



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EUBERT ALMEIDA PAIXÃO

ESTUDO COMPARATIVO DA NBR 6118 E *EUROCODE 2* NO
DIMENSIONAMENTO DE PILARES ISOLADOS DE CONCRETO
CONVENCIONAL E DE ALTO DESEMPENHO EM ESTRUTURAS DE NÓS FIXOS

FORTALEZA
2019

EUBERT ALMEIDA PAIXÃO

ESTUDO COMPARATIVO DA NBR 6118 E *EUROCODE 2* NO DIMENSIONAMENTO
DE PILARES ISOLADOS DE CONCRETO CONVENCIONAL E DE ALTO
DESEMPENHO EM ESTRUTURAS DE NÓS FIXOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof. Dr.^a Magnólia Maria Campêlo Mota

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P172e Paixão, Eubert Almeida.

Estudo comparativo da NBR 6118 e Eurocode 2 no dimensionamento de pilares isolados de concreto convencional e de alto desempenho em estruturas de nós fixos / Eubert Almeida Paixão. – 2019.
192 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Magnólia Maria Campêlo Mota.

1. Concreto de alto desempenho. 2. CAD. 3. NBR 6118. 4. Eurocode 2. 5. Pilares. I. Título.

CDD 620

EUBERT ALMEIDA PAIXÃO

ESTUDO COMPARATIVO DA NBR 6118 E *EUROCODE 2* NO DIMENSIONAMENTO
DE PILARES ISOLADOS DE CONCRETO CONVENCIONAL E DE ALTO
DESEMPENHO EM ESTRUTURAS DE NÓS FIXOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 06/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.^a Magnólia Maria Campêlo Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr.^a Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.e. Hugo Campêlo Mota
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo incentivo e apoio mediante todas as dificuldades.

À professora Magnólia Maria Campêlo Mota, por todos os ensinamentos neste período de orientação.

À minha namorada, Milena Scur Wagner, pelo apoio, paciência e atenção.

Às professoras Marisete Dantas de Aquino e Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, que auxiliaram o desenvolvimento do trabalho.

À Consultec, que proporcionou muitos aprendizados, vivências e amigos que levarei para toda a vida.

À Indústria de Projetos e ao engenheiro Yuri Facundo Teodoro Soares, pela oportunidade de estágio, na qual pude desenvolver habilidades técnicas e interpessoais.

RESUMO

A necessidade de obras mais econômicas, enxutas e de maior durabilidade é motivação para estudos e avanços científicos que cada vez mais ganham visibilidade no mercado. Dentre tais avanços, o concreto de alto desempenho (CAD) vem sendo amplamente aperfeiçoado devido a possuir elevada resistência à compressão, baixa porosidade e permitir a redução de taxas de aço e elementos mais esbeltos. Nesse contexto, a NBR 6118:2014 foi atualizada recentemente visando atender, também, este material. Em contrapartida, o *Eurocode 2:2004* é consolidado há vários anos no dimensionamento de estruturas de CAD. Deste modo, comparou-se a metodologia de cálculo destas normas aplicada a pilares isolados de estruturas de nós fixos mediante a utilização de concreto convencional e de alto desempenho. Utilizou-se resistências de 30 MPa e 70 MPa para um pilar central, um pilar lateral e um pilar de canto, que foram dimensionados a partir do formulário de ambas as normatizações. Além disso, buscou-se avaliar para o pilar central, através da NBR, um ponto ótimo de resistência à compressão e um ponto ótimo de dimensões de seção no que se refere à obtenção da armadura mínima calculada. No comparativo entre normas, para o concreto convencional, a norma brasileira apresentou-se ligeiramente mais conservadora, enquanto que para o concreto de alto desempenho a NBR apresentou valores consideravelmente superiores, visto que obteve-se a armadura mínima para as situações analisadas e as normas divergem na metodologia de cálculo desta. Por fim, a utilização de CAD permitiu notável redução das taxas de aço e de dimensões de seção, o que demonstra o potencial que este material possui.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho. CAD. NBR 6118. *Eurocode 2*. Pilares.

ABSTRACT

The necessity for more economical, leaner and more durable constructions is motivation for studies and scientific advances that are increasingly gaining viability in the market. Among such advances, high performance concrete (HPC) has been greatly improved due to have high compressive strength, low porosity and allow the reduction of armor and slimmer elements. In this context, NBR 6118: 2014 was updated recently aiming to attend this material also. By contrast, Eurocode 2: 2004 is consolidated for several years in the design of HPC structures. Thereby, comparing the methodology for calculating of both standard applied to isolated columns of fixed knot structures using conventional and high performance concrete. It was used 30 MPa and 70 MPa resistances for an internal column, an edge column and a perimeter column, that were dimensioned from the form of both standard. Besides, the objective was to evaluate for the internal column, through the NBR, an optimal point of resistance to compression and an optimal point of section dimensions with respect to obtaining the minimum reinforcement calculated. In the comparison between standards, for conventional concrete, the brasilian standard is slightly more conservative, while for high performance concrete the NBR presented considerably higher values, since minimum reinforcement for the situations analyzed and the standards differ in the calculation of this. Finally, the use of HPC has led to a reduction in steel rate and of section dimensions, which demonstrates the potential of this material.

Keywords: High performance concrete. NBR 6118. Eurocode 2. Columns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga utilizada para o estudo de caso de Nunes (2012)	18
Figura 2 – Falta de retilineidade e desaprumo de pilar, respectivamente.....	26
Figura 3 – Comprimentos efetivos para diversas condições de apoio – NBR.....	32
Figura 4 – Comprimentos efetivos para diversas condições de apoio – <i>Eurocode</i>	41
Figura 5 – Pilar central.....	46
Figura 6 – Pilar de lateral.....	46
Figura 7 – Pilar de canto.....	47
Figura 8 – Configuração de armadura utilizada.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Armadura necessária (A_s) na seção mais desfavorável – f_{ck} 30 MPa	71
Tabela 2 – Taxas mecânicas de armadura (ω) na seção mais desfavorável – f_{ck} 30 MPa	72
Tabela 3 – Excentricidades de segunda ordem – f_{ck} 30 MPa.....	73
Tabela 4 – Armadura necessária (A_s) na seção mais desfavorável – f_{ck} 70 MPa	73
Tabela 5 – Armadura necessária (A_s) para f_{ck} de 30 MPa e 70 MPa – NBR.....	75
Tabela 6 – Armadura necessária (A_s) para pilar central com variação de f_{ck} – NBR.....	74
Tabela 7 – Armadura necessária (A_s) para pilar central com variação de altura – NBR.....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Resultados de dimensionamento obtidos por Freitas (2014)	19
Quadro 2	– Classes de resistência dos concretos estruturais.....	21
Quadro 3	– Valores do coeficiente adicional γ_n – NBR.....	28
Quadro 4	– Valores dos coeficiente adicional γ_c e γ_s – NBR.....	28
Quadro 5	– Valores para o coeficiente γ_f – NBR.....	29
Quadro 6	– Valores para o coeficiente γ_{f2} – NBR.....	29
Quadro 7	– Dimensões mínimas para pilares e distância do eixo da barra à face para seções retangulares e circulares - <i>Eurocode</i>	37
Quadro 8	– Valores para os coeficientes adicionais γ_c e γ_s – <i>Eurocode</i>	38
Quadro 9	– Valores dos coeficiente de ponderação das ações no ELU – <i>Eurocode</i>	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema de pesquisa	14
1.2	Questões motivadoras	15
1.3	Justificativa.....	15
1.4	Objetivos.....	16
1.4.1	<i>Objetivo geral.....</i>	16
1.4.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Introdução teórica.....	21
2.1.1	<i>Concreto de alto desempenho.....</i>	21
2.1.2	<i>Estabilidade estrutural.....</i>	22
2.1.3	<i>Estrutura de nós fixos e nós móveis.....</i>	22
2.1.3.1	<i>Coefficiente γ_z.....</i>	23
2.1.4	<i>Flambagem.....</i>	24
2.1.5	<i>Tipos de excentricidades.....</i>	24
2.1.5.1	<i>Excentricidade inicial (e_i)</i>	24
2.1.5.2	<i>Excentricidade de forma.....</i>	25
2.1.5.3	<i>Excentricidade acidental (e_a)</i>	25
2.1.5.4	<i>Excentricidade de segunda ordem (e_2)</i>	26
2.1.5.5	<i>Excentricidade suplementar (fluência)</i>	26
2.1.6	<i>Classificação dos pilares.....</i>	26
2.1.6.1	<i>Quanto à posição em planta.....</i>	26
2.1.6.1.1	Pilares centrais ou intermediários.....	27
2.1.6.1.2	Pilares laterais ou de extremidade.....	27
2.1.6.1.3	Pilares de canto.....	27
2.1.6.2	<i>Quanto à esbeltez.....</i>	27
2.2	Formulário da NBR 6118:2014.....	28
2.2.1	<i>Dimensões mínimas.....</i>	28
2.2.2	<i>Coefficientes de ponderação no estado-limite último (ELU).....</i>	28
2.2.3	<i>Excentricidades de 1ª ordem.....</i>	29
2.2.3.1	<i>Momento mínimo.....</i>	30

2.2.4	Excentricidades de 2ª ordem	31
2.2.4.1	Índice de esbeltez (λ)	31
2.2.4.2	Dispensa da análise dos efeitos locais de segunda ordem.....	32
2.2.4.3	Método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada para determinação dos efeitos locais de segunda ordem.....	34
2.2.4.4	Cálculo da fluência.....	35
2.2.5	Armaduras máximas e mínimas	36
2.3	Formulário do Eurocode 2:2004	37
2.3.1	Dimensões mínimas	37
2.3.2	Coefficientes de ponderação no estado-limite último (ELU)	38
2.3.3	Excentricidades de 1ª ordem	39
2.3.3.1	Imperfeições geométricas.....	39
2.3.3.2	Excentricidade mínima.....	40
2.3.4	Excentricidades de 2ª ordem	40
2.3.4.1	Índice de esbeltez (λ).....	40
2.3.4.2	Dispensa da análise dos efeitos locais de segunda ordem.....	41
2.3.4.3	Método baseado numa rigidez nominal para determinação dos efeitos locais de segunda ordem.....	42
2.3.4.4	Cálculo da fluência.....	44
2.3.5	Armaduras máximas e mínimas	45
3	METODOLOGIA	46
3.1	Cálculos utilizando a NBR 6118:2014	49
3.2	Cálculos utilizando o Eurocode 2:2004	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	Resoluções de acordo com a NBR 6118:2014	54
4.1.1	Pilar lateral com f_{ck} de 30 Mpa	54
4.2	Resoluções de acordo com o Eurocode 2:2004	60
4.2.1	Pilar lateral com f_{ck} de 30 Mpa	60
4.3	Discussão de resultados	71
4.3.1	Comparativo entre normas	71
4.3.1.1	Resistência característica à compressão 30 Mpa.....	71
4.3.1.2	Resistência característica à compressão 70 Mpa.....	73
4.3.2	Concreto convencional e CAD na NBR 6118:2014	74

4.3.3	<i>Variação da resistência do concreto (f_{ck})</i>	74
4.3.4	<i>Variação de altura da seção do pilar</i>	75
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	79
	APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO O <i>EUROCODE 2:2004</i>	85
	APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	96
	APÊNDICE D – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO O <i>EUROCODE 2:2004</i>	101
	APÊNDICE E – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	106
	APÊNDICE F – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO O <i>EUROCODE 2:2004</i>	112
	APÊNDICE G – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR LATERAL COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	123
	APÊNDICE H – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR LATERAL COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO O <i>EUROCODE 2:2004</i>	129
	APÊNDICE I – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	134
	APÊNDICE J – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO O <i>EUROCODE 2:2004</i>	138
	APÊNDICE K – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 20 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014	143

APÊNDICE L – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 25 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014....	149
APÊNDICE M – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 35 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014....	155
APÊNDICE N – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E $H = 0,40$ M UTILIZANDO A NBR 6118:2014.....	161
APÊNDICE O – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E $H = 0,30$ M UTILIZANDO A NBR 6118:2014.....	167
APÊNDICE P – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E $H = 0,25$ M UTILIZANDO A NBR 6118:2014.....	173
APÊNDICE Q – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E $H = 0,20$ M UTILIZANDO A NBR 6118:2014.....	181
ANEXO A – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA ($D'/H = 0,10$).....	187
ANEXO B – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA ($D'/H = 0,20$).....	188
ANEXO C – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA ($D'/H = 0,25$).....	189
ANEXO D– ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA OBLIQUA ($v= 0, v= 0,2, v= 0,4, v= 0,6$)	190
ANEXO E– ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA OBLIQUA ($v= 0,8, v= 1,0, v= 1,2, v= 1,4$)	191
ANEXO F– CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO.....	192

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto armado no Brasil, embora dividindo espaço com novas tecnologias, apresenta posição de destaque nas atividades da construção civil, visto que é um material de fácil obtenção e que está incorporado na cultura do setor, o que viabiliza o maior acesso à mão de obra.

A necessidade de materiais que permitam a otimização das estruturas de concreto, aliada à evolução do conhecimento acerca do comportamento mecânico do material e ao progresso das técnicas de elaboração de projetos estruturais, possibilitaram o desenvolvimento do concreto de alto desempenho (CAD), que possui elevada resistência à compressão (f_{ck}), proporciona elementos mais esbeltos e de menor seção, apresenta baixa porosidade, baixa permeabilidade e possibilita redução nas taxas de aço da estrutura. Em contrapartida, requer elevado controle de qualidade desde a escolha dos materiais até a adequada execução.

As características que este material possui acarretam na possibilidade de maiores vãos, maior área útil e notável durabilidade, o que direcionam os olhos do mercado para as potencialidades e aplicabilidades do concreto de alto desempenho. Neste contexto, a utilização em pilares se destaca, pois são elementos que sustentam todas as ações nas lajes e vigas e que possuem a responsabilidade de transpor tais cargas para as fundações, o que o torna de grandes dimensões em situações de cargas elevadas. Esta utilização é particularmente importante na cidade de Fortaleza, que, devido a mudanças na cota do farol, poderá vir a ter edifícios com gabaritos mais altos e conseqüentemente de maiores cargas. Assim, a utilização de um material mais resistente nos pilares em tais situações, ocasiona menores dimensões e otimização do espaço arquitetônico, o que certamente acarretará em maior utilização do CAD em Fortaleza.

Comumente, o CAD é designado também como concreto de alta resistência (CAR) devido à resistência à compressão (f_{ck}) ser o principal parâmetro de comparação entre este material e o concreto convencional. No entanto, o ganho de resistência propicia diversas outras características favoráveis, tornando-o assim, também, de alto desempenho.

O desenvolvimento científico acerca do concreto de alto desempenho acarretaram em atualização recente da NBR 6118, ocorrida em 2014. Nesta, inseriu-se um novo grupo de resistência, o grupo II, conforme categorização da ABNT NBR 8953:2015, em que estão inseridos os concretos que apresentam resistência à compressão entre 55 e 90 MPa. Até então, a norma englobava em suas metodologias somente aqueles com resistência entre 20 e 50 MPa.

Tão importante quanto a utilização de tecnologias e materiais adequados numa obra, a existência de um projeto estrutural ideal é imprescindível para que se guie a execução e

garanta a segurança dos usuários e o desempenho adequado da estrutura. Assim, visando um projeto de qualidade, é necessário a utilização das normas técnicas, que embasam e orientam o projetista.

A NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento é a norma que orienta os projetos de estruturas de concreto armado no Brasil e é produzida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e elaborada por profissionais e pesquisadores. Em sua atual versão, tal qual a anterior, é reconhecida internacionalmente pela International Organization for Standardization (ISO), visto que atende exigências internacionais.

Segundo Laranjeiras (2000), tal harmonização internacional tem por objetivo a unificação das definições de termos gerais utilizados, definição dos requisitos básicos de resistência, estabilidade, desempenho, serviço e durabilidade e estabelecimento das bases da verificação de atendimento à esses requisitos básicos.

Assim, devido ao seu caráter internacional, a NBR 6118 se põe em posição de destaque, juntamente com normas consolidadas, como a norma europeia (*Eurocode 2:2004 – Design of concrete structures*) e a norma americana (*ACI 318:2014 – Building Code Requirements for Structural Concrete*).

1.1 Problema de pesquisa

O uso do CAD é bastante consolidado em países como Canadá, Estados Unidos, Japão, Coréia do Sul e França, amparados principalmente pela *Eurocode 2*, *ACI 318* e décadas de avanço científico. No entanto, no Brasil, embora utilizado desde a década de setenta, os estudos acerca desse material e a normatização de dimensionamento são recentes, o que constata um certo atraso em relação à outras potências.

Assim, questiona-se de que forma a utilização de CAD impacta na taxa de armadura e volume de concreto e qual o grau de maturidade e conservadorismo que a NBR 6118 apresenta no dimensionamento dessas estruturas e de estruturas convencionais em relação à normas mais consolidadas.

1.2 Questões motivadoras

Apresenta-se a seguir as questões que motivam a realização do presente trabalho.

- a) A utilização de concreto de alto desempenho em pilares é eficaz?
- b) Há divergências significativas na metodologia de cálculo de pilares da NBR 6118 e do *Eurocode 2*?
- c) Há expressiva diferença entre as duas normas na taxa de armadura resultante de pilares?

1.3 Justificativa

A construção civil é historicamente um setor que se desenvolve lentamente e os principais métodos construtivos se mantêm os mesmos desde muito tempo. No entanto, nos últimos anos, diversas novas tecnologias vêm surgindo mediante a demanda de obras mais econômicas e que tenham menores impactos ambientais. O concreto de alto desempenho, como material que comumente demanda menor quantidade de água em sua produção e que permite menor consumo de aço, possui elevado potencial para atender às necessidades atuais.

Paralelamente, o *Eurocode 2* é bastante consolidado no dimensionamento de estruturas de concreto armado, seja convencional ou de alto desempenho, devido ao seu caráter internacional e a sua aplicabilidade à diferentes resistências de concreto, embasadas por estudos que decorrem desde muito tempo. A NBR 6118, embora bastante respaldada por órgãos internacionais, é recente na normatização de estruturas de CAD.

Espera-se, portanto, contribuir para maior conhecimento acerca das características do CAD e sua aplicabilidade no dimensionamento de estruturas. Ademais, almeja-se contribuir para maior entendimento dos resultados da norma brasileira quanto ao uso deste material. Além disso, deseja-se verificar se a norma brasileira produz resultados que possibilitam estruturas de concreto convencional e de alto desempenho mais econômicas e otimizadas em comparação com o *Eurocode 2*.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar e comparar as metodologias de cálculo de pilares de concreto convencional e de alta resistência da ABNT NBR 6118:2014: projeto de estruturas de concreto – Procedimento e do *Eurocode 2:2004 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN-1992-1-1:2004).

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Contrastar o uso de CAD e concreto convencional aplicados à pilares;
- b) Comparar metodologias de dimensionamento de pilares das duas normas;
- c) Comparar a taxa de armadura de pilares resultante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora normatizado no Brasil recentemente, o estudo de dimensionamento de estruturas de concreto de alto desempenho advém de décadas, utilizando-se como base dados experimentais e metodologias de dimensionamento de normas estrangeiras ou de autores independentes. Paralelamente, a comparação entre normas é tema de discussão constante na academia, visto a importância da busca pela otimização das estruturas.

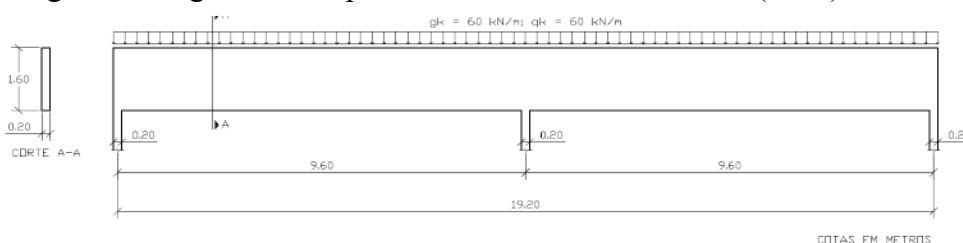
Vanderlei (1999) realizou ensaios de pilares de concreto de alta resistência sob compressão excêntrica, em pesquisa executada no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos EESC – USP. Utilizou-se como base a metodologia de ensaio proposta por Lima (1997), aperfeiçoando-se o modelo através da utilização de dispositivos de ensaio de pilares que gerassem resultados experimentais mais próximos dos obtidos na idealização teórica. Após ensaios para a obtenção do traço, moldou-se pilares com seção transversal de 15 cm x 30 cm, altura de 174 cm (índice de esbeltez igual a 40), resistência à compressão de 80 Mpa e variadas taxas de armaduras transversais e longitudinais. Aplicou-se excentricidade de 38 cm e os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração foram realizados. Os resultados obtidos foram consistentes com os resultados esperados de acordo com expressões propostas na literatura de pesquisadores e normas estrangeiras (*ACI 318*), o que leva à observação de que na década de 90 os estudos brasileiros acerca do concreto de alta resistência já apresentavam análises consistentes do material.

Aguiar e Pinheiro (2008) apresentaram visão geral sobre o dimensionamento e detalhamento de pilares de concreto de alta resistência, exibindo as diferenças e convergências para o concreto convencional. Quanto ao diagrama tensão-deformação, observou-se que diversos pesquisadores contestam a utilização do diagrama parábola-retângulo convencional para CAR argumentando com melhorias que idealizam o comportamento do material de maneira mais satisfatória. Em relação à não-linearidade física, os autores alertam que os menores valores de deformação plástica na flexão que o material em questão possui pode levar o pilar à ruína mais rapidamente, sendo necessário atenção caso se utilize CAR em pilares esbeltos, visto que apresentam maior instabilidade. No que se refere à fluência, citou-se a tendência de redução da fluência com o aumento da resistência. Isto ocorre devido a menor perda de umidade. Além disso, atentou-se para as características do material, que podem ocasionar a perda prematura de cobrimento antes da máxima capacidade de carga prevista ser alcançada. Para isso, recomendou-se a realização de estudo de confinamento, que garantem ganhos de resistência e ductilidade. Por fim, citou-se a dúvida presente no meio científico

quanto às taxas de armadura transversal necessárias para a estrutura de um pilar de concreto de alto desempenho e a ausência de diagramas de interação de momento fletor e esforço normal para diversos valores de resistência que visem o dimensionamento.

