



Estudos Avançados em Engenharia Civil



Altevir Castro dos Santos
(Organizador)

 **Bookerfield**



Estudos Avançados em Engenharia Civil



Altevir Castro dos Santos
(Organizador)

 **Bookerfield**

Editora Chefe

Marcia A. A. Marques

Editora Adjunta

Isabela Arantes Ferreira

Coordenador Editorial

Lucas Batista Cunha

Bibliotecária

Aline Grazielle Benitez

Diagramação

Marcos Antonio Ribeiro Pereira

Arte da Capa

Matheus Lacerra

Imagem da Capa

Freepik

Revisão

Os Autores

O conteúdo deste livro está licenciado sob uma licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial Não Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).



2021 by Bookerfield Editora

Copyright © Bookerfield Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Bookerfield Editora

Os autores cedem à Bookerfield Editora os direitos para esta edição

Esta obra é de natureza digital (e-book). Versões impressas são permitidas, não tendo a Bookerfield Editora qualquer responsabilidade pela confecção e distribuição de exemplares físicos deste conteúdo.

Todos os manuscritos da obra passaram por rigorosa avaliação cega pelos pares, baseadas em critérios científicos e imparciais, recebendo a aprovação após atender os critérios técnicos estabelecidos pelo Conselho Editorial.

Todo o conteúdo do livro e de artigos individuais é de responsabilidade exclusiva de seus respectivos autores, não sendo a Bookerfield Editora responsável por quaisquer eventuais irregularidades.

Situações como plágio, má conduta ética/científica ou dados e resultados fraudulentos são de responsabilidade do autor, comprometendo-se a Bookerfield Editora em investigá-las rigorosamente e tomar as ações cabíveis.

O download, compartilhamento e referência da obra são permitidos mediante atribuição de crédito aos autores e à Editora. A comercialização desta obra é expressamente proibida.

CONSELHO EDITORIAL

Ciências Agrárias

Afrânio Silva Madeiro
Alirya Magda Santos do Vale Gomes
Ana Luiza Trovo Marques de Souza
Carlos Eugenio Fortes Teixeira
Daniela Kunkel
Daniele Cristina Ficanha
Elson Barbosa da Silva Junior
Fabiana Schiochet
Fernando Rezende da Costa
Flávio José Rodrigues Cruz
Heiriane Martins Sousa
João Francisco Severo Santos
Joelma Leão Buchir
Kleber Fernando Pereira
Marden Manuel Rodrigues Marques
Maria Cristina Bueno Coelho
Monyck Jeane dos Santos Lopes
Pablo Daniel Freitas Bueno

Ciências Biológicas

Cesar Augusto Cunha Cervantes
Débora Cristina Damasceno
Érika Alves Tavares Marques
Fabíola Aliaga de Lima
Flávio José Rodrigues Cruz
Heiriane Martins Sousa
Jaqueline Rocha Borges dos Santos
Joelma Leão Buchir
José Amorim
José Maria Ferraz Filho
Jussara Gonçalves Fonseca
Kleber Fernando Pereira
Mário César de Oliveira
Morgana do Nascimento Xavier
Nathália Sayuri Yamamoto
Noemi Mendes Fernandes
Patricia Köster e Silva
Rafael Mesquita Stoque

Renato Luís Veiga Oliveira Júnior
Veronica Gabriela Ribeiro da Silva

Ciências da Saúde

Adriano José Barbosa Junior
Alexandre Daré de Almeida
Ana Irene Coelho Nunes
Ana Luiza Trovo Marques de Souza
Andrea Borges Gaia
Andressa Ribeiro Contreira
Camila Gemin R. Locatelli
Carlos Vinícius Pagani Vieira
Machado
Débora Cristina Damasceno
Elisângela Rodrigues Carrijo
Fabiana Leticia Sbaraini
Fabio José Antonio da Silva
Fabrício Casanova
Gisela da Costa Mascarenhas
Greicielle Pereira Arruda
Ivonete Aparecida Alves Sampaio
Janaina da Câmara Zambelli
Jandira Maria do Amarilho Silveira
Jaqueline Rocha Borges dos Santos
João Francisco Severo Santos
Jogilmira Macedo Silva Mendes
José Aderval Aragão
José Maria Ferraz Filho
José Roberto Zaffalon Júnior
Juliane Campos Inácio
June Fernanda Maria Teixeira
Katia Fernanda Forti Porcaro
Kilvia Paula Soares Macedo
Líncon Bordignon Somensi
Luciane Cristina Arantes
Marcello Alberton Herdt
Marcelo Benedit Tournier
Marcelo de Oliveira Pinto
Marcos Guimarães de Souza Cunha

Marcos Roberto Brasil
Maria Cristina C Nepomuceno
Carvalho
Nara Michelle Moura Soares
Nillianne Charles Ribeiro
Rafael Mesquita Stoque
Randson Souza Rosa
Renato Carlos Machado
Rogério Wagner da Silva
Sheila Moura Amaral
Simone Mattos do Nascimento
Sofia Banzatto
Suzana Silva Lira
Taíza Fernanda Ramalhais
Thaís Mendonça Resende
Thiago Luciano Rodrigues da Silva
Valéria Rodrigues da Conceição
Veronica Gabriela Ribeiro da Silva
Vivian Victoria Vivanco Valenzuela

Ciências Exatas e da Terra

Andrea Sartori Jabur
Cláudia Hitomi Watanabe Rezende
Dalvani Fernandes
Duany Dreyton Bezerra Sousa
Edfram Rodrigues Pereira
Evandro Preuss
Gisane Aparecida Michelin
Henrique Mariano Costa do Amaral
Henrique Pereira Oliveira Neves
Hermam Vargas Silva
Isidro ihadua
João César Abreu de Oliveira Filho
Lívia Sancho
Luiz Eduardo da Silva Gomes
Manolo Cleiton Costa de Freitas
Marco Aurélio Schünke
Marcos do Carmo Pereira
Rodolfo Lucas Bortoluzzi
Sonia Tomie Tanimoto
Vagner Marques de Moura
Valdecir Alves dos Santos Júnior

Ciências Humanas

Adailton Pereira de Melo
Alberto Carlos de Souza
Ana Margarida Theodoro Caminhas
Breno Henrique Ferreira Cypriano
Bruna Pacheco de Almeida
Bruno Cezar Silva
Camila Bueno Grejo
Camila de Vasconcelos Tabares
Carlos Eduardo Mauricio
Dalvani Fernandes
Dayane Cristina Guarnieri
Deiziane Pinheiro Aguiar
Eduardo Henrique Assis Cidade
Elisângela Rodrigues Carrijo
Eulalia Fabiano
Fernando Cesar Mendes Barbosa
Guilherme Camara Meireles
Guilherme William Udo Santos
Isadora Vianna Sento-Sé
João César Abreu de Oliveira Filho
João Francisco Severo Santos
Josael Jario Santos Lima
Josiane Nascimento Andrade
Luana Mayer de Souza
Marcos Pereira dos Santos
Marcos Pereira Magalhães
Maria Cristina C Nepomuceno
Carvalho
Marlon Nantes Foss
Miguel Rodrigues Netto
Oscar Yecid Bello Bello
Rebecca Bianca de Melo Magalhães
Sandra das Dores Souza
Silvio Santiago-Vieira
Susan Audrey Bueno dos Santos
Taíza Fernanda Ramalhais
Tatiane dos Santos Duarte
Vanderlei Frari
Vânia Maria Carvalho de Sousa
Vinícius Dantas Silveira

Ciências Sociais Aplicadas

Aline De Souza Lima Barbaroto
Ana Margarida Theodoro Caminhas
Bruna Pacheco de Almeida
Bruno Cezar Silva
Camila Nathalia Padula de Godoy
Cassio Rene Duminelli
Daniel Nascimento e Silva
Eduardo Henrique Assis Cidade
Elisângela Rodrigues Carrijo
Érika Rigotti Furtado
Eulalia Fabiano
Fernando Cesar Mendes Barbosa
Gisela da Costa Mascarenhas
Hermam Vargas Silva
Horácio Monteschio
Isabel das Mercedes Costa
Isadora Vianna Sento-Sé
João Clécio de Sousa Holanda
João Francisco Severo Santos
João Vitor Gomes Pinto
Josael Jario Santos Lima
Josiane Nascimento Andrade
Marco Aurelio de Jesus Mendes
Maria Cristina C Nepomuceno
Carvalho
Miguel Rodrigues Netto
Nelson Calsavara Garcia Junior
Renato Obikawa Kyosen
Rodolfo Lucas Bortoluzzi
Sandra Couto Barbosa
Solange Kileber
Susan Audrey Bueno dos Santos
Vanessa Paiva Costa Vale
Vinícius Dantas Silveira

Engenharias

Alejandro Victor Hidalgo Valdivia
Andrea Sartori Jabur
Andréia Monique Lermen
Cristhiane Michiko Passos Okawa
Daniele Cristina Ficanha

Elaine Patricia Arantes
Fernando Oliveira de Andrade
Henrique Mariano Costa do Amaral
Israel Henrique Ribeiro Rios
Jaime Andres Castaneda Barbosa
Marcelo Henrique da Silva
Marcelo Marques
Marcos Guimarães de Souza Cunha
Rafael Gonçalves Mafra
Rodolfo Lucas Bortoluzzi
Thiago Averaldo Bimestre
Valdecir Alves dos Santos Júnior
Vanessa Paiva Costa Vale

Linguística, Letras e Artes

Alberto Carlos de Souza
Geison Araujo Silva
Guilherme William Udo Santos
José Edson Barros Correia
Luciano de Oliveira Costa
Márcia Donizete Leite-Oliveira
Marlon Nantes Foss
Silvio Santiago-Vieira
Thiago Blanch Pires
Vera Regiane Brescovici Nunes

Multidisciplinar

Alejandro Victor Hidalgo Valdivia
Aline De Souza Lima Barbaroto
Ana Margarida Theodoro Caminhas
Andrea Sartori Jabur
Andréia Monique Lermen
Cláudia Hitomi Watanabe Rezende
Érika Alves Tavares Marques
Fernanda Imada de Lima
Fernando Oliveira de Andrade
Guilherme Camara Meireles
Isidro ihadua
José Amorim
Marcelo Marques
Vanessa Paiva Costa Vale

Estudos Avançados em Engenharia Civil

Editora Chefe Marcia A. A. Marques
Editora Adjunta Isabela Arantes Ferreira
Coordenador Editorial Lucas Batista Cunha
Bibliotecária Aline Grazielle Benitez
Diagramação Marcos Antonio Ribeiro Pereira
Revisão Os Autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Estudos avançados em engenharia civil [livro eletrônico] / organização Altevir Castro dos Santos. -- São Paulo : Bookerfield, 2021. PDF.

Bibliografia.
ISBN 978-65-89929-40-6

1. Engenharia civil - Estudo e ensino I. Santos, Altevir Castro dos.

21-96531

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia civil 624

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

DOI 10.53268/BKF21111100

Bookerfield Editora
São Paulo – Brasil
Telefone: +55 (11) 98441-4444
www.bookerfield.com
contato@bookerfield.com



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores declaram não haver qualquer interesse comercial ou irregularidade que comprometa a integridade desta obra; declaram que participaram da elaboração e revisão da obra, atestando a confiabilidade dos dados e resultados; declaram que a obra está livre de plágio acadêmico; declaram que a publicação desta obra não fere qualquer outro contrato por eles firmados; declaram ter atendido eventuais exigências de outras partes, como instituições financiadoras, para a publicação desta obra.

APRESENTAÇÃO

No Brasil a Engenharia Civil se utiliza de ciência aplicada na execução de ações indispensáveis prestadas à sociedade. Além da grande área das Engenharias, sua abrangência multidisciplinar frequentemente colabora com as demais áreas do conhecimento com soluções em benefício da sociedade.

Este livro reúne capítulos que trazem importantes avanços relacionados a estruturas, construção civil, eletrotécnica, hidráulica ambiental e geotecnia. Visando uma melhor organização, os capítulos estão agrupados nas seções: Ciência Onshore e Ciência Offshore.

A seção de Ciência Onshore é composta por cinco capítulos.

Pelo primeiro capítulo é avaliada a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais, construídos em Sistemas Leves de Madeira. Foram ensaiados protótipos em escala real com diferentes arranjos construtivos concluindo-se que o emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento da resistência e rigidez dos diafragmas.

O segundo capítulo aborda construções em madeira sob a ótica de sistemas com estruturas leves, apresentando análise computacional através de modelagem pelo método de elementos finitos. As análises demonstraram que a flecha real e a calculada para as vigas individuais, que compõem o diafragma de piso, apresentam reduções que variam de 18 a 30% quando comparadas com valores calculados para vigas isoladas.

No contexto dos sistemas construtivo e estrutural da Construção Civil, observa-se uma inevitável e progressiva tendência de substituição dos sistemas convencionais por sistemas industrializados. Por meio do terceiro capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre conceitos de construção industrializada, abordando o atual cenário técnico no Brasil, e confrontando algumas das principais tecnologias industrializadas presentes hoje no segmento da Construção Civil.

O quarto capítulo trata da engenharia aplicada ao ambiente offshore e apresenta uma análise de fadiga estrutural de conexões entre um reforçador longitudinal do costado e uma antepara transversal de uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO) convertida a partir de um navio petroleiro, sendo possível estimar a vida remanescente do FPSO.

Por meio do capítulo cinco são apresentados detalhes de um reforço estrutural utilizando polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) em uma plataforma offshore de concreto armado. Apesar de adotada uma técnica consolidada, pouco se sabe sobre o desempenho do reforço ao longo do tempo quando exposto ao ambiente marinho. Pelo capítulo é apresentado um panorama geral da estrutura após 17 anos da execução do reforço que comprovou o bom desempenho da técnica empregada.

A seção de Ciência Offshore é composta por quatro capítulos.

Pelo capítulo seis é abordada a utilização de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR), enquanto apresenta uma proposta de metodologia para avaliar o potencial fotovoltaico para a Região Metropolitana de Curitiba. Foi realizado ainda, um levantamento do montante de gases de efeito estufa que são deixados de emitir. O capítulo contribui para a implantação de políticas públicas de incentivo para esta fonte energética.

Geopolímeros são materiais alternativos ao cimento Portland, apresentando alta resistência mecânica e durabilidade química e térmica. Pelo capítulo sete são avaliadas as propriedades mecânicas de argamassas geopoliméricas contendo adição de Nanotubos de Carbono (NTC) assim como o método de incorporação do nanocompósito a argamassa. Os resultados mostram que os NTC quando bem distribuídos na matriz promovem um aumento de resistência à compressão e flexão das amostras.

O capítulo oito trata do fetch, importante elemento na quantificação de fenômenos gerados pelo vento em reservatórios de Usinas Hidrelétricas. A abordagem apresentada amplia a compreensão do fetch através de um conceito bidimensional via processamento computacional, permitindo a geração de mapas e a determinação segura dos valores máximos para cada direção e a localização dos maiores comprimentos para o reservatório de Tucuruí, este importante reservatório no Brasil.

Na quantificação dos fenômenos hidrodinâmicos em lagos e reservatórios é frequente a necessidade de conhecer o alcance das perturbações alcançadas pelas ondas ao se propagarem. Este fenômeno está relacionado à ressuspensão de sedimentos, desestratificação térmica, e erosão das margens, afetando o ecossistema aquático, as cadeias produtivas aquícolas e a vida útil de componentes mecânicos das UHE's. Por meio do capítulo nono é apresentado o conceito de profundidade de mistura aplicado ao reservatório da hidrelétrica de Lajeado, Tocantins. É realizado o mapeamento das profundidades máximas perturbadas pelas ondas de vento ao se propagarem, contribuindo para uma melhor compreensão da estratificação térmica e da ressuspensão de sedimentos no reservatório desta importante usina hidrelétrica.

