

Análise Comparativa do Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado ao Esforço Cortante Pela ABNT NBR 6118 e EN 1992-1-1: Estudo de Caso

Tiago da Rocha Cristofoli¹, Ranier Adonis Barbieri², Fabrício Longhi Bolina³

¹Unisinos / Engenheiro, pós-graduando em Projeto de Estruturas / trcristofoli@gmail.com

²UFRGS / Engenheiro, Dr. Ranier Adonis Barbieri/ r.barbieri@cte-sa.com

³Unisinos / Professor curso pós-graduação em Projeto de Estruturas / fabriciolb@unisinos.br

Resumo

O presente trabalho consiste em um comparativo entre os critérios de projeto de vigas de concreto armado segundo a metodologia de cálculo da NBR 6118 (ABNT, 2014) e Eurocode 2 (CEN, 2005). Para tanto, foi feita uma análise de elemento estrutural que compõe uma estrutura construída na França, tendo o Eurocode 2 (CEN, 2005) como diretriz de projeto. Fixando as hipóteses de carregamento e geometria do elemento, o mesmo foi recalculado de acordo com as premissas da Norma Brasileira, permitindo o comparativo do consumo final dos materiais obtido pelos dois cálculos. Notou-se que ambas as normas foram concebidas a partir dos códigos do CEB, mostrando-se clara a influência sofrida pelo mesmo. Porém, cada uma das normas possui algumas particularidades, o que proporcionou hipóteses, metodologias e resultados diferenciados. Notou-se que, no caso do dimensionamento ao cisalhamento, o consumo de armaduras com o uso do Eurocode 2 (CEN, 2005) é superior ao obtido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), podendo ser de até 88% em certos trechos. Esse conservadorismo se sustenta nos mecanismos complementares aos da treliça de Ritter e Morsch que não são consentidos pelo Eurocode, que assume que o aço resiste, isoladamente, a todos os esforços.

Palavras-chave

Projeto Estrutural. Concreto Armado. Esforço Cortante. Dimensionamento.

Introdução

O estudo de um projeto estrutural já realizado com base em normas estrangeiras possibilita a real comparação dos critérios e princípios praticados por normas utilizadas no Brasil, emergindo a possibilidade de analisar criticamente e comparar os critérios e conceitos de normas brasileiras perante outras normas regulamentadoras de referência no cenário internacional. Dentre estas, está a NBR 6118 que, pela qualidade técnica que foi incorporada nas últimas revisões, é reconhecida pela *International Organization for Standardization* como norma internacional, assim como Eurocode 2 (CEN, 2005).

Diante da sólida consistência dos procedimentos técnicos de ambas as normas, internacionalmente reconhecidas e tomadas como regulamentos de referência, o presente estudo visa comparar resultados obtidos no dimensionamento de um elemento estrutural ao esforço cortante, por meio do procedimento estabelecido pelas prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014) e Eurocode 2 (CEN, 2005) para este esforço.

Para tanto, o trabalho toma como base uma viga de concreto armado de um edifício residencial convencional. As dimensões da viga não foram modificadas em ambos os

cálculos procedidos. O comparativo se limitou a analisar apenas a diferença entre área de armaduras transversais obtidas por meio da aplicação dos critérios definidos pelas referidas normas. O carregamento admitido na análise desta viga, além da resistência à compressão do concreto empregado, foi mantida constante nas duas verificações.

Entende-se que, por meio deste comparativo, seja possível levantar ferramentas para análises críticas e futuras contribuições a discussões normativas, sobretudo no que tange ao grau de conservadorismo e segurança inerente aos métodos, os quais produzem consequências diretas no consumo dos materiais obtidos no dimensionamento estrutural de cada elemento de um projeto.

Revisão bibliográfica

Normatizações: histórico e origens

Em 1978, o primeiro Código Modelo para Estruturas de Concreto foi publicado. Era resultado de cooperação entre *Comité Euro-International du Béton* (CEB) e *Fédération Internationale de la Précontrainte* (FIP), duas organizações internacionais que objetivaram a análise e estudos dos dimensionamentos de estruturas de Concreto Armado. O CEB-FIP definiu a vanguarda das novas direções de pesquisa e produção de recomendações de projeto (MONTROYA *et al*, 2002), muitas destas inclusive até hoje praticadas por normas regulamentadoras de diversos países.

