

ANÁLISE DA ABORDAGEM INDIRETA NA PREVENÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO

A. P. SEABRA¹, F. N. ARROYO², M. M. dos SANTOS³, A. L. CHRISTOFORO⁴, A. M. P. G. DIAS⁵, F. A. R. LAHR⁶
Faculdades Integradas de Cacoal^{1,3}, Universidade Federal de São Carlos^{2,4}, Universidade de Coimbra⁵,

Universidade de São Paulo⁶

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8226-172X>
lipe.arroyo@gmail.com

Submetido em 21/05/2020 - Aceito em 04/11/2020

DOI: 10.15628/holos.2021.10190

RESUMO

Ainda que o Brasil não sofra com catástrofes naturais e sejam incomuns episódios de terrorismo às edificações, a crescente indústria da construção civil demanda práticas cada vez mais audaciosas que divergem do caminho da segurança e da integridade estrutural. Este fato tem gerado cada vez mais preocupação no meio técnico, uma vez que existem profissionais, por desconhecimento do colapso progressivo, negligencie a sua possibilidade e não anteveja os possíveis cenários de dano. Não obstante, a normas no cenário nacional carecem de explicações e de práticas de prevenção a este fenômeno. Isto posto, o

presente trabalho tem função de analisar os métodos de aplicação genérica, podendo concluir qual o melhor método a ser utilizado. Um edifício didático foi modelado com a intenção de aplicar três diferentes métodos, chegando-se a conclusão que a metodologia adotada pela norma UFC 04-023-03 de 2009, além de resistir às solicitações típicas do fenômeno de colapso considerado, apresentou acréscimo de material e financeiro razoáveis, plausível de ser empregado na realidade em que vivemos.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto armado, dimensionamento, método indireto, *Tie Force*.

INDIRECT APPROACH ANALYSIS THE PROGRESSIVE COLLAPSE PREVENTION

ABSTRACT

Although Brazil does not suffer from natural disasters and there are unusual episodes of terrorism in buildings, the growing construction industry demands increasingly audacious practices that diverge from the path of security and structural integrity. This fact has generated more and more concern in the technical environment, since there are professionals who, due to the lack of knowledge about the progressive collapse, neglect its possibility and do not foresee possible damage scenarios. Nevertheless, norms in the national scenario lack explanations and preventive practices to this phenomenon. That said, the

present work has the function of analyzing the methods of generic application, being able to conclude which is the best method to be used. A didactic building was modeled with the intention of applying three different methods, reaching the conclusion that the methodology adopted by the UFC 04-023-03 standard of 2009, in addition to resisting the typical requests of the considered collapse phenomenon, presented an increase in material and reasonable financial, plausible to be employed in the reality in which we live.

KEYWORDS: Reinforced concrete, dimensioning, indirect approach, *Tie Force*.



1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com os avanços feitos nas diversas áreas que abrangem a engenharia, permite-se construir edifícios cada vez mais altos, com estruturas mais esbeltas e processos cada vez mais simplificados, enfatizando principalmente a produtividade. Em contrapartida, é crescente o número de estruturas que carecem de integridade e robustez, ficando expostas ao risco do colapso progressivo (ELLINGWOOD *et al.*, 2007).

De acordo com a norma ASCE 7 (2005), na seção C1.4, “colapso progressivo é definido como a propagação de uma falha local inicial de um elemento a outro, resultando no colapso de uma estrutura inteira ou de uma parte desproporcionalmente grande dela”. A partir desta definição, vimos que se trata de um evento que implica em sérias perdas financeiras e fatalmente em perda de vidas, dada as proporções dos acontecimentos. Além disso, devido ao lamentável incremento na ocorrência de eventos de colapsos progressivos causados por ação terrorista, várias agências governamentais americanas com grandes programas de construção desenvolveram seus próprios guias e requisitos de projeto para fornecer resistência ao colapso progressivo, conforme Ellingwood *et al.* (2007), como o *General Services Administration* (2003) e *Unified Facilities Criteria* (2009 e 2018).

No cenário mundial, os principais guias que tratam do Colapso Progressivo através do método direto ou indireto em seu escopo são: ASCE/SEI 7 (2005), UFC 04-023-03 (2009), UFC 4-010-01 (2018), Eurocode 1 (1991), BS 5628 (1992), BS 8110-1 (1997), dentre outras. No Brasil, o tema do colapso progressivo é abordado na NBR 6118/2014, embora a mesma não trate especificamente de critérios e metodologias de cálculo para o dimensionamento frente ao risco em questão, dizendo apenas para buscar alternativas que evite esse colapso (FELIPE; HAACH, 2019).

Segundo Laranjeiras (2011), o método indireto é de fácil aplicabilidade e pode ser utilizado em qualquer tipo de estrutura, pois não demanda análise estrutural. Assim como todos os métodos, este visa aumentar a robustez e a integridade da estrutura, utilizando “amarrações” por meio de barras de aço contínuas de um canto ao outro da estrutura. É tomada como um método de boas práticas, e a observância do sistema estrutural, layout, disposição dos pilares, detalhamento das ligações são fundamentais para a integridade da estrutura. As medidas básicas que são tomadas para este método indireto são de baixo custo comparado ao método direto, independente das causas do dano (MELO, 2015).

Dessa forma, este trabalho visa adotar o método indireto em uma estrutura escolhida, inserida num suposto contexto em que se recomendam métodos de prevenção ao colapso progressivo do tipo indireto apenas, observando em especial três abordagens: baseadas na norma britânica BS 8110-1 (1997), UFC 04-023-03 (2009) e pelo método proposto por Li *et al.* (2011). Foi analisada a eficiência do método em prover a resistência necessária e o seu impacto no consumo de aço, visto que esse método aumenta a densidade de armadura dos elementos estruturais para evitar o colapso progressivo.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica serão abordados apenas os métodos indiretos utilizados nesta pesquisa, sendo estes: *Tie Force* segundo BS 8110-1 (1997), *Tie Force* segundo UFC 04-023-03 (2009) e *Tie Force* melhorado proposto por Li *et al.* (2011). Alguns desses métodos também são exemplificados por Felipe e Haach (2019).