Nunes (2012) buscou comparar e analisar as normas NBR 6118:2007, *Eurocódigo 2:2010* (versão traduzida para o português do *Eurocode 2:2004*) e *Fib Model Code:2010* através do dimensionamento de esforço cortante e momento fletor do trecho de uma viga de seção transversal 20 cm x 160 cm, comprimento de 19,20 metros e concreto de resistência à compressão de 25 MPa, conforme a figura 1. O dimensionamento foi realizado em uma seção transversal distante 7,80 metros do apoio da esquerda para a sequência de cálculo, porém em seções a cada 20 centímetros para o dimensionamento geral.

Figura 1 – Viga utilizada para o estudo de caso de Nunes (2012)



Fonte: Nunes (2012, p. 57).

No estudo levou-se em consideração os três níveis de aproximação que a *Fib* propõe para a utilização do esforço cortante resistente de cálculo atribuído ao concreto e ao reforço, sendo o ângulo de inclinação das diagonais de compressão diferente para cada nível (adotado como 45° quando permitido). Utilizou-se, também, os dois modelos de cálculo propostos pela NBR 6118. Observou-se que os coeficientes de majoração e minoração da norma brasileira apresentam diferenças para as outras duas, que apresentam hipóteses semelhantes entre si neste quesito. Além disso, analisou-se que, para o estudo de caso utilizado, a *Fib Model Code* exige maior valor de armadura transversal mínima, apresentando valor aproximadamente 33% maior que o *Eurocódigo* e 15% maior que a NBR. No tocante à armadura transversal necessária, na maioria das seções, a *Fib* apresentou-se como menos conservadora nos níveis de aproximação I e III, enquanto o nível de aproximação II e o *Eurocódigo* apresentaram-se como mais conservadores, tendo-se a NBR como intermediária. No entanto, para os métodos de cálculo que permitem adotar inclinação das diagonais de compressão de 45°, a norma brasileira apresentou-se como a menos conservadora. Em contrapartida, a NBR 6118 mostrou-se mais restritiva no detalhamento quanto aos espaçamentos.

Júnior (2014) comparou a NBR 6118:2014 e *Eurocode 2:2004* no dimensionamento de pilares isolados em estruturas de nós fixos por meio da análise de três tipos de pilares: um central, um lateral e um de canto, compostos de concreto convencional. Para o estudo, desconsiderou-se excentricidades de forma em todos os pilares e excentricidade inicial no pilar central. Após o dimensionamento, obteve-se que a norma brasileira apresentou-se como mais conservadora na taxa de armadura nos três casos: 2,74% no pilar central, 11,72% no pilar lateral e 6,68% no pilar de canto. Embora apresentem diferenças de cálculo, as normas resultam em pilares semelhantes, o que leva o autor a concluir que as normas brasileira e europeia estão em conformidade.

Freitas (2014) estudou os custos de uma estrutura utilizando-se concreto de três resistências à compressão diferentes (25 MPa, 40 MPa e 60 MPa) e tabela de índices e custos da PINI. Fez-se modelagem no SAP 2000 de um edifício de 18 pavimentos para a obtenção dos esforços seguida de dimensionamento e detalhamento de acordo com as metodologias de cálculo da NBR 6118:2014. Para cada dimensionamento, buscou-se utilizar as mesmas simplificações visando padronização dos resultados, como por exemplo a adoção dos maiores valores de esforços solicitantes para elementos de mesma natureza e redução das dimensões dos pilares a cada 6 pavimentos. Após o dimensionamento, observou-se diminuição considerável das dimensões e armaduras das vigas e pilares proporcionalmente ao aumento da resistência, conforme o quadro abaixo.

Quadro 1 – Resultados de dimensionamento obtidos por Freitas (2014)

	Lajes	Vigas	Pilares Superiores	Pilares Medianos	Pilares Inferiores
C25	h = 12cm As = $\Phi 10c12,5$ As' = $\Phi 10c10$	20 x 68cm As = 3 $\Phi 16$ As' = 8 $\Phi 16$ ASpele = 3 $\Phi 8$	75 x 35 14 $\Phi 25$	75 x 45 14 $\Phi 25$	75 x 65 18 $\Phi 25$ 2 $\Phi 25$ - auxiliar
C40	h = 12cm As = $\Phi 10c12,5$ As' = $\Phi 10c10$	15 x 62cm As = 4 $\Phi 16$ As' = 9 $\Phi 16$ ASpele = 3 $\Phi 8$	65 x 35 8 $\Phi 25$	55 x 45 10 $\Phi 25$	55 x 65 14 $\Phi 25$ 2 $\Phi 25$ - auxiliar
C60	h = 12cm As = $\Phi 10c12,5$ As' = $\Phi 10c10$	15 x 58cm As = 4 $\Phi 16$ As' = 9 $\Phi 16$	50 x 35 8 $\Phi 25$	45 x 45 8 $\Phi 25$	40 x 65 10 $\Phi 25$ 2 $\Phi 25$ - auxiliar

Fonte: Freitas (2014, p. 95).

Para as lajes não obteve-se diferenças, visto que se padronizou a espessura devido ao fato de que a diminuição da espessura para concretos mais resistentes acarretaria no aumento da quantidade de armaduras. Conseqüentemente, em relação a custo de execução, o concreto

de 25 MPa se torna mais vantajoso por apresentar menor custo de produção. Para as vigas e pilares, embora o dimensionamento com concreto C60 apresente dimensões e armaduras consideravelmente menores, o custo de execução da estrutura com este material manteve-se acima da execução com os concretos menos resistentes analisados. Isso se deve ao elevado custo que o concreto de 60 MPa apresenta, tendo preço por metro cúbico aproximadamente 2,5 vezes maior que o concreto de 25 MPa e 2,0 vezes maior que o concreto de 40 MPa. Cabe salientar que o estudo se ateve à análise de custo de execução, tendo-se diversas outras variáveis, qualitativas e quantitativas, que podem vir a tornar o concreto de alta resistência viável economicamente, visto que suas propriedades permitem aumento da vida útil e aumento do valor agregado em decorrência da diminuição das seções dos elementos.

Lima (2016) realizou a comparação das normas NBR 6118:2003, NBR 6118:2014, e *Eurocode 2:2004* no dimensionamento de pilares-parede, a partir de estudo de caso de elemento biapoiado de 3 metros de comprimento, seção transversal de 300 cm x 20 cm, resistência a compressão de 30 MPa, cobrimento de 30 mm e armadura de aço CA-50. A metodologia de cálculo da norma brasileira atual muito se assemelha à versão anterior, tendo pequena modificação que contribui para a redução da taxa de armadura. O pilar-parede foi dividido em 6 faixas, sendo utilizado três casos diferentes para os esforços solicitantes. A partir dos dimensionamentos, obteve-se, para a NBR 6118:2014, uma taxa de armadura 0,6% menor que a NBR 6118:2003 e 1% menor que o *Eurocode*, valores que quando analisados por meio de valores financeiros, em grandes obras, apresenta diferença relevante.

Alves e Souza (2018) buscaram definir a estrutura otimizada, por meio de cálculo iterativo, de pilares de CAR medianamente esbeltos e submetidos à flexo-compressão oblíqua. Utilizou-se o algoritmo dos pontos interiores para desenvolvimento de programa capaz de sugerir a estrutura de pilar que atenda aos critérios e exigências da norma e possua o menor custo. O programa desenvolvido produziu três cenários: um com a geometria fixada, outro com geometria livre para variação e outro com geometria e resistência à compressão do concreto livres para serem otimizados. Utilizou-se para efeito de comparação pilares dimensionados por ábacos. Nos 4 casos analisados, houve economia de 15 a 40% na situação de variação de geometria das duas variáveis. Na situação de cargas elevadas (5000 kN), a estrutura de concreto armado comum (45 MPa) apresentou-se como a mais econômica, embora de grandes dimensões (40x40 cm). Quando o mesmo exemplo foi limitado à base de 20 cm, resultou-se em concreto de 70 Mpa, porém com custo mais elevado que a hipótese anterior. Assim, os autores concluem que a utilização de CAR só se torna financeiramente vantajosa (no quesito execução) quando se há imposição ou limites de dimensões.

2.1 Introdução teórica

2.1.1 Concreto de alto desempenho

A ABNT NBR 8953:2015: Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, subdivide os concretos estruturais em dois grupos de acordo com a resistência característica à compressão (f_{ck}), de acordo com o quadro abaixo.

Quadro 2 – Classes de resistência dos concretos estruturais

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

Fonte: NBR 8953 (2015, p.02).

A classe de resistência grupo II se refere aos concretos de alto desempenho ou, como também podem ser nomeados, concretos de alta resistência. Cabe salientar que esta classificação é utilizada para a NBR 6118 e não é definida mundialmente, na qual diferentes normas e códigos definem diferentes fronteiras para a classificação de um CAD.

A produção deste material requer exigente controle de qualidade, visto que os materiais devem ser devidamente selecionados e dosados. Deste modo, recomenda-se que a dosagem do material seja realizada em usina, na qual há controle rigoroso de qualidade.

O elevado f_{ck} pode ser obtido, principalmente, através do uso de aditivos e redução do fator água/cimento. Devido ao uso de tais aditivos deve-se atentar a qual tipo de cimento será utilizado e se este possui compatibilidade com as características químicas do aditivo, visando evitar a ocorrência de patologias.

Em relação aos agregados, é necessário a idealização de uma distribuição granulométrica compatível com as características que se deseja produzir no concreto, atentando-se novamente às reações químicas que podem vir a ocorrer e à quantidade de água que os agregados irão absorver ou que necessitam para possibilitar a trabalhabilidade.

Dentre os aditivos utilizados no CAD pode-se citar os superplastificantes, que possibilitam reduzir a quantidade de água necessária, e adições minerais, como por exemplo a pozolana, que possibilitam maior trabalhabilidade, maior resistência, menor permeabilidade e menor sensibilidade quanto a mudanças de temperatura.

Dentre as desvantagens do CAD, pode-se citar a maior ruptura frágil que este material possui em relação ao concreto convencional, que ocorre devido a menor ductilidade apresentada e conseqüente tem-se a menor capacidade de distribuição de tensões. Ademais, há a possibilidade de perda prematura de cobrimento devido a formação de um plano natural de separação deste. Tais características negativas corroboram para a necessidade de que haja elevado controle de qualidade dos materiais, dimensionamento preciso e cauteloso e correta idealização da estrutura.

2.1.2 Estabilidade estrutural

Os efeitos de primeira ordem são aqueles calculados a partir da geometria inicial da estrutura, indeformada, sendo os efeitos de segunda ordem advindos da deformação da estrutura e que causam não-linearidade entre as ações e deformações. As não-linearidades podem ser geométricas (no caso dos pilares, flambagem) ou físicas (fissuração e fluência do concreto). Segundo a NBR 6118, os efeitos de segunda ordem dividem-se em efeitos globais, locais e localizados.

Os efeitos globais de segunda ordem advêm do deslocamento horizontal dos nós da estrutura, proporcionado pela ação das cargas verticais e horizontais. Os efeitos locais de segunda ordem ocorrem isoladamente em cada elemento, devido os eixos que não se mantêm retilíneos. Os efeitos localizados de segunda ordem ocorrem em pilares-parede, em que uma região pode apresentar não-retilíneidade maior do que a do elemento como um todo.

2.1.3 Estrutura de nós fixos e nós móveis

Visando a simplificação de cálculos mediante considerações, é válido dividir as estruturas em estrutura de nós fixos e estrutura de nós móveis.

Conforme a NBR 6118, as estruturas de nós móveis possuem deslocamentos horizontais consideráveis e os efeitos globais de 2º ordem são importantes (superiores a 10% dos respectivos esforços de 1º ordem). Para o cálculo de estruturas englobadas em nós móveis,

deve-se considerar os esforços de 2º ordem globais, locais e localizados. Paralelamente, nas estruturas de nós fixos, os deslocamentos horizontais são pequenos e os efeitos globais de 2º ordem são desprezíveis, sendo necessário portanto a consideração somente dos efeitos locais e localizados (quando houver).

Além disso, numa estrutura de nós fixos é permitida a análise isolada de cada elemento como barras vinculadas nas extremidades aos demais elementos estruturais.

Cabe salientar que a NBR 6118 (2014, p. 105) estabelece que “sob a ação de forças horizontais, a estrutura é sempre calculada como deslocável. O fato de a estrutura ser classificada como sendo de nós fixos dispensa apenas a consideração dos esforços globais de 2º ordem”

A avaliação se a estrutura deve ser considerada de nós deslocáveis ou indeslocáveis é realizada mediante dois processos aproximados estabelecidos em norma. Dentre eles, o método do coeficiente γ_z .

2.1.3.1 Coeficiente γ_z

O processo de cálculo do coeficiente γ_z da NBR 6118, estabelecido por Vasconcelos (1997) e Franco (1997), é válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares e é realizado a partir da avaliação da sensibilidade da estrutura aos esforços de segunda ordem globais em comparação com os esforços de primeira ordem.

O valor de γ_z é dado por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{\text{tot,d}}}{M_{1,\text{tot,d}}}} \quad (1)$$

Onde:

$M_{1,\text{tot,d}}$ - Momento de tombamento, dado pela soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura.

$\Delta M_{\text{tot,d}}$ - Soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem.

A estrutura será considerada de nós fixos se apresentar coeficiente γ_z menor ou igual a 1,1.

2.1.4 Flambagem

De acordo com Leonhardt e Monnig (1977), quando a relação altura do pilar/menor dimensão da seção transversal é maior que 15, o aumento de carga e consequente aumento dos esforços normais de compressão, geram deformações por flexão, sendo o colapso de pilares esbeltos por essas deformações denominado de flambagem.

Em concordância, Carvalho e Pinheiro (2009, p. 312) definem a flambagem como “[...] um fenômeno que causa equilíbrio instável na barra, onde o estado de deformação da estrutura influi nos esforços internos (não-linearidade geométrica), não valendo a superposição de efeitos.”

Deve-se salientar que o fenômeno de flambagem devido à compressão é designado como um efeito local de segunda ordem.

A verificação da flambagem é realizada por intermédio do índice de esbeltez (λ) e seu cálculo consta no formulário de cada norma, conforme os itens 2.2.4.1 e 2.3.4.1 deste trabalho.

2.1.5 Tipos de excentricidades

Excentricidade se configura como a distância do centro geométrico em que uma força está atuando no pilar. Quando atuando no centro geométrico, ocorre a compressão centrada. Quando aplicada sobre um dos eixos de simetria e distante do centro geométrico, ocorre a flexão composta. Quando aplicada em um ponto qualquer da seção, há a flexão oblíqua. Há diversos tipos de excentricidades e que são causadas por diferentes fatores.

2.1.5.1 Excentricidade inicial (e_i)

Esta excentricidade ocorre somente em pilares laterais e de canto, visto que estão ligados à extremidade de uma viga e consequentemente estão sob a ação de um momento fletor. Esta ação pode ser representada por uma excentricidade da força de compressão. Podem ser obtidas pelas equações:

$$e_{ix} = \frac{M_x}{N} \quad (2)$$

$$e_{iy} = \frac{M_y}{N} \quad (3)$$

Onde:

M_x e M_y – Momentos de ligação;

N – Forças normais atuantes.

Quando não há informações suficientes, o momento de engastamento perfeito do apoio permite determinar os momentos de ligação de maneira aproximada.

2.1.5.2 *Excentricidade de forma*

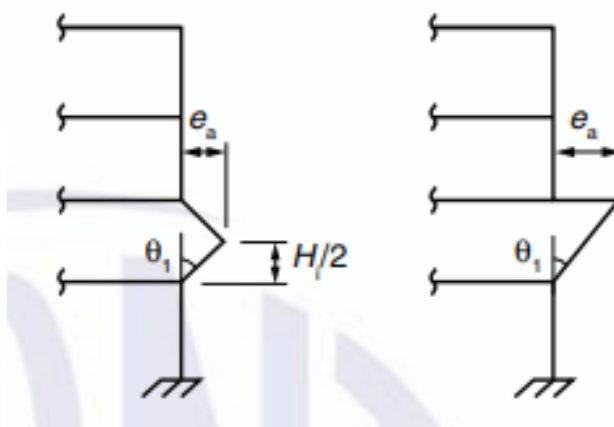
A excentricidade de forma ocorre quando os eixos das vigas não coincidem com o eixo dos pilares. Desta forma, o esforço gerado pela viga no pilar não passa pelo centro geométrico da seção transversal deste, gerando a excentricidade de forma.

2.1.5.3 *Excentricidade accidental (e_a)*

Tal excentricidade engloba as imperfeições geométricas que podem ocorrer por desvio do eixo da peça e é gerada a partir das imperfeições existentes nas peças estruturais. Pode ser dividida em duas categorias: imperfeições globais e imperfeições locais.

No caso de pilares, deve-se considerar para as imperfeições locais o desaprumo e a falta de retilineidade do seu eixo, conforme a figura 2. No entanto, a norma admite que para casos usuais, a consideração da falta de retilineidade é suficiente para a obtenção de resultados consistentes.

Figura 2 – Falta de retilineidade e desaprumo de pilar, respectivamente



Fonte: NBR 6118 (2014, p.60).

2.1.5.4 Excentricidade de segunda ordem (e_2)

A excentricidade de segunda ordem se refere àquela utilizada para reproduzir o fenômeno da flambagem, por meio da aplicação de força excêntrica em relação ao centro do pilar.

2.1.5.5 Excentricidade suplementar (fluência)

A excentricidade suplementar é utilizada para a consideração do efeito da fluência do concreto e é obrigatória em pilares com índice de esbeltez $\lambda > 90$ para a NBR 6118:2014 e $\lambda > 75$ para o *Eurocode 2:2004*.

2.1.6 Classificação dos pilares

Os pilares podem ser classificados quanto à posição em planta (central, lateral e canto) ou quanto à esbeltez (curtos, medianamente esbeltos, esbeltos e muito esbeltos).

2.1.6.1 Quanto à posição em planta

A localização do pilar em planta determina a quais excentricidades do carregamento da carga no pilar e o tipo de solicitação a que ele estará submetido.

2.1.6.1.1 Pilares centrais ou intermediários

Estes pilares estão sob efeito somente das cargas concentradas verticais. Deste modo, estão submetidos somente à compressão simples.

2.1.6.1.2 Pilares laterais ou de extremidade

Além da solicitação vertical, há momento fletor que é transmitido pelas vigas na direção perpendicular e que estão apoiadas e são interrompidas no pilar. Neste caso, tem-se um caso de flexão composta.

2.1.6.1.3 Pilares de canto

Além da solicitação vertical, há momentos fletores que são transmitidos pelas vigas nas duas direções e que são interrompidas no pilar. Neste caso, tem-se um caso de flexão composta oblíqua.

2.1.6.2 Quanto à esbeltez

A classificação dos pilares quanto à esbeltez é feita para fins didáticos, visto que as normas utilizadas não estabelecem uma divisão de maneira direta. Assim, é utilizada a classificação curto, medianamente esbeltos, esbeltos e muito esbeltos, e são determinadas pelo índice de esbeltez (λ).

- Pilares curtos: λ menor que λ_1 ;
- Pilares medianamente esbeltos: $\lambda_1 \leq \lambda \leq 90$;
- Pilares esbeltos: $90 \leq \lambda \leq 140$;
- Pilares muito esbeltos: $140 \leq \lambda \leq 200$.

2.2 Formulário da NBR 6118:2014

2.2.1 Dimensões mínimas

A NBR 6118:2014 estabelece valores mínimos para as dimensões de pilares e pilares-parede, limitando a 19 cm a menor dimensão da seção transversal. No entanto, permite-se dimensões entre 19 cm e 14 cm desde que os esforços solicitantes de cálculo sejam majorados por um coeficiente adicional γ_n e a seção transversal possua área maior ou igual a 360 cm², conforme o quadro 3.

Quadro 3 – Valores do coeficiente adicional γ_n - NBR

b cm	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

Onde:
 $\gamma_n = 1,95 - 0,05 b$;
 b é a menor dimensão da seção transversal do pilar.
 NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo nos pilares, quando de seu dimensionamento.

Fonte: NBR 6118 (2014, p.73).

2.2.2 Coeficientes de ponderação no estado-limite último (ELU)

Para a verificação do estado-limite último a norma brasileira estabelece os seguintes valores de coeficientes γ_c e γ_s para o concreto e o aço, respectivamente:

Quadro 4 – Valores dos coeficiente adicional γ_c e γ_s – NBR

Combinações	Concreto	Aço
	γ_c	γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: NBR 6118 (2014, p.71).

Para a combinação de ações tem-se ponderações para o coeficiente γ_f e γ_{f2} , apresentados nos quadros abaixo.

Quadro 5 – Valores para o coeficiente γ_f – NBR

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ¹⁾	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde:
D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.
¹⁾ Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: NBR 6118 (2014, p.65).