O CEB-FIP, Código Modelo 1990, foi o próximo da série e um grande passo em frente à harmonização internacional dos códigos. (MONTROYA *et al*, 2002).

Em 1940, foi criada pela iniciativa privada a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A primeira norma estabelecida foi a Norma Regulamentadora NB-1, justamente sobre estruturas de concreto (SANTOS, 1983). A NB-1 sofreu modificações em 1943, 1949 e 1950, vigorando até 1978. A edição NB-1 de 1978 trouxe o método dos estados limites de cálculo, adotado com base no CEB-FIP. Este entendimento trazia à época um conceito inovador quanto ao dimensionamento, trazendo precisão maior na verificação do comportamento da estrutura em serviço. (SANTOS, 1983).

A NBR 6118: 2014 trouxe modificações pontuais em relação a revisão de 2003. A utilização de concreto de alta resistência foi uma das principais inserções contidas na última versão desta norma, critérios estes já presentes no Eurocode 2 (CEN, 2005) e CEB-FIP. O CEB-FIP serviu de referência básica para o Eurocode para Estruturas de Concreto, que agora é introduzido na maioria dos países europeus. (CLÍMACO, 2008).

Em 1971 uma diretiva de procuração pública apontou um comitê para examinar a possibilidade de desenvolvimento de um conjunto de documentos técnicos europeus que cobrissem uma grande quantidade de trabalhos de construção. (CALGARO, 2006). Em 1980 foram criados os primeiros rascunhos de documentos técnicos sob a autoridade desta comissão, surgindo os Eurocodes. Em 1990, o CEN lançou a primeira versão dos padrões europeus normatizados. Entre 1998 e 2006 os Eurocodes foram convertidos em padrões europeus EN. (CALGARO, 2006).

Dimensionamento ao Esforço Cortante

Normalmente os esforços de flexão são acompanhados por esforços cortantes, visto que em sistemas estruturais é bem pouco provável que tenhamos apenas esforços axiais. Portanto, além das tensões normais estão atuando, também notam-se tensões tangenciais

na estrutura. Para cargas de pequena intensidade a solução para o problema poderá ser encontrada na teoria da resistência dos materiais, com a seção em estágio I, onde o concreto resiste a tração. Após o surgimento da primeira fissura, esta teoria não é mais válida, assim necessitando de um reajuste de tensões entre o concreto e a armadura. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O modelo proposto por Ritter e Morsch idealiza a explicação das tensões em uma viga de Concreto Armado após a fissuração, no qual o funcionamento é análogo ao de uma treliça, onde o concreto representa o banzo comprimido e as armaduras os banzos tracionados. (CLÍMACO, 2008).

A treliça original de Morsch idealizou as diagonais inclinadas a um ângulo de 45° com o eixo da peça, como mostrado na Figura 1. Atualmente, a treliça clássica de Morsch fornece armadura transversal superior à necessária. O modelo sofreu alterações que permitem considerar inclinações menores para as bielas de compressão, conhecido como Treliça Generalizada de Morsch. (CLÍMACO, 2008; ARAÚJO, 2014).

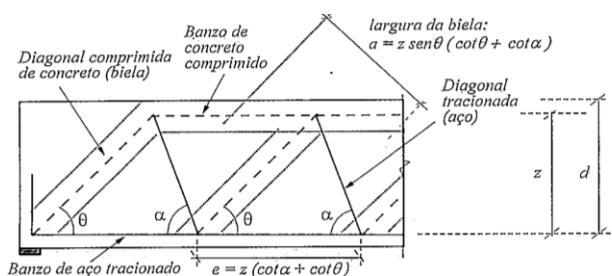


Figura 1 – Funcionamento de uma viga de concreto segundo a treliça de Morsch.

Fonte: Clímaco (2008, p. 243).

As expressões desenvolvidas por pesquisadores aplicadas aos códigos normativos para cálculo da resistência ao cisalhamento não levam em consideração todos os fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento. Podem surgir algumas variações que são por vezes contra a segurança ou tem caráter conservador. (FURLAN JUNIOR, 1995). Os critérios de cálculo normativos geralmente visam atingir um grau máximo de representatividade e de simplificação, para viabilizar o projeto, sendo normal e aceitável que determinadas discrepâncias em relação à modelos de cálculo mais refinados ocorram, mantida a segurança estrutural. Todavia, cada norma regulamentadora possui o seu grau de conservadorismo e simplificação inerente, tornando-as características e as vezes típicas da cultura de projeto empregada em cada país.