A norma ASCE/SEI 7 (2005) recomenda para este método (indireto) um sistema de amarrações integradas, que conecte toda a estrutura principal. Esta abordagem é utilizada pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) no UFC 04-23-03 (2009), o qual utiliza o sistema denominado *Tie force* (TF) para melhorar a continuidade, ductilidade e redundância, permitindo a redistribuição dos esforços, especificando forças de tração mínimas para unir a estrutura.

A Figura 1, adaptada do UFC 04-23-03 (2009), mostra os tipos de amarrações segundo sua localização: amarrações periféricas, amarrações verticais, amarrações longitudinais e transversais.

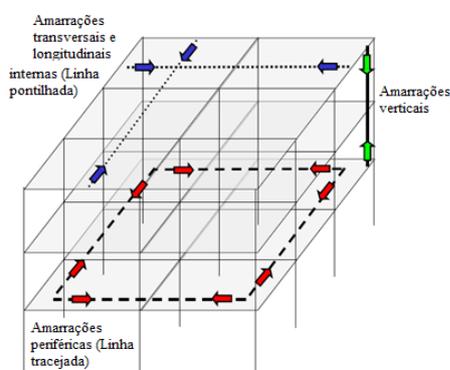


Figura 1: Tipos de amarrações (Adaptado de UFC 04-23-03 (2009)).

2.1 *Tie Force* segundo BS 8110-1 (1997)

Na seção 3.1.4.3 da norma diz que nas estruturas em que todos os elementos de transmissão de carga são de concreto, as amarrações devem ser utilizadas para aumentar sua integridade. As amarrações são classificadas em periféricas, longitudinais, transversais e verticais, da maneira ilustrada na Figura 1, espaçadas não mais do que 150% do comprimento do maior vão na direção considerada, espalhadas pela laje e coberturas, estendendo por todo o comprimento da estrutura, proporcionando a devida ancoragem nas amarrações periféricas. A norma diz possível o emprego destas amarrações agrupadas nas vigas, mas sem maiores considerações sobre.

A norma britânica prevê a possibilidade de utilizar armaduras dimensionadas para outros propósitos na composição necessária para atender a força de amarração requerida. Para cada direção as amarrações devem resistir a uma tensão igual à maior das obtidas como resultado das expressões abaixo:

$$N \geq \begin{cases} \frac{(G_k + Q_k) \cdot L_r \cdot L_r \cdot F_t}{7,50} \\ 1,00 \cdot F_t \end{cases} \quad (1)$$

Convém destacar que " G_k " e " Q_k " são a soma das cargas permanentes e acidentais em kN/m^2 , bem como " L_r " é o maior vão do pavimento na direção considerada e " F_t " é a força básica igual à menor dos resultados obtidos a partir das expressões a seguir, visto que " n_0 " o número de pavimentos da estrutura.

$$F_t \leq \begin{cases} 60 \text{ kN/m} \\ 4 \cdot n_0 + 20 \text{ kN/m} \end{cases} \quad (2)$$

De acordo com Li *et al.* (2011), a força básica de 60 kN/m é alcançada através da suposição do modo de falha de membros horizontais a partir da perda de um pilar de apoio (Figura 2), por exemplo, chamada ação catenária, em que o elemento horizontal é submetido a uma flecha exagerada, fazendo-o se comportar como um cabo, sustentando o carregamento por meio de força de tração (COSTA, 2008).

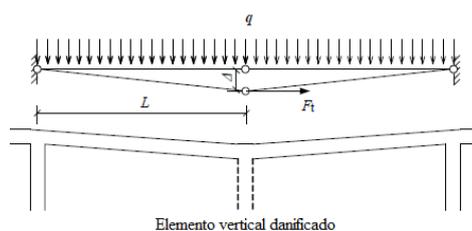


Figura 2: Ação catenária (Adaptado de Costa (2008)).

Li *et al.* (2011), através de ensaio simulando o efeito da ação catenária em uma estrutura plana com 3 lances de pilares e 4 vãos, retirando o pilar de sustentação central e medindo os deslocamentos, obteve o seu comportamento resistente. O resultado obtido (Figura 3) demonstra a ação catenária, com as vigas sendo solicitadas a esforço axial crescente a partir de uma deformação acentuada e o surgimento de rótulas plásticas, perdendo a capacidade de resistir à flexão.

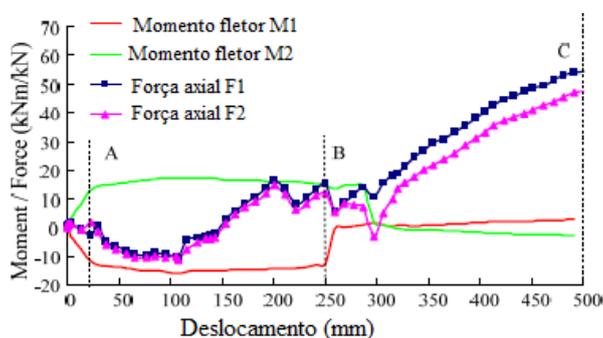


Figura 3: Ensaio perda elemento vertical (Adaptado de Li *et al.* (2011)).

Já a segunda força básica ($4 \cdot n_0 + 20 \text{ kN/m}$), ainda segundo Li *et al.* (2011), consiste em um valor empírico do ponto de vista estrutural e subestima o efeito do colapso progressivo em estruturas baixas¹.

2.2 Tie Force segundo UFC 04-023-03 (2009)

Segundo esta norma, a amarração deve atender ao seguinte critério de capacidade resistente e demanda:

$$0,75 \cdot R_n \geq R_u \quad (3)$$

Sendo que " R_n " é a resistência nominal da amarração e " R_u " é a resistência requerida da estrutura obtida por meio da seguinte combinação:

$$W_f = 1,20 \cdot G_k + 0,50 \cdot Q_k \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Sendo que " G_k " e " Q_k " são a soma das cargas permanentes e acidentais, conforme dito anteriormente, e " W_f " a carga distribuída por unidade de metro quadrado.

Diferente da norma BS 8110-1 (1997), as combinações de projeto para as amarrações são consideradas separadas do dimensionamento usual da estrutura, e este só resiste à solicitação de tração para o qual foi calculado. Além disso, não existem requisitos de rigidez para os elementos que ancoram essas amarrações.