Quadro 6 – Valores para o coeficiente γ_{f2} – NBR

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1 ¹⁾	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

¹⁾ Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente aos problemas de fadiga, ver seção 23.
²⁾ Edifícios residenciais.
³⁾ Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: NBR 6118 (2014, p.65)

2.2.3 Excentricidades de 1ª ordem

A excentricidade de 1º ordem é composta pela excentricidade inicial (e_i), de forma (e_f) e acidental (e_a), sendo esta última a mais imprevisível, visto que não depende do

posicionamento em planta e do posicionamento da estrutura, conforme a excentricidade inicial e de forma. Assim, o valor da excentricidade acidental no caso de falta de retlineidade pode ser calculado por:

$$e_a = \theta_1 * \left(\frac{l}{2}\right) \quad (4)$$

Enquanto a excentricidade acidental na situação de desaprumo pode ser calculada por:

$$e_a = \theta_1 * (l) \quad (5)$$

Em que:

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l}} \geq \theta_{1,\min} \quad (6)$$

Onde:

θ_1 – Desaprumo de um elemento vertical contínuo;

l – Altura de um pavimento;

$\theta_{1,\min}$ – 1/300 para imperfeições locais;

$\theta_{1,\max}$ – 1/200.

2.2.3.1 Momento mínimo

Define-se como momento total de primeira ordem o acréscimo das imperfeições locais no momento de primeira ordem. A excentricidade total, conforme recomendação da NBR 6118, deve respeitar o valor mínimo ($e_{1,\min}$) calculado por:

$$e_{1,\min} = 0,015 + 0,03 * h \quad (7)$$

Onde:

h – Altura total da seção transversal na direção considerada, em metros.

Caso o momento total mínimo seja respeitado, pode-se admitir que o efeito das imperfeições locais esteja atendido.

2.2.4 Excentricidades de 2ª ordem

2.2.4.1 Índice de esbeltez (λ)

O índice de esbeltez é o método da NBR 6118 para a avaliação da possibilidade de ocorrência de flambagem num pilar, sendo uma grandeza dependente do comprimento do pilar, da seção transversal e das condições de extremidade. É dado por:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (8)$$

Em que:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (9)$$

Onde:

l_e – Comprimento de flambagem;

i – Raio de giração;

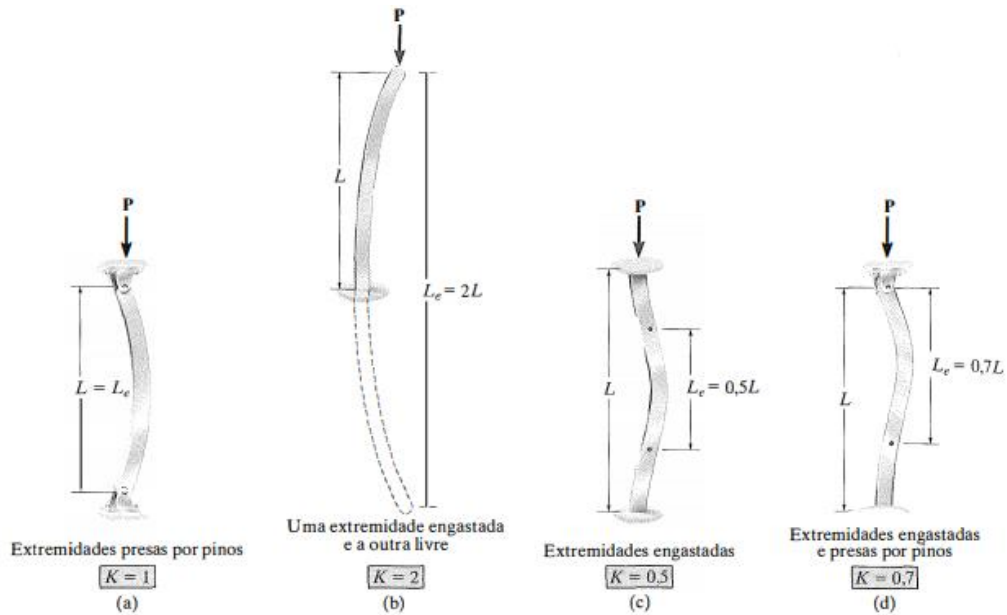
I – Momento de inércia;

A – Área da seção transversal do pilar.

A ocorrência da flambagem na direção X (λ_x) se dá na rotação da seção transversal segundo o eixo Y (i_y), valendo a recíproca.

A NBR 6118 (2014, p. 81) define o comprimento de flambagem (l_e) como sendo “o comprimento equivalente do elemento comprimido (pilar), suposto vinculado em ambas as extremidades”. Tem-se os seguintes comprimentos de flambagem para diferentes condições de apoio:

Figura 3 – Comprimentos efetivos para diversas condições de apoio - NBR



Fonte: Hibbeler (2010, p.484).

Cabe salientar que a NBR 6118:2014 não admite pilares com índice de esbeltez superior a 200. No entanto, abre-se exceção para elementos poucos comprimidos com força normal menor que $0,10 f_{cd} A_c$.

Para pilares com índice de esbeltez acima de 140, os esforços solicitantes de cálculo devem ser acrescidos de um coeficiente adicional γ_{n1} na análise dos efeitos locais de 2º ordem, em que:

$$\gamma_{n1} = 1 + [0,01 * (\lambda - 140)/1,4] \quad (10)$$

2.2.4.2 Dispensa da análise dos efeitos locais de segunda ordem

A NBR permite que os esforços locais de 2º ordem em elementos isolados sejam desprezados quando o índice de esbeltez for menor que o valor limite λ_1 , calculado por:

$$\lambda_1 = \frac{25 + 12,5 * e_1/h}{\alpha_b} \quad (11)$$

Onde:

e_1 – Excentricidade de primeira ordem (não inclui a excentricidade acidental);

h – Altura total da seção transversal na direção considerada, em metros.

Sendo:

$$35 \leq \lambda_1 \leq 90$$

E onde o valor de α_b é obtido por:

a) Para pilares biapoiados sem cargas transversais:

$$\alpha_b = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} \geq 0,40 \quad (12)$$

Sendo:

$$1,0 \geq \alpha_b \geq 0,4$$

Os momentos de primeira ordem M_A e M_B são os momentos nos extremos do pilar. Para M_A deve-se adotar o maior valor absoluto ao longo do pilar biapoiado e para M_B deve-se adotar sinal positivo se tracionar a mesma face que M_A e negativo em caso contrário.

b) Para pilares biapoiados com cargas transversais significativas ao longo da altura:

$$\alpha_b = 1,0$$

c) Para pilares em balanço:

$$\alpha_b = 0,80 + 0,20 * \frac{M_C}{M_A} \geq 0,85 \quad (13)$$

Sendo:

$$1,0 \geq \alpha_b \geq 0,85$$

M_A é o momento de 1º ordem no engaste e M_C é o momento de 1º ordem no meio do pilar em balanço.

d) Para pilares biapoiados ou em balanço com momentos menores que o momento mínimo:

$$\alpha_b = 1,0$$

2.2.4.3 Método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada para determinação dos efeitos locais de segunda ordem

O momento total máximo no pilar pode ser calculado através de uma majoração do momento de primeira ordem através da equação:

$$M_{Sd,tot} = \frac{\alpha_b * M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120 * \kappa/v}} \quad (14)$$

Em que:

$$\kappa_{aprox} = 32 * \left(1 + 5 * \frac{M_{Rd,tot}}{h * Nd} \right) * v \quad (15)$$

E:

$$v = \frac{Nd}{A_c * f_{cd}} \quad (16)$$

Onde:

v – Força normal adimensional;

h – Altura total da seção transversal na direção considerada, em metros;

N_d – Valor da força normal de cálculo;

$M_{1d,A}$ – Momento de 1º ordem do momento M_A ;

$M_{Rd,tot}$ – Momento resistente total;

A_c – Área da seção do pilar.

Em caso de dimensionamento, a norma estabelece um processo aproximado que recai na seguinte formulação:

$$M_{Sd,tot} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2 * A} \quad (17)$$

Em que:

$$A = 5 * h \quad (18)$$

$$B = h^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h * \alpha_b * M_{1d,A} \quad (19)$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_b * M_{1d,A} \quad (20)$$

2.2.4.4 Cálculo da fluência

De acordo com a NBR 6118:2014, a fluência pode ser calculada pelo acréscimo de um momento M_c ao momento de segunda ordem M_{2d} , em que o acréscimo é calculado por:

$$M_c = N_{sd} * e_c \quad (21)$$

Em que:

$$e_c = \left(\frac{M_{Sg}}{N_{Sg}} + e_a \right) * \left(2,718^{\frac{\varphi * N_{Sg}}{N_e - N_{Sg}}} - 1 \right) \quad (22)$$

E:

$$N_e = \frac{10 * E_c * I_c}{l_e^2} \quad (23)$$

Onde:

M_{Sg} e N_{Sg} – Valores característicos dos esforços solicitantes devidos às ações permanentes;

e_a – Excentricidade acidental;

φ – Coeficiente de fluência;

E_c – Módulo de elasticidade do concreto;

I_c – Momento de inércia da seção bruta do elemento de concreto segundo a direção do carregamento analisado.

2.2.5 Armaduras máximas e mínimas

Visando evitar a ruptura frágil das seções transversais, a NBR estabelece uma armadura mínima dada por:

$$A_{S,\min} = \left(0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \right) \geq 0,004 * A_c \quad (24)$$

Onde:

N_d – Valor da força normal de cálculo;

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço;

A_c – Área da seção do pilar.

Esta expressão pode ser escrita em termos de taxa de armadura (ρ) por meio de:

$$\rho_{\min} = 0,15 * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} * v \geq 0,40\% \quad (25)$$

Onde:

f_{cd} – Resistência de cálculo do concreto;

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço;

v – Valor da força normal adimensional.

Visando assegurar as condições de ductilidade e validade dos ensaios que deram origem às prescrições de funcionamento do conjunto aço-concreto, é estabelecido uma

armadura máxima de 8% da seção real, considerando também a sobreposição de armadura em regiões de emenda, conforme a equação:

$$A_{S,máx,tot} = \frac{8,0}{100} * A_c \quad (26)$$

2.3 Formulário do Eurocode 2:2004

2.3.1 Dimensões mínimas

Define-se as dimensões mínimas de pilares de acordo com a classificação de resistência ao fogo constante no Eurocode 2:2004 – *Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, conforme quadro abaixo:

Quadro 7 – Dimensões mínimas para pilares e distância do eixo da barra à face para seções retangulares e circulares - Eurocode

Standard fire resistance	Minimum dimensions (mm) Column width b_{min} /axis distance a of the main bars			
	Column exposed on more than one side			Exposed on one side
	$\mu_{fi} = 0.2$	$\mu_{fi} = 0.5$	$\mu_{fi} = 0.7$	$\mu_{fi} = 0.7$
1	2	3	4	5
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40**	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45** 450/40**	350/57** 450/51**	175/35
R 180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R 240	350/61**	450/75**	-	295/70

** Minimum 8 bars
 (EN) For prestressed columns the increase of axis distance according to 5.2. (5) should be noted. (EN)

Fonte: Eurocode 2 - part 1-2 (2004, p.43).

Observa-se que na situação mais favorável, na qual trabalha-se na resistência ao fogo R 30 e eventual exposição somente em uma das faces, a mínima dimensão admissível para o pilar corresponde a 15,5 centímetros.

2.3.2 Coeficientes de ponderação no estado-limite último (ELU)

Para a verificação do estado-limite último o *Eurocode* estabelece os seguintes valores de coeficientes γ_c e γ_s para o concreto e o aço, respectivamente:

Quadro 8 – Valores para os coeficientes adicionais γ_c e γ_s – *Eurocode*

Design situations	γ_c for concrete	γ_s for reinforcing steel	γ_s for prestressing steel
Persistent & Transient	1,5	1,15	1,15
Accidental	1,2	1,0	1,0

Fonte: *Eurocode 2 – part 1-1* (2004, p.24).

Para a combinação de ações, o *Eurocode:2005 – Basis of structural design* estabelece as seguintes ponderações de ações e os valores para os coeficientes:

Quadro 9 – Valores dos coeficiente de ponderação das ações no ELU - *Eurocode*

Persistent and transient design situations	Permanent actions		Leading variable action (*)	Accompanying variable actions	
	Unfavourable	Favourable		Main (if any)	Others
(Eq. 6.10)	$\gamma_{i,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{i,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(*) Variable actions are those considered in Table A1.1

NOTE 1 The γ values may be set by the National annex. The recommended set of values for γ are :

$\gamma_{i,j,sup} = 1,10$
 $\gamma_{i,j,inf} = 0,90$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)

NOTE 2 In cases where the verification of static equilibrium also involves the resistance of structural members, as an alternative to two separate verifications based on Tables A1.2(A) and A1.2(B), a combined verification, based on Table A1.2(A), may be adopted, if allowed by the National annex, with the following set of recommended values. The recommended values may be altered by the National annex.

$\gamma_{i,j,sup} = 1,35$
 $\gamma_{i,j,inf} = 1,15$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ where unfavourable (0 where favourable)
 provided that applying $\gamma_{i,j,inf} = 1,00$ both to the favourable part and to the unfavourable part of permanent actions does not give a more unfavourable effect.

Fonte: *Eurocode* (2005, p.49).

2.3.3 Excentricidades de 1ª ordem

No *Eurocode* define-se como excentricidades de 1º ordem aquelas resultantes das ações calculadas excluindo o efeito das deformações da estrutura, mas incluindo as imperfeições geométricas.

2.3.3.1 Imperfeições geométricas

As imperfeições geométricas podem ser representadas por uma inclinação θ_1 obtida por:

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (27)$$

Em que:

$$\alpha_h = 2 * \sqrt{l}; \quad 2/3 \leq \alpha_h \leq 1 \quad (28)$$

E:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + 1/m)} \quad (29)$$

Onde:

θ_0 – Valor básico (recomenda-se utilizar 1/200);

l – Comprimento ou altura em metros (para elementos isolados equivale ao comprimento efetivo l_0);

m – Número de elementos verticais que contribuem para o efeito total (para elementos isolados equivale a 1).

Para elementos isolados, permite-se calcular o efeito das imperfeições geométricas na seção intermediária pela expressão:

$$e_i = \theta_i * \left(\frac{l_0}{2}\right) \quad (30)$$

Para uma seção de extremidade utiliza-se a expressão:

$$e_i = \theta_i * (l_0) \quad (31)$$

2.3.3.2 Excentricidade mínima

A norma determina uma excentricidade mínima de:

$$e_0 = h/30 \quad (32)$$

Onde:

h – Altura total da seção transversal na direção considerada, em metros.

No entanto, a excentricidade mínima não deve ser inferior a 20 mm para seções com armaduras simétricas sujeitas a um esforço de compressão.

2.3.4 Excentricidades de 2ª ordem

2.3.4.1 Índice de esbeltez (λ)

Assim como a NBR, o *Eurocode* utiliza o índice de esbeltez para a avaliação da possibilidade de ocorrência de flambagem num pilar.

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad (33)$$

Onde:

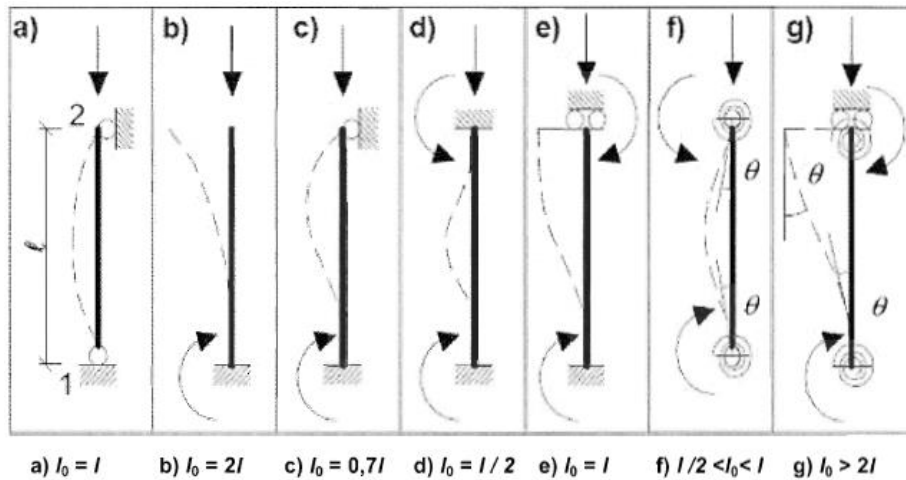
λ – Índice de esbeltez;

l_0 – Comprimento efetivo;

i – Raio de giração.

Para elementos isolados de seção transversal constante, tem-se os seguintes comprimentos efetivos:

Figura 4 – Comprimentos efetivos para diversas condições de apoio - *Eurocode*



Fonte: *Eurocode 2 – part 1-1* (2004, p.66).

2.3.4.2 Dispensa da análise dos efeitos locais de segunda ordem

A norma europeia estabelece que os efeitos de segunda ordem poderão ser ignorados se a esbelteza do elemento for inferior a um valor limite λ_{lim} calculado por:

$$\lambda_{lim} = 20 * A * B * C / \sqrt{n} \quad (34)$$

Em que:

$$A = 1 / (1 + 0,02 * \varphi_{ef}) \quad (\text{Se } \varphi_{ef} \text{ não é conhecido, adota-se } A=0,7);$$

$$B = \sqrt{1 + 2 * \omega} \quad (\text{Se } \omega \text{ não é conhecido, adota-se } B=1,1);$$

$$C = 1,7 - r_m \quad (\text{Se } r_m \text{ não é conhecido, adota-se } C=0,7);$$

$$\omega = \frac{A_s * f_{yd}}{(A_c * f_{cd})};$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{(A_c * f_{cd})};$$

$$r_m = \frac{M_{01}}{M_{02}};$$

Onde:

ω – Taxa mecânica de armadura;

n – Esforço normal reduzido;

φ_{ef} – Coeficiente de fluência efetivo;

A_s – Área total da seção das armaduras longitudinais;

N_{Ed} – Esforço normal de cálculo;

M_{01} e M_{02} – Momentos de primeira ordem nas extremidades.

Os momentos de primeira ordem M_{01} e M_{02} são os momentos de primeira ordem nas extremidades, em que $|M_{02}| \geq |M_{01}|$. Caso os momentos produzam tração do mesmo lado, r_m será considerado positivo. Em caso contrário, negativo. O valor de r_m deverá ser considerado igual a 1 quando:

- a) Os elementos contraventados nos quais os momentos de primeira ordem resultam apenas ou predominantemente de imperfeições ou de ações transversais;
- b) Elementos não contraventados em geral.

2.3.4.3 Método baseado numa rigidez nominal para determinação dos efeitos locais de segunda ordem

A rigidez nominal para o dado método pode ser calculada pela equação:

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s \quad (35)$$

Onde:

K_c – Coeficiente que se refere aos efeitos de fendilhação, fluência, etc;

E_{cm} – Módulo de elasticidade secante do concreto;

γ_{CE} – Coeficiente parcial sugerido como 1,2;

I_c – Momento de inércia da seção transversal do concreto;

K_s – Coeficiente que se refere à distribuição das armaduras;

E_s – Módulo de elasticidade do aço;

I_s – Momento de inércia das armaduras.

A norma estabelece que para $\rho \geq 0,02$ os seguintes coeficientes podem ser utilizados:

$$K_s = 1$$

$$K_c = k_1 * k_2 / (1 + \varphi_{ef}) \quad (36)$$

Em que:

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} \quad (37)$$

$$k_2 = n * \frac{\lambda}{170} \leq 0,20 \quad (38)$$

Onde:

ρ – Taxa geométrica de armaduras;

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão, em Mpa;

n – Esforço normal reduzido;

λ – esbeltez;

φ_{ef} – Coeficiente de fluência efetivo (utilizado como nulo na ausência de consideração da fluência).

Como alternativa simplificada em que $\rho \geq 0,01$ pode-se utilizar:

$$K_s = 0$$

$$K_c = 0,3 / (1 + 0,5 * \varphi_{ef}) \quad (39)$$

Cabe salientar que esta simplificação deve ser utilizada somente como passo preliminar seguido de cálculo mais rigoroso de acordo com $\rho \geq 0,02$.

O momento de cálculo total pode ser calculado por:

$$M_{Ed} = M_{0Ed} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right] \quad (40)$$

Em que:

$$\beta = \frac{\pi^2}{c_0} \quad (41)$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2} \quad (42)$$

Onde:

M_{0Ed} – Momento de primeira ordem;

β – Coeficiente que depende da distribuição dos momentos de primeira e segunda ordem;

N_b – Carga de encurvadura baseada numa rigidez nominal ou carga crítica de Euler;

N_{Ed} – Esforço normal de cálculo;

l_e – Comprimento efetivo do elemento;

c_0 – Coeficiente que depende da distribuição do momento de primeira ordem ($c_0 = 8$ para um momento de primeira ordem constante).

2.3.4.4 Cálculo da fluência

A fluência pode ser considerada de forma simplificada através de um coeficiente de fluência efetivo φ_{ef} :

$$\varphi_{ef} = \varphi_{(\infty,t_0)} * \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}} \quad (43)$$

Onde:

$\varphi_{(\infty,t_0)}$ – Valor final do coeficiente de fluência;

M_{0Eqp} – Momento de primeira ordem na combinação quase-permanente;

M_{0Ed} – Momento de primeira ordem na combinação de ações de cálculo.

A norma permite que o efeito da fluência seja ignorado quando forem satisfeitas as três condições:

- a) $\varphi_{(\infty, t_0)} \leq 2$;
- b) $\lambda \leq 75$;
- c) $\frac{M_{0Eqp}}{N_{Ed}} \geq h$; em que h é a altura da seção transversal.

2.3.5 Armaduras máximas e mínimas

Visando evitar a ruptura frágil das seções transversais, o *Eurocode* estabelece uma armadura mínima dada por:

$$A_{S, \min} = \left(0,10 * \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \right) \geq 0,002 * A_c \quad (44)$$

Onde:

N_{Ed} – Valor da força normal de cálculo;

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço;

A_c – Área da seção do pilar.