SUMÁRIO

SEÇÃO 1: CIÊNCIA ONSHORE

CAPÍTULO 1	14
PISO ESTRUTURAL EM MADEIRA COMPOSTO POR CHAPAS DE OSB E VIGAS I, SUBMETIDO AO CARREGAMENTO EM SEU PLANO	
Altevir Castro dos Santos	
DOI: 10.53268/BKF21111101	
CAPÍTULO 2	32
PISO ESTRUTURAL EM MADEIRA COMPOSTO POR CHAPAS DE OSB E VIGAS I, SUBMETIDO AO CARREGAMENTO PERPENDICULAR	
Altevir Castro dos Santos	
DOI: 10.53268/BKF21111102	
CAPÍTULO 3	44
SISTEMA CONSTRUTIVO E ESTRUTURAL MODULAR EM AÇO: ASPECTOS DE VIABILIDADE E DE SUSTENTABILIDADE	
Maria Emilia Penazzi	
DOI: 10.53268/BKF21111103	
CAPÍTULO 4	59
DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO EM CURITIBA E REGIÃO	
Henrique Marin van der Broocke Campos	
Jair Urbanetz Junior	
Eloy Fassi Casagrande Junior	
DOI: 10.53268/BKF21111104	
CAPÍTULO 5	75
EFEITOS DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM GEOPOLÍMEROS A BASE DE METACAULINITA	
Daniele Silvéria Brandão e Silva	
Paulo Henrique Ribeiro Borges	
Peter Ludvig	
DOI: 10.53268/BKF21111105	

SEÇÃO 2: CIÊNCIA OFFSHORE

CAPÍTULO 6	95
ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS OFFSHORE TIPO UNIDADE FLUTUANTE DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA (FPSO): CONEXÕES ENTRE UM REFORÇADOR LONGITUDINAL DO COSTADO E UMA ANTEPARA TRANSVERSAL	
Mariana Rezende Caire de Barros de Castro	
Gilberto Bruno Ellwanger	
DOI: 10.53268/BKF21111106	
CAPÍTULO 7	107
REFORÇO ESTRUTURAL DE UMA PLATAFORMA OFFSHORE DO PORTO DO ITAQUI COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (CFRP)	
Jefferson Sousa Farias	
Dênio Ramam Carvalho de Oliveira	
Alcebiades Negrão Macêdo	
DOI: 10.53268/BKF21111107	
CAPÍTULO 8	117
CAMPOS DE FETCH NO RESERVATÓRIO DA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ	
Marcelo Marques	
Alejandro Victor Hidalgo Valdivia	
Elaine Patricia Arantes	
Fernando Oliveira de Andrade	
DOI: 10.53268/BKF21111108	
CAPÍTULO 9	127
CONCEITO DE PROFUNDIDADE DE MISTURA APLICADO AO RESERVATÓRIO DA UHE DE LAJEADO	
Marcelo Marques	
Fernando Oliveira de Andrade	
Cristhiane Michiko Passos Okawa	
Elaine Patrícia Arantes	
DOI: 10.53268/BKF21111109	
ÍNDICE REMISSIVO	139
SOBRE O ORGANIZADOR	143

A low-angle, upward-looking photograph of a modern skyscraper with a glass and steel facade. The building's structure is composed of a dense grid of dark metal beams and large glass panels. The perspective creates a sense of height and scale, with the lines of the building converging towards the top of the frame. The sky is a pale, clear blue.

CIÊNCIA ONSHORE

SEÇÃO 1

PISO ESTRUTURAL EM MADEIRA COMPOSTO POR CHAPAS DE OSB E VIGAS I, SUBMETIDO AO CARREGAMENTO EM SEU PLANO

Altevir Castro dos Santos

lattes.cnpq.br/4351406863862394

OSB.

1. INTRODUÇÃO

RESUMO - O objetivo geral é avaliar a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais, construídos em Sistemas Leves de Madeira, quando submetidos ao carregamento monotônico em seu plano. Para atendimento deste propósito foram ensaiados protótipos em escala real (2,50 m x 5,00 m) com diferentes arranjos construtivos e avaliou-se a influência dos seguintes parâmetros: utilização de dispositivos enrijecedores entre vigas, que constituem a ossatura do diafragma horizontal; rigidez das ligações e o efeito do espaçamento entre pregos na rigidez do conjunto, composto de madeira e chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) nacional. Dos ensaios realizados conclui-se que o emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento do número de pregos de fixação no perímetro das chapas e este acréscimo é responsável pelo aumento da resistência e rigidez dos diafragmas.

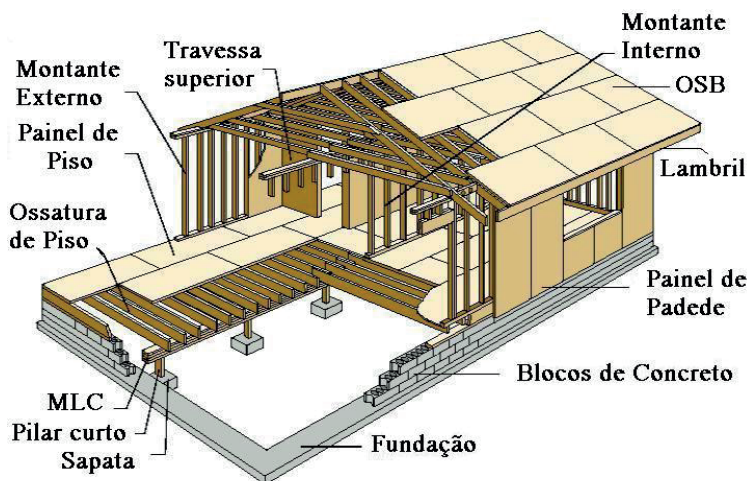
PALAVRAS-CHAVE: Estruturas em madeira; Diafragmas de madeira; Sistema plataforma; Edificações em madeira; Modelo numérico; Piso em

O sistema construtivo com estruturas leves de madeira (*Lightweight wood-frame construction*) é amplamente utilizado em países como os Estados Unidos, Canadá, França, Japão, Austrália, entre outros, o qual viabiliza maior industrialização e padronização do processo construtivo. A padronização, realizada pela indústria, dos vários componentes utilizados neste tipo de construção, como: esquadrias, louças, ferragens, metais etc., possibilita uma extrema eficiência nas várias etapas de montagem. Todas as peças se encaixam adequadamente graças a um eficiente controle de qualidade, exigido em todos os segmentos envolvidos na construção. Tudo isto assegura uma interferência mínima durante o processo de montagem, permite o cumprimento rigoroso do cronograma da obra e reduz custos devido a uma maior rapidez nos prazos de execução com racionalização de mão-de-obra e menor desperdício de material.

Esta técnica, exemplificada na Figura 1, utiliza basicamente

painéis estruturados com montantes de madeira de pequenas dimensões na seção transversal, geralmente pouco espaçadas, formando um quadro sobre o qual é colocado um fechamento de chapas de madeira reconstituída e/ou gesso acartonado, apresentando considerável economia de tempo, além da praticidade na execução e manutenção das instalações elétricas e hidráulicas.

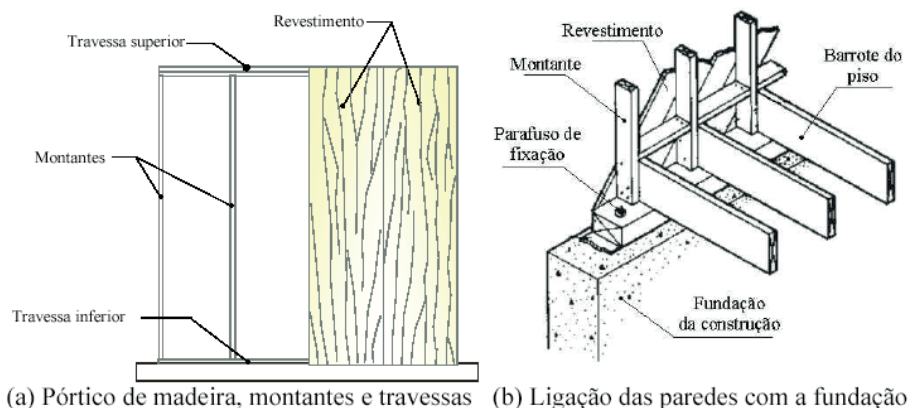
Figura 1: Representação do sistema construtivo com estruturas leves de madeira



Fonte: APA - The Engineered Wood Association (1997)

O sistema é formado basicamente por painéis estruturados de paredes e de piso. As paredes portantes, conforme ilustrado na Figura 2, são confeccionadas a partir de montantes verticais que possuem, geralmente, uma seção transversal de 38 mm de espessura e profundidade determinada pela espessura do isolamento térmico, na maioria das vezes de 140 mm. As paredes internas não necessitam deste tipo de isolamento e, por isso, a sua profundidade é usualmente de 90 mm. Os montantes suportam as solicitações verticais dos pisos e cobertura e são responsáveis pela rigidez transversal dos painéis estruturados. As chapas de madeira colocadas como fechamento são fixadas aos montantes através de pregos espaçados adequadamente de modo a prevenir a flambagem destes elementos estruturais (EINSFELD e PACHECO, 2000).

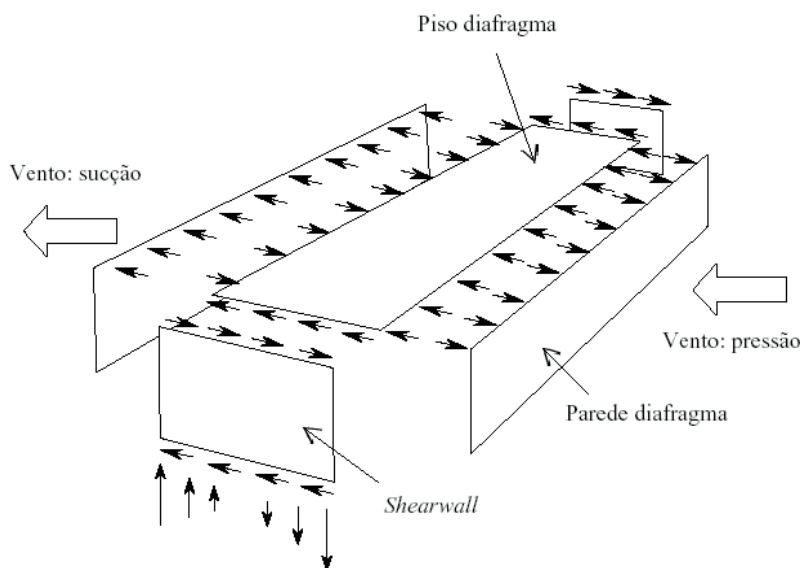
Figura 2: Constituição Básica da Parede Estrutural (*Shearwall*)



Fonte: VELOSO, L.A.C.M. (2002).

Chapas de revestimento em madeira recomposta servem, também, para compor a estruturação do painel, que se comporta como um diafragma de parede com significativa rigidez no seu plano. O fechamento interno das paredes externas, bem como das duas faces das paredes internas, pode ser realizado com o emprego de placas de gesso. Embora as placas de gesso não sejam consideradas portantes, elas possuem rigidez suficiente para contribuir no travamento dos componentes estruturais. A principal utilização deste material é para proteção contra incêndio, além de permitir que se obtenha um acabamento de melhor qualidade nas superfícies internas.

Este sistema é bastante estável e rígido, pois resiste de modo extremamente eficiente à ação de eventuais solicitações horizontais, como o efeito do vento. A pressão devida ao vento atua nas superfícies de fechamento da edificação e é distribuída para os montantes correspondentes nos painéis estruturados. As reações horizontais necessárias para equilibrar os montantes, transformam-se em cargas aplicadas nos diafragmas horizontais que formam o piso. As reações requeridas para equilibrar o piso correspondem às solicitações aplicadas nas paredes formadas por painéis estruturados (*shearwalls*) orientadas num plano paralelo à direção do vento. Estas cargas são levadas às fundações através destes diafragmas verticais colocados nos vários níveis da edificação, conforme esquema representativo mostrado na Figura 3.

Figura 3: Ação do vento nos painéis estruturados

Fonte: EINSFELD e PACHECO (2000)

Para projetar elementos tais como diafragmas de piso e paredes diafragma, é importante compreender o trajeto realizado pelas solicitações laterais através do plano de uma estrutura. A Figura 4 fornece uma descrição do comportamento básico de um edifício simples sob ação de um carregamento aplicado na parede lateral. Segue a relação de elementos numerados pela figura 4:

1. A solicitação, decorrente da ação do vento, é aplicada sobre a parede diafragma com transmissão de esforços ao diafragma de piso e à fundação através de paredes estruturais (*shearwalls*). O termo *shearwall* é utilizado para as paredes portantes solicitadas por esforços de cisalhamento no seu próprio plano, enquanto o termo diafragma é utilizado para os painéis que suportam carregamento na direção normal ao seu plano e transfere estes esforços para as paredes do tipo *shearwall*.

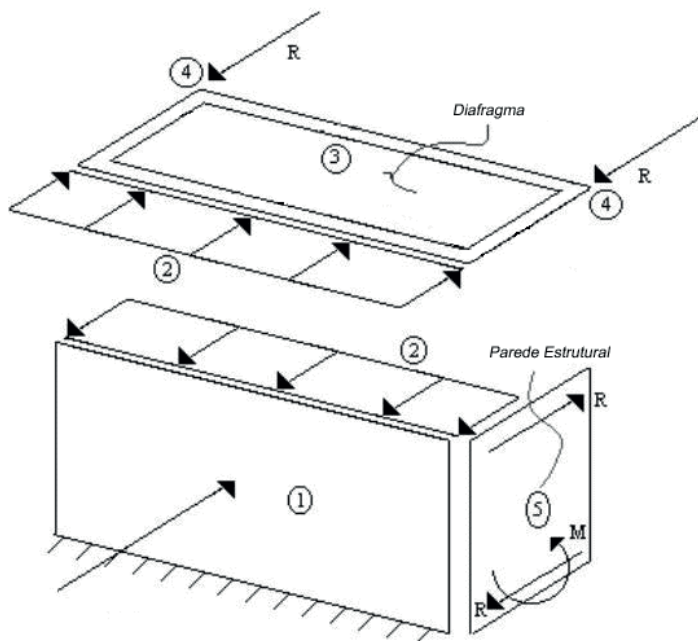
2. O diafragma horizontal e a fundação suportam a parede e desenvolvem conseqüentemente as reações no plano horizontal para equilíbrio do sistema.

3. Diafragma de piso é essencialmente uma laje com ossatura de elementos leves de viga, suportado por paredes estruturais.

4. No diafragma de piso, as solicitações, decorrentes das paredes estruturais (*shearwalls*), geram esforços reativos. O diafragma resiste às cargas geradas no próprio plano trabalhando como uma grande viga horizontal.

5. As paredes estruturais, quando corretamente projetadas, resistirão à transmissão de esforços do diafragma e realizará transferência de carga, e possível momento, à fundação.

Figura 4: Distribuição de esforços nos painéis estruturados

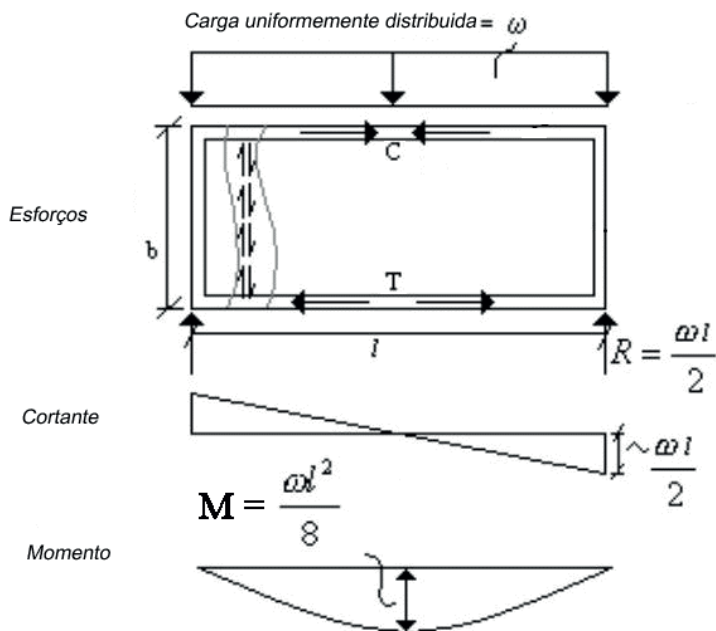


Fonte: Northern Arizona University (2000).

As paredes estruturais, responsáveis pela transmissão dos esforços verticais e horizontais à fundação, quando solicitadas pelos esforços horizontais, atuarão como elementos estruturais planos cujo mecanismo resistente principal se dá por cisalhamento. No caso das edificações residenciais de madeira, esses elementos transmitem o cisalhamento atuante em seu plano para as demais partes da estrutura, realizando o contraventamento do conjunto e garantindo a estabilidade estrutural.