A norma UFC 04-023-03 (2009) especifica que as amarrações devem ser posicionadas nas lajes dos pavimentos, permitido sua utilização em vigas desde que essas sejam capazes de proporcionar rotação de $11,3^\circ$ ($0,2$ radianos), como ilustra a Figura 4.

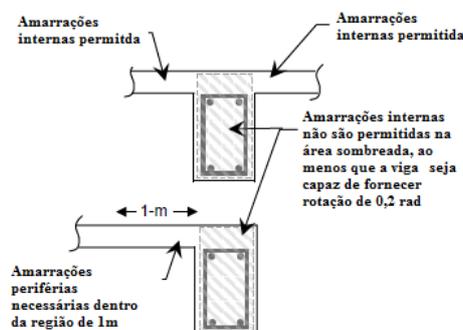


Figura 4: Tipos de amarrações (Adaptado de UFC 04-023-03 (2009)).

As amarrações longitudinais e transversais precisam ser dispostas como ilustrado na Figura 1 e espaçadas não mais que 20% (Figura 5) do maior comprimento do respectivo trecho transversal ou longitudinal.

¹ São consideradas estruturas baixas, conforme Li *et al.* (2011), as estruturas que possuem até 4 pavimentos.

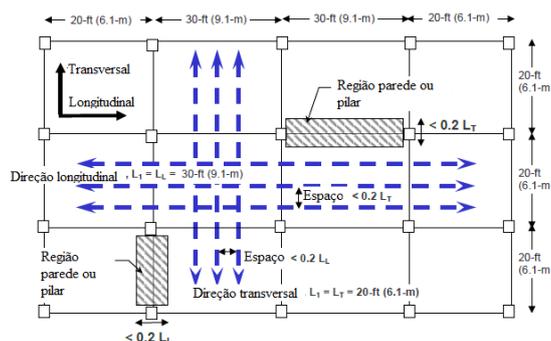


Figura 5: Espaçamento das amarrações (Adaptado de UFC 04-023-03 (2009)).

A força requerida (F_i) para as amarrações longitudinais e transversais é igual a:

$$F_i = 3 \cdot W_f \cdot L_1 \text{ [kN/m]} \quad (5)$$

Sendo que " L_1 " é o comprimento do maior trecho entre pilares, por exemplo, nos sentidos longitudinais e transversais.

As amarrações periféricas são dispostas como na Figura 1 e devem estar dentro de uma região de 1 metro a partir da face interior da viga ou do canto externo da estrutura. Sua força requerida é dada por:

$$F_p = 6 \cdot W_f \cdot L_1 \cdot L_p + 3 \cdot W_c \text{ [kN]} \quad (6)$$

Sendo que " L_p " é igual a um metro e " W_c " é 1,2 vezes a carga de vedação (paredes) sobre a distância " L_1 ".

2.3 Tie Force melhorado (Li et al., 2011)

Li et al. (2011) propôs uma melhora no método indireto corrente, pois o método atual falha em considerar fatores importantes como redistribuição de carga em três dimensões, efeito dinâmico e correção de força interna. Dessa forma, o autor propôs uma melhora levando em conta as amarrações dispostas nas vigas ao invés das lajes e fazendo uma observação aos pontos a seguir. Naji (2018) também ressalta essas falhas no *Tie Force* convencional.

- A força de amarração básica, através da equação 2 e condição 2, não tem um rigor teórico adequado e subestima a resistência requerida para estruturas baixas;
- O modelo básico assumido ignora a localização das amarrações, fazendo com que ocorra excesso de armaduras desnecessário;
- Não considera redistribuição de carga no espaço, uma vez que sua teorização por meio da equação 2 e condição 1 é obtido por estrutura plana; e
- O trecho das vigas que concorrem nos pilares de canto e não possuem continuidade não são capazes de fornecer resistência por meio da ação catenária, ou seja, esforço axial.

As hipóteses de cálculo partem da premissa de que, sob as condições da perda de um pilar de apoio, o elemento horizontal de transmissão de carga (viga) possui mecanismos de resistência.

Inicialmente, a viga é capaz de fornecer resistência a flexão através dos momentos negativos nos apoios sob pequenas deformações. Então, com aumento da deformação, transformação em rótula plástica na região do apoio perdido, a viga passa a atuar como tirante resistindo apenas ao esforço axial, como fica claro na Figura 3. A limitação de rotação de 11,3° para as vigas é atendida neste modelo proposto, assim como prescrito no UFC 04-023-03 (2009), comentado anteriormente.

As seguintes formulações visam proporcionar a quantidade de resistência necessária para ambos os mecanismos, preocupando-se em compatibilizar as deformações para vãos de vigas com diferentes comprimentos, e considera comportamento dinâmico e não linear através de seus coeficientes, com critérios adaptados da norma GSA (2003).

$$S = \alpha \cdot (G_k + Q_k) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (7)$$

Sendo que "S" é a combinação que deve ser empregada na estrutura para análise e "α" o fator de amplificação dinâmica, que deve ser igual a 2. "G_k" e "Q_k" são as somatórias das cargas permanentes e acidentais no pavimento, respectivamente.

Semelhante ao método dos caminhos alternativos abordado no GSA (2003), que a estrutura tem seus esforços analisados mediante a retirada de pilares em determinadas posições, Li *et al.* (2011) propõem apenas o emprego da equação de resistência (8) mediante a equação (9) para vigas conectadas em diversas situações de suposta perda de pilar, em que apenas vigas contínuas, como as conectadas em pilares interiores, utilizam a equação (8). Já as vigas conectadas a pilares de esquina, a equação (9).

Para a força requerida (F_i), adota-se a seguinte equação:

$$F_i = F_j > \frac{\beta \cdot q \cdot L_i \cdot L_j}{\Delta} \text{ [kN]} \quad (8)$$

Sendo que "F_i" e "F_j" são os esforços axiais resistentes para as vigas "i" e "j" conectadas pelo suposto pilar danificado, "β" o fator de correção interna, que vale 0,67, e "q" a carga distribuída linearmente sobre a viga. "L_i" e "L_j" são os comprimentos dos vãos das vigas "i" e "j", respectivamente, e "Δ" a deflexão limite igual a 1/5 do menor vão de viga conectada ao pilar em questão.