Requisitos e prescrições da NBR 6118: 2014

O item 17.4 da NBR 6118 define hipóteses básicas para dimensionamento de elementos estruturais sujeitos à força cortante no estado limite último. (ABNT, 2014).

Araújo (2014) ressalta que a NBR-6118 admite que a tensão de cisalhamento seja absorvida por mecanismos complementares aos da treliça, limitando-se a 60% do f_{ctd} , e, o restante deverá ser resistido por estribos. Os estribos podem ser inclinados entre 45° e 90°, sendo adotado normalmente o ângulo reto por facilidades construtivas. (FUSCO, 2008; FURLAN JUNIOR, 1995).

A resistência ao cisalhamento é considerada de forma usual a partir de duas parcelas: a contribuição da armadura transversal e a contribuição do concreto. A parcela

resistida pelo concreto (V_c) é determinada empiricamente, considerando igual à força que provoca a fissuração diagonal, e, a parcela resistida pelas armaduras (V_{sw}) é estimada com base nos modelos de treliça. A parcela V_c , em vigas com armaduras transversais, representa um fator de ajuste para quantificar a contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento. (FURLAN JUNIOR, 1995).

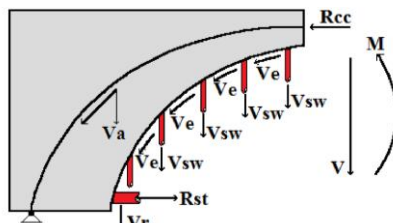


Figura 2 – Mecanismos internos resistentes da treliça.

Fonte: Camacho (2013, p. 8).

A aplicação de V_c pode ser atribuída à mecanismos internos da treliça:

- Esforço cortante absorvido pelo efeito de rebite da armadura de flexão (V_r);
- Esforço cortante absorvido pelo engrenamento ou atrito nas superfícies dos agregados do concreto ao longo da fissura (V_e);
- Parcela do cortante que se direciona diretamente para os apoios pelo arqueamento da força de compressão no concreto não fissurado (V_a);
- Tensão de tração residual transversal existente nas fissuras inclinadas. (CAMACHO, 2013).

A armadura mínima a NBR 6118 (ABNT, 2014) admite taxa em 20% da relação tensão de tração para a seção e resistência da armadura passiva.

a) Modelo de cálculo 01

O item 17.4.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta o modelo de cálculo considerando a Treliça Clássica de Morsch admitindo um ângulo fixo de 45° nas bielas comprimidas.

b) Modelo de cálculo 02

O item 17.4.2.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta o modelo de cálculo considerando a Treliça Generalizada de Morsch admitindo um ângulo variando entre 30° e 45° nas bielas comprimidas.

Requisitos e prescrições do Eurocode 2 (CEN, 2005)

O modelo proposto pelo Eurocode 2 (CEN, 2005), item 6.2 da NF EN 1992-1-1 admite também um modelo em analogia com uma treliça de banzos paralelos, proposto por Morsch.

O modelo ainda despreza totalmente a contribuição do concreto na resistência à tração no cisalhamento, sendo totalmente resistido pelos estribos. O modelo apresenta a inclinação das bielas comprimidas variando entre $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$, o que pode ser dito

como $22,8^\circ$ à 45° . Os estribos podem ser inclinados entre 45° e 90° , sendo adotado normalmente o ângulo reto por facilidades construtivas. (PAILLÉ, 2013; MOSLEY; BUNGEY; HULSE, 2007).

A armadura mínima empregada pelo Eurocode 2 (CEN, 2005) é a relação de 8% da razão entre a raiz quadrada da resistência do concreto pela resistência do aço aplicada a largura da seção.

