0,054	0,107	0,961	1,199	10		0,154	0,335	0,879	2,604	5,178
	0,056	0,112	0,959	1,266	10		0,157	0,341	0,876	2,604	5,030
	0,059	0,118	0,957	1,334	10		0,159	0,348	0,874	2,604	4,886
	0,062	0,123	0,955	1,404	10		0,160	0,350	0,873	2,604	4,832
	0,064	0,128	0,953	1,474	10						
	0,067	0,134	0,951	1,546	10						
	0,069	0,139	0,949	1,619	10						
	0,072	0,145	0,948	1,693	10						
	0,074	0,150	0,946	1,769	10						
	0,077	0,156	0,944	1,846	10						
	0,080	0,161	0,942	1,924	10						
	0,082	0,167	0,939	2,003	10						
	0,085	0,172	0,937	2,084	10						
	0,087	0,178	0,935	2,167	10						
	0,090	0,184	0,933	2,251	10						
	0,092	0,189	0,931	2,337	10						
	0,095	0,195	0,929	2,424	10						
	0,098	0,201	0,927	2,513	10						
	0,100	0,207	0,925	2,604	10						

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 14 Tabela A7-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C85

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 2	0,000	0,000	1,000	0,000	10
	0,002	0,005	0,998	0,049	10
	0,005	0,010	0,996	0,099	10
	0,007	0,015	0,995	0,150	10
	0,010	0,020	0,993	0,201	10
	0,012	0,025	0,991	0,254	10
	0,015	0,030	0,989	0,306	10
	0,017	0,035	0,988	0,360	10
	0,020	0,040	0,986	0,414	10
	0,022	0,045	0,984	0,469	10
	0,024	0,050	0,982	0,525	10
	0,027	0,055	0,980	0,582	10
	0,029	0,060	0,979	0,640	10
	0,032	0,065	0,977	0,698	10
	0,034	0,070	0,975	0,757	10
	0,037	0,076	0,973	0,817	10
	0,039	0,081	0,971	0,879	10
	0,042	0,086	0,969	0,941	10
	0,044	0,091	0,968	1,004	10
	0,047	0,096	0,966	1,068	10
	0,049	0,102	0,964	1,133	10
	0,051	0,107	0,962	1,199	10
	0,054	0,112	0,960	1,266	10
	0,056	0,118	0,958	1,334	10
	0,059	0,123	0,956	1,403	10
	0,061	0,128	0,954	1,474	10
	0,064	0,134	0,952	1,545	10
	0,066	0,139	0,950	1,618	10
	0,069	0,145	0,948	1,692	10
	0,071	0,150	0,946	1,768	10
	0,073	0,156	0,945	1,844	10
	0,076	0,161	0,943	1,922	10
	0,078	0,167	0,941	2,002	10
	0,081	0,172	0,939	2,083	10
	0,083	0,178	0,937	2,165	10
	0,086	0,184	0,935	2,249	10
	0,088	0,189	0,933	2,334	10
	0,091	0,195	0,931	2,421	10
	0,093	0,201	0,929	2,510	10
	0,096	0,206	0,926	2,600	10

	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
DOMÍNIO 3	0,096	0,206	0,926	2,600	10
	0,098	0,212	0,924	2,600	9,658
	0,100	0,218	0,922	2,600	9,332
	0,103	0,224	0,920	2,600	9,022
	0,105	0,230	0,918	2,600	8,726
	0,108	0,235	0,916	2,600	8,443
	0,110	0,241	0,914	2,600	8,173
	0,113	0,247	0,912	2,600	7,914
	0,115	0,253	0,910	2,600	7,667
	0,118	0,259	0,908	2,600	7,429
	0,120	0,265	0,905	2,600	7,201
	0,122	0,271	0,903	2,600	6,982
	0,125	0,277	0,901	2,600	6,772
	0,127	0,284	0,899	2,600	6,569
	0,130	0,290	0,897	2,600	6,374
	0,132	0,296	0,895	2,600	6,187
	0,135	0,302	0,892	2,600	6,005
	0,137	0,308	0,890	2,600	5,831
	0,140	0,315	0,888	2,600	5,662
	0,142	0,321	0,886	2,600	5,499
	0,145	0,327	0,883	2,600	5,341
	0,147	0,334	0,881	2,600	5,188
	0,149	0,340	0,879	2,600	5,041
	0,152	0,347	0,876	2,600	4,898
	0,153	0,350	0,875	2,600	4,824