O momento negativo (M_i) resistente necessário para os trechos não contínuos é definido através da seguinte equação:

$$M_i > \frac{\beta \cdot q \cdot L_i^2}{2} \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (9)$$

Sendo que "L_i" é o vão da viga "i" correspondente.

3 METODOLOGIA

Para o estudo da metodologia de projeto de prevenção do colapso progressivo, foi modelada uma estrutura apertada de concreto armado com 6 pavimentos de pé direito 2,80 m.

O sistema de vencimento de vãos foi por meio de vigas principais, servindo de apoio para as lajes são maciças. Foi utilizado o software Eberick para análise da estrutura e dimensionamento convencional baseado na norma NBR 6118 (2014) e, posteriormente, analisado pelo método dos elementos finitos através do SAP 2000, verificando as condições de dano por perda de pilar. Três situações da abordagem do método indireto, contidas na norma BS 8110-1 (1997), no UFC 04-023-03 (2009) e por último o método proposto no trabalho de Li *et al.* (2011), foram analisadas. É importante destacar que esta estrutura foi adotada de forma aleatória, sem correlação com trabalhos já publicados, sendo o formato do edifício escolhido por simplicidade didática. A disposição adotada dos elementos em planta forma uma grelha retangular, então é possível verificar a influência de diferentes comprimentos de vigas concorrendo num pilar.

3.1 Aspectos gerais da estrutura

O *layout* adotado foi de grelhas regulares, permitindo a utilização de membros estruturais repetitivos e contínuos ao longo dos aparelhos de apoio, favorecendo a redistribuição de cargas. Na direção vertical, têm-se vãos que variam entre 3 metros e 4,5 metros. Na horizontal, vãos com comprimento uniformes de 6 metros, de maneira que seja possível avaliar a influência do vão no emprego dos métodos analisados. Os pilares foram lançados nos encontros das vigas, evitando cargas concentradas de viga apoiadas sobre vigas.

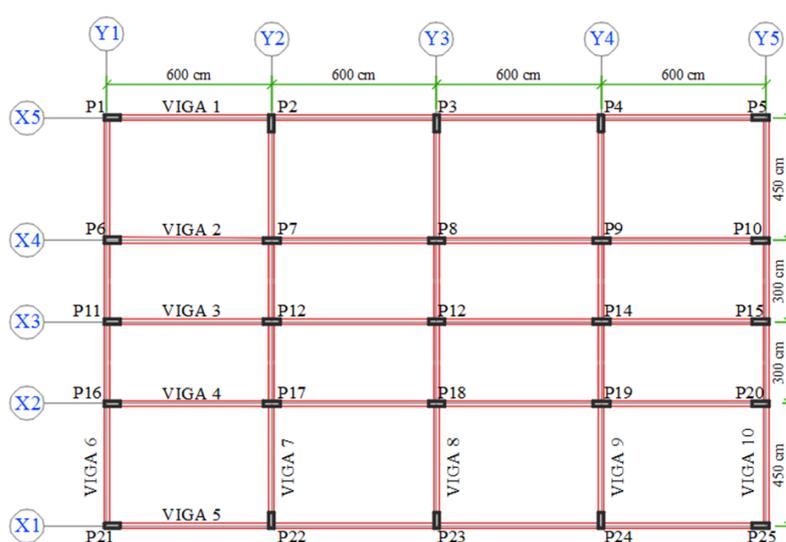


Figura 6: Planta do edifício estudado.

3.2 Pré-dimensionamento

O dimensionamento preliminar das seções das vigas seguiu regras práticas contidas em Ching *et al* (2010). Para o pré-dimensionamento da altura (h) e largura (b) das vigas, foi utilizada as seguintes fórmulas:

$$h = \frac{vão}{16} + 5 \text{ cm} \quad (10)$$

$$b = \frac{h}{3} + 5 \text{ cm} \quad (11)$$

Uniformizando um único vão igual a 6 metros, todas as vigas ficaram com seção $20 \times 40 \text{ cm}$. Para as lajes foi adotada espessura de 12 cm. A seção dos pilares foi pré-dimensionada pelo processo das áreas de influência, resultando numa seção de $20 \times 60 \text{ cm}$. Considerou-se f_{ck} de 25 MPa para o concreto; aço CA -50; classe de agressividade ambiental II; e cobrimento igual a 3 cm para todos os elementos.

3.3 Cargas

Conforme a NBR 6120 (1980), considerou-se para o concreto armado 25 kN/m^3 de peso específico e 13 kN/m^3 para a alvenaria. Dessa forma, resultou nas seguintes cargas permanentes:

- Vigas: $2,00 \text{ kN/m}$
- Lajes: $3,00 \text{ kN/m}^2$
- Paredes: $4,68 \text{ kN/m}$
- Revestimento: $0,80 \text{ kN/m}$

A carga acidental considerada foi de 2 kN/m^2 , considerando o uso da estrutura para um escritório, e velocidade básica do vento de 35 m/s (NBR 6118, 2014). Para determinar as forças de arrasto do vento, foram utilizados os seguintes parâmetros: $S_1 = 1,00$; Classe B; Categoria III; e $S_3 = 1,00$, conforme as premissas da ABNT NBR 6123:1998.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados consistiu em duas verificações. Primeiro foram analisados os dados do aumento da área de aço com o emprego de cada método. Posteriormente, foi avaliado se a quantidade calculada é suficiente, utilizando análise dos esforços obtidos através da modelagem de pórtico espacial por meio do método dos elementos finitos no SAP 2000, seguindo as condições de materiais e carregamentos mencionados anteriormente.

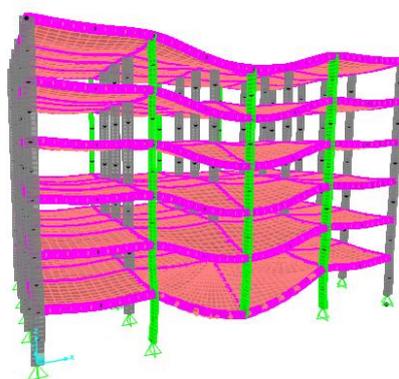


Figura 7: Pórtico espacial obtido no SAP 2000.