Métodos

A comparação entre os critérios das normas foi realizada através do cálculo de uma viga. O elemento em estudo faz parte do bloco sul do setor oeste do complexo ZAC *Clichy Batignolles*, localizado na Cidade de Paris, França. Trata-se de um empreendimento imobiliário que irá construir um loteamento em terreno criado acima das linhas de trem existentes, localizadas nas proximidades do Rio Sena. A estrutura sobre a qual será construído o empreendimento é composta por um pavimento de Concreto Armado apoiado sobre vigas e paredes estruturais, também em Concreto Armado. Sobre este pavimento serão construídos edifícios de vários andares, onde todo o carregamento das edificações e dos acessos ao local serão aplicados sobre as vigas.

Descrição Geral do Projeto

A viga em estudo faz parte do setor sul do projeto ZAC *Clichy Batignolles*, delimitando pelos eixos 38 e 40 e pelos eixos J e E. A planta de forma do setor sul do projeto é apresentada conforme Figura 3.

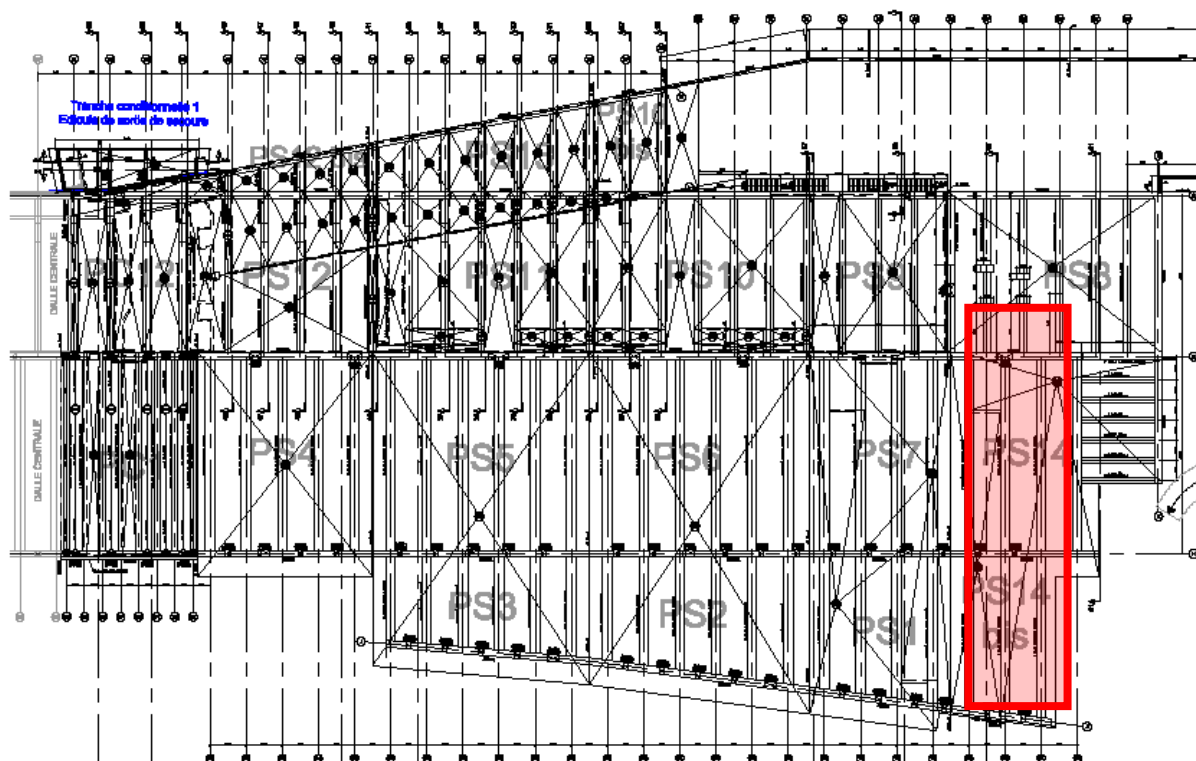


Figura 3 – Planta de forma do setor sul do projeto.

Fonte: ZAC Clichy (2014, p. 4).

A indicação em vermelho representa a área das vigas em estudo. O trecho será dimensionado seguindo como modelo o elemento de maior vão teórico (Figura 4).

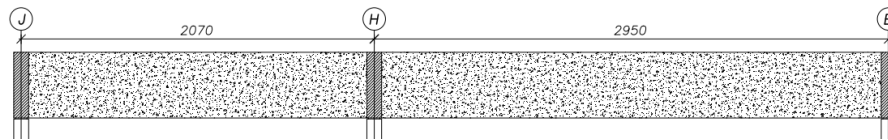


Figura 4 – Corte Longitudinal da viga (dimensões em centímetros).