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

Tabela 15 Tabela A8-Tabela para o dimensionamento de seções retangulares de concreto de alto desempenho à flexão simples-C90

(De acordo com a NBR 6118:2014)

	DOMÍNIO 2						DOMÍNIO 3				
	KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)		KM	KX	KZ	ε_c (‰)	ε_s (‰)
	0,000	0,000	1,000	0,000	10		0,091	0,206	0,928	2,600	10
	0,002	0,005	0,998	0,049	10		0,093	0,212	0,926	2,600	9,658
	0,005	0,010	0,997	0,099	10		0,096	0,218	0,924	2,600	9,333
	0,007	0,015	0,995	0,150	10		0,098	0,224	0,922	2,600	9,023
	0,009	0,020	0,993	0,202	10		0,100	0,230	0,920	2,600	8,728
	0,012	0,025	0,991	0,254	10		0,103	0,235	0,918	2,600	8,446
	0,014	0,030	0,990	0,307	10		0,105	0,241	0,916	2,600	8,176
	0,016	0,035	0,988	0,360	10		0,107	0,247	0,913	2,600	7,918
	0,019	0,040	0,986	0,415	10		0,110	0,253	0,911	2,600	7,671
	0,021	0,045	0,984	0,470	10		0,112	0,259	0,909	2,600	7,434
	0,023	0,050	0,983	0,526	10		0,114	0,265	0,907	2,600	7,206
	0,026	0,055	0,981	0,583	10		0,117	0,271	0,905	2,600	6,988
	0,028	0,060	0,979	0,640	10		0,119	0,277	0,903	2,600	6,778
	0,030	0,065	0,977	0,699	10		0,122	0,283	0,901	2,600	6,575
	0,033	0,070	0,975	0,758	10		0,124	0,290	0,899	2,600	6,381
	0,035	0,076	0,974	0,818	10		0,126	0,296	0,897	2,600	6,193
	0,037	0,081	0,972	0,879	10		0,129	0,302	0,894	2,600	6,013
	0,040	0,086	0,970	0,941	10		0,131	0,308	0,892	2,600	5,838
	0,042	0,091	0,968	1,004	10		0,133	0,314	0,890	2,600	5,670
	0,044	0,097	0,966	1,068	10		0,136	0,321	0,888	2,600	5,507
	0,047	0,102	0,964	1,133	10		0,138	0,327	0,886	2,600	5,350
	0,049	0,107	0,963	1,199	10		0,140	0,333	0,883	2,600	5,197
	0,051	0,112	0,961	1,267	10		0,143	0,340	0,881	2,600	5,050
	0,054	0,118	0,959	1,335	10		0,145	0,346	0,879	2,600	4,907
	0,056	0,123	0,957	1,404	10		0,146	0,350	0,878	2,600	4,829
	0,058	0,129	0,955	1,474	10						
	0,061	0,134	0,953	1,546	10						
	0,063	0,139	0,951	1,619	10						
	0,065	0,145	0,949	1,693	10						
	0,068	0,150	0,947	1,768	10						
	0,070	0,156	0,945	1,845	10						
	0,072	0,161	0,944	1,923	10						
	0,075	0,167	0,942	2,002	10						
	0,077	0,172	0,940	2,083	10						
	0,079	0,178	0,938	2,165	10						
	0,082	0,184	0,936	2,249	10						
	0,084	0,189	0,934	2,334	10						
	0,086	0,195	0,932	2,421	10						
	0,089	0,201	0,930	2,510	10						
	0,091	0,206	0,928	2,600	10						

Lista de Fórmulas:

$$KX = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

$$KM = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_c \cdot \lambda \cdot KX - 0,5 \cdot \alpha_c \cdot \lambda^2 \cdot KX^2$$

$$KZ = 1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot KX = \frac{z}{d}$$

$$A_s = \frac{M_d}{d \cdot KZ \cdot f_{yd}}$$

APÊNDICE B - TABELAS DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DE SEÇÃO RETANGULAR DE 15X30.