Importante ressaltar que alguns elementos estruturais tiveram as suas dimensões alteradas após o processamento considerando o colapso progressivo. Essa alteração aconteceu especificamente no caso do *Tie Force* melhorado, justamente pela taxa de armadura ser mais alta do que as premissas da ABNT NBR 6118:2014. As vigas, exceto a 6 e 10, tiveram as seções aumentadas até 20x90 cm, como no caso das vigas 2, 3 e 4. Já as demais tiveram alteração na faixa de 20x70 cm. Para a estrutura convencional, segundo UFC 04-023-03 (2009) e BS 8110-1 (1997) as dimensões dos elementos estruturais foram o mesmo do pré-dimensionamento.

4.1 Estrutura convencional

Para podermos comparar o acréscimo de armadura na estrutura com a utilização dos métodos propostos (evitar o colapso progressivo pelo método indireto) com o convencional (sem utilizar o método indireto), a Tabela 1 apresenta o resumo de aço em quilogramas para cada pavimento das vigas e laje apenas, uma vez que só abordaremos as amarrações horizontais.

Tabela 1: Resumo do aço para a estrutura convencional.

Pavimento	Elemento	Peso do aço (kg)	Pavimento	Elemento	Peso do aço (kg)
Cobertura	Vigas	831,00	Pav. tipo 2	Vigas	1.149,82
	Lajes	1.339,18		Lajes	1.362,82
	Total	2.170,27		Total	2.512,55
Pav. tipo 4	Vigas	996,73	Pav. tipo 1	Vigas	1.207,82
	Lajes	1.362,82		Lajes	1.362,82
	Total	2.359,55		Total	2.570,55
Pav. tipo 3	Vigas	1.055,09	Térreo	Vigas	1.197,55
	Lajes	1.362,82		Lajes	1.362,82
	Total	2.417,82		Total	2.560,36
Total:		14.591,09			

4.2 Tie Force segundo BS 8110-1 (1997)

A Tabela 2 mostra os dados da armadura adicional necessária para resistir ao colapso progressivo utilizando o método indireto segundo a BS 8110-1 (1997).

Tabela 2: Armadura adicional para evitar o colapso progressivo segundo a BS 8110-1 (1997).

Pavimento	Elemento	Estrutura Convencional (kg)	Armadura Adicional (kg)	Total (kg)	Aumento (%)
Cobertura	Vigas	831,00	-	-	-
	Lajes	1.339,18	694,19	2.033,37	51,83%
	Total	2.170,27	694,19	2.864,46	31,99%
Pav. tipo 4	Vigas	996,73	-	-	-
	Lajes	1.362,82	824,42	2.187,24	60,49%

	Total	2.359,55	824,42	3.183,96	34,94%
Pav. tipo 3	Vigas	1.055,09	-	-	-
	Lajes	1.362,82	824,42	2.187,24	60,49%
	Total	2.417,82	824,42	3.242,24	34,10%
Pav. tipo 2	Vigas	1.149,82	-	-	-
	Lajes	1.362,82	824,42	2.187,24	60,49%
	Total	2.512,55	824,42	3.336,96	32,81%
Pav. tipo 1	Vigas	1.207,82	-	-	-
	Lajes	1.362,82	824,42	2.187,24	60,49%
	Total	2.570,55	824,42	3.394,96	32,07%
Térreo	Vigas	1.197,55	-	-	-
	Lajes	1.362,82	824,42	2.187,24	60,49%
	Total	2.560,36	824,42	3.384,78	32,20%
Total		14.591,09	4.816,28	19.407,37	33,01%

A tabela indica aumento de 33,01% na quantidade (densidade) de aço, mesmo desconsiderando a possibilidade de adotar parte das armaduras dimensionadas para outros propósitos, como parte integrante das amarrações, o que é um valor muito singelo frente à magnitude dos esforços que a estrutura é submetida em situação de colapso.

4.3 Tie Force segundo UFC 04-023-03 (2009)

A Tabela 3 mostra os dados da armadura adicional necessária para resistir ao colapso progressivo, utilizando o método indireto segundo a UFC 04-023-03 (2009).

Tabela 3: Armadura adicional para evitar o colapso progressivo segundo a UFC 04-023-03 (2009).

Pavimento	Elemento	Estrutura Convencional (kg)	Armadura Adicional (kg)	Total (kg)	Aumento (%)
Cobertura	Vigas	831,00	-	-	-
	Lajes	1.339,18	1.752,73	3.091,91	130,88%
	Total	2.170,27	1.752,73	3.923,00	80,76%
Pav. tipo 4	Vigas	996,73	-	-	-
	Lajes	1.362,82	1.886,87	3.249,69	138,45%
	Total	2.359,55	1.886,87	4.246,42	79,96%
Pav. tipo 3	Vigas	1.055,09	-	-	-
	Lajes	1.362,82	1.886,87	3.249,69	138,45%
	Total	2.417,82	1.886,87	4.304,69	78,04%
Pav. tipo 2	Vigas	1.149,82	-	-	-
	Lajes	1.362,82	1.886,87	3.249,69	138,45%
	Total	2.512,55	1.886,87	4.399,42	75,09%
Pav. tipo 1	Vigas	1.207,82	-	-	-

	Lajes	1.362,82	1.886,87	3.249,69	138,45%
	Total	2.570,55	1.886,87	4.457,42	73,40%
Térreo	Vigas	1.197,55	-	-	-
	Lajes	1.362,82	1.886,87	3.249,69	138,45%
	Total	2.560,36	1.886,87	4.446,87	73,69%
Total		14.591,09	11.187,08	25.778,17	76,67%

Pode-se notar que foi alcançado valor médio de 76,67% de aumento na quantidade de aço empregado. O sistema visa utilizar o sistema de piso para transferir a cargas verticais na região danificada, via ação de catenária ou membrana até os elementos de suporte não danificados.

4.4 Tie Force melhorado proposto por Li *et al.* (2011)

A Tabela 4 mostra os dados da armadura adicional necessária para resistir ao colapso progressivo utilizando o método proposto por Li *et al.* (2011).

Tabela 4: Armadura adicional para evitar o colapso progressivo segundo o método proposto por Li *et al.* (2011).