Fonte: Elaborado pelo autor

O elemento estudado é representado na Figura 5. É uma viga de Concreto Armado contínua com 2 vãos. O elemento selecionado tem seção transversal de 305cm de altura total por 140cm de largura, atingindo vãos de 31,50m, espaçadas entre si a cada 5,40 metros na direção longitudinal. A viga conta com uma mesa colaborante de espessura total de 35cm, os quais 12cm correspondem às pré-lajes.

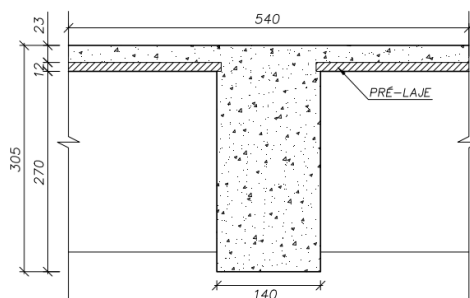


Figura 5 – Seção transversal para o dimensionamento (dimensões em centímetros).

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o dimensionamento ao cortante, a estrutura foi dividida trechos, apresentando as varrições de solicitações devido a cargas concentradas, representando as reações das edificações futuras, conforme o modelo de cargas apresentado na Figura 6.

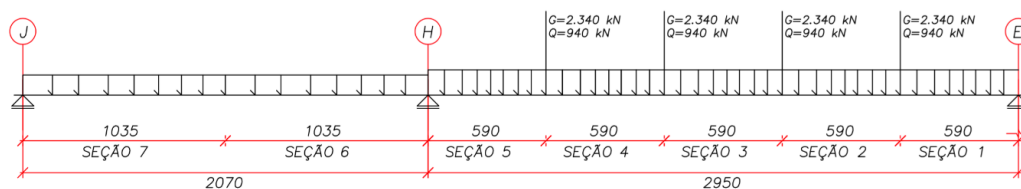


Figura 6 – Corte Longitudinal Modelo de Análise (dimensões em cm).

Fonte: Elaborado pelo autor

Ações Sobre a Viga

As hipóteses de carregamento, materiais e geometrias consideradas na execução deste trabalho são mantidas de acordo com as considerações do projeto original. A análise da estrutura foi realizada utilizando o software Graitec EFFEL v. 16.1 (2007).

Admitiu-se dentro da análise os coeficientes para ações e materiais empregados por cada normal, respectivamente.

A seguir são apresentados os diagramas resultantes do programa especificado para todos os casos acima descritos, bem como os valores para cálculo e dimensionamento extraídos dos mesmos.

Norma Brasileira

A Figura 7 apresenta o diagrama de cortante no ELU, para o dimensionamento da viga ao cisalhamento.

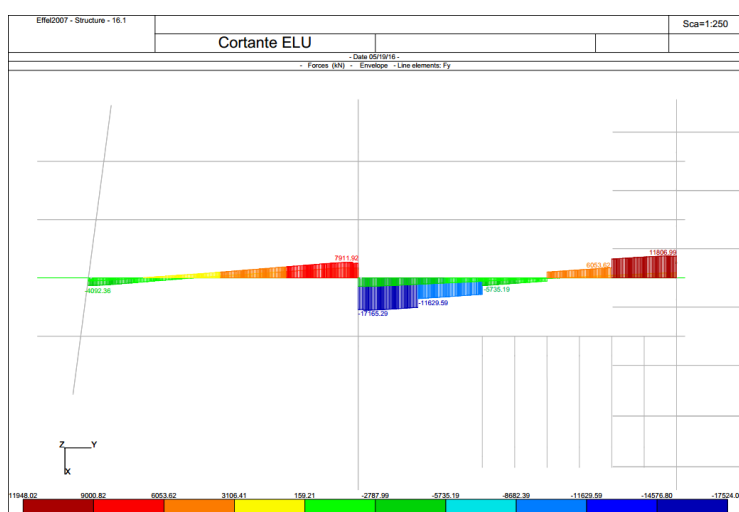


Figura 7 – Diagrama de Cortante (Fy – ELU).