Tabela 16*Tabela B1-Dimensionamento de viga de C55*

f_{ck} (Mpa)	55	55	55	55	55	55	55	55
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,0527	0,1054	0,1581	0,2109	0,2636	0,3163	0,3690	0,4217
KX	0,084	0,173	0,271	0,380	0,504	0,652	0,850	-
KZ	0,967	0,932	0,893	0,850	0,802	0,743	0,665	-
x	2,172	4,508	7,054	9,878	13,099	16,954	22,092	-
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,44E-04	6,93E-05	4,43E-05	3,16E-05	2,39E-05	1,84E-05	1,41E-05	-
As (cm ²)	1,921	3,988	6,240	8,738	11,587	14,996	19,542	Ar. dupla

Tabela 17*Tabela B2- Dimensionamento de viga de C60*

f_{ck} (Mpa)	60	60	60	60	60	60	60	60
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,048323	0,096647	0,14497	0,193294	0,241617	0,289941	0,338264	0,386588
KX	0,076	0,158	0,246	0,342	0,450	0,574	0,726	0,941
KZ	0,970	0,938	0,903	0,865	0,823	0,774	0,714	0,629
x	1,985	4,105	6,395	8,900	11,698	14,923	18,866	24,466
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,45E-04	7,02E-05	4,51E-05	3,24E-05	2,47E-05	1,93E-05	1,53E-05	1,18E-05
As (cm ²)	1,915	3,962	6,171	8,588	11,288	14,401	18,205	23,609

Tabela 18*Tabela B3-Dimensionamento de viga de C65*

f_{ck} (Mpa)	65	65	65	65	65	65	65	65
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,044606	0,089213	0,133819	0,178425	0,223031	0,267638	0,312244	0,35685
KX	0,070	0,145	0,225	0,312	0,407	0,514	0,639	0,797
KZ	0,972	0,943	0,911	0,877	0,840	0,798	0,748	0,686
x	1,828	3,769	5,849	8,102	10,581	13,369	16,625	20,715
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,50E-04	7,26E-05	4,68E-05	3,38E-05	2,59E-05	2,05E-05	1,65E-05	1,32E-05
As (cm ²)	1,911	3,940	6,115	8,470	11,061	13,976	17,380	21,655

Tabela 19Tabela B4-Dimensionamento de viga de C70

f_{ck} (Mpa)	70	70	70	70	70	70	70	70
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,04142	0,08284	0,12426	0,16568	0,207101	0,248521	0,289941	0,331361
KX	0,065	0,134	0,207	0,286	0,372	0,466	0,574	0,701
KZ	0,974	0,947	0,918	0,887	0,854	0,816	0,774	0,724
x	1,694	3,484	5,390	7,438	9,665	12,128	14,923	18,238
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,57E-04	7,62E-05	4,93E-05	3,57E-05	2,75E-05	2,19E-05	1,78E-05	1,46E-05
As (cm ²)	1,907	3,922	6,068	8,374	10,881	13,654	16,801	20,533

Tabela 20Tabela B5-Dimensionamento de viga de C75

f_{ck} (Mpa)	75	75	75	75	75	75	75	75
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,038659	0,077318	0,115976	0,154635	0,193294	0,231953	0,270611	0,30927
KX	0,061	0,125	0,192	0,264	0,342	0,427	0,522	0,630
KZ	0,976	0,951	0,924	0,896	0,865	0,832	0,795	0,752
x	1,578	3,239	4,999	6,876	8,900	11,110	13,569	16,388
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,66E-04	8,08E-05	5,24E-05	3,81E-05	2,94E-05	2,36E-05	1,93E-05	1,60E-05
As (cm ²)	1,903	3,907	6,030	8,295	10,735	13,401	16,367	19,768

Tabela 21Tabela B6-Dimensionamento de viga de C80

f_{ck} (Mpa)	80	80	80	80	80	80	80	80
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,036243	0,072485	0,108728	0,14497	0,181213	0,217456	0,253698	0,289941
KX	0,057	0,116	0,179	0,246	0,317	0,394	0,479	0,574
KZ	0,978	0,954	0,929	0,903	0,875	0,845	0,811	0,774
x	1,477	3,026	4,660	6,395	8,250	10,256	12,457	14,923
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,76E-04	8,60E-05	5,59E-05	4,07E-05	3,16E-05	2,54E-05	2,09E-05	1,74E-05
As (cm ²)	1,900	3,894	5,996	8,228	10,615	13,196	16,027	19,201