Pavimentos	Elementos	Estrutura Convencional (kg)	Armadura Adicional (kg)	Total (kg)	Aumento (%)
Cobertura	Vigas	831,00	3.234,93	4.065,93	389%
	Lajes	1.339,18	-	-	-
	Total	2.170,27	3.234,93	-	149,06%
Pav. tipo 4	Vigas	996,73	4.063,48	5.060,21	407,68%
	Lajes	1.362,82	-	-	-
	Total	2.359,55	4.063,48	-	172,21%
Pav. tipo 3	Vigas	1.055,09	4.063,48	5.118,57	385,13%
	Lajes	1.362,82	-	-	-
	Total	2.417,82	4.063,48	-	168,06%
Pav. tipo 2	Vigas	1.149,82	4.063,48	5.213,30	353,40%
	Lajes	1.362,82	-	-	-
	Total	2.512,55	4.063,48	-	161,73%
Pav. tipo 1	Vigas	1.207,82	4.063,48	5.271,30	336,43%
	Lajes	1.362,82	-	-	-
	Total	2.570,55	4.063,48	-	158,08%
Térreo	Vigas	1.197,55	4.063,48	5.261,03	339,32%
	Lajes	1.362,82	-	-	-
	Total	2.560,36	4.063,48	-	158,71%
Total		14.591,09	23.552,33	38.143,42	161,42%

Este método, diferente dos outros dois métodos abordados anteriormente, utiliza as amarrações no sistema de vigas, apresentando um acréscimo de 161,42%. O fato desse acréscimo de armadura ter sido alto leva ao problema com as vigas 2 e 4, pois apresentaram aumento na taxa de aço maior que 4%, valor limite permitido pela NBR 6118:2004. Peças superarmada, segundo Araújo (2010), a ruptura ocorre no domínio 4, ou seja, o aço não chega a escoar e sua ruptura é frágil devido ao esmagamento do concreto. Além disso, não é possível garantir que a viga suporte

os altos momentos negativos devido a problemas de ancoragem, tendo em vista que a região onde as armaduras negativas se encontram é de má aderência, exigindo maiores comprimentos de ancoragem (ARAUJO, 2010). Para atendermos a este requisito, as vigas 2 e 4 tiveram sua seção aumentada para 20x90 cm, conforme dito anteriormente.

A diferença do comprimento do vão se mostrou determinante na magnitude dos esforços resistentes, como exemplo, adotando o mesmo carregamento para as vigas 1 e 6. Com comprimentos de vão igual a 6 metros e 4,5 metros, respectivamente, o pilar solicitado ao momento negativo no trecho 1 apresenta valor 78% maior na viga 1. Além disso, as vigas da direção horizontal com vãos de 6 metros na região interior da estrutura tiveram esforços axiais até 3 vezes maiores que as vigas da direção vertical na mesma região da estrutura.

4.5 Comparativo do aumento da armadura entre os três métodos

A tabela 5 expressa os valores obtidos na aplicação dos três métodos, de forma comparativa. Nota-se que estão expressos os valores de peso total do aço, em quilogramas, e a porcentagem de aumento em relação ao estudo convencional.

Tabela 5: Comparativo da armadura da laje utilizando os três métodos.

Descrição	Convencional	BS 8110-1 (1997)	UFC 04-023-03 (2009)	<i>Tie Force</i> melhorado
Peso do aço total	14.591,09 kg	19.407,37 kg	25.778,17 kg	38.143,42 kg
% de aumento	-	33,01%	76,67%	161,42%

Através desta tabela é possível notar que, a primeira metodologia apresentou porcentagem baixa, isso se deve a abordagem simplificada da norma para esta situação, de maneira que a adoção destas amarrações torne-se prática comum entre as novas construções, acrescentando sua robustez diferente dos outros métodos, que utiliza fórmulas com pouco rigor teórico. Outro ponto que vale destacar é que a força básica (F_t) utilizada neste método subestima o efeito do colapso progressivo, segundo Li *et al.* (2011), acarretando em um esforço menor do que realmente pode vir a ocorrer.

Segundo UFC 04-023-03 (2009), as formulações para as forças de amarração são baseadas em análise numérica da situação de colapso por meio do método dos elementos finitos. Já para o *Tie Force* melhorado, que apresentou valores mais discrepantes, isso se deve sobretudo à diferença de comprimento dos vãos conectados ao ponto em análise, uma vez que este método atende à condição de compatibilidade da deflexão do nó, dada por 1/5 do menor vão que ali concorre.

4.6 Análise da resistência ao colapso dos três métodos

Através da modelagem no SAP 2000, foi analisada a magnitude dos esforços axiais de tração que as lajes e vigas estarão submetidas na situação da perda dos pilares no nível térreo P1, P2, P3, P6, P7 e P8, separadamente. Como modelo será tomado pórtico espacial, com discretização dos elementos lineares com no máximo 1,5 m, para os elementos planos, malha com 50x50 cm. É presumida a falha quando o esforço calculado pelo determinado método for menor do que o atuante. Na tabela 6, "F" designa que a estrutura não resistiu e "NF" que a estrutura resistiu.

Tabela 6: Resultados da análise pelo SAP 2000.

Pilar retirado	Método		
	BS 8110-1	UFC 04-023-03	TF MELHORADO
P1	F	NF	NF
P2	F	NF	NF
P3	F	NF	NF
P6	F	NF	NF
P7	F	NF	NF
P8	F	NF	NF

Através da Tabela 6 é possível notar que, embora o método da BS 8110-1 (1997) obteve um menor acréscimo de armadura (apenas 33,01%), este método não pode ser aplicado aqui no Brasil, visto que a estrutura entraria em colapso. Isso pode ter ocorrido por ser uma norma mais antiga que subestima o colapso progressivo atualmente ou pela combinação de efeitos considerado. Já as normas UFC 04-023-03 (2009) e o TF melhorado proposto por Li *et al.* (2011) atenderam aos requisitos de resistência e suas estruturas não entrariam em colapso. Como a norma UFC 04-023-03 (2009) teve um menor acréscimo de aço, essa poderia ser mais indicada no Brasil para evitar o colapso progressivo.