A Figura 5 mostra o funcionamento de sistemas de assoalho ou de telhado quando projetados para funcionar como diafragmas horizontais em estruturas típicas de madeira. Na vista de planta, o sistema pode ser descrito essencialmente por um feixe de finos barrotes de madeira ou vigas I (*I-Joist*) com mesas de madeira e alma em OSB (Oriented Strand Board), apoiado nas extremidades pelas paredes estruturais com comportamento análogo ao de uma grande viga simplesmente apoiada, uniformemente carregada.

Figura 5: Analogia para dimensionamento de diafragma



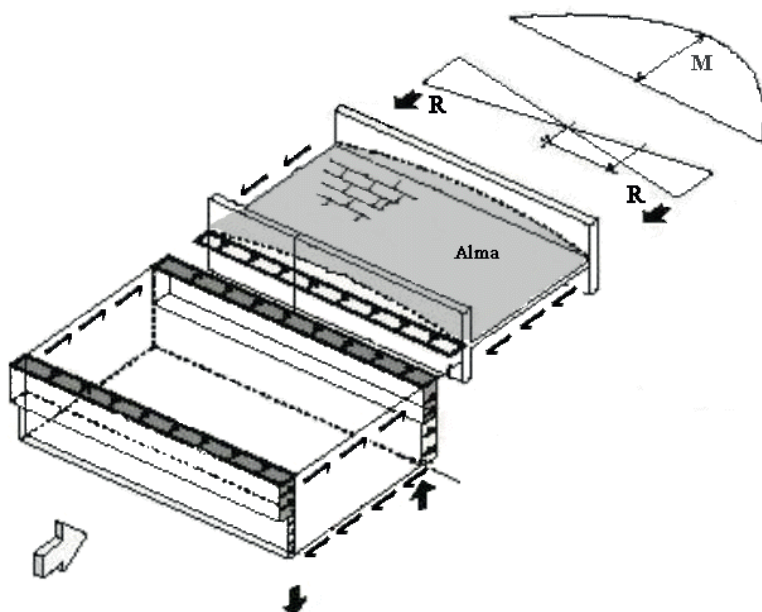
Fonte: Northern Arizona University (2000)

1.1 Rigidez do diafragma em seu plano

Várias teorias analíticas têm sido empregadas para descrever o comportamento de diafragmas horizontais de madeira sob ação de carregamento lateral, entre elas, a analogia da viga tem se mostrado mais apropriada para diafragmas construídos com chapas de madeira reconstituída. Este procedimento de analogia de viga foi substanciado através de ensaios de laboratório, conforme representação esquemática mostrada na Figura 6.

O projeto de diafragmas horizontais em sistemas leves de madeira, segundo esta teoria, dimensiona os painéis de fechamento para agirem como “alma” e os elementos do perímetro como “banzo” (chord), assumindo-se que os banzos resistem às solicitações normais à seção transversais e a alma resiste aos esforços de cisalhamento no plano do diafragma. O momento induz um binário de esforços axiais que é resistido pelos banzos e o pequeno momento observado nos banzos é ignorado.

Figura 6: Analogia da viga I para diafragma horizontal.



Fonte: Illinois Emergency Managment Agency (2000)

A alma do diafragma é representada por chapas de fechamento, normalmente de madeira compensada ou OSB – *Oriented Strand Board*. A conexão das chapas de fechamento aos elementos da ossatura é, normalmente, realizada através de pregos e/ou parafusos e são os responsáveis pela transferência de esforços de flexão para os banzos. O enrijecimento oferecido através da ligação dos painéis de fechamento aos componentes estruturais da ossatura reflete diretamente a rigidez da alma e do diafragma como um todo.

A resposta da estrutura de um edifício às forças de ação do vento ou cargas dinâmicas, induzidas por terremotos, depende diretamente da duração da ação sobre a estrutura. Sua duração será intimamente relacionada para determinação das características de deformação do diafragma (constante da mola). A determinação da rigidez do diafragma permite calcular a distribuição das forças laterais para os vários componentes verticais do edifício, no qual o diafragma é considerado apoiado de forma contínua.

Segundo a *ASCE Task Committee on Drift Control* (1988), citada pela AWC (1996), nos Estados Unidos da América a verificação do deslocamento lateral de edificações em madeira é feita, principalmente, devido à ação sísmica e de vento. O limite de deflexão comumente empregado para projetos

de edificações é da ordem de 1/600 a 1/400 da altura do edifício.

A deflexão em diafragmas de madeira (Δ) ocorre devido às ações combinadas de esforços de flexão nos banzos (Δ_b), esforços de cisalhamento na alma (Δ_s), deslizamento dos pregos (Δ_n) e deslizamento das emendas nos banzos (Δ_{ss}):

$$\Delta = \Delta_b + \Delta_s + \Delta_n + \Delta_{ss} \quad (1)$$

O deslocamento transversal máximo, no meio do vão, em diafragmas construídos com fechamento de chapas de madeira reconstituída pode ser determinada pela fórmula desenvolvida pela *American Plywood Association-APA* e apresentada no Apêndice A, do ATC-7 (1981) - “Construção de Diafragma de Madeira Compensada”. Segundo Skaggs e Martin (2004), esta fórmula é ainda hoje utilizada para o cálculo da deflexão de diafragmas retangulares sob ação de cargas distribuídas, com espaçamento uniforme entre pregos para fixação das chapas de fechamento e confeccionados com emprego de elementos enrijecedores. Segundo Bower (1974), a correlação entre os valores da deflexão teórica para a deflexão experimental dos diafragmas dada por esta expressão matemática é satisfatória.

$$\Delta = \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{96 \cdot EAb} + \frac{v \cdot L}{4 \cdot Gt} + 0,0006Le_n + \sum \frac{\Delta_c x_s}{2b} \quad (2)$$

em que:

Δ = Deflexão no centro do diafragma, mm

v = cisalhamento unitário máximo devido às cargas de projeto, ($v = V/b$), N/mm

V = cisalhamento máximo devido às cargas de projeto, N

L = comprimento do diafragma, mm

b = largura do diafragma, mm

E = Módulo de elasticidade do material do banzo do diafragma, N/mm²

A = área da seção do banzo do diafragma, mm²

G = módulo de rigidez das chapas de fechamento, N/mm²

t = espessura efetiva da chapa, mm

e_n = deformação de um prego para uma determinada carga, mm

x_s = distância da emenda do banzo ao apoio, mm

Δ_c = deslizamento individual da emenda do banzo, mm

Bower (1974) apresenta tabelas para valores de e_n remetendo ao *Uniform Building Code* as citações para valores de G e t .

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Ensaios preliminares

As propriedades mecânicas do OSB utilizadas neste trabalho foram obtidas através de ensaios realizados por Dias, *et al.* (2004). O módulo de elasticidade na direção vertical é de 4840 MPa e o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) é de 1820 MPa.

As propriedades mecânicas do Pinus foram obtidas através de ensaios descritos no Anexo B da Norma brasileira NBR-7190/1997 – Projeto de Estrutura de Madeira. O módulo de elasticidade longitudinal (E) é de 12600 MPa e adotou-se a relação $E : G \approx 14 : 1$ [Bodig & Jayne (1992)] para o módulo de elasticidade transversal (G), de aproximadamente 900 MPa.

O comportamento da rigidez e resistência das ligações realizadas com pregos anelados da série pneumática 2,7x70 ($\square = 2,7\text{mm}$; $L = 70\text{ mm}$), é apresentado por Santos *et al.* (2004).

2.2. Ensaio das Vigas

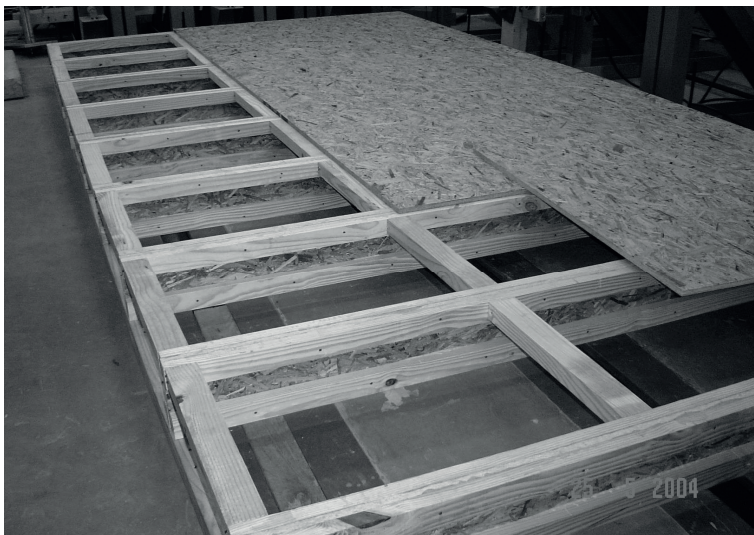
A confecção das Vigas-I com 2,5 metros de comprimento foi realizada de forma artesanal, empregando-se mesas em madeira de *Pinus sp* e alma em OSB – Oriented Strand Board, conforme metodologia e ensaios apresentados por Santos (2007).

2.3. Confecção dos protótipos de diafragmas horizontal de piso

A confecção dos protótipos, apresentada por Santos (2005), seguiu a seguinte metodologia: Confecção de dois banzos com seção 9 cm de espessura por 8 cm de altura e 500 cm de comprimento; fixação das cantoneiras metálicas nos banzos com pré-marcação da disposição das vigas-I; Distribuição e fixação das vigas-I nos banzos; fixação dos enrijecedores, quando empregados, nas vigas-I e, fixação das chapas de OSB nas vigas-I.

A Figura 7 mostra a confecção dos protótipos com emprego dos elementos enrijecedores de *pinus sp.*, de seção de 5 cm x 7 cm, entre as vigas-I. Tais elementos possibilitam a fixação de pregos entre vãos, nas extremidades das chapas de OSB, utilizadas como fechamento de piso.

Figura 7: Detalhe da fixação das chapas de OSB nos enrijecedores e nas vigas-I



2.3.1. Variáveis envolvidas na confecção dos protótipos

As variáveis avaliadas nos protótipos são apresentadas na Tabela 1 e os parâmetros fixos apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros variáveis para ensaio dos diafragmas horizontais de piso.

Parâmetros Variáveis	Especificação
(1) Espaçamento entre pregos	100 mm 205 mm 410 mm
(2) Configuração do diafragma	Sem enrijecedores Com enrijecedores Com enrijecedores despregados

Tabela 2: Parâmetros fixos para ensaio dos diafragmas horizontais de piso.

Parâmetros Fixos	Especificação
Altura da viga-I	200 mm
Seção das mesas da viga-I	2x(78 mm x 60 mm)
Espessura da alma da viga-I	18 mm
Espaçamento entre eixos das vigas-I	615 mm

Tipo de chapa de fechamento	OSB Home (Masisa) 0,84 m x 2,50 m
Espessura da chapa de fechamento	18 mm
Disposição das chapas de fechamento	2 inteiras + ($\frac{1}{2}$ + inteira+ $\frac{1}{2}$) + 2 inteiras
Tipo de prego	2,7 x 70 Anelado (pneumático)
Afastamento do prego-borda OSB	20 mm
Dimensões do protótipo	2,50 m x 5,00 m

Para a etapa experimental foram confeccionados doze protótipos em escala real (2,50 m x 5,00 m) com diferentes configurações conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Número de protótipos ensaiados de acordo com os parâmetros investigados

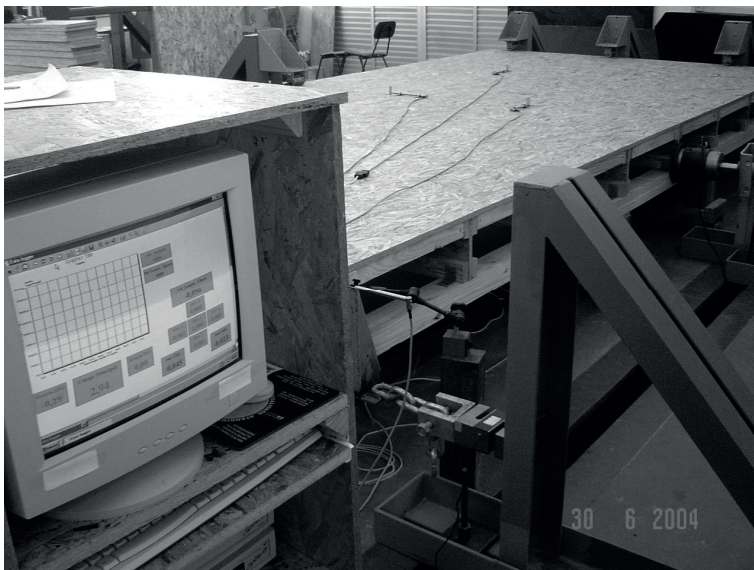
Espaçamentos entre pregos	Número de protótipos ensaiados		
	configuração 1	configuração 2	configuração 3
100 mm	-	dois	-
205 mm	três	três	dois
410 mm	-	dois	-

Para análise dos resultados de ensaios a **configuração 1** representa protótipos confeccionados sem o emprego de dispositivos enrijecedores e as **configurações 2 e 3** são, respectivamente, protótipos confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores vinculados e não vinculados às chapas de fechamento por intermédio de pregos.

2.4. Instrumentação utilizada no ensaio dos protótipos

Os ensaios experimentais dos diafragmas horizontais foram realizados com auxílio da laje de reação do Laboratório de Experimentação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, constituído de estruturas metálicas construídas com a forma triangular e dotadas de dispositivos rotativos com ajuste de altura para a contenção dos diafragmas durante os ensaios. Células de carga foram utilizadas para leitura das reações de apoio nas extremidades do diafragma e da aplicação da carga central, sendo que para o monitoramento e aquisição dos valores de deformação e carregamento empregou-se o sistema “spider 8” da HBM, conforme exibe a Figura 8.

Figura 8: Sistema de aquisição de dados empregado no ensaio dos protótipos



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

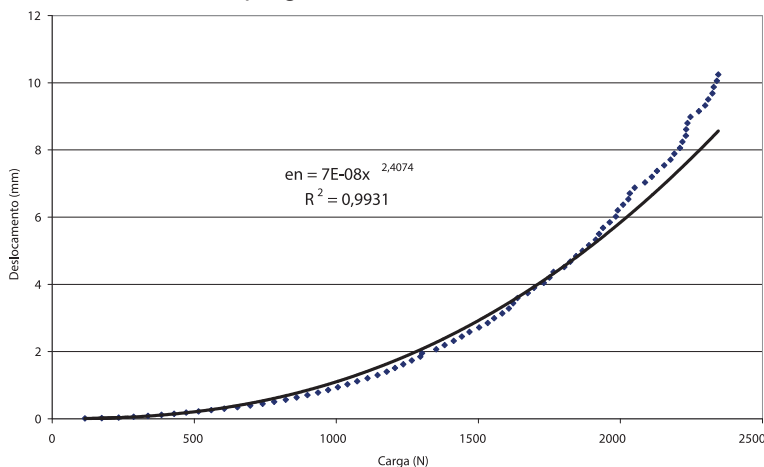
3.1. Formulação para cálculo do deslizamento da ligação

Segundo APA (2000), a contribuição devida ao deslizamento dos pregos, conforme equação 1.b, é determinada pelo diagrama carga deslocamento característico para o prego utilizado, sendo que o valor de “ e_n ” normalmente é expresso pela fórmula geral do tipo

$$e_n = a.(V_n)^b \quad (3)$$

Para determinação do valor de “ e_n ” para o prego anelado 2,7x70 ($\square = 2,7\text{mm}$; $L = 70 \text{ mm}$) foi empregado o diagrama carga-deslocamento apresentado por Santos *et al.* (2004). A partir dos resultados experimentais realizou-se análise de regressão conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9: Análise de regressão para determinação do deslizamento de pregos anelados 2,7x70



Ajustando a expressão da Figura 9 em função dos esforços de cisalhamento atuantes no diafragma, temos:

$$e_n = (V_n / 938)^{2,4074} \quad (4)$$

$$V_n = V / n \quad (5)$$

em que:

V = cisalhamento máximo devido às cargas de projeto, N ;

n = n° de pregos, aplicados nas chapas de fechamento nas extremidades do diafragma, submetidos ao cisalhamento máximo;

V_n = Cisalhamento atuante em um único prego, N ;

e_n = Deslocamento de um único prego devido ao esforço de cisalhamento, mm .

