

Sobre a interação entre lajes e núcleo estrutural sujeito a empenamento em edifícios altos de concreto armado

WAGNER QUEIROZ SILVA – D.Sc, PROFESSOR

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – DEC/FT/UFAM

RESUMO

EM PROJETOS DE EDIFÍCIOS ALTOS É COMUM O USO DE NÚCLEOS RÍGIDOS PARA COMBATER ESFORÇOS HORIZONTAIS E REDUZIR A FLEXIBILIDADE DA EDIFICAÇÃO. EXISTEM DIFERENTES MANEIRAS DE SE MODELAR ESSE TIPO DE ESTRUTURA E MUITOS MODELOS USUAIS NÃO CONSIDERAM OS EFEITOS DA INTERAÇÃO ENTRE O NÚCLEO E A ESTRUTURA DO PAVIMENTO. NESTE TRABALHO REALIZA-SE UM ESTUDO COM DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO COM NÚCLEOS RÍGIDOS, BUSCANDO IDENTIFICAR A INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO ENTRE AS LAJES E AS PAREDES DO NÚCLEO NO FUNCIONAMENTO MECÂNICO DA EDIFICAÇÃO. APÓS UMA BREVE REVISÃO DE MODE-

LOS NUMÉRICOS EXISTENTES PARA MODELAGEM DE NÚCLEO RÍGIDO, AVALIA-SE UM EXEMPLO COM APLICAÇÃO DESTES MODELOS, COMPARANDO RESULTADOS DE DESLOCAMENTOS DA ESTRUTURA AO LONGO DE SUA ALTURA. BUSCA-SE AVALIAR OS EFEITOS DO EMPENAMENTO DAS PAREDES DO NÚCLEO SUJEITO À TORÇÃO NA ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS. CONSTATA-SE QUE O EMPENAMENTO DO NÚCLEO PODE PRODUZIR DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA LAJE FORA DE SEU PLANO, E QUE APENAS MODELOS QUE CONSIDERAM OS EFEITOS DA FLEXO-TORÇÃO SÃO CAPAZES DE DETECTAR TAL FENÔMENO. ESTA CONSIDERAÇÃO É DE GRANDE IMPORTÂNCIA EM CASO DE TORÇÃO NOS EDIFÍCIOS.

Palavras-chave: edifícios altos, núcleo estrutural, modelagem estrutural, empenamento.

I. INTRODUÇÃO

Em estruturas de edifícios altos de concreto armado é comum o uso de núcleos rígidos associados a pórticos para atribuir maior rigidez às ações horizontais, reduzindo assim os efeitos devidos a essas ações. Nesses casos, o núcleo rígido constitui parte da estrutura monolítica do edifício em conjunto com as lajes, vigas e pilares.

Nos modelos de análise convencionais, a estrutura é dividida de tal forma que as peças estruturais são analisadas em separado, a fim de facilitar o dimensionamento. Distinguem-se lajes e vigas como elementos que

constituem o pavimento, repassando em seguida as reações destas ao subsistema vertical, formado por pórticos e paredes estruturais. Muitos admitem que a laje funcione como um diafragma infinitamente rígido no seu plano, compatibilizando os deslocamentos horizontais, o que simplifica o modelo. Essas aproximações, no entanto, não consideram as reais interações entre as peças que constituem a estrutura. No caso dos edifícios de concreto armado, a ligação monolítica entre peças faz com que haja uma transmissão de esforços que muitas vezes pode não estar sendo considerada da maneira mais adequada.

Com a evolução das tecnologias, algumas simplificações perderam sentido e até mesmo aplicação. As paredes dos núcleos rígidos e as lajes, atualmente, são executadas com espessuras menores do que no passado e para edifícios com alturas cada vez maiores, isto é, resultando em estruturas mais esbeltas. Os avanços tecnológicos e ferramentas computacionais permitem hoje análises mais elaboradas de forma a considerar mais adequadamente o comportamento mecânico das estruturas.

No presente trabalho é realizado um estudo numérico de edifícios de concreto armado com núcleo rígido

buscando avaliar, para diferentes modelos, os efeitos da interação entre as lajes e as paredes do núcleo quando este sofre empenamento.