Importante destacar que o colapso acontece devido ao acréscimo de carregamento nos elementos estruturais, ficando na faixa de 14 a 25% neste estudo. O mesmo aconteceu no trabalho elaborado por Baía (2014), por exemplo, em que o acréscimo de carregamento nos elementos ficou na faixa de 20 a 30% para um edifício de 12 pavimentos. Entretanto, pode existir casos em que o acréscimo de carregamento pode chegar a 134%, como foi no caso estudado por Fell Jr e Schmitz (2018), também em um edifício de 12 pavimentos. Dessa forma, mostra que o efeito do colapso progressivo é relevante em estruturas desde 6 pavimentos, que foi o caso desse estudo, até 12 pavimentos, conforme mostrado por Baía (2014) e Fell Jr e Schmitz (2018).

5 CONCLUSÃO

Conforme observado na abordagem em relação ao colapso progressivo, existem várias normas que o abordam, evitando assim perda de vidas e financeira. Entretanto, no Brasil, nenhuma norma auxilia o dimensionamento de uma estrutura utilizando métodos para prevenir o colapso progressivo. Através da análise das duas normas, UFC 04-023-03 (2009) e BS 8110-1 (1997), e o método proposto por Li *et al.* (2011), é possível inferir as seguintes conclusões:

- O método proposto pela norma BS 8110-1 (1997) não deve ser utilizado, visto que o aumento da armadura calculado não foi necessário para evitar o colapso progressivo em nenhuma situação analisada;
- Embora o método TF Melhorado proposto por Li *et al.* (2011) tenha mostrado resistência ao colapso, as altas taxas de armaduras requer redimensionamento das seções e as barras em várias camadas, dificultando sua armação;

- O método adotado pela norma UFC 04-023-03 (2009) apresentou bons resultados, com valores bastante coerentes dos esforços resistentes propostos pelo método, resistindo a todas as situações analisadas com relativa margem de segurança, uma vez que as armaduras adotadas para as amarrações são consideradas exclusivas, desprezando a possibilidade das armaduras advindas do dimensionamento convencional contribuírem no momento do colapso;
- A montagem da armadura para a UFC 04-023-03 (2009) é mais fácil quando comparado com o TF Melhorado proposto por Li *et al.* (2011), visto que a armadura fica na laje e dispensa o redimensionamento da espessura de outros elementos, como seria necessário no caso da viga do método proposto por Li *et al.* (2011); e
- A altura do edifício impacta no colapso progressivo, visto que quanto maior este for, maior será a chance da estrutura ruir.

6 REFERÊNCIAS

- American Society of Civil Engineers: ASCE/SEI 7. (2005). *Minimum design loads for buildings and other structures*. Washington D.C.
- Araújo, J. M. (2010). *Curso de concreto armado* (Vol. 3). Rio Grande: Dunas.
- Associação Brasileira de normas Técnicas. (1988). NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1980). *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de Estruturas de concreto armado - procedimentos*. Rio de Janeiro.
- Baía, R. O. D. (2014). Análise de uma edificação considerando o colapso progressivo. Dissertação (graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Rio de Janeiro.
- British Standard: BS 5628. (1992). *Code of practice for use of masonry. Structural use of unreinforced masonry*.
- British Standard: BS 8110-1. (1997). *Structural use of concrete: code of practice for design and construction*.
- Carvalho, R. C., & Figueiredo Filho, J. R. (2014). *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118:2014*. São Carlos: EdUFSCar.
- Ching, F. D., Onouye, B. S., & Zuberbuhler, D. (2010). *Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projetos*. Porto Alegre: Bookman.



- Costa, C. N. (2008). Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. *Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*. São Paulo.
- Ellingwood, B. R., Smilowitz, R., Dusenberry, D. O., Duthinh, D., & Carino, N. J. (2007). *Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings*. National Institute of Standards and Technology: NISTIR 7396, U.S. Department of Commerce. Fonte: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860696
- European Commission EN Eurocode 1. (1991). *Actions on structures*.
- Fell Jr, V. S., Schmitz, R. J. (2018). Colapso progressivo: estudo de uma edificação residencial. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas – XCBPE. Rio de Janeiro.
- Felipe, T. R. C., Haach, V. G. (2019). Discussion about progressive collapse of masonry buildings. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. Vol. 12, n. 3, p. 479-485. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952019000300003>
- General Services Administration: GSA. (2003). *Progressive collapse analysis and design for new Federal Office buildings and major modernization projects*.
- Laranjeiras, A. R. (2011). *TQS News*. Fonte: download.tqs.com.br:8080/download/JornalTQS33_ArtigoAntonioCarlosRLaranjeiras.pdf
- Li, Y., Lu, X., Guan, H., Ye, L. (2011). An improved tie force method for progressive collapse resistance design of reinforced concrete frame structures. *Engineering Structures*, 1-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.017>.
- Melo, C. D. (2015). Estudo do colapso progressivo de pórticos planos de concreto armado via análise não linear. *Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza.
- Naji, A. (2018). Improving the tie force method for progressive collapse design of RC frames. *International Journal of Structure Integrity*. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJSI-10-2017-0058>
- Unified Facilities Criteria: UFC 04-023-03. (2009). *Design of Structures to resist progressive collapse*.
- Unified Facilities Criteria: UFC 4-010-01. (2018). *DoD Minimum Antiterrorism standards for buildings*.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Seabra, A. P., Arroyo, F. N., Santos, M. M. dos, Christoforo, A. L., A. M. P. G. Dias, Lahr, F. A. R. (2021). Análise da abordagem indireta na prevenção do colapso progressivo. *Holos*. 37(1), 1-19.