3.2. Modelo analítico

Segundo Skaggs e Martin (2004), Chun e Karacabeyli (2004), Breyer et al. (1998) e Bower (1974), a determinação da deflexão dos protótipos pode ser estimada através da formulação analítica apresentada, no entanto, foram necessárias correções em função da geometria das chapas de OSB (0,84 m x 2,50 m) e da concentração de cargas no carregamento. Desta forma, a equação 1.b apresentada, desconsiderando-se a parcela devido às emendas do banzo, é assim representada:

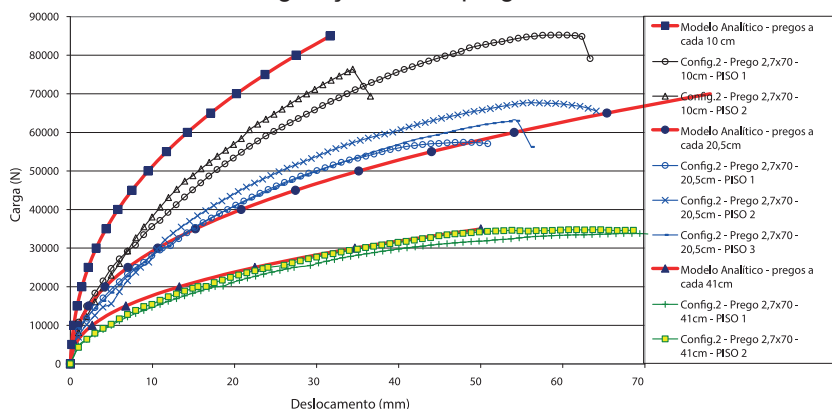
$$\Delta = \frac{v \cdot L^3}{12 \cdot EAb} + \frac{v \cdot L}{2 \cdot Gt} + 0,0017Le_n \quad (6)$$

Para o cálculo do termo “ e_n ” foi empregada a expressão dada pela equação 4.

Considerando que o modelo em questão é utilizado para estimativas de diafragmas confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos, comparações entre os resultados analíticos e experimentais são apresentadas a seguir, sob a forma gráfica, para as diferentes densidades de prego que seguiram distribuição uniforme.

A Figura 10, apresenta os resultados analíticos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos 2,7x70 ($\square = 2,7\text{mm}$; $L = 70\text{ mm}$), espaçados uniformemente.

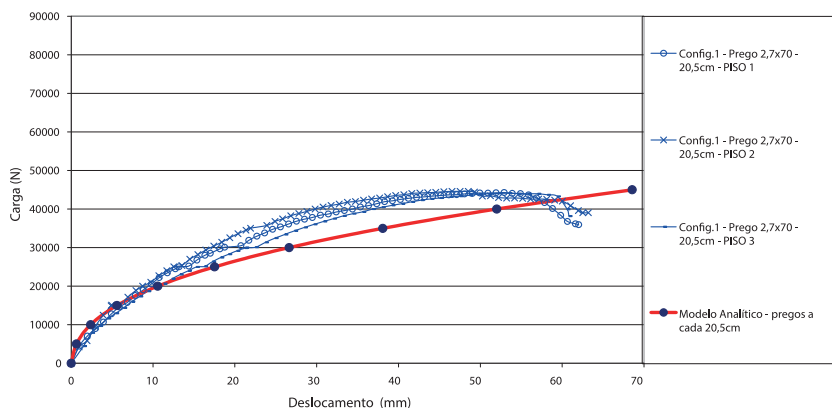
Figura 10: Resultados analíticos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70



A formulação analítica apresentada é utilizada para o cálculo da flecha máxima de diafragmas confeccionados, com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos. No entanto, ensaios realizados [APA, 1952, 1954, 1955, 1967], citados por APA (2001), sugerem que a deflexão de um diafragma que não emprega elementos enrijecedores é de aproximadamente 2.5 vezes a deflexão calculada de um diafragma construído com dimensões semelhantes e emprego de elementos enrijecedores. Se o diafragma é construído com vigas espaçadas com mais de 0,6 m entre centros, testes indicam um aumento adicional da deflexão de cerca de 20%.

A Figura 11 demonstra o comportamento da aplicação do critério sugerido por APA (2001), para protótipos confeccionados com a configuração 1 e emprego de pregos 2,7x70 ($\square = 2,7\text{ mm}$; $L = 70\text{ mm}$), espaçados a cada 20,5 cm.

Figura 11: Comparações entre resultados experimentais e do modelo analítico para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5cm



4. CONCLUSÃO

A formulação desenvolvida pela *American Plywood Association-APA* e apresentada neste artigo, permite estimar a deflexão de diafragmas confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores e distribuição uniforme de pregos. A fórmula permite determinar os valores parcelados devido aos esforços de flexão no banzo, cisalhamento da alma e deslizamento das emendas, os resultados obtidos representam estimativas bastante semelhantes aos ensaios experimentais realizados.

Foi confirmada a indicação da APA (2001), para o exemplo realizado neste trabalho, que a deflexão de um diafragma que não emprega elementos enrijecedores é de aproximadamente 2.5 vezes à deflexão calculada de um diafragma construído com dimensões semelhantes e emprego de elementos enrijecedores.

Dos ensaios realizados conclui-se que a resistência e rigidez dos diafragmas está diretamente relacionada ao número de pregos empregados na fixação das chapas de fechamento. O emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento do número de pregos de fixação no perímetro das chapas, este acréscimo é responsável pelo aumento da resistência e rigidez, não se comprovando a afirmativa de Falk e Itani (1989), que diafragmas que empregam elementos enrijecedores apresentam maior rigidez em função da armação adicional conferida por estes elementos.

Dentre os parâmetros avaliados observou-se que a rigidez do diafragma é significativamente influenciada pela rigidez das ligações e pela densidade de pregos utilizados na fixação das chapas de fechamento.

Sugere-se, portanto, o emprego de elementos enrijecedores nos projetos de diafragmas horizontais de pisos solicitados lateralmente. Tais

elementos são de fácil execução e possibilita significativa elevação da capacidade resistente, conferindo maior estabilidade ao conjunto devido ao emprego de um maior número de pregos.

REFERÊNCIAS

APA - The Engineered Wood Association. 1997. Panel Handbook & Grade Glossary [online], APA - TheEngineeredWoodAssociation, EngineeredWoodSystems, Tacoma, WA. [citado 20 maio 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.apawood.org/pdfs/managed/X505-R.pdf>

APA - The Engineered Wood Association. 2000. Wood Structural Panel Shear Wall Deflection Formula, Technical Topics, Tacoma, WA. [citado 28 outubro 2004], Disponível na World Wide Web:http://www.apawood.org/level_c.cfm?content=pub_tch_libmain

APA - The Engineered Wood Association. 2001. Deflection of Unblocked Wood Structural Panel Diaphragms, Technical Topics, Tacoma, WA. [citado 28 outubro 2004], Disponível na World Wide Web:http://www.apawood.org/level_c.cfm?content=pub_tch_libmain

ATC – Applied Technology Council. *Guidelines for Design of Horizontal Wood Diaphragms* (ATC-7), Redwood City, CA. 1981.

AWC (1996) - AMERICAN WOOD COUNCIL AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. Manual For Engineered Wood Construction. [citado 14 novembro 2002], Disponível na World Wide Web: <http://www.awc.org>

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992.

BOWER, W.H. Lateral Analysis of Plywood Diaphragms. *Journal of Structural Division*, Vol. 100(ST4):759-772; 1974.

BREYER, D.E., FRIDLEY, K.J., COBEEN K.E. *Design of Wood Structures ASD*. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y. 1998. 4 th ed

CENTER FOR INTERNATIONAL TRADE IN FOREST PRODUCTS. *Cintrafor News* 13(1) [S.l.: s.n.]. 1998. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/nltr/nltr0698.htm#WT/EWP>>. Acesso em 11 nov. 2002.

DIAS, G.L. *et al.* Determinação de propriedades mecânicas do OSB. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais*. . . Cuiabá: EdUFMT, 2004.p.51.

EINSFELD, R.A. e PACHECO, M. Utilização de Painéis Estruturados em Habitações Residenciais de Madeira, In: Encontro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7, 2000, São Carlos, *Anais*. . . São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 2000.p.91.

FALK, R.H. e ITANI, R.Y. Finite Element Modeling of Wood Diaphragms. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115(3):543-559; 1989.

ILLINOIS EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Companion manual to the windstorm mitigation manual for light frame construction. Julho, 2000. [citado 12 Abril 2003], Disponível na World Wide Web: http://www.state.il.us/iema/comp_manual.pdf

NORTHERN ARIZONA UNIVERSITY, College of Engineering and Technology Fall, 2000. Course Syllabus, Schedule, And Assignments for CENE 437-Wood & Masonry Design. [citado 04 Julho 2002], Disponível na World Wide Web: <http://jan.ucc.nau.edu/~dsl/egr437/class/diaphragms.html>

SANTOS, A.C. Pisos em sistema leve de madeira sob ação de carregamento monotônico em seu plano. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 90p.

SANTOS, A.C. *et al.* Avaliação experimental das ligações pregadas entre chapas de OSB e madeira de *pinus* quanto à solicitação lateral. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá. *Anais*. . . Cuiabá: EdUFMT, 2004.p.103.

SANTOS, A. C. Diafragmas horizontais de piso em madeira, confeccionados com chapas de OSB e vigas I, submetidos ao carregamento vertical. *Acta Sci. Tech.*, Maringá, v. 29, n. 2, p. 119-124, 2007.

SHERWOOD, G.E. e MOODY, R. C. *Light-frame wall and floor systems - analysis and performance*. [S.l.: s.n.]. 1989. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr59.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2002.

SKAGGS, T.D. e MARTIN, Z.A. Estimating Wood Structural Panel Diaphragm and Shear Wall Deflection. ASCE – Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 9, nº 3, August 2004, pp.136-141.

VELOSO, L.A.C.M. e MARTINEZ, M.A.B. Modelos Analíticos para a Avaliação do Comportamento Diafragmas de Paredes de Madeira. In: Encontro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 8, 2002, Uberlândia, *Anais*... Uberlândia: FECIV/UFU, 2002.p.200.

WOOD LIGHT-FRAME FLOOR DIAPHRAGMS, MADE WITH OSB PANELS AND I-JOISTS, SUBJECTED TO LATERAL LOADS

ABSTRACT - The main goal of this research is to evaluate the resistance and rigidity of wood light-frame floor diaphragms, when subjected to monotonic lateral forces acting in the plane of the floor. Full scale floor diaphragm specimens (2,50m x 5,00m) were tested with different constructive arrangements, and the influence of the following variables were examined: blocked vs. unblocked diaphragms, rigidity of the nailed joints between I-joists and sheathing ; and distance between nails around the perimeter of the OSB boards. The tests showed that the blocked floor diaphragms enable nailing

the whole perimeter of the boards, thus increasing its resistance and rigidity.

KEYWORDS: Timber structure; Wood Diaphragm; Platform frame; Wood frame construction; Finite element model; OSB Diaphragm.

PISO ESTRUTURAL EM MADEIRA COMPOSTO POR CHAPAS DE OSB E VIGAS I, SUBMETIDO AO CARREGAMENTO PERPENDICULAR

Altevir Castro dos Santos

lattes.cnpq.br/4351406863862394

Piso em OSB.

1. INTRODUÇÃO

RESUMO - Este trabalho aborda construções em madeira sob a ótica de sistemas com estruturas leves, apresenta análise computacional através de modelagem pelo método de elementos finitos de diafragmas de piso e vigas I submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos. O objetivo geral é avaliar a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais, construídos em Sistemas Leves de Madeira, quando submetidos a ações verticais. As análises foram realizadas através do programa computacional SAP2000 e foram avaliadas as influências dos seguintes parâmetros: espaçamento entre vigas que constituem os elementos de ossatura do diafragma horizontal e o espaçamento entre pregos de fixação do contrapiso composto por chapas de OSB (*Oriented Strand Board*). Ao final do trabalho comparam-se os resultados obtidos a partir das análises numérica e teórica e são apresentadas algumas conclusões.

PALAVRAS-CHAVE: Viga-I; Estruturas em madeira; Diafragmas de madeira; Método de Elementos Finitos;

Os diafragmas horizontais em estruturas leves de madeira têm como principal composição estrutural os múltiplos elementos de viga em paralelo. Desde o início do século passado, piso de tábua corrida tem sido usado nos EUA para distribuir as cargas verticais sobre as vigas da ossatura, mas durante os últimos 40 anos as chapas de madeira reconstituídas têm substituído o piso de tábuas quase que completamente. Cintrafor News (1998) avalia que, em 1995, o mercado de painéis estruturais nos Estados Unidos da América estava distribuído em: 45,5% de OSB (*Oriented Strand Board*), 44% de madeira compensada nacional e 10,5% madeira compensada ocidental. Destacando-se que desde 1980 o OSB vem apresentando custos menores do que a madeira compensada por espessura equivalente.

Nesse país, diafragmas horizontais de piso em madeira foram projetados por muito tempo considerando os elementos de viga da ossatura agindo independentemente,

com propriedades semelhantes a vigas isoladas. Esta concepção assume que as chapas empregadas como contrapiso apresenta somente a função de transferir cargas para as vigas isoladas, sem considerar sua contribuição para o acréscimo da resistência e rigidez final da estrutura como um todo.

Esta suposição desconsiderava os fatores de interação entre os materiais, que são capazes de afetar a rigidez e deformação da estrutura final de piso. Fato aceitável para a época, uma vez que os procedimentos de cálculo não dispunham de modelos mais modernos de projeto capazes de considerar o emprego de novos materiais e métodos construtivos. Porém, estudos posteriores revelaram que tais fatores trazem ganhos ao desempenho.

Segundo Sherwood e Moody (1989), a National Association of Home Builders observou 13% de aumento na rigidez de diafragmas de piso com o emprego de contrapiso de chapas compensadas pregadas e aumento de 38% quando utilizado contrapiso de chapas de madeira compensada com ligação pregada e colada aos elementos da ossatura. Williston e Abner (1962), *apud* Sherwood e Moody (1989), observaram que a flecha real e a calculada para diafragmas de piso são em média 40 por centos menores devido aos efeitos proporcionados pela interação das chapas de contrapiso com elementos que compõem a estrutura do diafragma de piso. Pesquisas desta natureza têm demonstrado que a ação combinada dos elementos de piso pode proporcionar aumentos significativos ao desempenho do diafragma de piso.

No entanto, Polensek *et al.* (1972) *apud* Sherwood e Moody (1989), testaram 44 diafragmas de piso observando aumento de rigidez na ordem de 15% a 104%, ressaltam que a grande variabilidade de valores observados segue a variabilidade natural dos elementos de madeira e assumir que todo elemento de viga da ossatura apresenta propriedades iguais é ignorar a variabilidade natural da madeira como material de construção. Assim a propriedade das chapas de contrapiso em minimizar as diferenças entre deflexões das vigas da ossatura, quando submetidas a cargas uniformes e a habilidade em distribuir cargas (quando as vigas estão sujeitas a cargas concentradas ou apresentam grande variação de propriedades mecânicas), é atualmente uma importante consideração para avaliação do desempenho de diafragmas de piso composto por vigas pré-fabricadas de madeira.

1.1. Ações Verticais

As Normas e Códigos Norte Americanos para piso geralmente declaram limites de deslocamento vertical como exigências de desempenho e não são explícitas quanto ao tempo de duração da carga aplicada. Um limite de flecha vertical estática de 1/360 do vão é usado na maioria de casos, porém 1/240 do vão é permitido pelo Basic Building Code (BOCA) quando não exista nenhum teto de gesso na parte inferior do piso.

No Brasil, a Norma para Projeto de Estruturas de Madeira, NBR-7190/97, preconiza que nas estruturas sobre as quais o público em geral pode caminhar, devem ser evitadas vibrações que tragam desconforto aos usuários. No caso particular de pisos sobre os quais as pessoas andem regularmente, como os de residências e escritórios, a menor frequência natural de vibração dos elementos da estrutura do piso não deve ser inferior a 8 Hz. Para as construções correntes, admite-se que esta condição fique satisfeita se a aplicação do carregamento correspondente à combinação de curta duração, não provocar flecha imediata superior a 15 mm.