Em relação à armadura máxima, determina-se para as zonas de emendas por sobreposição:

$$A_{S, \max} = 0,08 * A_c \quad (45)$$

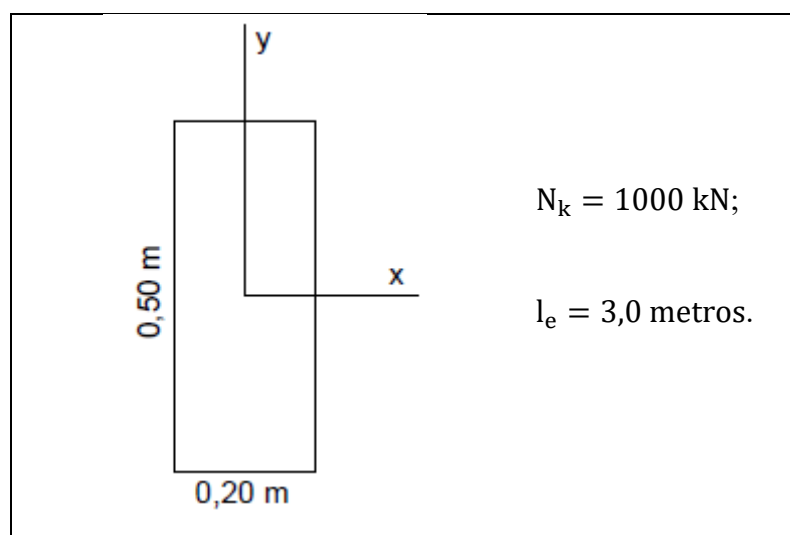
E para fora das zonas de emendas por sobreposição determina-se:

$$A_{S, \max} = 0,04 * A_c \quad (46)$$

3 METODOLOGIA

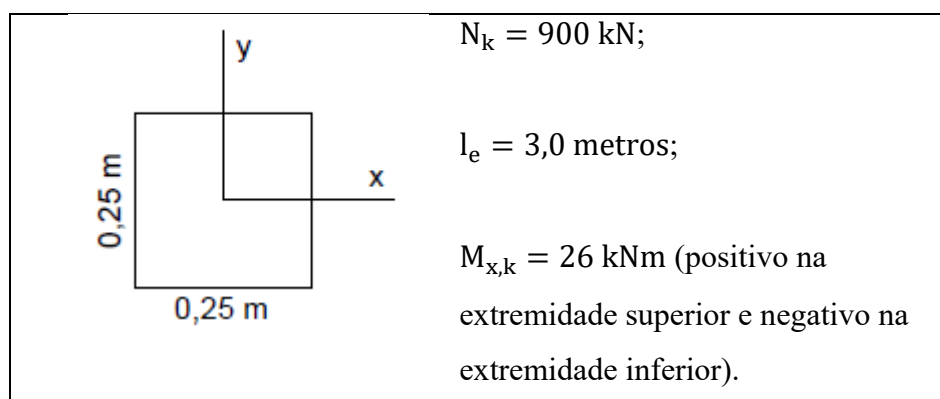
Optou-se por realizar o estudo a partir de pilares adaptados de Botelho e Marchetti (2018). Pôde-se analisar tais elementos isoladamente e os efeitos globais de segunda ordem puderam ser desconsiderados, visto que as condições de nós fixos são atendidas. Selecionou-se três tipos de pilares para a resolução, que foram dimensionados pelos formulários da NBR 6118:2014 e do *Eurocode 2:2004*: um pilar central, um pilar lateral e um pilar de canto, posto que o diferente posicionamento do elemento no conjunto da estrutura acarreta em diferentes solicitações a serem consideradas. As informações acerca de cada pilar constam nas figuras seguintes.

Figura 5 – Pilar central



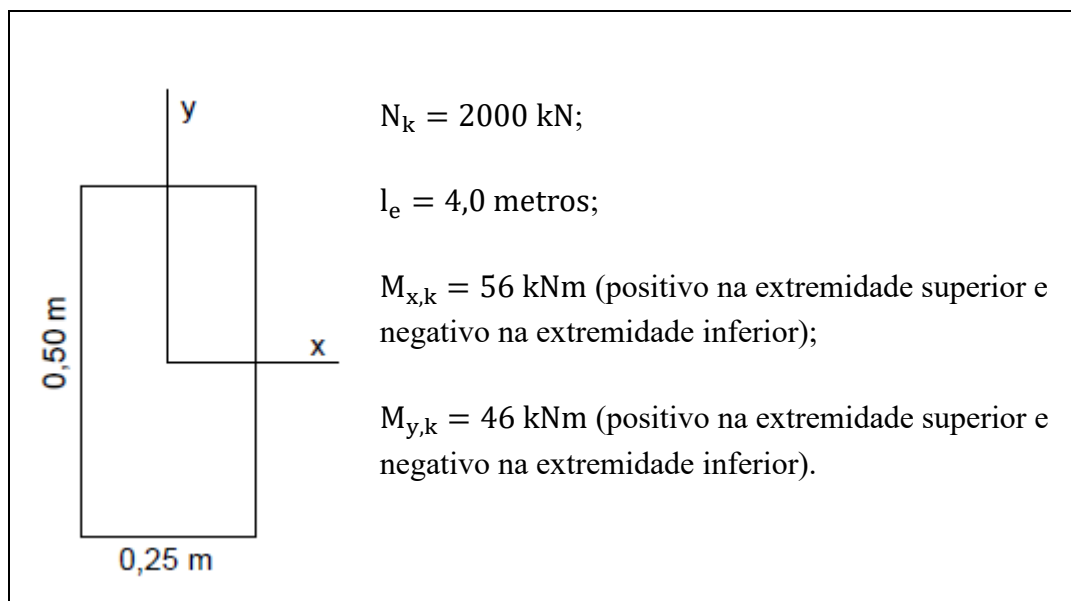
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 6 – Pilar lateral



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 7 – Pilar de canto



Fonte: elaborada pelo autor.

Decidiu-se pela utilização de duas resistências características do concreto à compressão (f_{ck}) para cada pilar: 30 MPa, referente a um concreto convencional; e 70 MPa, referente a um concreto de alta resistência, conforme categorização da NBR 8953.

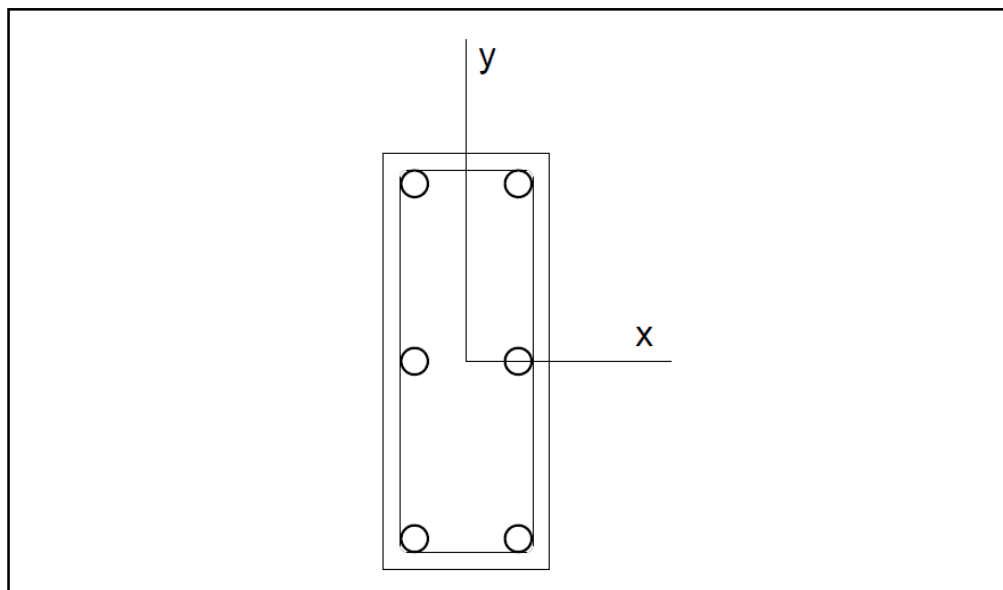
Cabe salientar que admitiu-se simplificações que as normas em questão possibilitam, como a desconsideração do efeito da fluência e a desconsideração dos efeitos locais de segunda ordem, de acordo com os critérios de esbeltez estabelecidos para cada caso. Além disso, desconsiderou-se as excentricidades de forma.

Nas situações em que teve-se que considerar os efeitos locais de segunda ordem, visando compatibilidade entre os métodos de cada norma, utilizou-se para a norma brasileira o método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada e para a norma europeia o método baseado numa rigidez nominal.

Para o cálculo de armadura necessário no estado limite último empregou-se os ábacos para flexão composta reta de Pinheiro (1993 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009), que constam nos anexos A, B e C e os ábacos para flexão composta oblíqua de Pinheiro et al. (1994 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009), que constam nos anexos D e E. Definiu-se para as armaduras aço CA-50 e uma distância do centro das barras até a face da seção (d') de 5 centímetros, informações estas que são necessárias para os valores de entrada dos ábacos.

A utilização dos ábacos prevê uma determinada configuração de armadura. Assim, decidiu-se por uma distribuição composta por 6 barras localizadas nas extremidades laterais do pilar, conforme exemplo da figura 8.

Figura 8 – Configuração de armadura utilizada



Fonte: elaborada pelo autor.

Para efeitos didáticos, dividiu-se os memoriais de cálculo de cada norma em etapas de cálculo, sendo estas:

- (I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes;
- (II) Excentricidade acidental;
- (III) Excentricidades de segunda ordem (quando necessário);
- (IV) Seções de extremidade;
- (V) Seções intermediárias;
- (VI) Cálculo das armaduras.

Obteve-se, portanto, 12 resultados de área de aço necessária, que foram analisados quantitativamente através das áreas de aço necessárias obtidas.

Como segunda etapa de estudo, fixou-se o uso do formulário da NBR 6118:2014 e o pilar central utilizado na etapa anterior e variou-se o f_{ck} do concreto visando à análise da variação da área de aço resultante.

Por fim, para o mesmo pilar central, fixou-se a resistência de 70 MPa e a dimensão da base da seção, enquanto variou-se a altura da seção visando a observação dos efeitos resultantes na área de aço necessária.

3.1 Cálculos utilizando a NBR 6118:2014

(I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Inicialmente calculou-se a excentricidades iniciais (e_i) através das equações (2) e (3), seguido das excentricidades mínimas para cada direção via equação (7). Para o índice de esbeltez (λ) utilizou-se a equação (8), que para seções transversais retangulares pode ser descrita por:

$$\lambda = 3,46 * l_e / h \quad (47)$$

O índice de esbeltez foi comparado com o índice de esbeltez limite calculado pela equação (11). Conforme a norma possibilita, nas situações em que o índice de esbeltez calculado é menor que o índice de esbeltez limite, os efeitos de segunda ordem foram desconsiderados. Além disso, permite-se a desconsideração dos efeitos de fluência quando o índice de esbeltez for menor que 90.

(II) Excentricidade acidental

A excentricidade acidental foi calculada através da equação (5) na situação de desaprumo na extremidade do pilar, e através da equação (4) na situação de falta de retilineidade na seção intermediária do pilar.

(III) Excentricidades de segunda

Nas situações em que a excentricidade de segunda ordem necessitou ser calculada utilizou-se a equação (17), empregando-se para o momento de 1º ordem a soma da excentricidade inicial com a excentricidade acidental para falta de retilineidade quando esta soma superou o valor da excentricidade mínima, conforme equação abaixo.

$$e_1 = e_i + e_a \geq e_{\min} \quad (48)$$

(IV) Seções de extremidade

Obteve-se para cada direção a excentricidade na seção de extremidade do pilar, em que se considerou para o eixo analisado o maior valor entre a excentricidade mínima e a soma da excentricidade inicial com a excentricidade acidental decorrente do desaprumo, conforme a equação (48). Para a direção perpendicular a esta considerou-se a excentricidade inicial correspondente.

Em posse das excentricidades, calculou-se a força normal adimensional (v) através da equação (16) e os parâmetros adimensionais μ_x e μ_y para cada eixo analisado através das equações abaixo:

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x} \quad (49)$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y} \quad (50)$$

Por fim, dispondo-se de tais dados, consultou-se os ábacos correspondentes para a obtenção das taxas mecânicas de armadura (ω).

(V) Seções intermediárias

Nas situações em que os esforços de segunda ordem não foram considerados, obteve-se para cada direção a excentricidade na seção intermediária do pilar, em que se considerou para o eixo analisado o maior valor entre a excentricidade mínima e a soma da excentricidade inicial com a excentricidade acidental decorrente da falta de retlineidade, conforme a equação (48). Quando houve a consideração dos esforços de segunda ordem utilizou-se para a direção analisada a excentricidade total calculada na etapa (III). Para a direção perpendicular a esta, considerou-se a excentricidade inicial correspondente.

Recalculou-se os valores de μ_x e μ_y para cada eixo conforme as equações (49) e (50), e com a força normal adimensional (v) já calculada consultou-se os ábacos correspondente para a obtenção das taxas mecânicas de armadura (ω).

(VI) Cálculo das armaduras.

Dentre as situações analisadas utilizou-se a maior taxa mecânica de armadura (ω) e calculou-se a área de aço necessária (A_s) em cm^2 através da equação abaixo e comparou-a com os limites mínimos e máximos calculados pelas equações (24) e (26).

$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}} \quad (51)$$

3.2 Cálculos utilizando o Eurocode 2:2004

(I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes;

Inicialmente calculou-se a excentricidades iniciais (e_i) através das equações (2) e (3), seguido das excentricidades mínimas para cada direção via equação (32). Para o índice de esbeltez (λ) utilizou-se a equação (33), que para seções transversais retangulares pode ser descrita pela equação (47).

O índice de esbeltez foi comparado com o índice de esbeltez limite calculado pela equação (34). Conforme a norma possibilita, nas situações em que o índice de esbeltez calculado é menor que o índice de esbeltez limite, os efeitos de segunda ordem foram desconsiderados. Além disso, permite-se a desconsideração dos efeitos de fluência quando o índice de esbeltez for menor que 75.

(II) Excentricidade acidental;

A excentricidade acidental foi calculada através da equação (31) na situação de desaprumo na extremidade do pilar, e através da equação (30) na situação de falta de retilineidade na seção intermediária do pilar.

(III) Excentricidades de segunda ordem

Nas situações em que a excentricidade de segunda ordem necessitou ser calculada utilizou-se a equação (40), empregando-se para o momento de 1º ordem a soma da excentricidade inicial com a excentricidade accidental para falta de retineidade quando esta soma superou o valor da excentricidade mínima (e_0), conforme equação abaixo.

$$e_1 = e_i + e_a \geq e_0 \quad (52)$$

Preliminarmente utilizou-se a simplificação de $\rho \geq 0,01$, para o cálculo da rigidez nominal, em que o coeficiente $K_s = 0$ e o coeficiente K_c é calculado através da equação (39). As etapas seguintes foram realizadas para o valor de excentricidade encontrado visando um pré-dimensionamento, obtendo-se a área de aço necessária que foi detalhada conforme a configuração apresentada na figura 7 afim de calcular-se o momento de inércia das armaduras (I_s) obtido por:

$$I_s = 4 * \left[\frac{\pi * D^4}{64} + \pi * \frac{D^2}{4} * \left(\frac{h}{2} - d' \right)^2 \right] + 2 * \frac{\pi * D^4}{64} \quad (53)$$

Onde:

D – Diâmetro da barra, em metros;

h – Altura total da seção transversal na direção considerada, em metros;

d' – distância do centro das barras até a face da seção (adotado como 0,05 metros).

Posteriormente refez-se os cálculos utilizando-se a simplificação de $\rho \geq 0,02$ para a rigidez nominal, em que o coeficiente $K_s = 1$ e o coeficiente K_c é calculado através da equação (36).

(IV) Seções de extremidade

Obteve-se para cada direção a excentricidade na seção de extremidade do pilar, em que se considerou para o eixo analisado o maior valor entre a excentricidade mínima e a soma da excentricidade inicial com a excentricidade acidental decorrente do desaprumo, conforme a equação (52). Para a direção perpendicular a esta considerou-se a excentricidade inicial correspondente.

Em posse das excentricidades, calculou-se a força normal adimensional (v) através da equação (16) e os parâmetros adimensionais μ_x e μ_y para cada eixo analisado através das equações (49) e (50), respectivamente.

Por fim, dispondo-se de tais dados, consultou-se os ábacos correspondentes para a obtenção das taxas mecânicas de armadura (ω).

(V) Seções intermediárias

Nas situações em que os esforços de segunda ordem não foram considerados, obteve-se para cada direção a excentricidade na seção intermediária do pilar, em que se considerou para o eixo analisado o maior valor entre a excentricidade mínima e a soma da excentricidade inicial com a excentricidade acidental decorrente da falta de reticidade, conforme a equação (52). Quando houve a consideração dos esforços de segunda ordem utilizou-se para a direção analisada a excentricidade total calculada na etapa (III). Para a direção perpendicular a esta, considerou-se a excentricidade inicial correspondente.

Recalculou-se os valores de μ_x e μ_y para cada eixo conforme as equações (49) e (50), respectivamente, e com a força normal adimensional (v) já calculada consultou-se os ábacos correspondentes para a obtenção das taxas mecânicas de armadura (ω).

(VI) Cálculo das armaduras.

Dentre as situações analisadas utilizou-se a maior taxa mecânica de armadura (ω) e calculou-se a área de aço necessária (A_s) em cm^2 através da equação (51) e comparou-a com os limites mínimos e máximos calculados pelas equações (44) e (45), respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resoluções de acordo com a NBR 6118:2014

Segue a resolução de cálculo para um dos casos analisados no comparativo entre normas, enquanto os demais constam nos apêndices A, C, E, G e I. Nos apêndices K, L e M constam os memoriais de cálculo para a análise da variação de resistência do concreto (f_{ck}) e nos apêndice N, O, P e Q constam os memoriais de cálculo para a análise da variação da altura da seção do pilar.

4.1.1 Pilar lateral com f_{ck} de 30 Mpa

D) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X	Direção Y
$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{26}{900} = 0,029 \text{ m}$	$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{900} = 0$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$
$e_{1,\min,x} = 0,023 \text{ m}$	$e_{1,\min,y} = 0,023 \text{ m}$
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$	
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-26)}{26} > 0,40$	
$\alpha_{b,x} = 0,20 < 0,40$	
$\alpha_{b,x} = 0,40$	$\alpha_{b,y} = 1$
$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$	$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0,029/0,25}{0,40} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 66,11 > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 66,11$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,36$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,25}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_y = 55,36$$

Como $\lambda_x < \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y > \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção Y. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{4}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} = \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,01\text{m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,y} = e_a + e_{i,y} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_{1,y} = 0,01 + 0 > 0,023$$

$$e_{1,y} = 0,01 < 0,023$$

$$e_{1,y} = 0,023 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_y$$

$$A = 5 * 0,25$$

$$A = 1,25$$

$$B = h_y^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_y * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$B = 0,25^2 * 900 * 1,4 - \frac{900 * 1,4 * 4^2}{320} - 5 * 0,25 * 1 * 900 * 1,4 * 0,023$$

$$B = -19,688$$

$$C = -N_d * h_y^2 * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$C = -900 * 1,4 * 4^2 * 1 * 900 * 1,4 * 0,023$$

$$C = -2232,563$$

$$M_{\text{Sd,tot},y} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{\text{Sd,tot},y} = \frac{-(-19,688) + \sqrt{(-19,688)^2 - 4 * 1,25 * (-2232,563)}}{2 * 1,25}$$

$$M_{\text{Sd,tot},y} = 50,864 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},y} = \frac{M_{\text{Sd,tot},y}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},y} = \frac{50,864}{900 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},y} = 0,040 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{900 * 1,4}{0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,941$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,029 > 0,023$$

$$e_x = 0,049 > 0,023$$

$$e_x = 0,049 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,941 * 0,049}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,18$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,02 + 0 > 0,023$$

$$e_y = 0,02 < 0,023$$

$$e_y = 0,023 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029 \text{ m}$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,941 * 0,023}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,08$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,941 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0,7$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,6533 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,11$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,5$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_a + e_{i,x} + e_2 > e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,01 + 0,029 + 0 > 0,023$$

$$e_x = 0,039 > 0,023$$

$$e_x = 0,039 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,941 * 0,039}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,15$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,941 * 0}{0,25}$$

Direção Y

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_y = 0,04 > 0,023$$

$$e_y = 0,04$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,941 * 0,04}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,15$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,941 * 0,029}{0,25}$$

$\mu_y = 0$ Pelo ábaco do anexo B: $\omega = 0,55$		$\mu_x = 0,11$ Pelo ábaco do anexo E: $\omega = 0,66$
--	--	---

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção de extremidade da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{900 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,\min} = 4,35 > 2,5$$

$$A_{s,\min} = 4,35 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,\max} = 50 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,70 * 0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 21,56 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 21,56 \text{ cm}^2$$

4.2 Resoluções de acordo com o Eurocode 2:2004

Segue-se a resolução de cálculo para um dos casos analisados no comparativo entre normas, enquanto os demais constam nos apêndices B, D, F, H e J.