Tabela 22Tabela B7-Dimensionamento de viga de C85

f_{ck} (Mpa)	85	85	85	85	85	85	85	85
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,034111	0,068221	0,102332	0,136443	0,170553	0,204664	0,238775	0,272885
KX	0,053	0,109	0,168	0,230	0,296	0,366	0,443	0,528
KZ	0,979	0,957	0,934	0,909	0,884	0,856	0,825	0,792
x	1,388	2,840	4,365	5,977	7,690	9,528	11,523	13,723
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,87E-04	9,16E-05	5,96E-05	4,35E-05	3,38E-05	2,73E-05	2,26E-05	1,89E-05
A_s (cm ²)	1,898	3,882	5,968	8,170	10,513	13,026	15,753	18,761

Tabela 23Tabela B8-Dimensionamento de viga de C90

f_{ck} (Mpa)	90	90	90	90	90	90	90	90
M_k (KN.m)	15	30	45	60	75	90	105	120
d	26	26	26	26	26	26	26	26
KM	0,032216	0,064431	0,096647	0,128863	0,161078	0,193294	0,22551	0,257725
KX	0,050	0,103	0,158	0,216	0,277	0,342	0,413	0,489
KZ	0,980	0,959	0,938	0,915	0,891	0,865	0,838	0,807
x	1,309	2,675	4,105	5,610	7,203	8,900	10,726	12,716
$1/r$ (mm ⁻¹)	1,99E-04	9,72E-05	6,33E-05	4,63E-05	3,61E-05	2,92E-05	2,42E-05	2,04E-05
A_s (cm ²)	1,895	3,872	5,943	8,121	10,426	12,883	15,526	18,406

APÊNDICE C - TABELAS DE VIGAS DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO DA CLASSE C80.

Tabela 24Tabela C1-Dimensionamento de viga de seção de 20x30cm

f_{ck} (Mpa)	M_k (KN.m)	d	KM	KX	KZ	x	1/r (mm ⁻¹)	As (cm ²)
80	15	26	0,0272	0,042	0,983	1,101	2,36E-04	1,889
80	30	26	0,0544	0,086	0,966	2,242	1,16E-04	3,846
80	45	26	0,0815	0,132	0,948	3,426	7,60E-05	5,878
80	60	26	0,1087	0,179	0,929	4,660	5,59E-05	7,995
80	75	26	0,1359	0,229	0,910	5,951	4,38E-05	10,208
80	90	26	0,1631	0,281	0,889	7,306	3,56E-05	12,533
80	105	26	0,1903	0,336	0,868	8,736	2,98E-05	14,987
80	120	26	0,2175	0,394	0,845	10,256	2,54E-05	17,594

Tabela 25Tabela C2-Dimensionamento de Viga de Seção de 20x40cm

f_{ck} (Mpa)	M_k (KN.m)	d	KM	KX	KZ	x	1/r (mm ⁻¹)	As (cm ²)
80	15	36	0,0142	0,022	0,991	0,789	3,30E-04	1,353
80	30	36	0,0284	0,044	0,983	1,592	1,64E-04	2,731
80	45	36	0,0425	0,067	0,974	2,410	1,08E-04	4,134
80	60	36	0,0567	0,090	0,965	3,243	8,03E-05	5,564
80	75	36	0,0709	0,114	0,955	4,094	6,36E-05	7,023
80	90	36	0,0851	0,138	0,946	4,962	5,25E-05	8,512
80	105	36	0,0992	0,162	0,936	5,849	4,45E-05	10,034
80	120	36	0,1134	0,188	0,926	6,756	3,85E-05	11,590

Tabela 26Tabela C3-Dimensionamento de Viga de Seção de 20x50cm

f_{ck} (Mpa)	M_k (KN.m)	d	KM	KX	KZ	x	1/r (mm ⁻¹)	As (cm ²)
80	15	46	0,0087	0,013	0,995	0,615	4,23E-04	1,056
80	30	46	0,0174	0,027	0,989	1,237	2,10E-04	2,122
80	45	46	0,0261	0,041	0,984	1,866	1,40E-04	3,201
80	60	46	0,0347	0,054	0,979	2,502	1,04E-04	4,292
80	75	46	0,0434	0,068	0,973	3,145	8,28E-05	5,395
80	90	46	0,0521	0,083	0,968	3,796	6,86E-05	6,512
80	105	46	0,0608	0,097	0,962	4,454	5,85E-05	7,641
80	120	46	0,0695	0,111	0,956	5,121	5,08E-05	8,785