As principais teorias que diferem da concepção de vigas isoladas para dimensionamento de diafragmas horizontais de piso em sistemas leves de madeira, são:

(1) Ação composta – Considera que vigas da ossatura de piso não agem só como uma viga simples transmitindo as cargas impostas. A ação combinada das chapas de contrapiso com os elementos da ossatura é similar ao da composição de uma viga T. A chapa de contrapiso vinculada aos elementos da ossatura age como a mesa da viga T e o elemento de ossatura como alma. Porém, essa viga composta não pode ser analisada pelas simples equações que definem as propriedades da maioria das seções compostas, porque a conexão das chapas de contrapiso com os elementos de vigas da ossatura é realizada através de ligações semirrígidas, existindo um plano de deslize entre os dois elementos. Também a presença de aberturas das chapas de fechamento do piso rompe a continuidade da mesa, dificultando a análise.

(2) Redistribuição de Esforços – As chapas de contrapiso executam uma segunda função importante, redistribuindo a carga entre os elementos de viga que compõem a ossatura do diafragma. Este comportamento é observado devido às chapas de contrapiso agirem como uma viga larga e muito fina, disposta continuamente sob vários elementos de viga da ossatura, resultando na redução das diferentes flechas individuais destas vigas que é decorrente da variabilidade de suas propriedades mecânicas. Assim sendo, as chapas de contrapiso propiciam maior enrijecimento na direção perpendicular ao elemento de viga, maior Redistribuição de Esforços e menor variação na deflexão das vigas de ossatura.

1.2. Ação composta

A rigidez e a resistência axial da mesa (chapas de contrapiso) dependem da interação das ações e rigidez de seus componentes: da interação rigidez-deslize e da presença ou ausência de aberturas da mesa na direção do vão das vigas da ossatura. Se as chapas de contrapiso forem coladas (ligação rígida) aos elementos da ossatura e não houver nenhuma abertura, o comportamento está completamente composto e suas propriedades poderão ser calculadas como uma viga T por uma análise

simples da seção equivalente.

Se não há nenhuma conexão entre chapas de contrapiso e vigas da ossatura, a ação dos dois elementos é analisada como membros independentes quando carregadas. A contribuição das chapas de contrapiso normalmente será desprezível em comparação aos elementos de viga da ossatura.

O estudo capaz de avaliar a condição intermediária destes dois extremos é o caso prático mais interessante e de maior complexidade matemática. Quando são utilizadas ligações mecânicas por meio de pregos e/ou parafusos, para fixação das chapas de contrapiso na ossatura, existe um certo grau de deslizamento entre a interface piso-ossatura. A rigidez desta ligação é definida em função da densidade de pregos e/ou parafusos e do diagrama tensão/deformação do respectivo elemento de ligação (prego ou parafuso). Embora a relação entre carga/deslocamento não seja linear para a maioria dos elementos mecânicos de ligação, a maioria das análises assume uma relação linear.

Estudos realizados por Santos (2005) demonstraram que o desempenho das ligações pregadas entre madeira maciça e chapas de madeira reconstituída é um parâmetro fundamental na modelagem de diafragmas de piso em sistemas leves em madeira. O comportamento estrutural dos diafragmas de piso está diretamente relacionado ao desempenho individual de cada ligação pregada, que trabalha essencialmente à solicitação lateral. Nesta situação, a ligação apresenta um comportamento não-linear, o que determina um comportamento igualmente não-linear do diafragma como um todo.

1.3. Redistribuição de Esforços

As chapas de contrapiso, dispostas na direção perpendicular ao vão do piso, agem como uma fina viga contínua que atravessa apoiando-se sobre os elementos da ossatura. Isto tem sido suficiente para dobrar a eficiência das vigas da ossatura na transmissão de esforços de carregamento para os apoios (Sherwood e Moody, 1989).

As chapas de contrapiso, disposto na direção perpendicular ao vão do piso, também têm um efeito importante no desempenho global do diafragma de piso, uma vez que as propriedades mecânicas dos elementos da ossatura variam com a variabilidade natural da madeira. Se as vigas da ossatura (ou vigas T compostas) agissem independentemente umas das outras, consideráveis diferenças aconteceriam nas deflexões individuais dos membros. Na realidade, as chapas de contrapiso agem como um elemento de distribuição que dirige porções mais altas da carga total para as vigas mais rígidas (e normalmente mais resistentes) e uma menor parte para as mais fracas. Este fenômeno tende o cálculo das vigas para um valor médio de resistência, reduzindo-se os desvios e resultando em menor variabilidade.

Esta redistribuição de carga também é benéfica à resistência final do diafragma de piso, porque a viga mais fraca e freqüentemente a menos rígida, dirige a carga para os elementos mais rígidos de sua proximidade.

A ação composta e a redistribuição de esforços acontecem simultaneamente porque dependem do mesmo elemento estrutural, as chapas de contrapiso. Assim, o objetivo duplo do incremento da rigidez, por ação composta e redução da variabilidade por redistribuição de esforços, conduz a demandas contraditórias. Projetistas terão que levar isto em conta, especificando materiais e considerando novas práticas de construção.

Atualmente, conforme será demonstrado neste trabalho, análises mais sofisticadas são providas através de modelos computacionais que consideram o efeito da ação composta e redistribuição de esforços e demais interações de todos os elementos constituintes da estrutura que compõem a ossatura do piso quando sujeitos a carregamentos verticais e horizontais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Ensaios preliminares

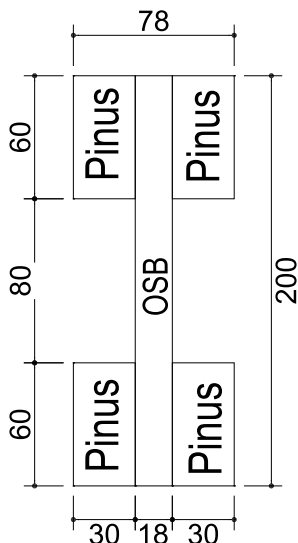
As propriedades mecânicas do OSB utilizadas neste trabalho foram obtidas através de ensaios realizados por Dias, *et al.* (2004). O módulo de elasticidade na direção vertical é de 4840 MPa e o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) é de 1820 MPa.

As propriedades mecânicas do Pinus foram obtidas através de ensaios descritos no Anexo B da Norma brasileira NBR-7190/1997 – Projeto de Estrutura de Madeira. O módulo de elasticidade longitudinal (E) é de 12600 MPa e adotou-se a relação $E : G \approx 14 : 1$ [Bodig & Jayne (1992)] para o módulo de elasticidade transversal (G), de aproximadamente 900 MPa.

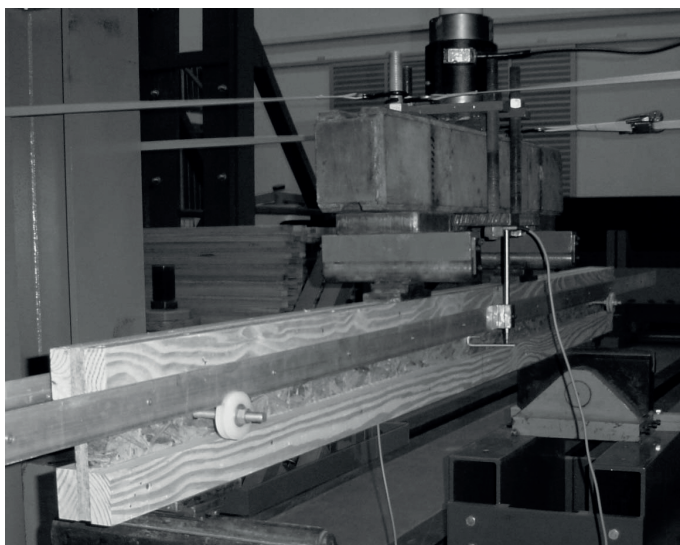
O comportamento da rigidez e resistência das ligações realizadas com pregos anelados da série pneumática 2,7x70 ($\varphi = 2,7\text{mm}$; $L = 70\text{ mm}$), utilizados nos modelos computacionais, é apresentado por Santos *et al.* (2004).

2.2. Ensaio das Vigas

A confecção das Vigas-I com 2,5 metros de comprimento foi realizada de forma artesanal, empregando-se mesas em madeira de *Pinus sp* e alma em OSB – Oriented Strand Board, com seções demonstradas na Figura 1, conforme metodologia apresentada por Santos (2005).

Figura 1: Seção Transversal das Vigas-I (dimensões em mm)

A capacidade de resistência e os módulos de elasticidade das vigas-I foram determinados experimentalmente através de ensaios à flexão com arranjo a quatro pontos, apoios espaçados de 210 centímetros e aplicadores de carga posicionados a 70 centímetros dos apoios, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Arranjo experimental dos ensaios a quatro pontos

2.3. Análise Teórica das Vigas

A avaliação teórica deste tipo de viga-I é apresentada por Lima *et al.* (2004), que emprega metodologia proposta por La Rovere (1998). A metodologia substitui a seção transversal composta por materiais heterogêneos em uma seção equivalente de material homogêneo. Assim, a flecha teórica das vigas pode ser determinada pelo princípio dos Trabalhos Virtuais considerando os efeitos do momento fletor e dos esforços cortantes através da seguinte formulação:

$$\delta = \delta_F + \delta_C = \int_L \frac{M\overline{M}}{EI_H} ds + \int_L \eta \frac{Q\overline{Q}}{GA_H} ds \quad (1)$$

em que:

I_H = inércia da seção homogeneizada

A_H = área da seção homogeneizada

2.4. Modelo numérico

O programa computacional SAP2000-Nonlinear foi empregado para desenvolver o modelo numérico através do método dos elementos finitos com formulação não linear. Os barrotes de Pinus sp, que correspondem às mesas das vigas, foram discretizados por elementos sólidos, a alma das vigas e o painel em OSB por elementos de placas tipo “shell” e os pregos das ligações por elementos de molas com propriedades elásticas multilíneas. A condição de contorno empregada restringiu os deslocamentos horizontais da cabeceira das vigas, os modelos ajustaram pregos espaçados de 105 mm e 210 mm e vigas espaçadas de 40 cm e 60 cm.

Para análise das vigas isoladas empregou-se o modelo ilustrado na Figura 3 e para análise do comportamento dos pisos empregaram-se modelos semelhantes ao ilustrado na Figura 4.

Figura 3: Discretização do modelo empregado para análise de vigas isoladas

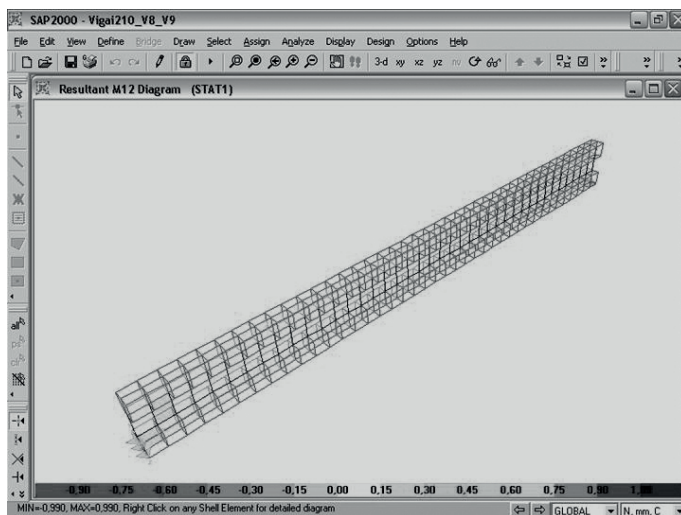
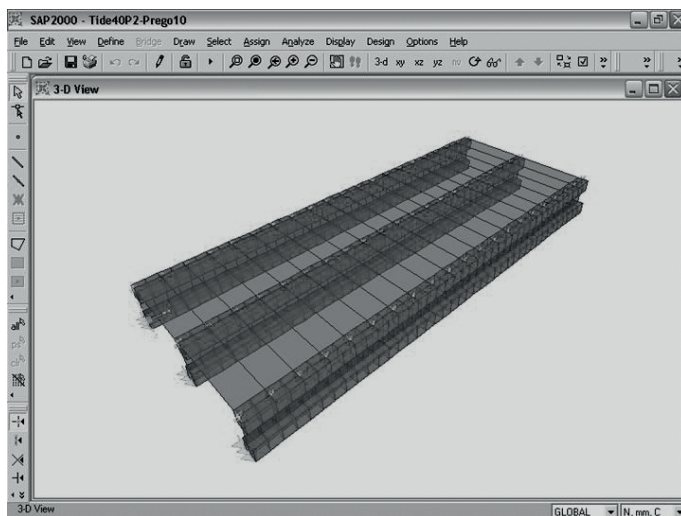


Figura 4: Discretização do modelo com pregos espaçados de 105mm e vigas de 40 cm



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios experimentais das vigas-I foram utilizados para avaliar o modelo numérico desenvolvido através do programa computacional SAP2000-Nonlinear. A Tabela 1 apresenta os valores experimentais de carga máxima de ruptura ($F_{\text{máx}}$) e flechas máximas ($\delta_{\text{exp.}}$) no

meio do vão para as vigas ensaiadas e a flecha teórica ($\delta_{\text{Teórico}}$), obtida através da equação (1).

Tabela 1: Comparativo entre valores experimentais e teóricos das vigas-I.

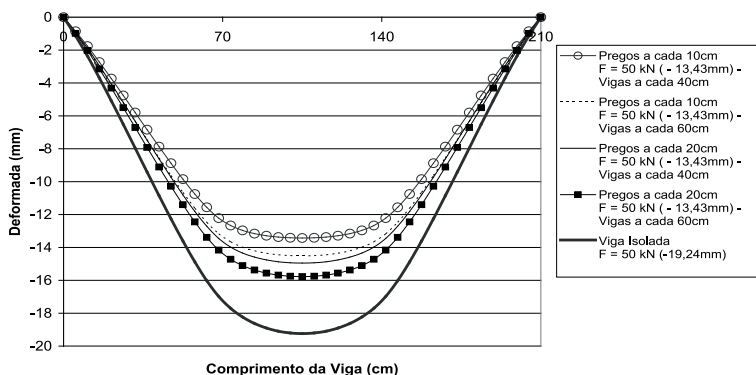
Viga	$F_{\text{máx}}$ (KN)	δ_{exp} (mm)	$\delta_{\text{Teórico}}$ (mm)
1	53,63	14,75	18,94
2	45,83	16,18	16,19
3	64,74	22,85	22,86
4	49,88	19,95	17,62
5	49,16	15,62	17,36
6	51,32	15,63	18,12
7	68,53	22,48	24,20
8	61,80	19,94	21,83
9	45,32	18,69	16,01
10	50,61	16,40	17,87
11	58,91	20,50	20,81
12	49,32	18,05	17,42
Média	54,09	18,42	19,10
D.Padrão	7,60	2,75	2,68
C.V. (%)	14,04	14,95	14,04

Observa-se na Tabela 1, diferentes deflexões individuais dos elementos de viga, a dispersão dos resultados pode ser explicada pela variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais empregados para sua confecção. Variações entre valores experimentais e teóricos são observadas pelo mesmo motivo.

O valor do deslocamento máximo calculado pelo modelo computacional ilustrado na Figura 3, desenvolvido para descrever o comportamento das vigas-I isoladas, é igual a 20,81mm quando empregadas características mecânicas descritas anteriormente, através de ensaios preliminares e, valor médio da carga de ruptura apresentado na Tabela 1.

A análise das vigas empregadas como elementos de ossatura dos diafragmas de piso, foram realizadas através do modelo computacional, ilustrado na Figura 4, seus resultados são apresentados na Figura 5. Observa-se que a flecha máxima no meio do vão é influenciada pela densidade de pregos e o espaçamento entre vigas. Nesta Figura a espessura das chapas de OSB, empregadas como contrapiso, são mantidas constantes e iguais a 18 mm. Embora reconhecidas, as influências de diferentes espessuras não foram consideradas devido ao vão proposto para análise neste trabalho.