4.2.1 Pilar lateral com f_{ck} de 30 Mpa

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{26}{900} = 0,029 \text{ m}$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-26)}{26}$$

$$C = 2,7$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{900} = 0$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{900 * 1,35}{0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,972$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{0,972}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 60,249$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,360$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{900 * 1,35}{0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,972$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,972}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 37,935$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_y = 55,360$$

Como $\lambda_x < \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y > \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção Y. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{4}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1 = 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{m})}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{1})}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,y} = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_{1,y} = 0,01 + 0 \geq 0,02$$

$$e_{1,y} = 0,01 < 0,02$$

$$e_{1,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$I_c = \frac{b_x * h_y^3}{12}$$

$$I_c = \frac{0,25 * 0,25^3}{12}$$

$$I_c = 3,255 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$E_{cm} = 33 \text{ GPa (Anexo F)}$$

Utilizando $\rho \geq 0,01$:

$$K_c = 0,3$$

$$K_s = 0$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,3 * \frac{33 * 10^6}{1,2} * 3,255 * 10^{-4} + 0 * E_s * I_s$$

$$EI = 2685,547$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{c_0}$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{8}$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 2685,547 * \frac{\pi^2}{4^2}$$

$$N_b = 1656,580 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = M_{0Ed,y} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,y} = 900 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{1656,580}{900 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,y} = 106,786 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,y} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,y} = \frac{106,786}{900 * 1,35}$$

$$e_{tot,y} = 0,088 \text{ m}$$

Pré-dimensionamento:

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{900 * 1,35}{0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$v = 0,972$$

$$e_x = e_{i,x}$$

$$e_x = 0,029 \text{ m}$$

$$e_y = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_y = 0,088 > 0,02$$

$$e_y = 0,088 \text{ m}$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,972 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,11$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,972 * 0,088}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,34$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 1,27$$

$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{1,27 * 0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 36,65 \text{ cm}^2$$

Para atender esta área necessária, 6 barras de 32 milímetros de diâmetro são suficientes. Deste modo, refaz-se o cálculo considerando a rigidez referente às armaduras e $\rho \geq 0,02$.

Refazendo os cálculos utilizando $\rho \geq 0,02$:

$$e_{1,x} = 0,02$$

$$I_c = 3,255 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_s = 4 * [I_B + A * (y')^2] + 2 * I_B$$

$$I_s = 4 * \left[\frac{\pi * D^4}{64} + \pi * \frac{D^2}{4} * (0,25 - 0,05)^2 \right] + 2 * \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$I_s = 1,825 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{30}{20}}$$

$$K_1 = 1,225$$

$$K_2 = n * \frac{\lambda_y}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,972 * \frac{55,36}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,317 > 0,20$$

$$K_2 = 0,20$$

$$K_c = K_1 * K_2$$

$$K_c = 1,225 * 0,20$$

$$K_c = 0,245$$

$$K_s = 1$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,245 * \frac{33 * 10^6}{1,2} * 3,255 * 10^{-4} + 1 * \frac{200 * 10^6}{1,15} * 1,825 * 10^{-5}$$

$$EI = 5366,651$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 5366,651 * \frac{\pi^2}{4^2}$$

$$N_b = 3310,420 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = M_{0Ed,y} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,y} = 900 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{3310,420}{900 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,y} = 41,683 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,y} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,y} = \frac{41,683}{900 * 1,35}$$

$$e_{tot,y} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,029 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,049 > 0,020$$

$$e_x = 0,049 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,972 * 0,049}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,19$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,972 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0,72$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,02 = 0,020$$

$$e_y = 0,020 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029 \text{ m}$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,972 * 0,020}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,08$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,972 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,11$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,52$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_a + e_{i,x} + e_2 \geq e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,01 + 0,029 > 0,020$$

$$e_x = 0,039 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,972 * 0,039}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,15$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,972 * 0,0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0,58$$

Direção Y

$$e_y = e_{tot,y} \geq e_{1,y}$$

$$e_y = 0,034 > 0,02$$

$$e_y = 0,034 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,972 * 0,034}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,13$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,972 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,11$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,63$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção de extremidade da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{900 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,\min} = 2,795 > 1,25$$

$$A_{s,\min} = 2,795 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,\max} = 50 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,72 * 0,25 * 0,25 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 20,70 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 20,70 \text{ cm}^2$$

4.3 Discussão de resultados

4.3.1 Comparativo entre normas

4.3.1.1 Resistência característica à compressão 30 Mpa

Os valores obtidos para a área de armadura necessária (A_s) estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 1 – Armadura necessária (A_s) na seção mais desfavorável – f_{ck} 30 MPa

Pilares	NBR 6118:2014	<i>Eurocode 2:2004</i>	Diferença (%)
Pilar de centro	Seção intermediária direção X		14,80%
	7,39 cm ²	6,44 cm ²	
Pilar lateral	Seção de extremidade direção X		4,17%
	21,56 cm ²	20,70 cm ²	
Pilar de canto	Seção de extremidade direção X		4,39%
	45,62 cm ²	43,70 cm ²	

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que a NBR 6118:2014, para os casos analisados, apresentou valores de área de armadura necessária mais conservadores que o *Eurocode 2:2004*. Tais diferenças ocorrem primeiramente devido aos diferentes coeficientes adicionais para as cargas e para o concreto que as normas apresentam, que impactam na obtenção da força normal de cálculo (n) ou força normal adimensional (v) e no cálculo da armadura necessária (A_s). Em relação ao coeficiente adicional para o aço, as normas são semelhantes. Enquanto a norma brasileira apresenta coeficientes $\gamma_f = 1,4$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$, a norma europeia apresenta coeficientes $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$, $\gamma_c = 1,5$ e $\gamma_s = 1,15$.

Em relação às taxas mecânicas de armadura (ω), tem-se o comparativo:

Tabela 2 – Taxas mecânicas de armadura (ω) na seção mais desfavorável – f_{ck} 30 MPa

Pilares	NBR 6118:2014	<i>Eurocode 2:2004</i>	Diferença (%)
Pilar de centro	Seção intermediária direção X		7,14%
	0,15	0,14	
Pilar lateral	Seção de extremidade direção X		-2,78%
	0,70	0,72	
Pilar de canto	Seção de extremidade direção X		-2,63%
	0,74	0,76	

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com os dados apresentados, é possível observar que as taxas mecânicas obtidas para cada norma possuem valores próximos nas situações em que a seção mais desfavorável não apresentou excentricidade de segunda ordem (pilar lateral e pilar de canto), o que demonstra que os valores e os métodos de cálculo de excentricidade de primeira ordem se apresentam razoavelmente aproximados e as pequenas diferenças obtidas nas taxas mecânicas de armadura se devem unicamente devido ao coeficiente adicional para a carga que cada norma possui e que impacta na força normal de cálculo ou força normal adimensional. No entanto, ao obter-se a área de armadura necessária (A_s), conforme a tabela 1, as diferenças se intensificaram devido ao coeficiente adicional para o concreto (γ_c) de cada norma.

No pilar lateral e no pilar de canto a taxa mecânica de armadura obtida pelo *Eurocode* foi superior ao da NBR. No entanto, devido ao coeficiente da norma brasileira ser mais elevado, resultou-se em armaduras superiores para a NBR, o que corrobora o impacto que o coeficiente em questão resulta.

Acerca da esbeltez limite, as normas apresentam processos diferentes mas que resultam em valores próximos, que comumente acarretam em decisões semelhantes sobre a necessidade de consideração ou não os efeitos de segunda ordem. Em todos os 6 casos analisados por cada norma, somente um deles apresentou divergências sobre tal consideração, sendo este para o pilar lateral com f_{ck} de 70 Mpa, no qual a NBR determinou a consideração dos efeitos de segunda ordem em uma das direções e o *Eurocode* possibilitou a desconsideração

destes efeitos.

Em consonância, as normas apresentam processos semelhantes para o cálculo de excentricidades acidentais.

No pilar central, onde apresentou-se uma diferença de 14,80% na armadura de aço necessária, tal discrepância em relação aos outros casos se deve, além dos coeficientes já citados, à consideração dos efeitos de segunda ordem na seção mais desfavorável. As normas apresentam processos de cálculos divergentes para estes efeitos, tendo-se a norma europeia como geradora de excentricidades menos conservadoras, como pode-se observar na tabela abaixo:

Tabela 3 – Excentricidades de segunda ordem – f_{ck} 30 MPa

Pilares	NBR 6118:2014	<i>Eurocode 2:2004</i>
Pilar de centro	0,034 m	0,025 m
Pilar lateral	0,040 m	0,034 m
Pilar de canto	-	-

Fonte: elaborada pelo autor.

Cabe salientar que os valores obtidos para o *Eurocode* foram alcançados após a realização da simplificação de $\rho \geq 0,02$. Ao utilizar-se somente a simplificação de $\rho \geq 0,01$ os resultados de excentricidade foram demasiadamente elevados, o que demonstra a importância do refinamento dos resultados através do cálculo mais detalhado.

4.3.1.2 Resistência característica à compressão 70 Mpa

Os valores obtidos estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 4 – Armadura necessária (A_s) na seção mais desfavorável – f_{ck} 70 MPa

Pilares	NBR 6118:2014	<i>Eurocode 2:2004</i>	Diferença (%)
Pilar de centro	4,83 cm ²	3,11 cm ²	55%
Pilar lateral	4,35 cm ²	2,79 cm ²	56%
Pilar de canto	9,66 cm ²	6,21 cm ²	56%

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que há uma diferença considerável na área de aço necessária entre as normas, com a NBR resultando em valores mais conservadores em todos os casos analisados. Cabe salientar que para as situações analisadas a área de aço resultou na armadura mínima ($A_{S,min}$) e através das equações (24) e (44) pode-se notar que norma brasileira considera um fator de 15%, enquanto o *Eurocode* considera uma porcentagem de 10%, sendo esta desconformidade a principal geradora das discrepâncias obtidas, tendo-se a diferença de coeficientes como uma segunda causa, porém de menor efeito.

4.3.2 Concreto convencional e CAD na NBR 6118:2014

Os valores obtidos para a área de armadura necessária (A_s) nas situações de f_{ck} de 30 MPa e 70 MPa através da norma brasileira estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 5 – Armadura necessária (A_s) para f_{ck} de 30 MPa e 70 MPa – NBR

Pilares	f_{ck} 30 MPa	f_{ck} 70 MPa	Redução (%)
Pilar de centro	7,39 cm ²	4,83 cm ²	35%
Pilar lateral	21,56 cm ²	4,35 cm ²	80%
Pilar de canto	45,62 cm ²	9,66 cm ²	79%

Fonte: elaborada pelo autor.

Percebe-se a elevada capacidade do concreto de alto desempenho de reduzir a armadura necessária no elemento estrutural, apresentando-se como uma característica de relevância que este material possui e que justifica o avanço da empregabilidade deste.

4.3.3 Variação da resistência do concreto (f_{ck})

Os resultados para o pilar central utilizando-se a NBR 6118:2014, variando-se a resistência característica do concreto a compressão de 30 MPa e fixando-se as dimensões da seção estão resumidos no quadro abaixo:

Tabela 6 – Armadura necessária (A_s) para pilar central com variação de f_{ck} – NBR

f_{ck}	As Calculada	As mínima	As Adotada
20 Mpa	24,64 cm ²	4,83 cm ²	24,64 cm ²
25 Mpa	18,48 cm ²	4,83 cm ²	18,48 cm ²
30MPa	7,39 cm ²	4,83 cm ²	7,39 cm ²
35 Mpa	2,80 cm ²	4,83 cm ²	4,83 cm ²

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que ao utilizar-se um concreto com f_{ck} de 35 Mpa, assim como um f_{ck} de 70 Mpa, obtém-se a armadura mínima. Deste modo, para a situação analisada, a utilização de um f_{ck} de 70 Mpa não apresentaria vantagens na redução da armadura necessária em comparação com um f_{ck} de 35 Mpa, visto que a armadura mínima deve ser respeitada e esta não varia com a mudança de resistência.

4.3.4 Variação de altura da seção do pilar

Os resultados para pilar central utilizando-se a NBR 6118:2014, fixando-se a resistência característica do concreto a compressão de 70 Mpa e variando-se uma das dimensões da seção estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 7 – Armadura necessária (A_s) para pilar central com variação de altura – NBR

Base (b)	Altura (h)	As Necessária
20 cm	50 cm	4,83 cm ²
20 cm	40 cm	4,83 cm ²
20 cm	30 cm	4,83 cm ²
20 cm	25 cm	4,83 cm ²
20 cm	20 cm	11,50 cm ²

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que a utilização de um f_{ck} de 70 Mpa permite para a situação analisada a redução da altura da seção de 50 cm para 25 cm e ainda utilizar somente a A_s mínima. Cabe salientar a elevada redução proporcionada, sendo esta uma das grandes vantagens do CAD

5 CONCLUSÃO

Através do estudo é possível concluir que o concreto de alto desempenho é um material que possui características que são bastante vantajosas e que possibilita elementos mais esbeltos, com menor taxa de armadura e maior durabilidade. Embora seja um material de maior custo de produção devido aos materiais envolvidos e o elevado controle de qualidade, as reduções proporcionadas em volume e aço o tornam como um material de ótimo custo-benefício e que eventualmente possibilita a redução do custo total de determinada obra.

O potencial que este material possui justifica a necessidade de maior aprofundamento científico visando compreender melhor suas características e buscando o aperfeiçoamento para a redução do custo de produção, o que o tornaria ainda mais vantajoso.

Em relação às normas analisadas, é possível observar que há semelhanças consideráveis entre elas no que se refere à metodologia de cálculo para pilares, o que demonstra equiparidade e avanço conjunto dos conhecimentos de estruturas, fruto da globalização atual que possibilita maior compartilhamento de informações.

Com relação ao concreto convencional, as normas resultaram em valores aproximados, em que norma brasileira apresentou-se mais conservadora, principalmente devido às diferenças de cálculo de excentricidades locais de segunda ordem. Tratando-se do concreto de alto desempenho, obteve-se diferenças consideráveis nos resultados obtidos para cada norma, novamente tendo-se a NBR 6118:2014 como mais conservadora nas armaduras mínimas obtidas. Tais diferenças apresentadas são justificáveis visto que cada norma possui suas características e grau de conservadorismo.

Recomenda-se para trabalhos futuros o estudo computacional de pilares de concreto de alto desempenho mediante cargas mais elevadas, visto que não é possível estudo manual devido à limitação dos ábacos. Ademais, recomenda-se um estudo realizado mediante comparativos financeiros visando encontrar situações que o CAD é financeiramente melhor. Por fim, sugere-se o estudo do concreto de ultra alto desempenho (*ultra high performance concrete*), material que permite alcançar valores de resistência próximos a 1000 MPa.

REFERÊNCIAS

ALVES, E. C; SOUZA, P. M. S. *Projeto ótimo de Pilares em Concreto de Alta Resistência Segundo ABNT NBR 6118:2014*. Revista sul-americana de engenharia estrutural, Vitória, Espírito Santo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

BOTELHO, M.; MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. Volume 1, 9ª edição. São Paulo: Blucher, 2018.

CARVALHO, R.; PINHEIRO, L. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Volume 2, 1ª edição. São Paulo: Pini, 2009.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Eurocode**: Basis of structural design. Bruxelas, 2005.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Eurocode 2**: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelas, 2004.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Eurocode 2**: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Bruxelas, 2004.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Eurocódigo 2**: Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Bruxelas, 2010.

FREITAS, R. D. *Estudo comparativo de custos da estrutura de um edifício com concreto comum e de alto desempenho*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO AMERICANO DE CONCRETO. **ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Michigan, 2014.

LARANJEIRAS, A. C. R. **Análise comparativa entre Normas de Estrutura**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n.], 2000.

LEONHARDT, F.; MONNIN, E. **Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Volume 1, 1ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

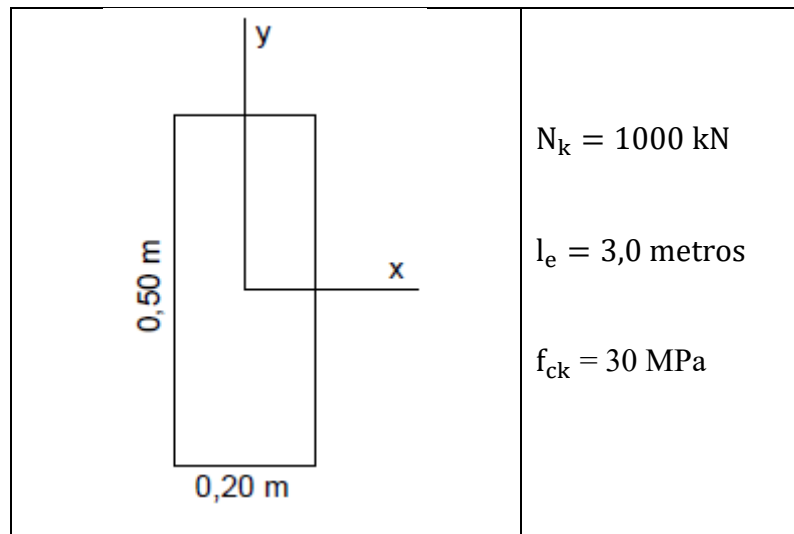
LIMA, A. S. **Comparação entre o dimensionamento de pilares-parede segundo as normas NBR-6118:2014 e NBR-6118:2003 e o EUROCODE 2**. 2016. *Trabalho de Conclusão de Curso* – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

LIMA, F. B. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. 1997. *Tese de Doutorado* – Doutorado em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

NUNES, M. D. **Dimensionamento de uma viga de concreto armado ao esforço cortante segundo NBR-6118:2007, EUROCODE 1992-1-1 2010 e FIB MODEL CODE 2010**. 2012. *Trabalho de Conclusão de Curso* – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta**. 1999. *Dissertação de Mestrado* – Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

**APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
30 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,50)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,50}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 20,76 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h_x^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Sd,tot,x}}{N_d}$$

$$e_{tot,x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,6533$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,6533 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,069$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,6533 * 0}{0,5}$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,015 < 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,6533 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,039$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,6533 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,6533 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,11$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,6533 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,15$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,6533 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,039$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,6533 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 4,00$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\max} = 80 \text{ cm}^2$$

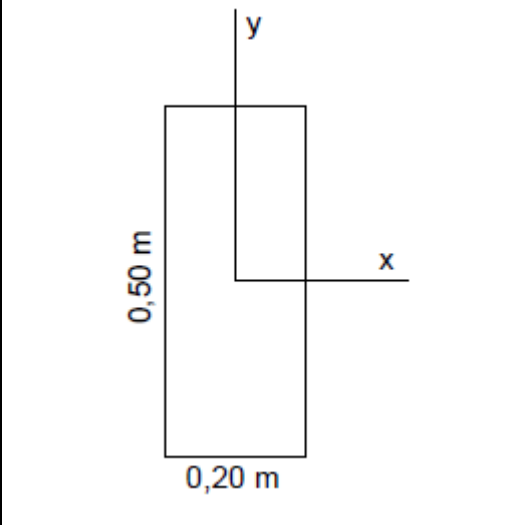
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,15 * 0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 7,39 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 7,39 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
30 MPa UTILIZANDO O *EUROCODE 2:2004***

	$N_k = 1000 \text{ kN}$ $l_e = 3,0 \text{ metros}$ $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ $E_{cm} = 33 \text{ GPa (Anexo F)}$
---	---

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,2}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00667 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,5}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,01667 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,675$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,675}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 45,522$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2}$$

$$\lambda_x = 51,90$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,675$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,675}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 45,522$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5}$$

$$\lambda_y = 20,76$$

Como $\lambda_x > \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{3}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1,155 > 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{1}\right)}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 \geq 0,02$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,02$$

$$e_{1,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$I_c = \frac{b_y * h_x^3}{12}$$

$$I_c = \frac{0,5 * 0,2^3}{12}$$

$$I_c = 3,333 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

Utilizando $\rho \geq 0,01$:

$$K_c = 0,3$$

$$K_s = 0$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,3 * \frac{33 * 10^6}{1,2} * 3,333 * 10^{-4} + 0 * E_s * I_s$$

$$EI = 2750$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{c_0}$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{8}$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 2750 * \frac{\pi^2}{3^2}$$

$$N_b = 3015,71 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,x} = M_{0Ed,x} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 1000 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{3015,71}{1000 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 53,996 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,x} = \frac{53,996}{1000 * 1,35}$$

$$e_{tot,x} = 0,04 \text{ m}$$

Pré-dimensionamento:

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$v = 0,675$$

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,04 > 0,02$$

$$e_x = 0,04$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,675 * 0,04}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,13$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,675 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,8$$

$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,8 * 0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 36,80 \text{ cm}^2$$

Para atender esta área necessária, 6 barras de 16 milímetros de diâmetro são suficientes. Deste modo, refaz-se o cálculo considerando a rigidez referente às armaduras e $\rho \geq 0,02$.