2. MODELOS PARA EDIFÍCIOS COM NÚCLEO RÍGIDO

2.1 Os primeiros modelos

A metodologia simplificada conhecida como técnica do meio contínuo teve grande destaque no passado. Consiste basicamente em substituir elementos horizontais (lajes e vigas), que conectam os diversos painéis rígidos, por meios contínuos de rigidez equivalente, distribuídos ao longo da altura do edifício. Com isso, é possível equacionar esforços e deslocamentos da estrutura em função da variável altura, transformando a análise do edifício em um problema unidirecional. A grande vantagem é a redução do número de parâmetros, porém, o método é restrito a estruturas que apresentem características elásticas e geométricas constantes ao longo da altura. O uso de tal processo era impulsionado em função dos limitados recursos computacionais da época, estando atualmente em desuso.

Outros processos de análise de edifícios são a análise matricial e o método dos elementos finitos reticulados. Estes métodos passaram a ser mais utilizados com os avanços dos computadores, que permitem o processamento da estrutura dividida em vários elementos discretos. Neste sentido, um modelo mais simples é o modelo bidimensional no qual os painéis de contraventamento, incluindo o núcleo, são ligados através da laje, que atua como diafragma rígido. O modelo plano apresenta limitações, uma vez que não é possível

analisar efeitos tridimensionais como a torção do edifício. Alguns projetistas de estruturas procuram evitar distribuições assimétricas de painéis e núcleos rígidos em planta, a fim de reduzir os efeitos de torção e justificar, assim, a análise com modelo plano.

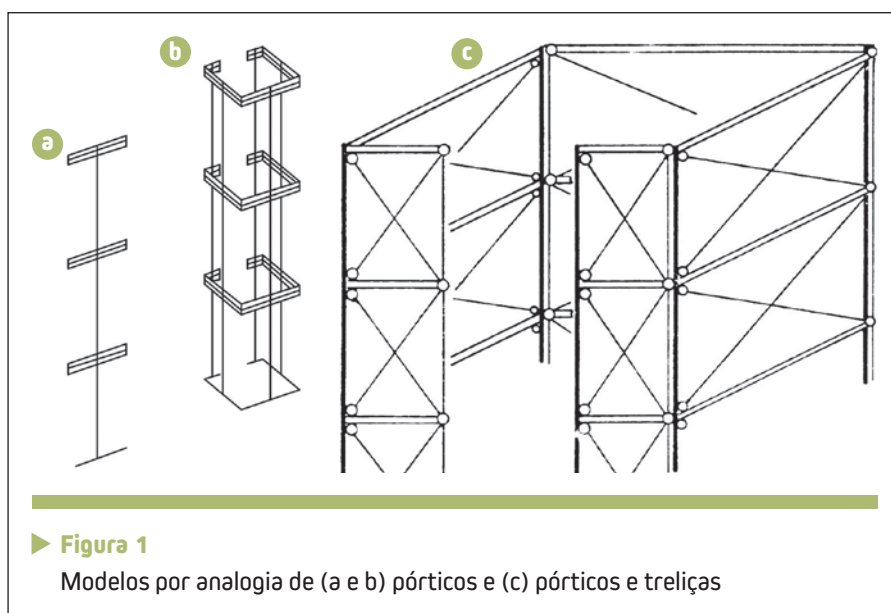
Modelos discretos em pórticos tridimensionais proporcionam maior representatividade da estrutura global, já que se consideram a distribuição espacial entre os diversos painéis e, consequentemente, tem-se melhor representação da transmissão de esforços entre as peças (CORREA, 1991). O modelo de pórtico tridimensional é passível de aplicação, porém a análise do núcleo poderá ser comprometida se a hipótese de manutenção de seções planas for admitida, pois a mesma não se aplica a estes elementos quando sujeitos à torção. Neste caso, o comportamento mecânico deve levar em conta a teoria de flexo-torção.

Uma alternativa consiste em dividir o núcleo em pilares-paredes isolados, permitindo a aplicação do modelo de pórtico 3D e tornando o proces-

so mais simples. Esse processo costuma ser utilizado em escritórios de cálculo estrutural devido a sua praticidade. Porém, esse tipo de simplificação também não deverá ser a mais representativa, pois não são consideradas as forças de cisalhamento que surgem na interface de encontro das paredes, fazendo com que estes elementos isolados não possuam a mesma rigidez que o núcleo, principalmente em relação à torção.