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 1 apresenta os valores para cálculos e dimensionamento ao cisalhamento para cada uma das seções da viga previamente estipuladas.

Tabela 1 – Cortante (Fy) máximo por seção.

Trecho	Cortante (kN)
Seção 1	11.806,99
Seção 2	6.053,62
Seção 3	5.735,19
Seção 4	11.629,59
Seção 5	17.165,29
Seção 6	7.911,92
Seção 7	4.092,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Eurocode 2 (CEN, 2005)

A Figura 8 apresenta o diagrama de cortante no ELU, para o dimensionamento da viga ao cisalhamento.

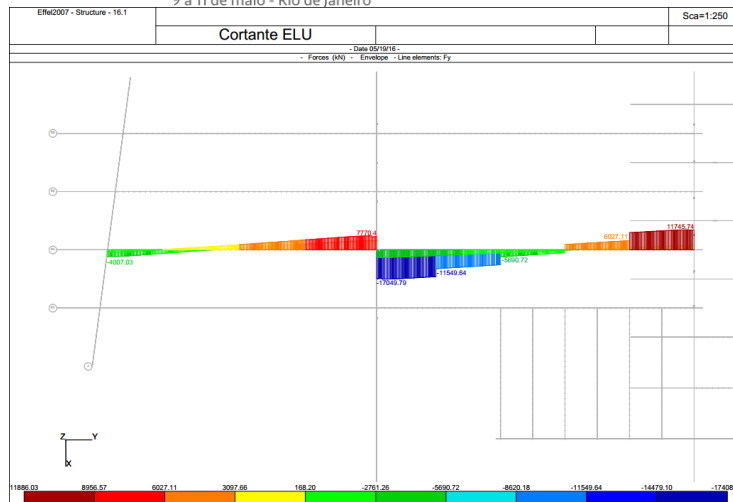


Figura 8 – Diagrama de Cortante (Fy – ELU).

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 2 apresenta os valores para cálculos e dimensionamento ao cisalhamento para cada uma das seções da viga previamente estipuladas.

Tabela 2 – Cortante máximo por seção.

Trecho	Cortante (kN)
Seção 1	11.745,74
Seção 2	6.027,11
Seção 3	5.690,72
Seção 4	11.549,64
Seção 5	17.049,79
Seção 6	7.770,40
Seção 7	4.007,03

Fonte: Elaborado pelo autor e gerado através do software Graitec EFFEL v. 16.1 (2014).

Dimensionamento

O dimensionamento foi realizado a partir de planilhas eletrônicas guiadas pelo *software* Microsoft Excel 2016, desenvolvidas seguindo os critérios apresentados por normas objeto de comparação deste estudo.

Os materiais definidos para dimensionamento do elemento estrutural foram mantidos conforme projeto original. Os materiais são os seguintes: Concreto C60, classe de exposição CAA-III e aço CA-50, ângulo da armadura transversal a 33,8°, características equivalentes ao Eurocode 2 (CEN, 2005).

Os materiais utilizados no dimensionamento se mantiveram os mesmos adotados pelo projetista original, considerado como concreto C60/75, na classe de exposição ambiental XC3/XC4, aço 500B e ângulo da armadura transversal a 33,8°.

Resultados

A Tabela 3 e Tabela 4 apresentadas abaixo apresentam o quadro comparativo do dimensionamento ao cisalhamento. Observa-se uma grande variação nos resultados.

Tabela 3 - Armadura transversal Mínima ($A_{sw,min}/S_w$)

NBR 6118	Eurocode 2 (CEN, 2005)	Δ
24,08 cm ² /m	17,35 cm ² /m	-27,94%

Tabela 4 – Armadura transversal (A_{sw}/S_w) por seção.

Trecho	NBR 6118	Eurocode 2 (CEN, 2005)	Δ
Seção 1	46,93 cm ² /m	70,02 cm ² /m	49,20%
Seção 2	24,54 cm ² /m*	35,93 cm ² /m	46,41%
Seção 3	24,54 cm ² /m*	33,92 cm ² /m	38,22%
Seção 4	45,68 cm ² /m	68,85 cm ² /m	50,72%
Seção 5	84,90 cm ² /m	101,63 cm ² /m	19,71%
Seção 6	24,54 cm ² /m*	46,32 cm ² /m	88,75%
Seção 7	24,54 cm ² /m*	23,89 cm ² /m	-2,65%

*Esforço cortante $V_{s,min}$. Considerado armadura mínima.