Refazendo os cálculos utilizando $\rho \geq 0,02$:

$$e_{1,x} = 0,02$$

$$I_c = 3,333 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_s = 4 * [I_B + A * (y')^2] + 2 * I_B$$

$$I_s = 4 * \left[\frac{\pi * D^4}{64} + \pi * \frac{D^2}{4} * (0,5 - 0,05)^2 \right] + 2 * \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$I_s = 3,218 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{30}{20}}$$

$$K_1 = 1,225$$

$$K_2 = n * \frac{\lambda_x}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,675 * \frac{51,9}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,206 > 0,20$$

$$K_2 = 0,20$$

$$K_c = K_1 * K_2$$

$$K_c = 1,225 * 0,20$$

$$K_c = 0,245$$

$$K_s = 1$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,245 * \frac{33 * 10^6}{1,2} * 3,333 * 10^{-4} + 1 * \frac{200 * 10^6}{1,15} * 3,218 * 10^{-5}$$

$$EI = 7841,811$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 7841,811 * \frac{\pi^2}{3^2}$$

$$N_b = 8599,51 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,x} = M_{0Ed,x} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 1000 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{8599,51}{1000 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 33,203 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,x} = \frac{33,203}{1000 * 1,35}$$

$$e_{tot,x} = 0,025 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,015 < 0,020$$

$$e_x = 0,020 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,675 * 0,020}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,07$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,675 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,015 < 0,020$$

$$e_y = 0,020 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,675 * 0,020}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,03$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,675 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{\text{tot},x} \geq e_{1,x}$$

$$e_x = 0,025 > 0,020$$

$$e_x = 0,025 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,675 * 0,025}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,08$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,675 * 0,0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,14$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} + e_2 > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 \geq 0,02$$

$$e_y = 0,075 < 0,02$$

$$e_y = 0,02 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,675 * 0,02}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,03$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,675 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{1000 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 3,105 > 2,00$$

$$A_{s,\min} = 3,105 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\max} = 80 \text{ cm}^2$$

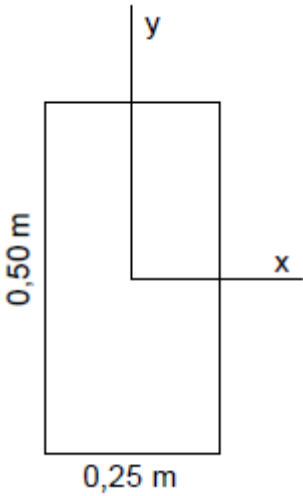
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,14 * 0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 6,44 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 6,44 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014

	<p>$N_k = 2000 \text{ kN}$</p> <p>$l_e = 4,0 \text{ metros}$</p> <p>$M_{x,k} = 56 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$M_{y,k} = 46 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$</p>
---	--

D) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X	Direção Y
$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{56}{2000} = 0,028 \text{ m}$	$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{46}{2000} = 0,023 \text{ m}$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,5)$
$e_{1,\min,x} = 0,023 \text{ m}$	$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-56)}{56} > 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-46)}{46} > 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,20 < 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,20 < 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,40$

$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$ $\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0,028/0,25}{0,40} > 35$ $\lambda_{1,x} = 66 > 35$ $\lambda_{1,x} = 66$ $\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$ $\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$ $\lambda_x = 55,360$	$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$ $\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0,023/0,5}{0,40} > 35$ $\lambda_{1,y} = 63,938 < 35$ $\lambda_{1,y} = 63,938$ $\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$ $\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,5}$ $\lambda_y = 27,680$
---	---

Como $\lambda_x < \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem não precisam ser considerados em ambas as direções. Deste modo, as seções de extremidade serão as mais desfavoráveis. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade accidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{4}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} = \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a (\text{extremidade}) = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_a (\text{extremidade}) = 0,02 \text{ m}$$

$$e_a (\text{intermediária}) = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_a (\text{intermediária}) = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Esta etapa não é necessária.

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{2000 * 1,4}{0,25 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 1,045$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\min,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,028 > 0,023$$

$$e_x = 0,048 > 0,023$$

$$e_x = 0,048 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0,023$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\min,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0,023 > 0,03$$

$$e_y = 0,043 < 0,03$$

$$e_y = 0,043 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,028 \text{ m}$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{1,045 * 0,048}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,20$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{1,045 * 0,023}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,74$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{1,045 * 0,043}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,089$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{1,045 * 0,028}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,12$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,63$$

V) Seções intermediárias

Esta etapa não é necessária, visto que a ausência de excentricidades de segunda ordem gerarão condições menos desfavoráveis que as apresentadas nas seções de extremidade.

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção de extremidade da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{2000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,25 * 0,5$$

$$A_{s,min} = 9,66 > 5$$

$$A_{s,min} = 9,66 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,max} = 10000 * 0,08 * 0,25 * 0,5$$

$$A_{s,max} = 100 \text{ cm}^2$$

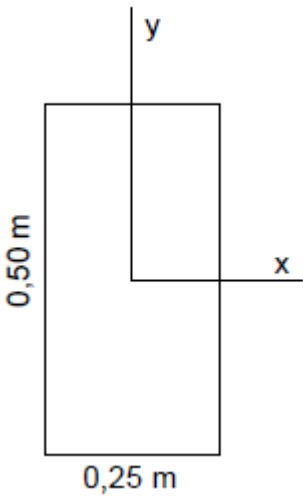
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,74 * 0,25 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 45,62 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,adot} = 45,62 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE D – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 30 MPa UTILIZANDO O *EUROCODE 2:2004*

	<p>$N_k = 2000 \text{ kN}$</p> <p>$l_e = 4,0 \text{ metros}$</p> <p>$M_{x,k} = 56 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$M_{y,k} = 46 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$</p> <p>$E_{cm} = 33 \text{ GPa}$ (Anexo F)</p>
---	--

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{56}{2000} = 0,028 \text{ m}$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{46}{2000} = 0,023 \text{ m}$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,5}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,01667 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-56)}{56}$$

$$C = 2,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{2000 * 1,35}{0,25 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 1,080$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{1,080}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 57,158$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,360$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-46)}{46}$$

$$C = 2,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{2000 * 1,35}{0,25 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 1,080$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{1,080}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 57,158$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,5}$$

$$\lambda_y = 27,680$$

Como $\lambda_x < \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem não precisam ser considerados em ambas as direções. Deste modo, as seções de extremidade serão as mais desfavoráveis. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{4}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1 = 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{1}\right)}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Esta etapa não é necessária.

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,028 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,048 > 0,020$$

$$e_x = 0,048 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0,023$$

$$v = n = 1,080$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{1,080 * 0,048}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,21$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{1,080 * 0,023}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,05$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0,023 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,043 > 0,020$$

$$e_y = 0,043 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,028 \text{ m}$$

$$v = n = 1,080$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{1,080 * 0,043}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,09$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{1,080 * 0,028}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,12$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,76$$

Pelo ábaco do anexo E:

$$\omega = 0,66$$

V) Seções intermediárias

Esta etapa não é necessária, visto que a ausência de excentricidades de segunda ordem gerarão condições menos desfavoráveis que as apresentadas nas seções de extremidade.

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção de extremidade da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{2000 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,25 * 0,50$$

$$A_{s,\min} = 6,21 > 2,50$$

$$A_{s,\min} = 6,210 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,25 * 0,50$$

$$A_{s,\max} = 100 \text{ cm}^2$$

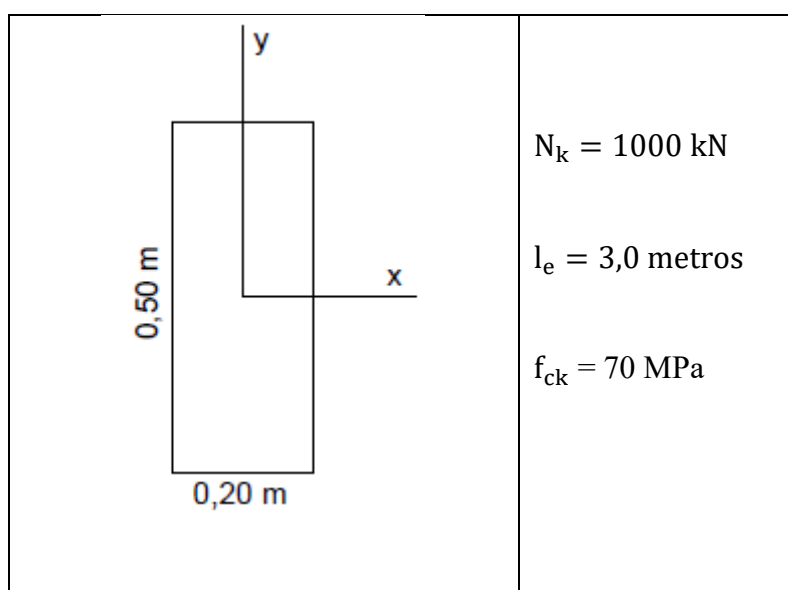
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,76 * 0,25 * 0,50 * \frac{30 * 10^3}{1,5}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 43,70 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 43,70 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE E – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,50)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,50}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 20,76 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h_x^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Sd,tot,x}}{N_d}$$

$$e_{tot,x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,28$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,28 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,029$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,28 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,015 < 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,28 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,017$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,28 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{\text{tot},x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,28 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,05$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,28 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} + e_2 > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,28 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,017$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,28 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

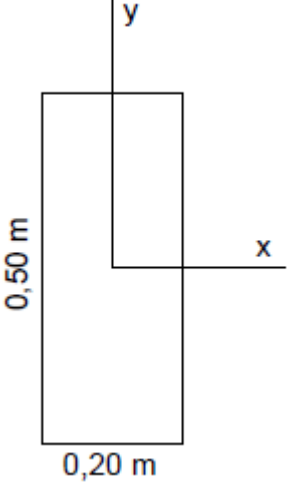
$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 4,00$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 4,83 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE F – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
70 MPa UTILIZANDO O EUROCODE 2:2004**

	$N_k = 1000 \text{ kN}$ $l_e = 3,0 \text{ metros}$ $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$ $E_{cm} = 41 \text{ GPa (Anexo F)}$
---	---

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,2}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00667 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,5}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,01667 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,289$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,289}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 28,632$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2}$$

$$\lambda_x = 51,90$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,289$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,289}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 28,632$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5}$$

$$\lambda_y = 20,76$$

Como $\lambda_x > \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{3}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1,155 > 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{m})}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{1})}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 \geq 0,02$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,02$$

$$e_{1,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$I_c = \frac{b_y * h_x^3}{12}$$

$$I_c = \frac{0,5 * 0,2^3}{12}$$

$$I_c = 3,333 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

Utilizando $\rho \geq 0,01$:

$$K_c = 0,3$$

$$K_s = 0$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,3 * \frac{41 * 10^6}{1,2} * 3,333 * 10^{-4} + 0 * E_s * I_s$$

$$EI = 3416,667$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{c_0}$$

$$\beta = \frac{\pi^2}{8}$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 3416,667 * \frac{\pi^2}{3^2}$$

$$N_b = 3746,794 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,x} = M_{0Ed,x} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 1000 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{3746,794}{1000 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 45,762 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,x} = \frac{45,762}{1000 * 1,35}$$

$$e_{tot,x} = 0,034 \text{ m}$$

Pré-dimensionamento:

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,35}{0,2 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$v = 0,289$$

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,02$$

$$e_x = 0,034$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,289 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,05$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,289 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Deste modo, recai na armadura mínima:

$$A_{s,min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,min} = 10000 * 0,10 * \frac{1000 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,min} = 3,105 > 2,00$$

$$A_{s,min} = 3,105 \text{ cm}^2$$

Para atender esta área necessária, 6 barras de 10 milímetros de diâmetro são suficientes. Deste modo, refaz-se o cálculo considerando a rigidez referente às armaduras e $\rho \geq 0,02$.

Refazendo os cálculos utilizando $\rho \geq 0,02$:

$$e_{1,x} = 0,02$$

$$I_c = 3,333 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_s = 4 * [I_B + A * (y')^2] + 2 * I_B$$

$$I_s = 4 * \left[\frac{\pi * D^4}{64} + \pi * \frac{D^2}{4} * (0,5 - 0,05)^2 \right] + 2 * \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$I_s = 1,257 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{70}{20}}$$

$$K_1 = 1,871$$

$$K_2 = n * \frac{\lambda_x}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,289 * \frac{51,9}{170} \leq 0,20$$

$$K_2 = 0,088 < 0,20$$

$$K_2 = 0,088$$

$$K_c = K_1 * K_2$$

$$K_c = 1,871 * 0,088$$

$$K_c = 0,165$$

$$K_s = 1$$

$$EI = K_c * \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} * I_c + K_s * E_s * I_s$$

$$EI = 0,165 * \frac{41 * 10^6}{1,2} * 3,333 * 10^{-4} + 1 * \frac{200 * 10^6}{1,15} * 1,257 * 10^{-5}$$

$$EI = 4067,457$$

$$\beta = 1,2337$$

$$N_b = EI * \frac{\pi^2}{l_e^2}$$

$$N_b = 4067,457 * \frac{\pi^2}{3^2}$$

$$N_b = 4460,466 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,x} = M_{0Ed,x} * \left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_b}{N_{Ed}} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 1000 * 1,35 * 0,02 \left[1 + \frac{1,2337}{\left(\frac{4460,466}{1000 * 1,35} \right) - 1} \right]$$

$$M_{Ed,x} = 41,457 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,x} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

$$e_{tot,x} = \frac{41,457}{1000 * 1,35}$$

$$e_{tot,x} = 0,031 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,015 < 0,020$$

$$e_x = 0,020 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,289 * 0,020}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,03$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,289 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,015 < 0,020$$

$$e_y = 0,020 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,289 * 0,020}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,01$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,289 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{\text{tot},x} \geq e_{1,x}$$

$$e_x = 0,031 > 0,020$$

$$e_x = 0,031 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,289 * 0,031}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,04$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,289 * 0,0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} + e_2 > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 \geq 0,02$$

$$e_y = 0,075 < 0,02$$

$$e_y = 0,02 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,289 * 0,02}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,01$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,289 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

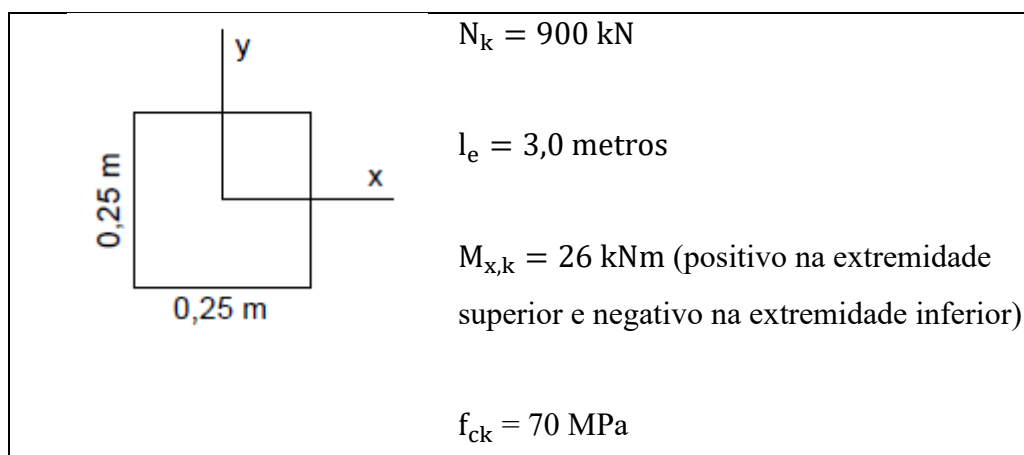
$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{1000 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 3,11 > 2,00$$

$$A_{s,\min} = 3,11 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 3,11 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE G – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR LATERAL COM f_{ck} DE
70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{26}{900} = 0,029 \text{ m}$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,023 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$$

$$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-26)}{26} > 0,40$$

$$\alpha_{b,x} = 0,20 < 0,40$$

$$\alpha_{b,x} = 0,40$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0,029/0,25}{0,40} > 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{900} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,023 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,25}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 66,11 > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 66,11$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,36$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_y = 55,36$$

Como $\lambda_x < \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y > \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção Y. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{4}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} = \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,y} = e_a + e_{i,y} > e_{1,\min,y}$$

$$e_{1,y} = 0,01 + 0 > 0,023$$

$$e_{1,y} = 0,01 < 0,023$$

$$e_{1,y} = 0,023 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_y$$

$$A = 5 * 0,25$$

$$A = 1,25$$

$$B = h_y^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_y * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$B = 0,25^2 * 900 * 1,4 - \frac{900 * 1,4 * 4^2}{320} - 5 * 0,25 * 1 * 900 * 1,4 * 0,023$$

$$B = -19,688$$

$$C = -N_d * h_y^2 * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$C = -900 * 1,4 * 4^2 * 1 * 900 * 1,4 * 0,023$$

$$C = -2232,563$$

$$M_{Sd,tot,y} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,y} = \frac{-(-19,688) + \sqrt{(-19,688)^2 - 4 * 1,25 * (-2232,563)}}{2 * 1,25}$$

$$M_{Sd,tot,y} = 50,864 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},y} = \frac{M_{\text{Sd,tot},y}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},y} = \frac{50,864}{900 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},y} = 0,040 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{900 * 1,4}{0,25 * 0,25 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,403$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,029 > 0,023$$

$$e_x = 0,049 > 0,023$$

$$e_x = 0,049 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,403 * 0,049}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,08$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,02 + 0 > 0,023$$

$$e_y = 0,02 < 0,023$$

$$e_y = 0,023 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029 \text{ m}$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,403 * 0,023}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,04$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,403 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,403 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_a + e_{i,x} + e_2 > e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,01 + 0,029 + 0 > 0,023$$

$$e_x = 0,039 > 0,023$$

$$e_x = 0,039 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,403 * 0,039}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,06$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

Direção Y

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_y = 0,04 > 0,023$$

$$e_y = 0,04$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,403 * 0,04}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,065$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_y = \frac{0,403 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0$$

$$\mu_x = \frac{0,403 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

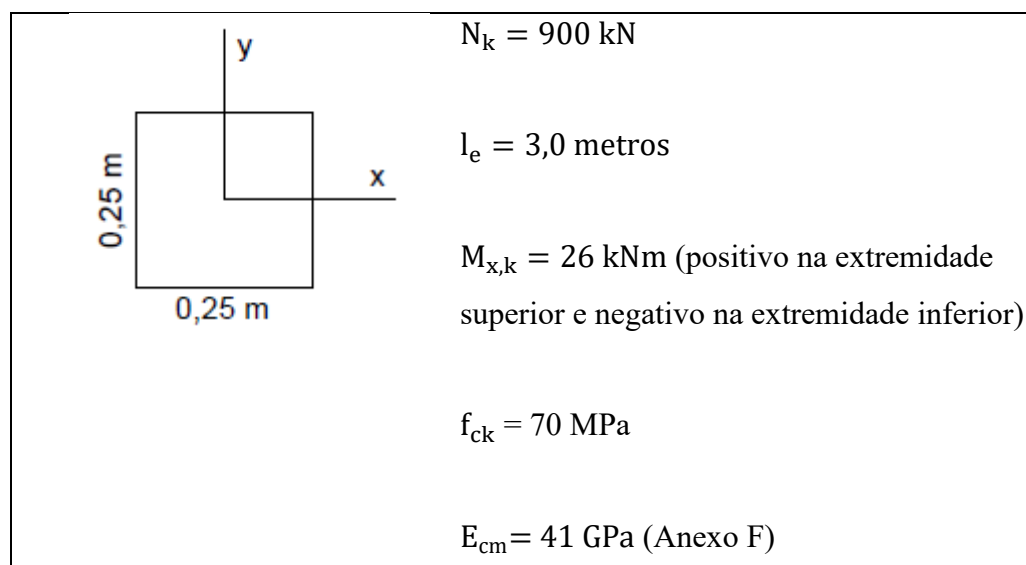
$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{900 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,min} = 4,35 > 2,5$$

$$A_{s,min} = 4,35 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,adot} = 4,35 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE H – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR LATERAL COM f_{ck} DE
70 MPa UTILIZANDO O EUROCODE 2:2004**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{26}{900} = 0,029 \text{ m}$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{900} = 0$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-26)}{26}$$

$$C = 2,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{900 * 1,35}{0,25 * 0,25 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,417$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{0,417}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 92,03$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,360$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{900 * 1,35}{0,25 * 0,25 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,417$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 1,7}{\sqrt{0,417}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 57,95$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_y = 55,360$$

Como $\lambda_x < \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem não precisam ser considerados em ambas as direções. Deste modo, as seções de extremidade serão as mais desfavoráveis. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{4}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1 = 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{m})}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{1})}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Esta etapa não é necessária.

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,029 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,049 > 0,020$$

$$e_x = 0,049 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$v = n = 0,417$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,417 * 0,049}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,08$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,417 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,02 = 0,020$$

$$e_y = 0,020 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,029 \text{ m}$$

$$v = n = 0,417$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,417 * 0,020}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,03$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,417 * 0,029}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Esta etapa não é necessária, visto que a ausência de excentricidades de segunda ordem gerarão condições menos desfavoráveis que as apresentadas nas seções de extremidade.

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

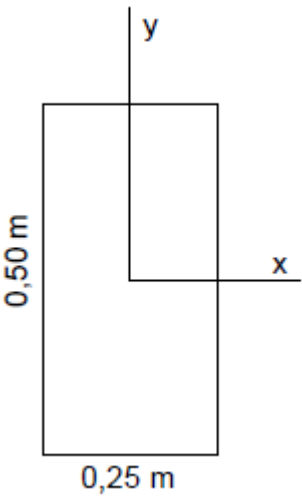
$$A_{s,min} = 10000 * 0,10 * \frac{900 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,25 * 0,25$$

$$A_{s,min} = 2,79 > 1,25$$

$$A_{s,min} = 2,79 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,adot} = 2,79 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE I – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014

	<p>$N_k = 2000 \text{ kN}$</p> <p>$l_e = 4,0 \text{ metros}$</p> <p>$M_{x,k} = 56 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$M_{y,k} = 46 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$f_{ck} = 70 \text{ MPa}$</p>
---	--

D) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X	Direção Y
$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{56}{2000} = 0,028 \text{ m}$	$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{46}{2000} = 0,023 \text{ m}$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$
$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$	$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,5)$
$e_{1,\min,x} = 0,023 \text{ m}$	$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,60 + 0,40 * \frac{M_B}{M_A} > 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-56)}{56} > 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,60 + 0,40 * \frac{(-46)}{46} > 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,20 < 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,20 < 0,40$
$\alpha_{b,x} = 0,40$	$\alpha_{b,y} = 0,40$

$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$ $\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0,028/0,25}{0,40} > 35$ $\lambda_{1,x} = 66 > 35$ $\lambda_{1,x} = 66$ $\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$ $\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$ $\lambda_x = 55,360$	$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$ $\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0,023/0,5}{0,40} > 35$ $\lambda_{1,y} = 63,938 < 35$ $\lambda_{1,y} = 63,938$ $\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$ $\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,5}$ $\lambda_y = 27,680$
---	---

Como $\lambda_x < \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem não precisam ser considerados em ambas as direções. Deste modo, as seções de extremidade serão as mais desfavoráveis. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade accidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{4}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} = \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Esta etapa não é necessária.

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{2000 * 1,4}{0,25 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,448$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,028 > 0,023$$

$$e_x = 0,048 > 0,023$$

$$e_x = 0,048 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0,023 \text{ m}$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0,023 > 0,03$$

$$e_y = 0,043 < 0,03$$

$$e_y = 0,043 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,028 \text{ m}$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,448 * 0,048}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,09$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,448 * 0,023}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,02$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,448 * 0,043}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,04$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,448 * 0,028}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Esta etapa não é necessária, visto que a ausência de excentricidades de segunda ordem gerarão condições menos desfavoráveis que as apresentadas nas seções de extremidade.