2.2 Modelos por analogia de pórtico e treliça

Um modelo alternativo para análise de paredes estruturais consiste em substituir as paredes planas por um conjunto de vigas horizontais rígidas com suas extremidades em balanço e engastadas em colunas verticais centrais, cujas propriedades geométricas são semelhantes a da parede que esta substitui. No caso de estruturas 3D, o núcleo é substituído por uma espécie de pórtico equivalente, conforme a Figura 1(b).



► **Figura 1**
Modelos por analogia de (a e b) pórticos e (c) pórticos e treliças

A proposta se baseia na ideia de que o núcleo resistente comporta-se como associação de estruturas de paredes delgadas e as vigas horizontais estão sempre dispostas aos níveis dos diafragmas rígidos. O modelo considera a rigidez à força normal, à flexão, à torção e à força cortante, através de trechos de pilares que substituem o sistema contínuo de paredes planas. Permite, portanto a aplicação de técnicas matriciais para análise dos núcleos fazendo uma analogia a um sistema de barras.

Outro modelo nessa linha considera elementos de barras diagonais contraventando uma treliça tridimensional equivalente ao núcleo rígido, a fim de considerar de maneira simplificada a rigidez axial das paredes, conforme a Figura 1(c).

2.3 Modelos mais recentes

O método dos elementos finitos permite uma variedade muito grande de aplicações, principalmente pela existência de diversos tipos de elementos finitos disponíveis na bibliografia. Uma possibilidade é a modelagem dos pilares-paredes com malhas de barras, adequando as propriedades de rigidez destas barras para simular o comportamento das paredes. É preciso, no entanto, avaliar com cautela os efeitos da flexo-torção (MEDEIROS, 2014). No caso dos núcleos estruturais, outra possibilidade é o uso de elementos de casca, o que permite a modelagem das paredes considerando suas continuidades e também as rigidezes à flexão e às forças axiais (PEREIRA, 2000).

Dentre as vantagens de se utilizar a modelagem em elementos de cas-

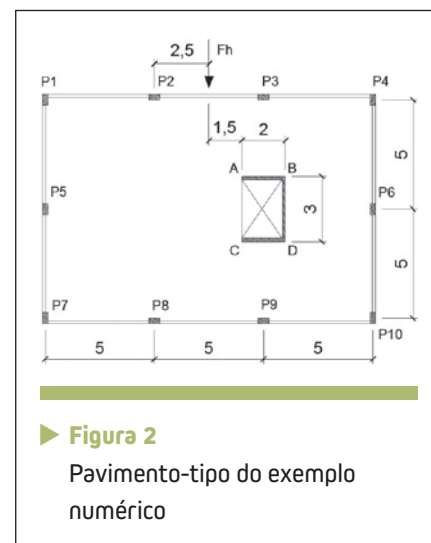
ca, cita-se a maior representatividade do núcleo, uma vez que tendem a se aproximar do meio contínuo real. Não há necessidade de configurar as hipóteses cinemáticas relacionadas à flexo-torção, pois os graus de liberdade da casca são suficientes para captar esse tipo de fenômeno, além das instabilidades das paredes de pequena espessura.

A desvantagem é que ao utilizar elementos de casca, o modelo envolve um número maior de graus de liberdade na medida em que toda a superfície das paredes é discretizada. Quanto menor for o tamanho do elemento finito adotado, maior será a quantidade de elementos necessária para a malha discreta, o que aumenta o número de variáveis envolvidas.

Existem também outros tipos de elementos finitos especiais para núcleo, encontrados na bibliografia. Geralmente, a formulação é baseada na teoria de flexo-torção na tentativa de reduzir a quantidade de graus de liberdade, sem perda de representatividade do modelo (SILVA, 2014). Porém, observa-se que os softwares comerciais ainda não oferecem este tipo de elemento e, por este motivo, não será tratado no presente trabalho.