Conclusões

O elemento estrutural objeto deste estudo, faz parte de uma obra de elevada complexidade, e foi idealizado utilizando-se Eurocode 2 (CEN, 2005). O principal feito deste estudo foi à análise e dimensionamento deste elemento utilizando-se para tal a Norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), para posterior comparação com resultados obtidos. Ambas normas têm origem CEB/90, código modelo internacional, amplamente utilizado para projeto de estruturas em Concreto Armado. A aplicação deste elemento utilizando-se os métodos prescritos na Norma Brasileira possibilitaram uma análise mais profunda dos seus critérios, explorando ao máximo as suas diretrizes para buscar um projeto otimizado. Para uma comparação de resultados, o elemento foi redimensionado utilizando-se também o Eurocode 2 (CEN, 2005). Assim, foi possível obter um entendimento mais profundo, e, fazer uma análise de procedimentos e conceitos aplicados.

Para o dimensionamento ao cisalhamento, Eurocode 2 (CEN, 2005) se mostrou mais conservador, pois, divergindo do CEB, a Norma considera que a armadura seja o único mecanismo de resistência dos esforços cortantes. A Norma Brasileira, seguindo a linha do código que lhe serviu de modelo, considera uma parcela da resistência por mecanismos complementares aos da treliça de Ritter e Morsch, chegando a resultados mais econômicos, uma vez que a armadura deve absorver somente uma parcela dos esforços cortantes. Devido a elevada seção transversal do elemento estrutural estudado, a Eurocode 2 (CEN, 2005) apresentou um resultado bem superior ao obtido pela Norma



Brasileira, que se valeu da grande área de concreto para diminuir os esforços a serem resistidos pelo aço.

Referências

- ARAÚJO, J. M. Curso de concreto armado. 4.ed. Rio Grande: Dunas, 2014. v.1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- CALGARO, J. A. The Eurocodes Eurocodes, history and present. Itália: Varese, 2006. Disponível em: <<http://elsa.jrc.ec.europa.eu/eurocodes2006/pdf/pres090.pdf>> Acesso em: 22 de Out. 2017.
- CAMACHO, S. J. Ilha Solteira. UNESP – Universidade Estadual Paulista. Estudo do Esforço cortante. 2013. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/jeffcam_estudo_do-esforco_-cortante.pdf>. Acesso em: 14 Dez. 2017.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. D. Cálculo de Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118:2014. 4ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. v. 1.
- CLÍMACO, J. C. T. D. S. Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2ª. ed. Brasília: UnB, 2008. v. 1.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). NF EN 1992-1-1: Eurocode 2 – calcul des structures en béton – partie 1-1: règles générales et règles pour les bâtiments. Ixelles, 2005.
- FUSCO, P. B. Estruturas de concreto: Solicitações Tangenciais. 1ª. ed. São Paulo: PINI, 2008. v.1.
- FURLAN JUNIOR, S. Vigas de concreto armado com taxas reduzidas de armadura de cisalhamento: influência do emprego de fibras curtas e protensão. São Carlos: Tese (Doutorado), Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995. Disponível em: <http://site.abcic.org.br/pdf/PCT06_FurlanJr.pdf>. Acesso em: 12 Dez. 2017.
- MONTOYA, P. J.; MESEGUER, Á. G.; CABRÉ, F. M. Hormigón Armado: Baseada en la EHE ajustada al código modelo y al Eurocódigo. 14ª. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2002. v.1.
- MOSLEY, B.; BUNGEY, J.; HULSE, R. Reinforced concrete design to Eurocode 2 (CEN, 2005). New York: Palgrave Macmillan, 2007. v.1.
- PAILLÉ, J.-M. Calcul des Structures en Béton: Guide d'application. 2ª. ed. Paris: EYROLLES; AFNOR, 2013. v.1.
- SANTOS, L. M. Cálculo de Concreto Armado. 2.ed. São Paulo: LMS Ltda, 1983. V.1.
- ZAC Clichy. Batignolles Secteur Ouest: Lot no 1: dale sud – note des poutres entre files E et J. França, 2014.