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

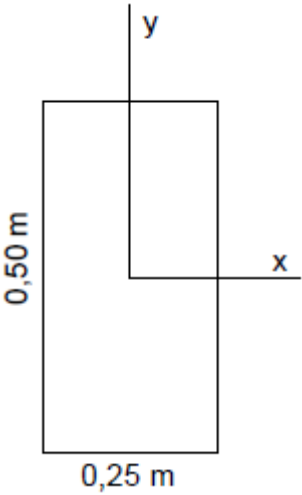
$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{2000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,25 * 0,5$$

$$A_{s,min} = 9,66 > 5$$

$$A_{s,min} = 9,66 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,adot} = 9,66 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE J – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR DE CANTO COM f_{ck} DE 70 MPa UTILIZANDO O EUROCODE 2:2004

	<p>$N_k = 2000 \text{ kN}$</p> <p>$l_e = 4,0 \text{ metros}$</p> <p>$M_{x,k} = 56 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$M_{y,k} = 46 \text{ metros}$ (positivo na extremidade superior e negativo na extremidade inferior)</p> <p>$f_{ck} = 70 \text{ MPa}$</p> <p>$E_{cm} = 41 \text{ GPa}$ (Anexo F)</p>
---	--

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{56}{2000} = 0,028 \text{ m}$$

$$e_{0,x} = \frac{h_x}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = \frac{0,25}{30} > 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,00833 < 0,02$$

$$e_{0,x} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{46}{2000} = 0,023 \text{ m}$$

$$e_{0,y} = \frac{h_y}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = \frac{0,5}{30} > 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,01667 < 0,02$$

$$e_{0,y} = 0,02 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * \varphi_{ef})}$$

$$A = \frac{1}{(1 + 0,2 * 0)}$$

$$A = 1$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-56)}{56}$$

$$C = 2,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{2000 * 1,35}{0,25 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,480$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,x} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{0,480}}$$

$$\lambda_{lim,x} = 87,310$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x}$$

$$\lambda_x = 3,46 * \frac{4}{0,25}$$

$$\lambda_x = 55,360$$

$$B = 1,1$$

$$C = 1,7 - \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$C = 1,7 - \frac{(-46)}{46}$$

$$C = 2,7$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}}$$

$$n = \frac{2000 * 1,35}{0,25 * 0,5 * \frac{70 * 10^3}{1,5}}$$

$$n = 0,480$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim,y} = \frac{20 * 1 * 1,1 * 2,7}{\sqrt{0,480}}$$

$$\lambda_{lim,y} = 87,310$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y}$$

$$\lambda_y = 3,46 * \frac{4}{0,5}$$

$$\lambda_y = 27,680$$

Como $\lambda_x < \lambda_{lim,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{lim,y}$, os efeitos de segunda ordem não precisam ser considerados em ambas as direções. Deste modo, as seções de extremidade serão as mais desfavoráveis. Além disso, como tem-se $\lambda < 75$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_e}} \leq 1$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{4}} \leq 1$$

$$\alpha_h = 1 = 1$$

$$\alpha_h = 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{1}\right)}$$

$$\alpha_m = 1$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200} * 1 * 1$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_i = \theta_1 * l_e$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 4$$

$$e_i \text{ (extremidade)} = 0,02 \text{ m}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{4}{2}$$

$$e_i \text{ (intermediária)} = 0,01 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Esta etapa não é necessária.

IV) Seções de extremidade

Direção X

$$e_x = e_i + e_{i,x} \geq e_{0,x}$$

$$e_x = 0,02 + 0,028 \geq 0,020$$

$$e_x = 0,048 > 0,020$$

$$e_x = 0,048 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0,023$$

$$v = n = 0,480$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,480 * 0,048}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,09$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,480 * 0,023}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,02$$

Direção Y

$$e_y = e_i + e_{i,y} \geq e_{0,y}$$

$$e_y = 0,02 + 0,023 \geq 0,020$$

$$e_y = 0,043 > 0,020$$

$$e_y = 0,043 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0,028 \text{ m}$$

$$v = n = 0,480$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,480 * 0,043}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,04$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,480 * 0,028}{0,25}$$

$$\mu_x = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Esta etapa não é necessária, visto que a ausência de excentricidades de segunda ordem gerarão condições menos desfavoráveis que as apresentadas nas seções de extremidade.

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

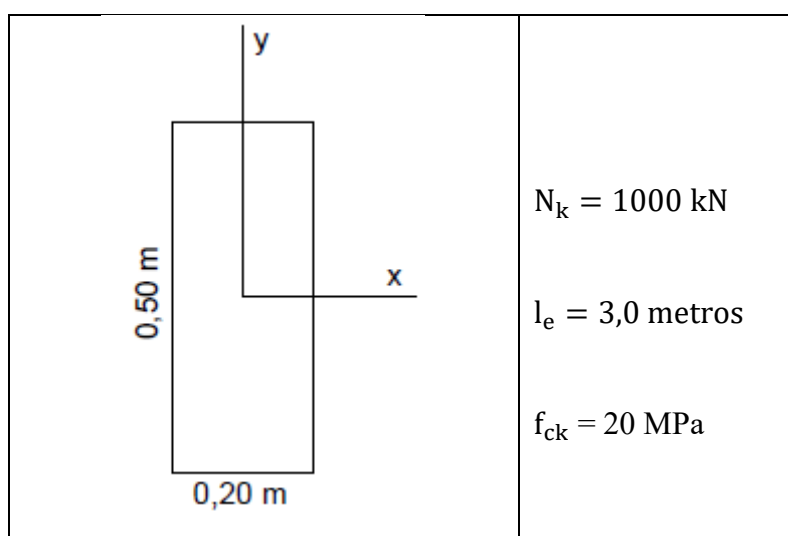
$$A_{s,\min} = 10000 * 0,10 * \frac{2000 * 1,35}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,002 * 0,25 * 0,50$$

$$A_{s,\min} = 6,21 > 2,50$$

$$A_{s,\min} = 6,21 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 6,21 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE K – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
20 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,50)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 20,76 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,5 * \frac{20 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,980$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,980 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,10$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,015 < 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,980 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,06$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,980 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,48$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,980 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0,20$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,980 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,17$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,980 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{i,y} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,980 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,06$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,980 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,75$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0,20$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 4,00$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\max} = 80 \text{ cm}^2$$

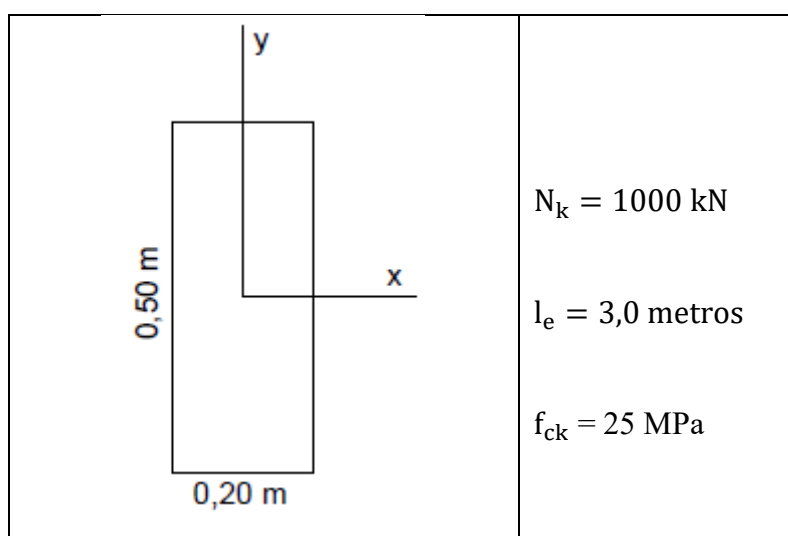
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,75 * 0,2 * 0,5 * \frac{20 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 24,643 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 24,643 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE L – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
25 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,50)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 20,76 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,5 * \frac{25 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,784$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,784 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,082$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,015 < 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,784 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,047$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,784 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,17$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,784 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0,08$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,784 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,13$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,784 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{i,y} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,784 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,05$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,784 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,45$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0,08$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 4,00$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\max} = 80 \text{ cm}^2$$

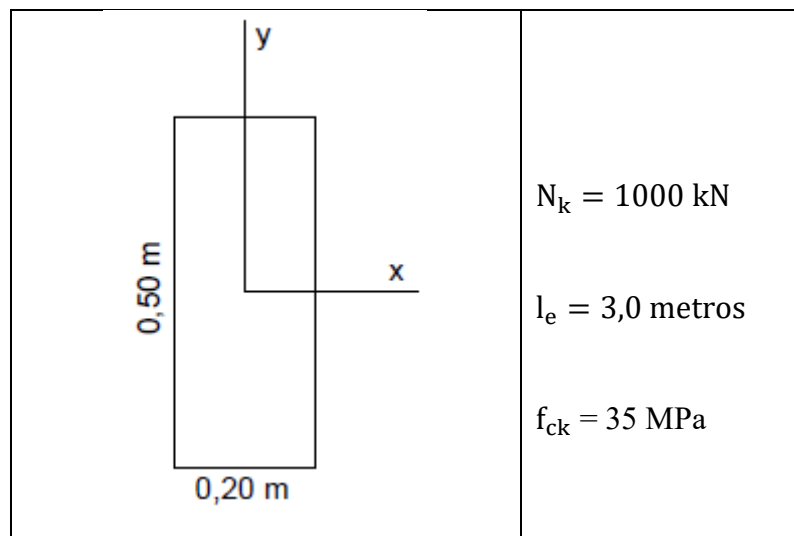
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,45 * 0,2 * 0,5 * \frac{25 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 18,482 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 18,482 \text{ cm}^2$$

**APÊNDICE M – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE
35 MPa UTILIZANDO A NBR 6118:2014**



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,50)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,030 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,5} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 20,76 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,5 * \frac{30 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,560$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,560 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,059$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,015 < 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,560 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,034$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,560 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,560 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,560 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,09$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,560 * 0}{0,5}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{i,y} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,03$$

$$e_y = 0,03 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,560 * 0,03}{0,5}$$

$$\mu_y = 0,037$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,560 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,05$$

Pelo ábaco do anexo A:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 4,00$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,5$$

$$A_{s,\max} = 80 \text{ cm}^2$$

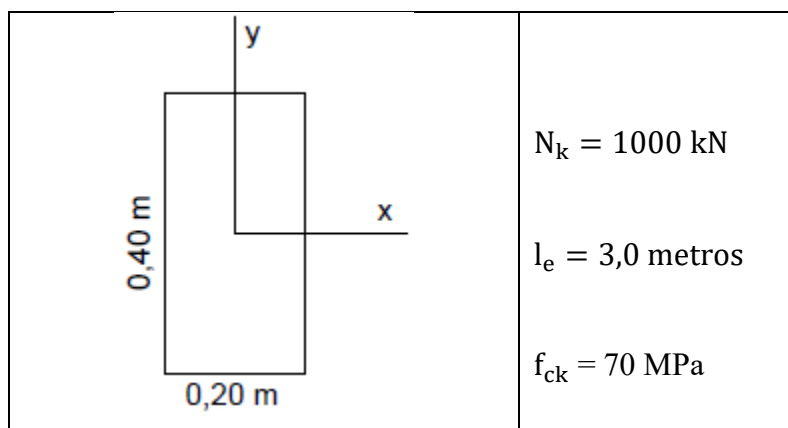
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,05 * 0,2 * 0,5 * \frac{35 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 2,875 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 4,83 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE N – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E H = 0,40 M UTILIZANDO A NBR 6118:2014



I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,20}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,40)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,027 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,40}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,4} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 25,95 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,4 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,35$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,35 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,037$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,027$$

$$e_y = 0,015 < 0,027$$

$$e_y = 0,027 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,35 * 0,027}{0,4}$$

$$\mu_y = 0,024$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,35 * 0}{0,4}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,35 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,35 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,06$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,35 * 0}{0,4}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{i,y} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,027$$

$$e_y = 0,027 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,35 * 0,027}{0,4}$$

$$\mu_y = 0,024$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,35 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

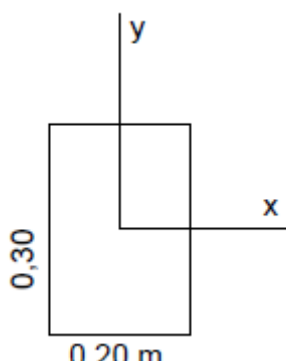
$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,4$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 3,20$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 4,83 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE O – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E H = 0,30 M UTILIZANDO A NBR 6118:2014

	$N_k = 1000 \text{ kN}$ $l_e = 3,0 \text{ metros}$ $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$
---	--

I) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,30)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,024 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,3}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,3} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 34,60 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y < \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados somente na direção X. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,3 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,467$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,467 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,049$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,024$$

$$e_y = 0,015 < 0,024$$

$$e_y = 0,024 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,467 * 0,024}{0,3}$$

$$\mu_y = 0,04$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,467 * 0}{0,3}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,467 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,08$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,467 * 0}{0,3}$$

$$\mu_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,467 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} + e_2 > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,0075 + 0 + 0 > 0,024$$

$$e_y = 0,024 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,467 * 0,024}{0,3}$$

$$\mu_y = 0,04$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,467 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

Pelo ábaco do anexo D:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que todas as hipóteses apresentaram $\omega = 0$. Assim, recai na armadura mínima.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

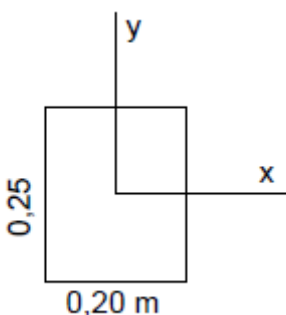
$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,3$$

$$A_{s,min} = 4,83 > 2,84$$

$$A_{s,min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,adot} = 4,83 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE P – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E H = 0,25 M UTILIZANDO A NBR 6118:2014

	$N_k = 1000 \text{ kN}$ $l_e = 3,0 \text{ metros}$ $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$
---	--

D) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,25)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,0225 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,25}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,25} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 41,52 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y > \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados em ambas as direções. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Direção X:

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

Direção Y:

$$e_{1,y} = e_a + e_{i,y} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_{1,y} = 0,0075 + 0 > 0,0225$$

$$e_{1,y} = 0,0075 < 0,0225$$

$$e_{1,y} = 0,0225 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_y$$

$$A = 5 * 0,25$$

$$A = 1,25$$

$$B = h_y^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_y * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$B = 0,25^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,25 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,0225$$

$$B = 8,75$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,y} * M_{1,d,A,y}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,25^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,0225$$

$$C = -2756,25$$

$$M_{Sd,tot,y} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,y} = \frac{-(8,75) + \sqrt{(8,75)^2 - 4 * 1 * (-2756,25)}}{2 * 1,25}$$

$$M_{Sd,tot,y} = 43,588 \text{ kNm}$$

$$e_{tot,y} = \frac{M_{Sd,tot,y}}{N_d}$$

$$e_{tot,y} = \frac{43,588}{1000 * 1,4}$$

$$e_{tot,y} = 0,031$$

$$e_{tot,y} = 0,031 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,25 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,56$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,min,x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,min,y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,0225$$

$$e_y = 0,015 < 0,0225$$

$$e_y = 0,0225 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,56 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,06$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,56 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,56 * 0,0225}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,05$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,56 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_{tot,y} > e_{1,y}$$

$$e_y = 0,031 > 0,0225$$

$$e_y = 0,031 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,56 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,09$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,56 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,05$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,56 * 0,031}{0,25}$$

$$\mu_y = 0,07$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,56 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo B:

$$\omega = 0$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seção intermediária da direção X é a mais desfavorável, visto que apresenta maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para esta seção.

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,25$$

$$A_{s,min} = 4,83 > 2,00$$

$$A_{s,min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,25$$

$$A_{s,\max} = 40 \text{ cm}^2$$

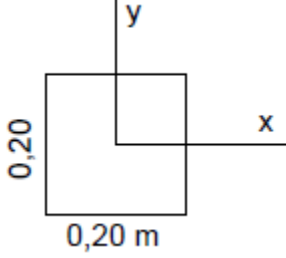
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,05 * 0,2 * 0,25 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 2,875 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{adot}} = 4,83 \text{ cm}^2$$

APÊNDICE Q – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR CENTRAL COM f_{ck} DE 70 MPa E H = 0,20 M UTILIZANDO A NBR 6118:2014

	$N_k = 1000 \text{ kN}$ $l_e = 3,0 \text{ metros}$ $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$
---	--

D) Excentricidades iniciais, excentricidades mínimas e esbeltezes

Direção X

$$e_{i,x} = \frac{M_x}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,x} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,x} = 1$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,x}/h_x}{\alpha_{b,x}} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,x} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,x} = 35$$

Direção Y

$$e_{i,y} = \frac{M_y}{N} = \frac{0}{1000} = 0$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * h)$$

$$e_{1,\min,y} = (0,015 + 0,03 * 0,20)$$

$$e_{1,\min,y} = 0,021 \text{ m}$$

$$\alpha_{b,y} = 1$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * e_{i,y}/h_y}{\alpha_{b,y}} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = \frac{25 + 12,5 * 0/0,2}{1} > 35$$

$$\lambda_{1,y} = 25 < 35$$

$$\lambda_{1,y} = 35$$

$$\begin{array}{l|l} \lambda_x = 3,46 * \frac{l_e}{h_x} & \lambda_y = 3,46 * \frac{l_e}{h_y} \\ \lambda_x = 3,46 * \frac{3}{0,2} & \lambda_y = 3,46 * \frac{3}{0,20} \\ \lambda_x = 51,90 & \lambda_y = 51,90 \end{array}$$

Como $\lambda_x > \lambda_{1,x}$ e $\lambda_y > \lambda_{1,y}$, os efeitos de segunda ordem devem ser considerados em ambas as direções. Além disso, como tem-se $\lambda < 90$, os efeitos de fluência podem ser desconsiderados.

II) Excentricidade acidental

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{l_e}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 * \sqrt{3}} \leq \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{173,2} < \frac{1}{200}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{200}$$

$$e_a = \theta_1 * l_e$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = \frac{1}{200} * 3$$

$$e_a \text{ (extremidade)} = 0,015 \text{ m}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = \frac{1}{200} * \frac{3}{2}$$

$$e_a \text{ (intermediária)} = 0,0075 \text{ m}$$

III) Excentricidades de segunda ordem

Direção X = Direção Y:

$$e_{1,x} = e_a + e_{i,x} > e_{1,\min,x}$$

$$e_{1,x} = 0,0075 + 0 > 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,0075 < 0,021$$

$$e_{1,x} = 0,021 \text{ m}$$

$$A = 5 * h_x$$

$$A = 5 * 0,2$$

$$A = 1$$

$$B = h_x^2 * N_d - \frac{N_d * l_e^2}{320} - 5 * h_x * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$B = 0,2^2 * 1000 * 1,4 - \frac{1000 * 1,4 * 3^2}{320} - 5 * 0,2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$B = -12,775$$

$$C = -N_d * h^2 * \alpha_{b,x} * M_{1,d,A,x}$$

$$C = -1000 * 1,4 * 0,2^2 * 1 * 1000 * 1,4 * 0,021$$

$$C = -1646,4$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 * A * C}}{2A}$$

$$M_{Sd,tot,x} = \frac{-(-12,775) + \sqrt{(-12,775)^2 - 4 * 1 * (-1646,4)}}{2 * 1}$$

$$M_{Sd,tot,x} = 47,463 \text{ kNm}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{M_{\text{Sd,tot},x}}{N_d}$$

$$e_{\text{tot},x} = \frac{47,463}{1000 * 1,4}$$

$$e_{\text{tot},x} = 0,034 \text{ m}$$

IV) Seções de extremidade

$$v = \frac{N_d}{A_c * f_{cd}}$$

$$v = \frac{1000 * 1,4}{0,2 * 0,2 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}$$

$$v = 0,70$$

Direção X

$$e_x = e_a + e_{ix} > e_{1,\text{min},x}$$

$$e_x = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_x = 0,015 < 0,021$$

$$e_x = 0,021 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,70 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,074$$

Direção Y

$$e_y = e_a + e_{iy} > e_{1,\text{min},y}$$

$$e_y = 0,015 + 0 > 0,021$$

$$e_y = 0,015 < 0,021$$

$$e_y = 0,021 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,70 * 0,021}{0,2}$$

$$\mu_y = 0,074$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,70 * 0}{0,25}$$

$$\mu_y = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,05$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,70 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,05$$

V) Seções intermediárias

Direção X

$$e_x = e_{tot,x} > e_{1,x}$$

$$e_x = 0,034 > 0,021$$

$$e_x = 0,034 \text{ m}$$

$$e_y = e_{iy}$$

$$e_y = 0$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,70 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_x = 0,12$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,70 * 0}{0,2}$$

$$\mu_y = 0$$

Direção Y

$$e_y = e_{tot,y} > e_{1,y}$$

$$e_y = 0,034 > 0,021$$

$$e_y = 0,034 \text{ m}$$

$$e_x = e_{ix}$$

$$e_x = 0$$

$$\mu_y = \frac{v * e_y}{h_y}$$

$$\mu_y = \frac{0,70 * 0,034}{0,2}$$

$$\mu_y = 0,12$$

$$\mu_x = \frac{v * e_x}{h_x}$$

$$\mu_x = \frac{0,70 * 0,0}{0,2}$$

$$\mu_x = 0$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,25$$

Pelo ábaco do anexo C:

$$\omega = 0,25$$

VI) Cálculo das armaduras

Observa-se que a seções intermediárias são as mais desfavoráveis, visto que apresentam maior valor de ω . Assim, as armaduras devem ser dimensionadas para estas seções:

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 10000 * 0,004 * A_c$$

$$A_{s,\min} = 10000 * 0,15 * \frac{1000 * 1,4}{\frac{50 * 10^4}{1,15}} \geq 10000 * 0,004 * 0,2 * 0,2$$

$$A_{s,\min} = 4,83 > 1,60$$

$$A_{s,\min} = 4,83 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * A_c$$

$$A_{s,\max} = 10000 * 0,08 * 0,2 * 0,2$$

$$A_{s,\max} = 32 \text{ cm}^2$$

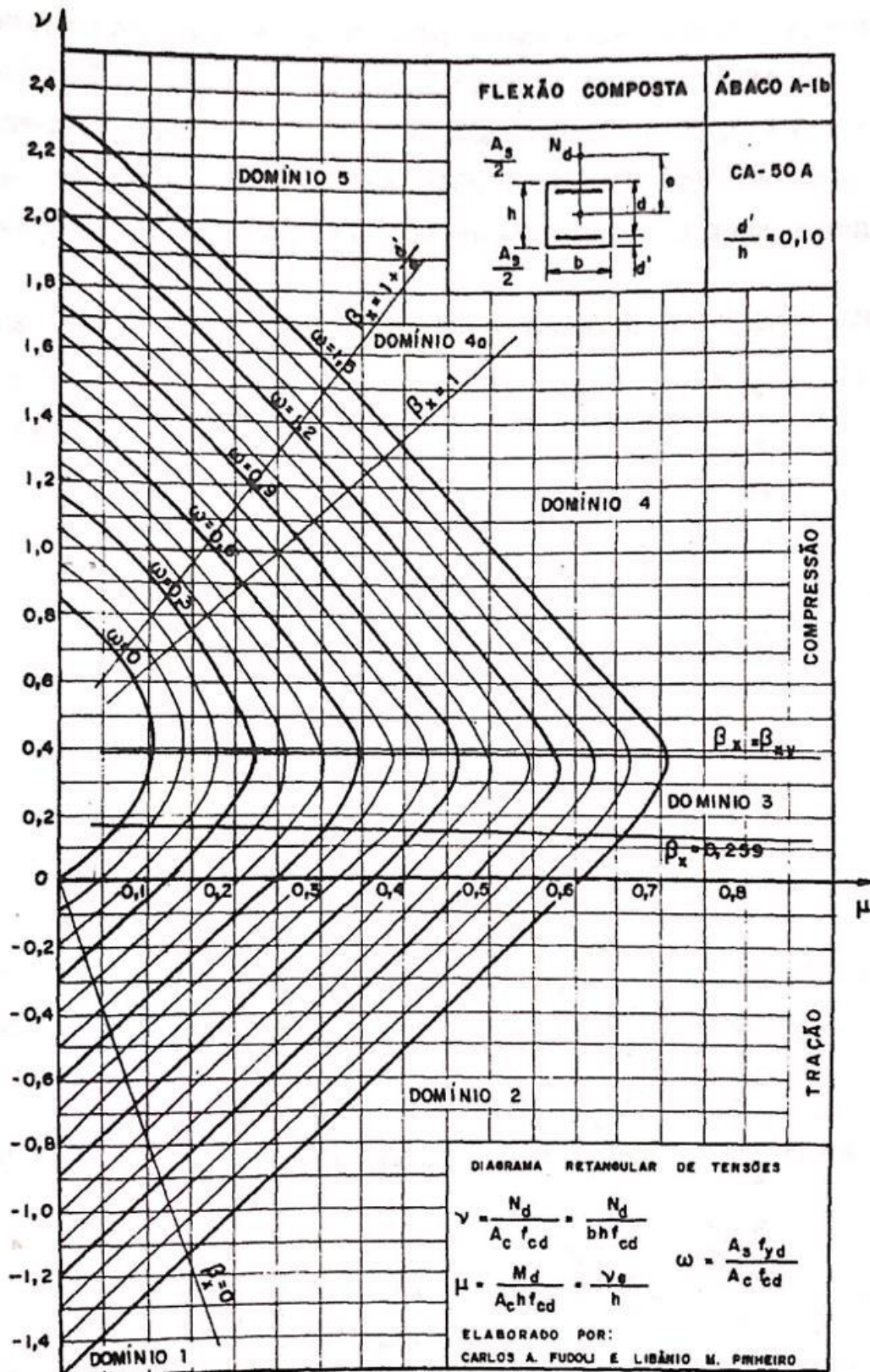
$$A_s = 10000 * \frac{\omega * A_c * f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = 10000 * \frac{0,25 * 0,2 * 0,2 * \frac{70 * 10^3}{1,4}}{\frac{50 * 10^4}{1,15}}$$

$$A_s = 11,5 \text{ cm}^2$$

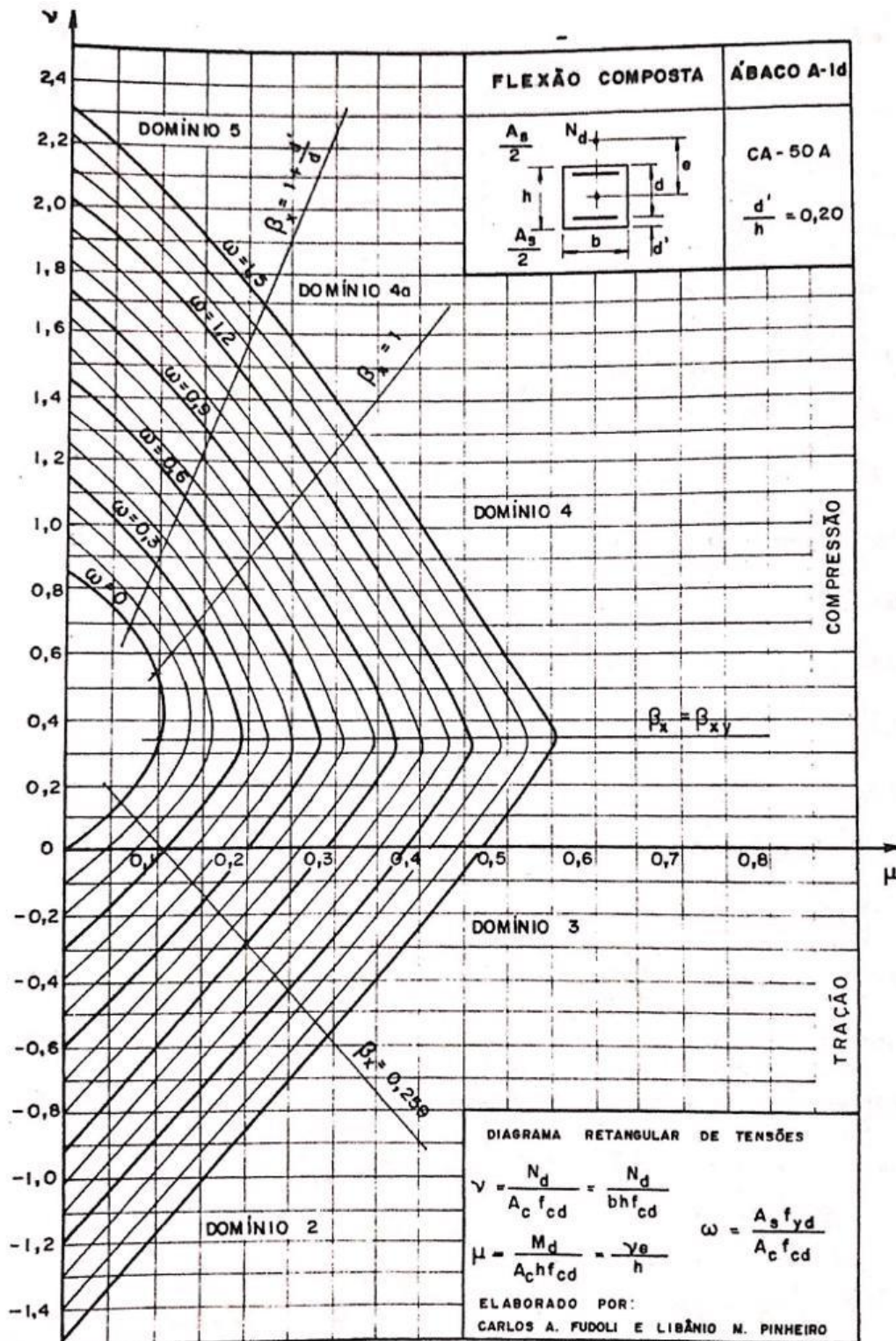
$$A_{s,\text{adot}} = 11,5 \text{ cm}^2$$

ANEXO A – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA ($D'/H = 0,10$)



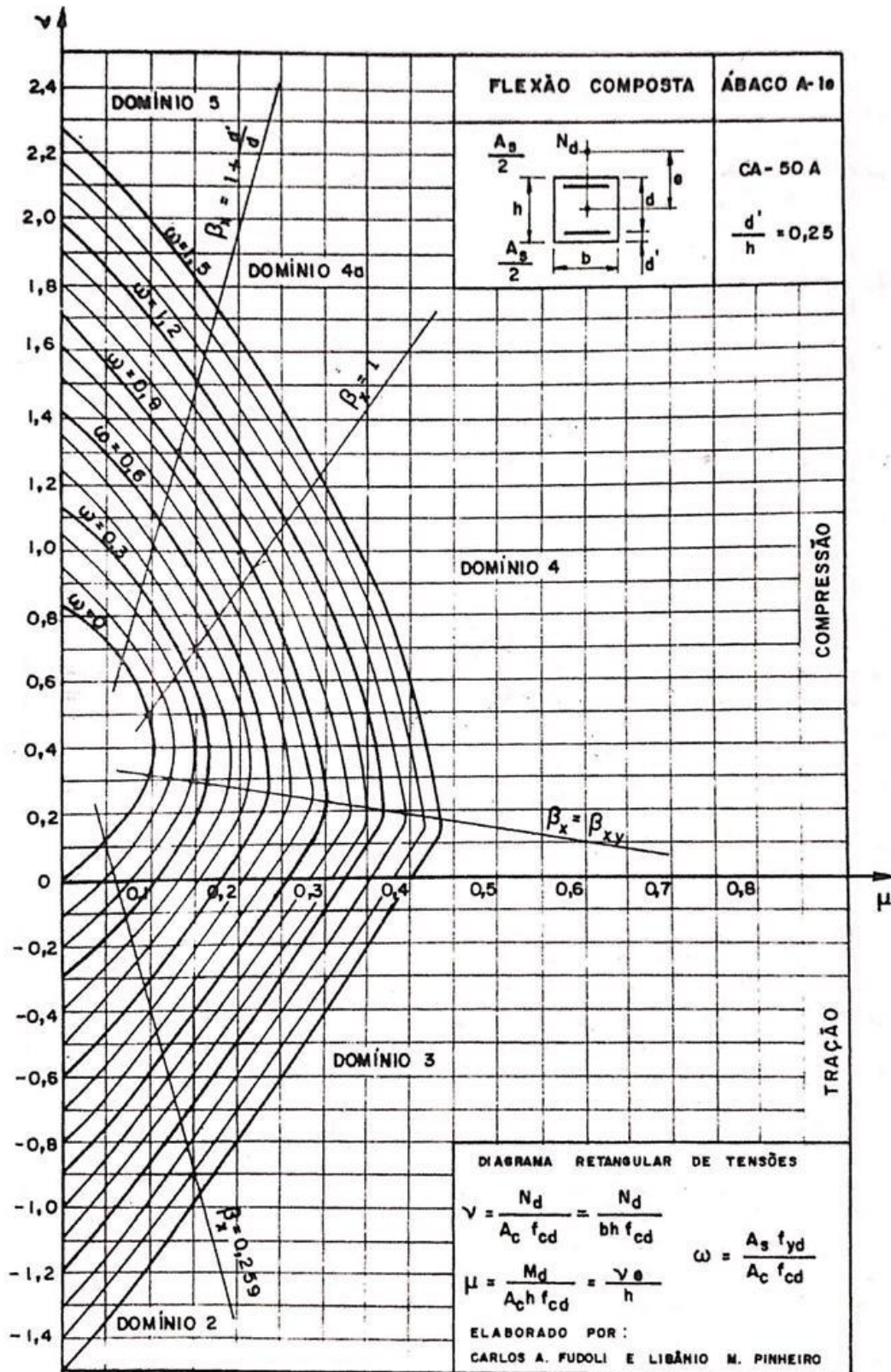
Fonte: Pinheiro (1993 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009, p. 298).

ANEXO B – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA (D'/H = 0,20)



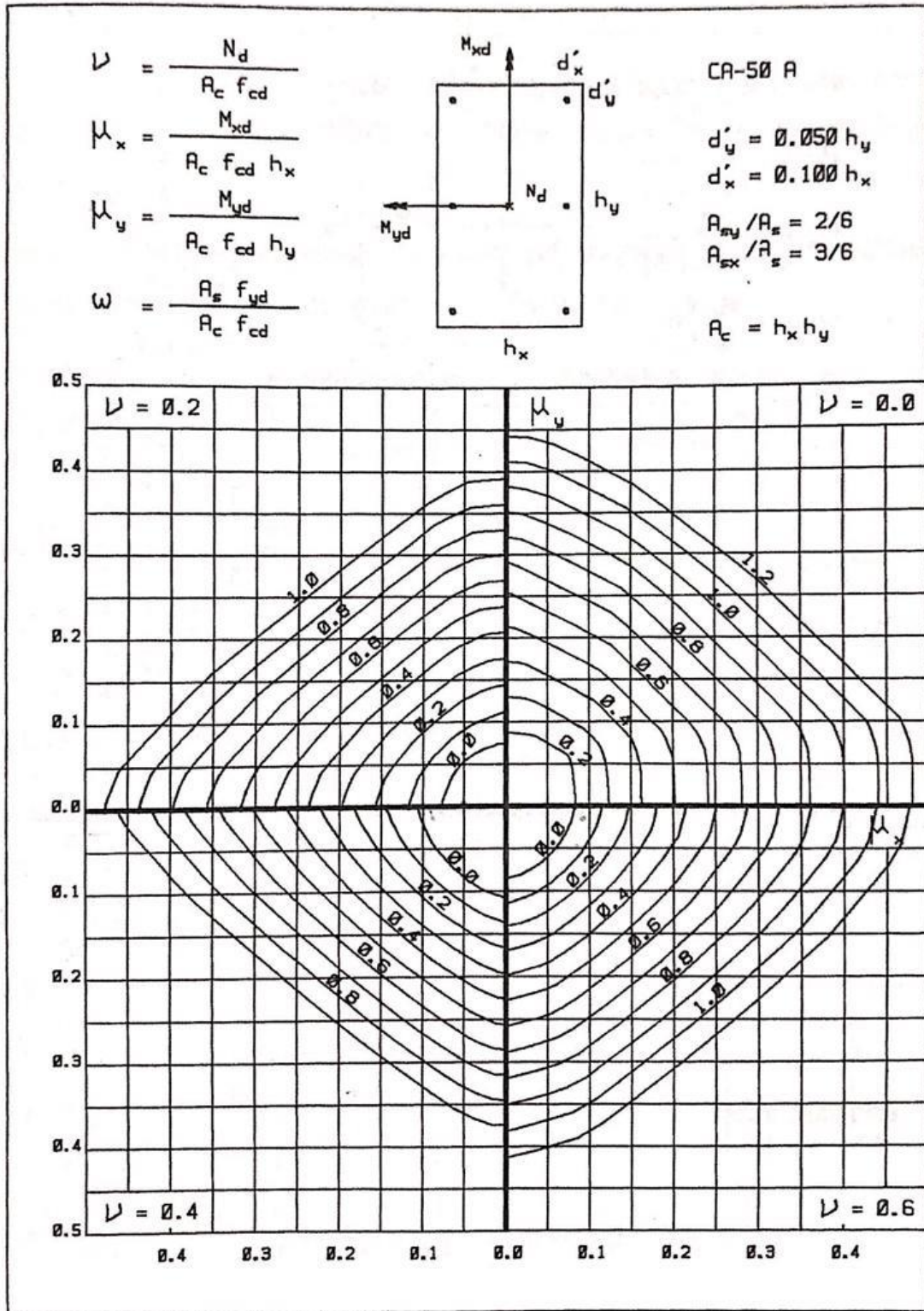
Fonte: Pinheiro (1993 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009, p. 300).

ANEXO C – ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA RETA ($D'/H = 0,25$)



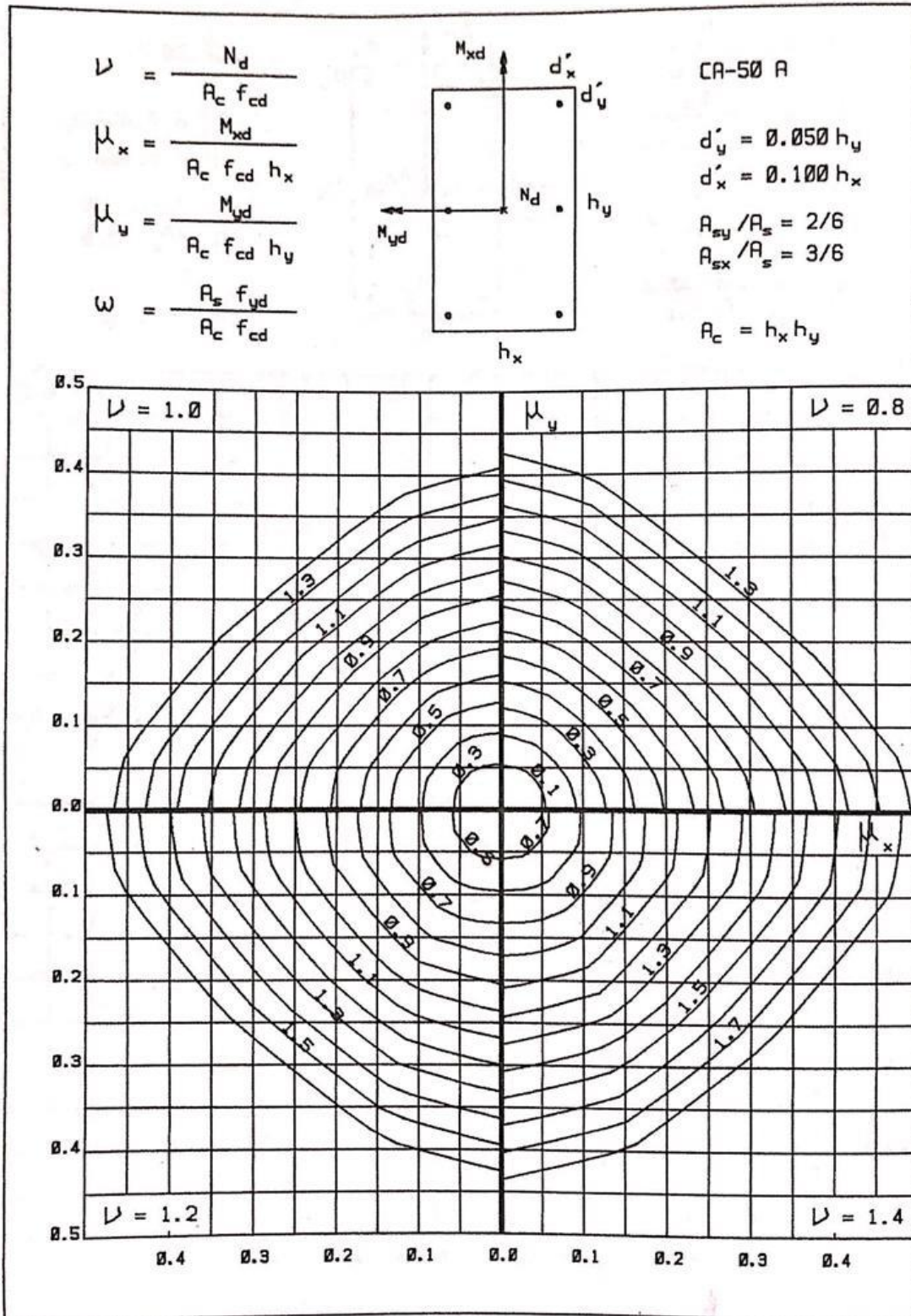
Fonte: Pinheiro (1993 apud CARVALHO e PINHEIRO 2009, p. 301).

ANEXO D- ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA OBLIQUA
 (v = 0, v = 0,2, v = 0,4, v = 0,6)



Fonte: Pinheiro et al. (1994 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009, p. 305).

ANEXO E- ÁBACO PARA FLEXÃO COMPOSTA OBLIQUA
 (v= 0,8, v= 1,0, v= 1,2, v= 1,4)



Fonte: Pinheiro et al. (1994 *apud* CARVALHO e PINHEIRO 2009, p. 306).

ANEXO F- CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

Strength classes for concrete														Analytical relation / Explanation	
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	2.8
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ck,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ck,0.05} = 0,7 \times f_{cm}$ 5% fractile
$f_{ck,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ck,0.95} = 1,3 \times f_{cm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{1,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	see Figure 3.2 $\varepsilon_{c1}^{(f_{cm})} = 0,7 f_{cm}^{0,33} \leq 2,8$ (‰)
ε_{cu1} (‰)	3,5								3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	2,8	see Figure 3.2 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu1}^{(f_{cm})} = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0								2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c2}^{(f_{cm})} = 2,0 + 0,085(f_{cm} - 50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5								3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu2}^{(f_{cm})} = 2,6 + 35[(90 - f_{cm})/100]^4$
n	2,0								1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	1,4	for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{cm})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75								1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,3	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c3}^{(f_{cm})} = 1,75 + 0,55[(f_{cm} - 50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5								3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	2,6	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu3}^{(f_{cm})} = 2,6 + 35[(90 - f_{cm})/100]^4$

Fonte: Eurocode 2 – part 1- 1 (2004, p.29).