Figura 5: Influência da densidade de pregos e espaçamento das vigas na deformada

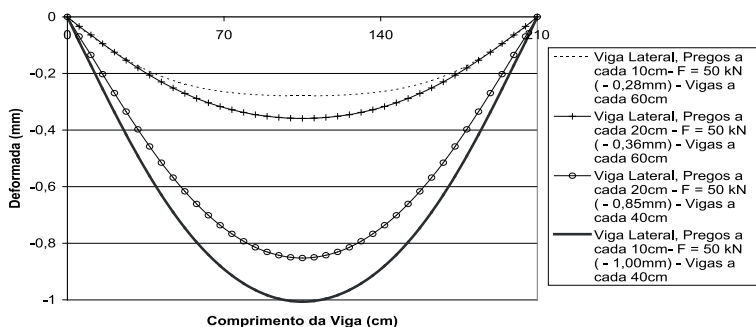


Observa-se na Figura 5, para um carregamento de 50kN, que o emprego de vigas espaçadas de 40cm e ligadas ao contrapiso a cada 10,5cm através de pregos, apresentaram valores de flechas centrais 30% inferiores aos valores se calculadas como vigas isoladas. Para a mesma densidade de pregos esta diferença reduz-se para 24,6% quando as vigas são espaçadas de 60cm.

Observa-se também na Figura 5, para um carregamento de 50kN, que o emprego de vigas espaçadas de 40cm e ligadas ao contrapiso a cada 21cm através de pregos, apresentaram valores de flechas centrais 22,3% inferiores aos valores se calculadas como vigas isoladas. Para a mesma densidade de pregos esta diferença reduz-se para 18% quando as vigas são espaçadas de 60cm.

A análise das vigas adjacentes à viga que recebe o carregamento, ilustrado na Figura 4, também foram calculadas através do modelo computacional e seus resultados são apresentados na Figura 6.

Figura 6: Influência da densidade de pregos e espaçamento das vigas na deformada das vigas adjacentes à viga que recebe o carregamento



Comparando-se as flechas no meio do vão das vigas adjacentes ao carregamento, através da Figura 6, com os valores ilustrados na Figura 5 para as vigas centrais que recebem o carregamento, podemos verificar que: para um carregamento de 50kN, a flecha no meio do vão das vigas adjacentes representou 7,4% dos valores das flechas observadas para as vigas centrais, quando empregadas vigas espaçadas de 40cm e ligadas ao contrapiso a cada 10,5cm através de pregos. Para o mesmo espaçamento entre vigas esta diferença reduz-se para 5,7% quando as vigas são ligadas ao contrapiso a cada 21cm através de pregos. Para o carregamento em estudo e vigas espaçadas de 60cm, a flecha no meio do vão das vigas adjacentes representou 2,3% dos valores das flechas observadas para as vigas centrais, quando empregadas ligações ao contrapiso a cada 10,5cm através de pregos. Para o mesmo espaçamento entre vigas esta diferença reduz-se para 1,9% quando as vigas são ligadas ao contrapiso a cada 21cm através de pregos.

4. CONCLUSÃO

Análises de vigas que compõem os elementos de ossatura dos diafragmas horizontais de piso são influenciadas, entre outros fatores, pelo espaçamento entre as vigas e a densidade de ligações pregadas, utilizadas para fixação das chapas de contrapiso. O dimensionamento destes elementos supondo agirem independentemente, com propriedades semelhantes a vigas isoladas, desconsidera os efeitos das interações de todos os elementos constituintes do sistema estrutural de piso capazes de conferir maior resistência e rigidez da estrutura como um todo.

As análises desenvolvidas neste trabalho demonstraram que a flecha real e a calculada para as vigas individuais, que compõem o diafragma de piso, apresentam reduções que variam de 18 a 30% quando comparadas com valores calculados para vigas isoladas. A maior diferença corresponde ao emprego de vigas espaçadas de 40cm com pregos fixados a cada 10,5cm, esta diferença é reduzida até 18% com emprego de vigas espaçadas de 60cm e pregos fixados a cada 21cm.

O emprego de análise numérica através do Método de Elementos Finitos conduz a resultados mais precisos para o dimensionamento deste tipo de estrutura e seu emprego poderá representar maior economia e confiabilidade na execução de edificações em sistema leves em madeira.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma NBR - 7190: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992.

CENTER FOR INTERNATIONAL TRADE IN FOREST PRODUCTS. *Cintrafor News* 13(1) [S.l.: s.n.]. 1998. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/nltr/nltr0698.htm#WT/EWP>>. Acesso em 11 nov. 2002.

DIAS, G.L. *et al.* Determinação de propriedades mecânicas do OSB. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p.51.

LA LOVERE, H.L. (1998). Aplicações do método de homogeneização da seção a vigas de madeira laminada colada. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis-SC: EdUFSC, 1998., Vol.1, p.391-400.

LIMA, A.L. *et al.* Análise de vigas I em madeira com mesa em pinus e alma em OSB. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p.394.

SANTOS, A.C. Pisos em sistema leve de madeira sob ação de carregamento monotônico em seu plano. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 90p. 2005.

SANTOS, A.C. *et al.* Avaliação experimental das ligações pregadas entre chapas de OSB e madeira de *pinus* quanto à solicitação lateral. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p.103.

SHERWOOD, G.E. e MOODY, R. C. *Light-frame wall and floor systems - analysis and performance*. [S.l.: s.n.]. 1989. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgrt59.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2002.

WOOD LIGHT-FRAME FLOOR DIAPHRAGMS, MADE WITH OSB PANELS AND I-JOISTS, SUBJECTED TO VERTICAL LOADS

ABSTRACT - This work is focused on lightweight wood-frame constructions, presents a finite element modeling of floor diaphragms and wood I-joists subjected to four-point bending. It presents the results of experimental tests on wood I-joists subjected to vertical loads. The main goal of this research is to evaluate the resistance and rigidity of wood light-frame floor diaphragms, when subjected to monotonic vertical forces acting in the plane of the floor. The analysis is performed by SAP2000 computer program were tested with different constructive arrangements, and the influence of the following variables were examined: distance between wood I-joists and distance between nails around the perimeter of the OSB boards. Finally, a comparison between analytical and numerical results is performed.

KEYWORDS: I-Joists; Timber structure; Wood Diaphragm; Finite element model; OSB Diaphragm.

SISTEMA CONSTRUTIVO E ESTRUTURAL MODULAR EM AÇO: ASPECTOS DE VIABILIDADE E DE SUSTENTABILIDADE

Maria Emilia Penazzi

lattes.cnpq.br/5255684877046557

Universidade Federal de São Carlos
– UFSCar

RESUMO - No contexto dos sistemas construtivo e estrutural da Construção Civil, observa-se uma inevitável e progressiva tendência de substituição dos sistemas convencionais por sistemas industrializados. Tal transição configura fator positivo e capaz de impulsionar uma gradativa mudança de paradigmas, com maior consideração de fatores ambientais e de sustentabilidade nas construções. Valendo-se inicialmente de uma abordagem teórica, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos de construção industrializada, abordando o atual cenário técnico no Brasil, e confrontando algumas das principais tecnologias industrializadas presentes hoje no segmento da Construção Civil. Na sequência, procurou-se demonstrar a viabilidade técnica de utilização do sistema construtivo e estrutural em aço, através do desenvolvimento de um módulo adequável a variadas tipologias de edificações. Para tal abordagem,

foi necessária a elaboração de soluções técnicas, de modo flexível e adaptável à concepção projetual inicial, contemplando não somente a geometria espacial em relação à sua estrutura, mas também considerando os sistemas construtivos, instalações e logística, dentro da temática da industrialização da construção. Como resultado, foi elaborada uma modulação tecnicamente viável de ser executada, que pode ser aplicada ou adequada a várias situações de projeto, adaptando o sistema modular à demanda do espaço didático, destacando os ganhos ambientais decorrentes desta opção projetual.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; Sistema modular em aço; Industrialização da construção; Racionalização.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, em detrimento a questões de cunho ambiental, o cenário construtivo brasileiro sempre colocou no primeiro plano a importância da lucratividade. Tal contexto obviamente configura-se natural dentro de uma economia de mercado fundamentada no sistema capitalista.

Porém, a atual situação da

construção civil no Brasil pode ser considerada favorável à adoção de novas tecnologias, com maior potencial de disseminação de conceitos teóricos e práticos de processos sustentáveis. Fatores como o aumento de custo de mão de obra, a situação econômica, a crescente demanda por novas edificações para diferentes utilizações, a normatização de critérios e requisitos de desempenho, a abertura do mercado da construção civil com a importação de novos produtos e tecnologias, entre outros, formam um terreno propício para que empresas construtoras busquem na industrialização da construção alternativas viáveis de serem implantadas, tecnicamente e financeiramente. Em tais processos, inovadores em múltiplos aspectos, os ganhos em adequação aos quesitos ambiental e sustentável são intrínsecos, podendo ser citados:

1. **Canteiro de obras:** devido à maior produtividade, agilidade e precisão, minimiza-se a necessidade de retrabalhos, geralmente associado a possíveis demolições e adequações in loco, ocasionando queda na quantidade de resíduos gerados, e conseqüentemente, maior organização e limpeza no ambiente construtivo. Neste cenário favorável do ponto de vista organizacional e ambiental, otimiza-se a gestão dos resíduos, tanto pela menor quantidade gerada, como pela maior capacidade das diferentes tipologias de materiais descartados.

2. **Consumo de insumos:** redução de perdas de materiais, devido a necessidade de uma agenda de trabalho voltada para a sustentabilidade, envolvendo ações que minimizem o uso da água e energia, reduzam a perda de materiais por uso inadequado dos recursos ferramentais e tecnológicos, diminuam as emissões totais de CO₂ com transporte de insumos e produtos e não gerem um impacto direto na paisagem original.

3. **Mão de obra:** ampliação da conscientização ambiental e qualificação pessoal, fazendo investimento em processos produtivos e qualificação de mão de obra.

4. **Cronograma:** construção consciente e com sustentabilidade, além de evitar os prejuízos que uma construção tradicional traria ao meio ambiente, pode diminuir o custo final da obra e seu tempo de execução.

Neste contexto, os sistemas estruturais e construtivos, podem se apresentar sob diferentes formas. Tudo vai depender das variáveis envolvidas no desenvolvimento do projeto, onde uma determinada solução, ou conjunto delas, contribui para a adoção de uma composição específica de elementos que vão formar um sistema. A forma de estabelecimento do desempenho arquitetônico e construtivo, e na busca cada vez mais crescente da sustentabilidade, evitando os impactos negativos das obras urbanas, ganha importância relevante o ciclo de vida dos produtos, como exposto na NBR 15575-1 (2013), é comum e pensada por meio da definição de requisitos qualitativos, critérios quantitativos ou premissas, e métodos de avaliação.

Falhas na escolha do sistema estrutural e construtivo, para NBR

15575-1 (2013), podem surgir devido à falta de diretrizes no desenvolvimento de projeto, emprego de materiais, na elaboração de especificações e detalhamento executivo, que acabam por levar a improvisações no momento da execução, abrindo margem para o surgimento de futuros problemas, dificultando a eficiência da edificação, e consequentemente, diminuindo a qualidade para o usuário, assim como a vida útil.

A atividade da construção de edifícios possui relativa importância frente à movimentação econômica do país. De acordo com Linner e Bock (2012) a temática da qualidade no setor da construção civil vem adquirindo crescente importância. Em relação à industrialização, os autores afirmam que no setor da construção civil ocorreu o deslocamento dos processos convencionais, do canteiro para a fábrica, com declínios no desperdício de material e mão de obra, notadamente, em função da produção seriada, por meio da pré-fabricação de componentes.

Alinhando-se a tal cenário, o sistema construtivo modular em aço, quando associado à indústria da construção civil, busca aumentar a produtividade, diminuir o desperdício, minimizar perdas e prazos durante a obra, permitindo a industrialização e racionalização nos processos (FREITAS; CRASTO, 2006).

Dentro destas colocações, o intuito deste trabalho é agregar conhecimento relativo à melhoria do processo construtivo eficiente e seguro, com alta durabilidade e qualidade, propondo parâmetros para a adoção de sistema estrutural e construtivo modular em aço, de modo a permitir a elaboração de soluções técnicas de modo flexível e adaptável à concepção do edifício, compreendendo também o atendimento ao respectivo programa de necessidades do espaço didático.

2. SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS

Para Vivan (2016), o processo construtivo na industrialização apresenta caráter repetitivo, bem representado pelo sistema de pré-fabricados, com características que o diferenciam dos sistemas mais tradicionais ou convencionais, estes com alta taxa de trabalho artesanal. No entanto, antes de se tornarem tarefas muito repetitivas, os procedimentos e os processos devem ser altamente coerentes, para não se correr o risco de reproduzirem, em larga escala, também os erros. Ainda de acordo com o autor, o grande diferencial dos processos construtivos industrializados é verificado na padronização, racionalização dos materiais e otimização da mão de obra, pois o sistema utiliza-se de equipamentos e dispositivos para pré-fabricação, precedidos da montagem dos elementos estruturais básicos da construção, como paredes, coberturas e lajes (GOMES; VIVAN; SICHIERI; PALIARI, 2015).

A partir daí foram criados sistemas de pré-fabricação dos elementos para obras e desenvolvidos equipamentos para executar a montagem de

tais elementos na construção de edificações, de modo que tais sistemas possam viabilizar a construção de edifícios em menor espaço de tempo, com custos reduzidos e oferecendo os benefícios da padronização e otimização construtiva, que se refletem em ganho dos índices de qualidade e racionalização e, conseqüentemente, na interface frente aos parâmetros de sustentabilidade. Dentro de tal viés, Vivan (2016) aponta que inovações nas bases técnicas e tecnológicas na produção de edificações começam com a iniciativa de se levar a produção de edificações do canteiro de obras tradicional para um ambiente no qual tais unidades sejam produzidas a partir de uma linha de montagem. Assim, o autor propõe a busca pela viabilidade da substituição dos sistemas construtivos tradicionais por um ambiente fabril.

Diante do exposto, nota-se que a cada dia surgem novos produtos pré-fabricados ditos inovadores, para atender à crescente demanda de industrialização no canteiro de obra, o que pode ser positivo para o meio ambiente em que a obra esta inserida.

Em tempos de economia aquecida, construtoras concorrem por obras públicas de infraestrutura, e o aumento na demanda por profissionais especializados pressiona os custos de contratação. Como resultado, o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC) sobe, a margem de lucro dos empreendimentos fica achatada, e encarecem os imóveis para o consumidor final.

Neste contexto, os sistemas construtivos industrializados, por exemplo, os pré-moldados e os pré-fabricados, racionalizam recursos humanos, e são executivamente consideravelmente mais rápidos. Estruturas com maior rentabilidade produtiva (por exemplo, com transporte de peças inteiras), impactam menor necessidade de entrega de materiais para fabricação *in loco* das estruturas, o que significa menor consumo de combustíveis fósseis e de insumos ligados aos meios de transporte (FREITAS; CRASTO, 2006).

Desta forma, diferente da construção convencional, onde todas as tarefas das obras são executadas através do elemento humano, a construção industrializada utiliza equipamentos automatizados para fabricação e montagem dos seus componentes ou elementos construtivos. Oferecem vantagens como organização de processos executivos, qualidade, controle tecnológico, segurança e agilidade construtiva.

3. ASPECTOS DE VIABILIDADE: MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando demonstrar a viabilidade executiva e a presença de aspectos inerentes à sustentabilidade do sistema construtivo adotado nesta pesquisa, considerando o levantamento bibliográfico exposto anteriormente, foi estudado o leiaute do Edifício de Aulas Teóricas 7 (AT7), localizado na UFSCar Campus São Carlos, visando a adaptação de seu projeto inicial, proposto e executado em estrutura de concreto tradicional, à concepção de um projeto estruturado sobre o sistema construtivo modular estruturado em

aço.

O edifício de aulas teóricas AT7 tornou-se padrão de construção de edifícios de sala de aulas na UFSCar tanto no que se refere ao programa de necessidades, quanto à sua arquitetura e sistema construtivo adotado. Portanto, inicialmente o edifício AT7 foi re-projetado com a metodologia proposta, ou seja, utilizando o sistema modular em aço, mantendo-se todas as suas características e demandas.