SOBRE OS AUTORES

A. P. SEABRA

Possui graduação em Engenharia Civil - Faculdades Integradas de Cacoal (2018). cursando pós-graduação



em Engenharia Diagnóstica - INBEC (2020). Atualmente é assessor especial de engenharia da Prefeitura Municipal de Rolim de Moura e docente na Faculdade FAROL. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase orçamentos e projetos de estruturas. E-mail: seabra_eng@hotmail.com
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5717-3653>

F. N. ARROYO

Possui graduação em Engenharia Civil pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (2015) e mestrado em Sistemas Estruturais pela Universidade Federal de São Carlos (2017). Após a conclusão do mestrado, atuou como professor (2 anos e meio) e coordenador de curso da Engenharia Civil e Mecânica (1 ano e 2 meses) nas Faculdades Integradas de Cacoal (UNESC). Nesta instituição, ministrou as principais disciplinas de estruturas, como Pontes, Concreto Armado, Estrutura Metálica, Estrutura de Madeira e Análise de Estruturas. Também participou do Núcleo Docente Estruturante (NDE) dos cursos de Engenharia Civil (2 anos e meio) e Engenharia Mecânica (1 ano). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: alvenaria estrutural, concreto armado e execução de obras. A produção científica está baseada em artigos que englobam estruturas de madeira, materiais compósitos, desenvolvimento de materiais e estruturas de concreto armado. E-mail: lipe.arroyo@gmail.com
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8226-172X>

M. M. DOS SANTOS

Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em construção civil. E-mail: mayconmendes1996@gmail.com
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1064-8575>

A. L. CHRISTOFORO

Possui Pós-Doutorados em Estatística, em Engenharia de Materiais e em Engenharia de Estruturas pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP), campus de Ilha Solteira e de Rio Claro, Pós-Doutorado em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP) e Pós-Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos FZEA/USP. Doutor e Mestre em Engenharia de Estruturas pela EESC/USP, Especialista em Matemática Aplicada pela UNESP de Rio Claro e graduado em Engenharia Civil Pela Universidade de Franca (UNIFRAN). É autor-coautor em mais de 400 artigos publicados em periódicos com política editorial bem definida, em mais de 200 trabalhos completos publicados em anais de eventos nacionais e internacionais, participação em mais de 30 eventos científicos nacionais e internacionais, autor-coautor em mais de 25 livros (Mecânica dos Sólidos, Métodos Numéricos, Madeira, Estruturas de Madeira - Pontes, Painéis a Base de Madeira, Materiais Compósitos a Base de Resíduos Lignocelulósicos), revisor em mais de 30 periódicos, editor da área de Construções Rurais e Ambiente da Revista Engenharia Agrícola (EAgri - SBEA) e membro do corpo editorial da revista Construindo. Coordena projetos de pesquisa em desenvolvimento com empresas (Sindusmad, Greenplac, Kehl polímeros, STWood, Imperveg, Vale do Cedro: Madeiras Termo tratadas), é colaborador em vários projetos de pesquisa independentes e financiados por agências de fomento à pesquisa (CNPq, FAPESP), avaliador ad hoc de projetos da FAPESP e FAPEAL e possui forte colaboração em pesquisa com a Universidade de Coimbra (Portugal) e de Cantabria (Espanha). Homenageado com o seu nome no Centro Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT / Sinop / MT). Foi professor Interino na UNEMAT e posteriormente professor Visitante nessa mesma instituição, ministrando aulas de disciplinas diversas para o curso de Engenharia Civil. Foi concursado na vaga de Álgebra Linear, Cálculo Diferencial e Integral e Geometria Analítica da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT / Sinop / MT), concursado na área de Resistência dos Materiais no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ / MG) e concursado na vaga de Mecânica das Estruturas no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), onde leciona atualmente, orientando alunos de graduação



e de pós-graduação (Mestrado e Doutorado - PPGECiv) com supervisões de estágios de pós-doutorados. Organizou vários eventos técnico-científicos, dentre eles o Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional (ERMAC), patrocinado pela Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC) e o Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial (CONEMI), financiado pela Federação Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial (FENEMI). Membro da Comissão de Estudo de Estruturas de Madeiras (ABNT/CE-02:126.10) do Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-02): Ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira, e membro da diretoria do Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira (IBRAMEM). Atua na modelagem numérica de estruturas de madeira (estruturas mistas; em situação de incêndio) e de materiais compósitos para aplicações diversas, em estruturas de madeira, na caracterização da madeira, na fabricação e na caracterização de produtos engenheirados a base de madeira e de resíduos lignocelulósicos (MLC, PPH, MDP, MDF, OSB, LVL, etc..) e na modelagem estatística. E-mail: christoforoal@yahoo.com.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

A. M. P. G. DIAS

Licenciado em Engenharia Civil e Mestre em Estruturas pela Universidade de Coimbra. Ph.D. da Universidade de Delft, Holanda. Professor Auxiliar com Agregação no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, atualmente lecionando na área de Análise e Projeto Estrutural e Construção em Madeira. Investigador do ISISE, desenvolvendo estudos nas áreas de estruturas de madeira e estruturas mistas (madeira-betão). Vice-Diretor do Departamento de Engenharia Civil (DEC) desde 2013 e membro da Assembleia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC desde 2017. Vice-presidente do Centro de Inovação e Competências Florestais - SerQ, em representação da Universidade de Coimbra. Ao longo de sua carreira, ele é autor e co-autor de mais de cem publicações científicas em periódicos com revisão independente e reuniões científicas. Participou de cerca de três dezenas de Projetos de Pesquisa Nacionais e Internacionais, sendo Investigador Principal na maioria deles. Membro de várias Comissões Técnicas Nacionais e Internacionais relacionadas com produtos, soluções construtivas e dimensionamento estrutural em madeira. Neste âmbito, é coordenador do Grupo de Trabalho Nacional sobre Dimensionamento de Estruturas em Madeira, e do Grupo de Trabalho Europeu de Estruturas Mistas. Foi coordenador do grupo europeu responsável pelo desenvolvimento da primeira proposta normativa internacional para a análise e dimensionamento de Estruturas Mistas Madeira-Betão. E-mail: alfgdias@dec.uc.pt

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9752-1907>

F. A. R. LAHR

Engenheiro Civil formado em 1975 pela Escola de Engenharia de São Carlos, USP, desenvolveu nesta instituição sua carreira acadêmica, ocupando diferentes funções e cargos. Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas desde 1993, vem trabalhando nos temas: Madeiras, Estruturas de Madeira, Compósitos à Base de Madeira e Compósitos Cimentícios. Linhas de pesquisa: propriedades e aplicações das madeiras e dos compósitos à base de madeira, estruturas de cobertura, pontes, fôrmas e cimbramentos, normalização, metodologia de ensaio, insumos alternativos na produção de painéis. E-mail: frocco@sc.usp.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3510-8498>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: ALEXANDRE PEREIRA E RAFAEL DE PAULA GARCIA