2.4 Sobre o acoplamento do núcleo com a laje

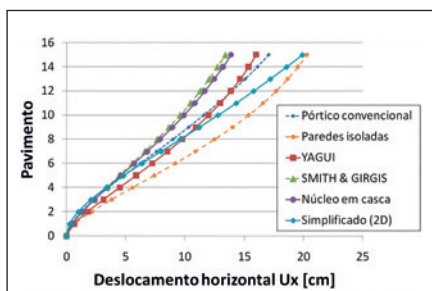
Alguns dos modelos de cálculo negligenciam a relação entre todos os componentes da estrutura de um edifício, a fim de facilitar o seu dimensionamento. Em estruturas usuais, esse tipo de simplificação pode ser aceitável e, às vezes, até conduzir a resultados satisfatórios. Porém, é importante atentar que, em alguns casos,



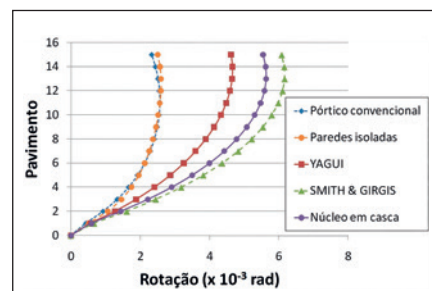
tais simplificações podem não ser as mais adequadas, principalmente em projetos de edifícios esbeltos onde o comportamento global é altamente dependente das interações entre os elementos estruturais.

Trabalhos como o de (SOUZA JR, 2001) e (SILVA, 2014) exemplificam a influência da modelagem de núcleos na análise de edifícios. Estes autores recomendam que não sejam utilizados modelos que não consideram a teoria da flexo-torção na análise de edifícios que possam apresentar rotações significativas, uma vez que esses modelos não conseguem representar adequadamente o empenamento dos núcleos.

Existem modelos onde a interação entre núcleos rígidos e lajes de edifícios são analisadas por elementos finitos de barra especial, com as considerações de seções generalizadas e as lajes geralmente simuladas com elementos de placa. Esses trabalhos permitem a verificação da influência das interações entre peças no comportamento global de edifícios, porém a maioria dos softwares comerciais ainda não dispõe desses recursos,



► **Figura 3**
Resultados de deslocamentos horizontais



► **Figura 4**
Resultados de rotações em relação a vertical

motivo pelo qual não serão abordados no presente trabalho.

A seguir apresenta-se o exemplo numérico avaliado por diferentes modelos para se verificar a influência da interação entre as lajes e as paredes do núcleo.

3. EXEMPLO NUMÉRICO: EDIFÍCIO COM NÚCLEO SUJEITO À TORÇÃO

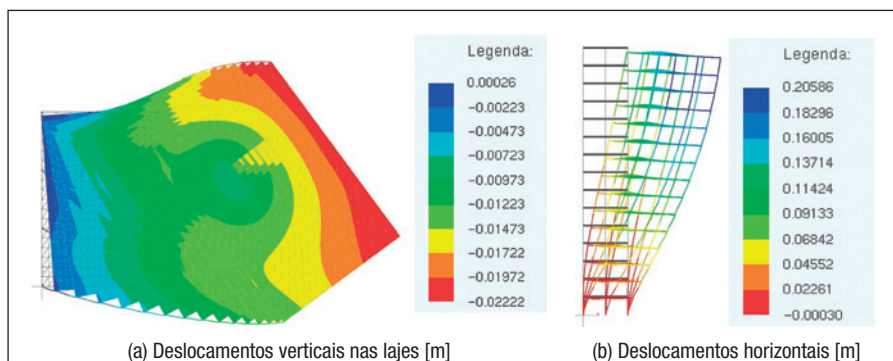
O exemplo consiste de uma estrutura hipotética de edifício com 15 pavimentos, pé-direito de 4 metros e planta do pavimento tipo conforme a Figura 2. As vigas têm seção 20 cm x 60 cm, e os pilares de 25 cm x 50 cm estão localizados no perímetro da planta. As lajes e as paredes do núcleo possuem espessura de 15 cm. O módulo de elasticidade é de 20 GPa e o coeficiente de Poisson 0,25. Consideram-se forças horizontais $F_h = 100$ kN aplicadas em todos os pavimentos. Com isso, pretende-se avaliar os efeitos globais de flexão e torção no edifício. Foi utilizado o software SAP 2000 e foram consideradas neste trabalho análises estáticas lineares e as fundações rígidas.