Para o desenvolvimento do sistema construtivo proposto, utilizou-se algumas ferramentas de trabalho, tais como o *software* SAP2000® para realizar análise e o dimensionamento. O *AutoCAD*® foi utilizado para os desenhos de projetos e detalhes construtivos. Para elaboração das maquetes e renderização das imagens foi utilizado o *software* SketchUp®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a adoção dos parâmetros do sistema construtivo adotado, iniciou-se pela concepção arquitetônica, avaliando as características das estruturas em aço ao traçar as diretrizes de projeto, procurando a modulação adequada, para que os custos finais fossem menores. Desse modo, as premissas para o desenvolvimento do projeto adotando o sistema construtivo modular em aço estão sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1: Resumo da escolha dos sistemas construtivos

Sistema	Descrição
Fundação	Convencional tipo radier
Estrutura	Perfis comerciais de chapa de aço formados a frio
Vedação horizontal laje / piso	Painel OBS
Vedação vertical externa	Painel pré-fabricado de concreto
Vedação vertical interna	Sistema <i>Dry-Wall</i> e painel removível
Cobertura	Telhas metálicas

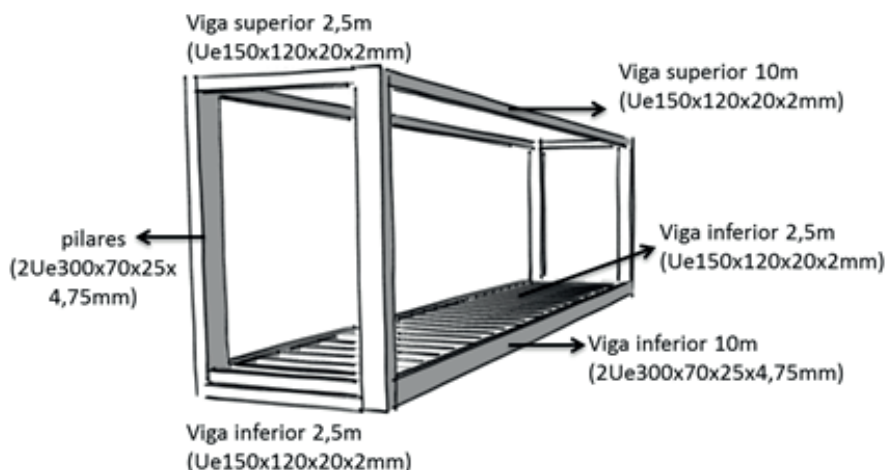
Para o desenvolvimento do módulo básico, foram considerados os seguintes fatores técnicos:

- 1. Vão livre:** a opção por uma dimensão principal de 10,0 metros, permite a utilização do sistema em ambientes que demandem áreas livres do porte de salas de aulas, laboratórios didáticos e pequenos auditórios, e outras tipologias, comerciais e mesmo habitacionais;
- 2. Largura:** a largura de 2,5 metros permite que sejam projetadas circulações sem a necessidade de sistemas de fechamento, além de ser subdivisão da medida principal;

3. **Logística de transporte:** permite o uso de meios de transporte usuais (caminhões *truck*), para o módulo montado, parcialmente montada ou desmontada, para execução em obra;
4. **Montagem:** permite maior flexibilidade e rapidez na etapa executiva, através da montagem mecanizada;
5. **Padronização:** permite alta produtividade, alta adaptabilidade a projetos diversos, queda na necessidade de detalhamento projetual devido à grande repetibilidade de soluções;
6. **Fechamentos:** adoção de sistemas industrializados de fechamento vertical e horizontal, de alta produtividade, manutenibilidade e maleabilidade projetual;
7. **Instalações:** soluções tecnológicas e inovadoras, adaptadas aos sistemas construtivos industrializados;
8. **Especificações:** componentes industrializados disponíveis no mercado e que atendam às exigências desempenho estabelecidas nas normas nacionais.
9. **Normatização:** baseando-se em ABNT NBR 15253:2014, ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 8800:2008.

Expostas as principais premissas técnicas, e definidos os componentes estruturais e sistemas complementares de fechamento e piso na Figura 1 apresenta-se a modulação padrão desenvolvida.

Figura 1: Perspectiva módulo: indicação dos componentes



Para a estrutura foi utilizado perfis formados a frio em aço ASTM A36. As ligações realizadas em fábrica deverão ser soldadas e as ligações de campo parafusadas. Os perfis formados a frio foram escolhidos para compor a

estrutura pela flexibilidade de forma e dimensões e pela maior disponibilidade no mercado. No quadro 1 resume-se as seções transversais utilizadas na estrutura do módulo básico dimensionadas segundo os critérios da NBR 14762:2010 e considerando os esforços obtidos para os carregamentos típicos para edificações de sala de aula. No Quadro 2 apresenta-se um resumo do dimensionamento e do consumo de aço para um módulo básico.

Além da análise estrutural do módulo básico são realizadas análise do edifício completo para avaliar o efeito do vento na estrutura e garantir sua estabilidade por meio da introdução de sistemas adequados de contraventamento.

Quadro 2: Resumo do dimensionamento e consumo de aço para o módulo básico

Cálculo peso próprio Módulo Metálico						
Nº	Elemento	Dimensões	Quantidade	Perfil/Descrição	Peso (kg)	Subtotal (kg)
1.	Pilares	3,30	4,00	2 Ue 300x70x25x4,75mm	36,25	478,50
2.	Vigas inferiores 2,5m	2,50	26,00	Ue 150x120x20x2mm	9,30	604,50
3.	Vigas inferiores 10,0m	10,00	2,00	2 Ue 300x70x25x4,75mm	36,25	725,00
4.	Vigas superiores 2,50m	2,50	4,00	Ue 150x120x20x2mm	9,30	93,00
5.	Vigas superiores 10,0m	10,00	2,00	Ue 150x120x20x2mm	9,30	186,00
Peso do módulo (estrutura) (kg)						2.087,00

O Quadro 3 apresenta o quantitativo e peso dos componentes complementares, laje, forro e fechamento relativo a um módulo. Neste caso considerando que o módulo tem fechamento nas quatro faces, que seria a pior situação em termos de peso do componente.

Quadro 3: Peso dos sistemas de fechamento

Nº	Elemento	Área (m2)	Perfil/descrição	Peso próprio	Subtotal (Kg)
6.	Base para piso + piso vinílico	25,00	Piso laminado em madeira	22,00	550,00
7.	Forro	25,00	Forro acústico removível	13,00	325,00
8.	Revestimento paredes	90,86	Placa cimentícia	40,80	3.707,25
Peso acabamentos (kg)					4.582,25

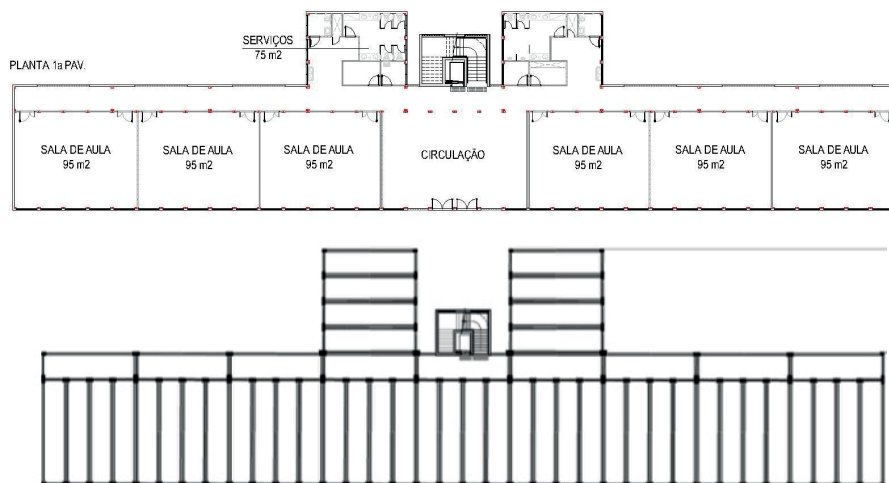
Portanto, de acordo com os quadros 4 e 5 o módulo somente com a estrutura tem um peso de 2,09t. Já o módulo com os fechamentos e acabamentos pesaria 6,67t. Ou seja, para o transporte e a montagem do módulo acabado esse peso teria que ser considerado para a definição da logística de transporte e montagem.

Importante salientar que este peso final corresponde ao caso mais crítico, já que nela adotou-se o fechamento lateral completo (quatro faces), de modo que qualquer outro módulo teria peso similar ou abaixo deste, devido às aberturas necessárias para as adequações arquitetônicas.

A primeira simulação da aplicação do sistema modular em aço desenvolvido será no projeto do edifício AT7 mantendo-se suas demandas, o programa de necessidades e a forma arquitetônica.

O projeto do Edifício AT7 segue o seguinte programa (Figura 2): 03 pavimentos tipos com 06 salas de aproximadamente 95,76 m², circulações verticais (elevadores e escadas) e horizontais, área de serviços (sanitários e apoio), cobertura.

Figura 2 - Planta adaptada ao AT7 e disposição espacial e estrutural



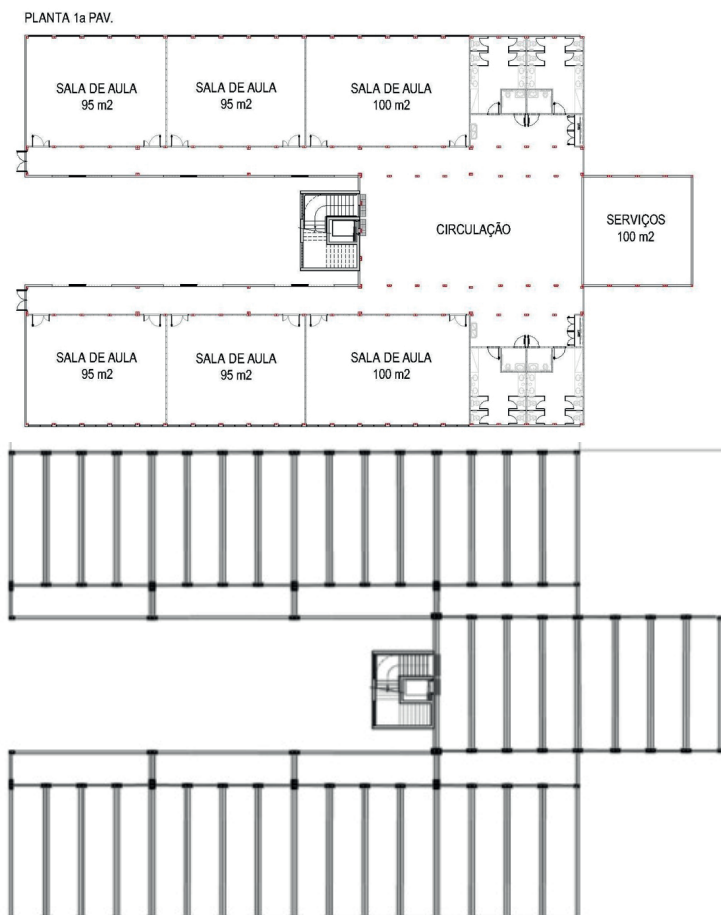
Desta forma mantem-se a área de 3.975 m² e capacidade de 1022 alunos do projeto original executado, no campus da UFSCar-São Carlos, em estrutura de concreto pré-moldado. Com o sistema modular em estruturas metálicas o consumo de aço é de 80 kg/m². Esse consumo de aço é superior à média esperada para uma construção em aço convencional. No entanto, como sistema modular racionaliza-se o processo de fabricação, transporte e montagem agregando benefícios ao sistema, tanto no aspecto econômico, como logístico e ambiental, que compensam o acréscimo no consumo de materiais estruturais.

A situação apresentada foi uma simples adaptação, de uma edificação já projetada e executada, de um sistema construtivo convencional para o sistema modular em aço. No entanto, a modulação foi concebida para atender diferentes demandas e programas arquitetônicos de forma rápida e eficiente. Reforçando a tese de que a modulação é um sistema que pode servir como referência para a compatibilização espacial e dimensional dos elementos presentes em uma edificação, apresentam-se na sequência duas propostas de edifícios com essa finalidade.

Na PROPOSTA 1 foi concebido um edifício com as mesmas demandas do AT7, porém com geometria distinta, contando com três pavimentos tipos, com oito salas de aula de aproximadamente 100,0 m², circulações e área de serviços. Na Figura 3 a planta do pavimento térreo coma distribuição dos módulos.

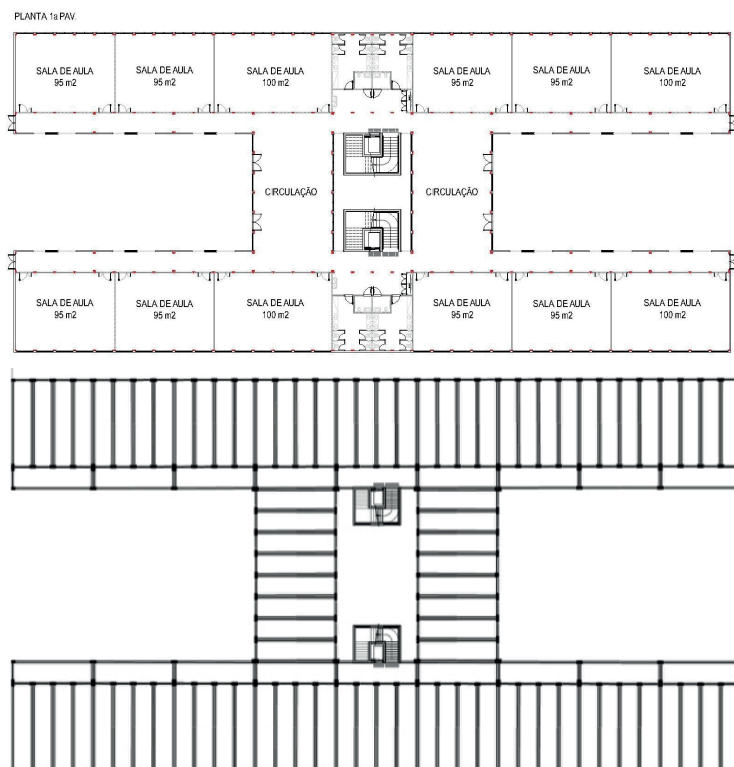
Neste caso, o edifício seria composto por 144 módulos, para uma área total 3.600 m², com consumo de aço total da estrutura de 288 toneladas, equivalendo a uma taxa de 80 kg/m². Em todos os exemplos abordados, não ocorre variação na taxa de aço/ m² devido ao peso definido por módulo. Tal abordagem, somada a um custo por kg de insumo, a princípio permitiria orçamentações mais precisas de estruturas semelhantes, consoante aos princípios de controle de custos inerente aos processos industrializados.

Figura 3: Planta com geometria distinta ao Edifício AT7 com disposição espacial e estrutural



Na PROPOSTA 2, foi concebido um edifício, com demanda superior ao AT7, composto de três pavimentos tipo com dezesseis salas de aula de aproximadamente 100,0 m², circulações e área de serviços. Na Figura 4 a planta do pavimento térreo como distribuição dos módulos. Neste caso o edifício resultaria com 12.000m² com consumo de 960t de aço.

Figura 4: Planta demanda maior do Edifício AT7



O sistema modular desenvolvido e aplicado nas três situações apresentada considerou primeiramente o edifício como um todo, ou seja, sua distribuição espacial: sistemas de circulação horizontal e vertical do edifício, composto por corredores, escada e elevador, áreas comuns compostas por sanitários, áreas de convívio/descanso e aparência da edificação. Essas análises fortificam que a relação métrica de ambas as modulações, PROPOSTA 01 e 02, favorecem a disposição dos módulos, podendo assim desenvolver um jogo de formas, além de auxiliar o sistema estrutural.

Desse modo, do ponto de vista arquitetônico e dos principais sistemas complementares (fechamentos e instalações) entende-se que a adoção de sistemas industrializados e modulares em aço pode ser uma

opção viável no momento da concepção projetual de edificações, neste estudo especificamente para fins didáticos, mas teoricamente ampliável para quaisquer tipos de habitação, incluindo habitações populares.

Pelas figuras anteriores buscou-se simular possível adaptação estrutural de um sistema convencional (concreto pré-fabricado) para um padrão industrializado (estrutura metálica), que no caso do Edifício analisado, ocorreria de forma a preservar, com maior proximidade métrica possível, a configuração arquitetônica original.

Da mesma forma, do ponto de vista de fechamento, com a substituição de alvenarias convencionais (tijolos de concreto e cerâmicos) pelo sistema industrializado proposto (placas cimentícias), seria possível manter as fachadas originais, com suas passagens, portas e esquadrias. No quesito isolamento térmico e acústico, dentro da proposta de forro apresentada, seriam atendidas as solicitações de uso.