Foram considerados cinco modelos diferentes, variando a maneira

como o núcleo é modelado. No primeiro modelo de pórtico convencional, o núcleo é simulado como elemento de barra simples 3D; o segundo modelo considera paredes isoladas, sendo o núcleo dividido em um conjunto de três paredes, sem considerar a interação entre as mesmas; o terceiro modelo adotado é o de pórtico denominado Yagui, com vigas horizontais rígidas e uma barra vertical central; o quarto modelo é baseado na proposta de analogia de treliça com diagonais de contraventamento de Smith & Girgis (1984 apud SILVA, 2014) simulando as paredes; no último modelo o núcleo é discretizado em elementos finitos de casca. Para todos os casos, as lajes foram discretizadas em elementos de casca e os pilares e vigas com elementos de barra convencional. Observa-se que cada modelo trata a ligação entre laje e paredes do núcleo de maneira totalmente distinta. A intenção é analisar a influência de sua modelagem e também da vinculação deste elemento com o pavimento no comportamento global do edifício.

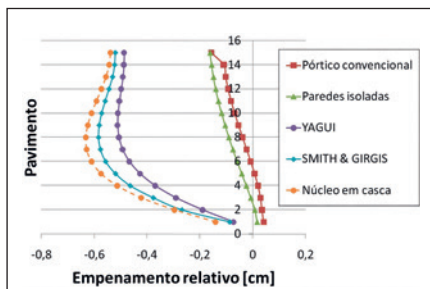
Os resultados de deslocamento horizontal e de rotação em torno do eixo vertical para o ponto C de cada pavimento são apresentados nas Figuras 3 e 4. Observa-se que o modelo de pórtico convencional e o de paredes isoladas apresentaram maior flexibilidade à translação e menores rotações. Para fins comparativos, o deslocamento foi também analisado com modelo simplificado 2D. No caso plano, modelam-se o núcleo e os pórticos transversais, sendo estes vinculados com barras horizontais fictícias de rigidez infinita (diafragmas rígidos).

Essa flexibilidade se deve ao fato desses modelos não considerarem a rigidez do núcleo. O modelo



► **Figura 5**
Aspecto amplificado da deformada do edifício





► **Figura 6**
Empennamento relativo no núcleo

de analogia de pórtico-treliça foi o que mais se aproximou do modelo discretizado em cascas, o que demonstra sua eficiência.

A Figura 5 exibe configurações deformadas da estrutura vista em planta e lateralmente para o modelo com analogia de pórtico-treliça. Apresentam-se os deslocamentos (verticais e horizontais) amplificados para auxiliar na análise. Observa-se que o núcleo enrijeceu a estrutura, ocasionando um movimento de giro de corpo rígido nos pavimentos em torno de um eixo vertical. Caso a rigidez à flexo-torção do núcleo não seja adequadamente considerada, os resultados de deslocamentos

poderão ser equivocados, comprometendo assim a análise em serviço da movimentação lateral do edifício. Erros no cálculo da rigidez podem também comprometer a correta distribuição de esforços.

Foi analisado também o empennamento relativo das paredes do núcleo (entre os pontos A e C) de cada pavimento. Os resultados apresentados na Figura 6 demonstram haver movimentação na direção vertical (empennamento). Somente os modelos que consideram a teoria de flexo-torção são capazes de detectar tal deslocamento. Os modelos simplificados apresentam apenas efeitos de simples translação dos pavimentos.

Os modelos usuais não consideram o fenômeno do empennamento. Para edificações esbeltas solicitadas a flexo-torção ou, quando os esforços atuantes no núcleo têm maior magnitude, esses efeitos podem alcançar níveis que interferem no comportamento global do edifício, comprometendo a análise dos deslocamentos devido às ações horizontais. A Figura 7 ilustra de maneira amplificada os efeitos do empe-

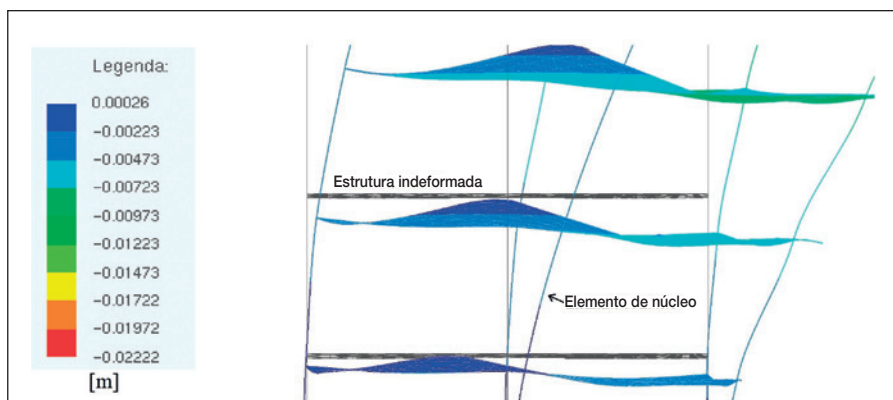
namento na estrutura do pavimento.

A influência da rigidez das lajes no comportamento do edifício também foi analisada considerando diferentes espessuras para as lajes. Os resultados de deslocamentos horizontais do núcleo são apresentados na Figura 8, na qual se observa que, quanto mais espessa for a laje, mais rígida se torna a estrutura do edifício.

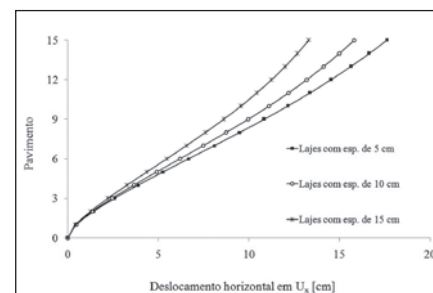
4. CONCLUSÕES

Dentre os modelos mecânicos de núcleo aqui considerados, alguns foram capazes de simular o comportamento de flexo-torção, sendo por esse motivo mais representativo. Os modelos simplificados, especialmente o de pórtico convencional e de paredes isoladas, não oferecem resultados suficientemente seguros. As limitações devido a não consideração dos efeitos da flexo-torção e das reais interações entre a laje e as paredes do núcleo são os motivos para tal imprecisão.

Modelos mais simplificados se mostram mais conservadores. De maneira geral, o exemplo demonstrou que a facilidade de aplicação dos modelos é inversamente proporcional a qualidade dos resultados obtidos.



► **Figura 7**
Aspecto amplificado da deformação das lajes com a torção do edifício




► **Figura 8**
Deslocamentos para diferentes espessuras de laje

Dentre os modelos com analogia de barras, o modelo denominado por Smith & Girgis (1984 *apud* SILVA, 2014) se mostrou mais rígido do que o modelo de Yagui (1978 *apud* SILVA, 2014), além de valores mais próximos ao modelo de casca.

Em relação à interação entre a laje e as paredes do núcleo, fica clara a influência da rigidez no em-

penamento da seção transversal do núcleo no comportamento global do edifício. Essa influência será maior para o caso de edifícios esbeltos. A região de vinculação das paredes e das lajes pode demandar maior consumo de aço para as armaduras por conta da concentração de tensões.

Acredita-se que alguns fatores como a fissuração do concreto e as

altas taxas de armaduras nas regiões de ligação podem contribuir para uma redução dos efeitos da interação entre o núcleo e o pavimento, porém muitas vezes, sem o devido controle por parte do projetista. É preciso ter ciência de que o comportamento global do edifício depende das ligações entre as diversas peças estruturais. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CORREA, M. R. S. Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP. São Carlos/SP, 1991.
- [2] MEDEIROS, S.R.P. Modelos estruturais de núcleos de edifícios - barra vs. casca. TQS News, São Paulo, n. 39, p. 29-35, ago. 2014.
- [3] PEREIRA, A.C. de O. Estudo da influência da modelagem estrutural do núcleo nos painéis de contraventamento de edifícios altos. Dissertação (Mestrado), EESC-USP, São Carlos, 2000.
- [4] SILVA, W. Q. Sobre análise não linear geométrica de edifícios considerando o empenamento dos núcleos estruturais e a interação solo-estrutura. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP. São Carlos/SP, 2014.
- [5] SOUZA JR, E. Análise da interação entre núcleos estruturais e lajes em edifícios altos. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP. São Carlos/SP, 2001.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre *Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras*, a Prática Recomendada especifica os requisitos técnicos das macrofibras poliméricas para uso em concreto estrutural.

A Prática Recomendada abrange macrofibras para uso em todos os tipos de concreto, incluindo concreto projetado, para pavimentos, pré-moldados, moldados no local e concretos de reparo.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-29-9

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 37

Acabamento: digital

Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

MACROFIBRAS POLIMÉRICAS PARA CONCRETO
DESTINADO A APLICAÇÕES ESTRUTURAIS



COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
Representante CTA: Sofia Maria Carrato Dinis

Patrocínio