Obviamente, a adoção de sistemas não tradicionais, devido às especificidades inerentes a processos tecnologicamente inovadores, em geral desconhecidos tecnicamente por grande parte dos envolvidos com o projeto e a construção, deve considerar alguns fatores de fundamental importância:

01. **Exequibilidade:** a altura da edificação, o solo (suporte) e área disponível para a instalação e trânsito de maquinário pesado.

02. **Investimento:** o custo/benefício global a curto, médio e longo prazo, as otimizações decorrentes de soluções de projeto, a disponibilidade de componentes próximos ao empreendimento.

03. **Durabilidade:** a comparação da depreciação entre sistemas, a vida útil dos componentes e da edificação.

04. **Manutenibilidade:** a disponibilidade de peças para reposição, a mão de obra especializada disponível emergencialmente. As peças de fechamento, verticais e horizontais, podem vir incorporadas aos módulos, ou a fixação pode ocorrer no local, neste caso, facilitando as instalações prévias a tal etapa.

05. **Logística:** a viabilidade do acesso de maquinário e equipamentos, o transporte de componentes de grande porte pelas vias de acesso.

06. **Uso:** as premissas do usuário, o atendimento ao plano de necessidades (PN).

07. **Reuso:** a facilidade de desmontagem/montagem, quando for o caso de edificações temporárias.

08. **Interdisciplinaridade:** o projeto fortemente compatibilizado, integrando soluções inovadoras de diversas áreas, minimizando lacunas executivas.

09. **Flexibilidade:** a incorporação projetual de possibilidades de ampliação com baixo impacto executivo, se possível, não interferindo na ocupação quando for o caso.

10. **Reformas:** a viabilidade executiva de eventuais reformas para alteração e adaptação de uso, fatos usuais em ambientes educacionais.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou colaborar com a sistematização do conhecimento sobre os aspectos de viabilidade dos sistemas modulares industrializados, fomentando o aprofundamento técnico para futuras discussões dentro da temática abordada, e fornecendo subsídios quantitativos e qualitativos que possam ser utilizados visando à execução de edificações com mesmo panorama sustentável. Para tanto, apresentou o projeto de um módulo formado por perfis de aço, e respectivos subsistemas de fechamento, capaz de atender à demanda inicialmente proposta dentro do universo da pesquisa, no caso, edificações para fins didáticos.

Além da questão métrica, que norteou o desenvolvimento da modulação, o dimensionamento considerou aspectos comerciais e de logística, almejando simular ao máximo possíveis situações executivas reais, dentro do cenário técnico encontrado hoje na Construção Civil. Em relação à logística, vale a consideração de que o módulo projetado poderia ser transportado montado ou desmontado, com ou sem fechamentos, sendo teoricamente viável dentro de um processo mais elaborado de industrialização.

Através do estudo de caso, entende-se que a proposta modular corrobora a premissa inicial, ao adaptar via abordagem de projeto, a demanda de um edifício existente na UFSCar, com base na modulação apresentada. Complementarmente, foram propostas outras configurações e *layouts* dentro da sistemática modular, visando demonstrar sua maleabilidade e plasticidade arquitetônica. Desse modo, entende-se ser possível que soluções de projeto, tanto estruturais como de fechamentos, sejam repetidas e padronizadas, porém mantendo-se partidos arquitetônicos distintos.

Assim, a pesquisa permitiu aferir, teoricamente, a viabilidade técnica relativa ao projeto desta adaptação demonstrada no estudo de caso, na qual a adoção do conceito de construção industrializada, temática central deste estudo, mostrou-se teoricamente exequível, valendo-se de tecnologias hoje disponíveis no mercado nacional, incorporando, desse modo, preceitos industriais e de sustentabilidade no processo de projeto.

Os levantamentos, e consequente desenvolvimento projetual, permitiram confirmar a hipótese de que o processo de projeto de edifícios, em linhas gerais, pode ser otimizado e qualificado, através da introdução das premissas da industrialização da construção, sem perder de foco as demandas do usuário. Entretanto, é fundamental que tais premissas sejam adaptadas ao ambiente do setor, e às necessidades e possibilidades particulares de cada empreendimento. Ou seja, fundamentar a teoria para que sua implantação seja viável dentro de parâmetros reais.

A visão sistêmica e holística, inerente à elaboração de projetos, deve

ocorrer concomitantemente à concepção do empreendimento, de modo que as decisões sejam analisadas em conjunto, visando solucionar, o quanto antes, todas as interfaces com as demais disciplinas de projeto, com a fábrica e com as tarefas de logística e montagem, que serão realizadas no canteiro de obra, antecipando e solucionando possíveis entraves técnicos, ou mesmo demonstrando a viabilidade ou não de sua execução.

Dentro de um projeto modular, a métrica do módulo base é o cerne projetual, de onde derivam todos os sistemas, tanto estrutural como complementares, unificando e uniformizando os diferentes elementos construtivos das tipologias projetuais propostas. Além disso, o detalhamento deve atender às características funcionais dos materiais, contendo as indicações relativas às juntas necessárias, sua conexão com outros componentes, e interfaces com instalações.

O presente trabalho aborda o edifício como um produto, e na busca por qualidade, como em qualquer outra área, almeja-se a antecipação e resolução de eventuais problemas na etapa executiva através de intervenções na etapa de concepção e desenvolvimento projetual, caracterizando-se assim o conceito de processo de projeto.

Considerando-se que em um projeto no qual são englobados os conceitos de modulação e industrialização, propõe-se a seguir requisitos e planos globais de construtibilidade, complementares, porém essenciais dentro de uma concepção executiva:

1. Análise dos resultados de desempenho em empreendimentos similares já executados, retroalimentando o processo projetual;
2. Análise das soluções alternativas de projeto junto ao usuário, buscando características que direcionem à solução mais eficaz;
3. Identificação de limitações de projeto: custo, prazo, materiais, componentes, mão de obra, entre outros;
4. Identificação dos níveis de complexidade dos diferentes sistemas prediais;
5. Identificação das interfaces entre materiais e elementos construtivos;
6. Identificação da complexidade da sequência de operações no canteiro e as tolerâncias consideradas.

Neste aspecto, baseando-se na indústria da Construção Civil, a pré-fabricação somente é uma ferramenta adequada para melhorar os níveis de industrialização dos processos de produção se adotada dentro de uma visão sistêmica da construção de um edifício, em que a racionalização seja parte fundamental do processo.

A proposta de pesquisa na área de sistemas construtivos estruturais modulares em aço e sistemas industrializados, além de focar o desenvolvimento de parâmetros técnicos que possam ser utilizados em pesquisas futuras ou

mesmo embasar práticas executivas, também tem o intuito de colaborar com a divulgação de tais sistemas no meio técnico, demonstrando sua viabilidade executiva, quando adequada ao cenário executivo.

Apesar de apresentar aspectos gerais, implantáveis em várias tipologias arquitetônicas, a pesquisa enfatiza inicialmente edificações para fins didáticos, no caso, em Universidades, por entender que tal recorte seja terreno propício para o pioneirismo tecnológico, em decorrência da existência de corpo técnico qualificado e da abertura inovadora em geral presente em Instituições de Ensino Superior. Conquanto, todo fluxo tecnológico, quando é capaz de atender a princípios de exequibilidade e viabilidade, acaba por estender-se para outros cenários e condições. Neste caso, entende-se que, oportunamente, tipologias projetuais que atendam a parâmetros de maior industrialização e sustentabilidade possam expandir-se para outros tipos de edificações, como empresas (fato já observável em cidades grandes e médias), galpões industriais e mesmo edificações voltadas a fins de interesse social.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15575-1**: Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos – Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. (Série Manual da Construção em Aço). 2006.

GOMES, C. E. M.; VIVAN, A. L.; SICHIERI, E. P.; PALIARI, J. C. Light Steel Frame na produção de moradias no Brasil. In: **IX Congresso de Construção Metálica e Mista & I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável**. Portugal. 2015.

LINNER, T.; BOCK, T. Evolution of large-scale industrialisation and service innovation in Japanese prefabrication industry. **Journal of Construction Innovation**. Vol. 12 n. 2, pp. 156-178. 2012.

VIVAN, A. L. **Linha de montagem para produção de habitação de Light Steel Frame: projeto e otimização**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos. 2016.

CONSTRUCTION SYSTEM AND MODULAR STEEL STRUCTURAL: FEASIBILITY AND SUSTAINABILITY ASPECTS

ABSTRACT - In the context of constructive and structural systems of construction, there is an inevitable and progressive trend of replacement of conventional systems for industrial systems. Such transition configures positive factor and able to boost a gradual change of paradigms, with greater consideration of environmental factors and sustainability in buildings. Using initially a theoretical approach, the work presents

a literature review on industrialized construction concepts, addressing the current technical scenario in Brazil, and confronting some of the main technologies present in today's industrialized construction segment. As a result, sought to demonstrate the technical feasibility of use of constructive and structural system in steel, through the development of a suitable module to different types of buildings. For such an approach, it was necessary to elaborate technical solutions, flexible and adaptable to the initial design concept, contemplating not only the spatial geometry in relation to your structure, but also considering the constructive systems, installations and logistics, within the theme of industrialization of construction. Finally, it is presented a technically viable modulation to be executed, which can be applied in various project situations, adapting the modular system to demand educational space, highlighting the environmental gains resulting from this design option.

KEYWORDS: Sustainability; Modular system in steel; Industrialization of construction; Rationalization.

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO EM CURITIBA E REGIÃO

Henrique Marin van der Broocke Campos

lattes.cnpq.br/5094011569295022

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná

Jair Urbanetz Junior

lattes.cnpq.br/2654512569280452

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná

Eloy Fassi Casagrande Junior

lattes.cnpq.br/8353762351277382

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná

RESUMO - Este estudo visa aprofundar o conhecimento do uso de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR), enquanto apresenta uma proposta de metodologia para avaliar o potencial fotovoltaico para uma região definida, sendo a Região Metropolitana de Curitiba o foco deste artigo. Além disso, os procedimentos metodológicos envolveram a simulação de diferentes cenários para geradores fotovoltaicos distribuídos variando seu nível de penetração de potência, de forma

que os efeitos nas curvas de carga reais da região analisada foram quantificados. Foram selecionados 12 dias críticos para a análise, que incluiu a contribuição fotovoltaica em termos de redução do consumo de energia elétrica, além da capacidade dos sistemas fotovoltaicos para reduzir a demanda de ponta da rede elétrica no período diurno. Também foi feito um levantamento do montante de gases de efeito estufa que são deixados de emitir. Os resultados revelaram que o nível de penetração fotovoltaico mais adequado, em termos de potência, situa-se entre 40,80 MWp e 55,68 MWp, exceto em alguns dias críticos tratados neste estudo. Este intervalo de potência resulta em valores máximos de Fator Efetivo de Capacidade de Carga (ELCC) para dias de irradiação solar máxima e típica durante as estações de inverno e verão. Desse modo, este intervalo proposto representa a melhor capacidade de redução do pico de demanda, além de evitar a emissão de gases do efeito estufa estimada em 18.790 toneladas de CO₂-eq a 25.643 toneladas de CO₂-eq, sendo, portanto, uma solução mais sustentável e que eleva a capacidade do sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; Energia Solar Fotovoltaica; Fator Efetivo de Capacidade de Carga; Potencial Solar Fotovoltaico; Emissão de Gases do Efeito Estufa.

1. INTRODUÇÃO

A capacidade instalada acumulada no mundo para o fim do ano de 2020, conforme o relatório intitulado *Renewables 2020: Global Status Report*, foi equivalente a 627 GW, sendo a China o país que lidera o ranking de maior potência instalada, chegando em torno de 200 GW instalados. Em comparação a 5 anos atrás o incremento mundial em potência fotovoltaica foi próximo de 450 GW. Os principais países, em ordem decrescente de maior potência em energia solar fotovoltaica, são: China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Índia (REN21, 2021).

No Brasil, a capacidade instalada acumulada de geração fotovoltaica é cerca de 3,3 GW (potência fiscalizada), conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2021 (ANEEL, 2021). A matriz elétrica brasileira destaca-se pela predominância da geração hidráulica, que apresentou uma representatividade de 64,9% no ano de 2020, seguida pela energia térmica a base de combustíveis fósseis, 14,6 %, sendo que a base de biomassa foi 8,4%, a fonte eólica atingiu 8,6% e a nuclear 2,5%, seguida da solar com 1% de representatividade (EPE, 2021).

Ao final do ano de 2013 o primeiro leilão destinado à energia solar ocorreu no Brasil. Participaram, também, outras fontes como eólica e termelétrica a biomassa ou gás natural em ciclo combinado (EPE, 2013). Após cerca de um ano, outro leilão entrou em vigor para energia de reserva, tendo contabilizado 400 empreendimentos para a fonte fotovoltaica, ainda inferior aos 626 empreendimentos de fonte eólica e, por fim, 8 termelétricas a biogás (EPE, 2014a).

Em 2015, 341 projetos totalizaram uma capacidade de 11,3 GW e foram considerados aptos a participar do leilão, porém 30 projetos foram efetivamente contratados, totalizando 1,04 GWp que iniciaram a operação no dia primeiro de agosto de 2017 (EPE, 2015b).

Uma conclusão bastante lógica é que uma matriz elétrica de um país como o Brasil, de dimensões continentais, deve ser diversificada de forma a suprir energia com confiabilidade e segurança, para um consumo crescente, cujo aumento é estimado em 4% ao ano até 2023 (EPE, 2014b). Além do mais, em 2014, 34,7% da geração de energia foi a partir de termelétricas, que possuem um impacto ambiental intrínseco a geração, associado às emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEEs) (EPE, 2015a). Logo, a diversificação é importante também no quesito sustentabilidade, para se reduzir a necessidade de acionamento de usinas que utilizam combustíveis fósseis como fonte para geração de energia elétrica (LACCHINI; SANTOS, 2012).

O Brasil possui a regulamentação efetiva para a geração distribuída,

tal como a solar fotovoltaica conectada à rede elétrica, desde abril de 2012, com a resolução 482 da ANEEL (ANEEL, 2012), posteriormente atualizada em 2015 (ANEEL, 2015) e, atualmente aguarda a apreciação do Senado Federal o PL 5829/2019 (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2021). No Brasil, o consumidor que instalar o gerador fotovoltaico em sua residência, escritório ou indústria poderá ter o sistema operando em paralelo com a rede de distribuição do local, podendo injetar o excedente, caso a geração seja maior que o consumo, e ter seu crédito de energia contabilizado e com validade de 60 meses.

O objetivo desta pesquisa é contribuir para o planejamento da geração de energia elétrica da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), a partir de uma análise quantitativa através da metodologia proposta, contabilizando os benefícios obtidos com a geração de energia elétrica a partir de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica (SFVCR). Para isto, o estudo de caso é restringido para a área que abrange o sistema elétrico da RMC, adotando-se dois sistemas fotovoltaicos em operação em Curitiba como base para as simulações: o SFVCR do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o SFVCR da empresa ELCO Engenharia. Os dados de irradiação são obtidos a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto Tecnológico SIMPAR, que possuem estações solarimétricas em Curitiba (INMET, 2015; D'ÁVILA, 2014).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Classificação de Sistemas Fotovoltaicos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 11704:2008, intitulada Sistemas Fotovoltaicos – Classificação, os sistemas fotovoltaicos podem ser: Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e Sistema fotovoltaico isolado (SFVI).

Os SFVCR constituem o sistema mais encontrado mundialmente, que apresenta reduzida complexidade em relação ao SFVI, que necessita de baterias que podem ser consideradas seu elo frágil, devido aos elevados custos em manutenção. Esses sistemas apresentam apenas um ou mais painéis fotovoltaicos, que formam o arranjo fotovoltaico, que é conectado ao inversor e disponibiliza energia em CA para a instalação e, por serem conectados em paralelo com a rede elétrica, podem injetar a energia excedente gerada (VILLALVA; GAZOLI, 2012) (URBANETZ JUNIOR, 2010).

2.2 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

Conforme o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), para se dimensionar um SFVCR, as seguintes etapas devem ser cumpridas: levantamento da irradiação solar disponível

no local; definição da localização e configuração do sistema; identificação da demanda e consumo energético da instalação em que o sistema fotovoltaico será instalado; dimensionamento do painel fotovoltaico e do inversor (elemento de controle e condicionamento de potência). Este trabalho se restringe a sistemas puramente fotovoltaicos, ou seja, sem outra forma de geração de energia distribuída integrada, e sistemas fixos, que não possuem seguidor do sol e nem dispositivos de concentração da radiação solar.

A potência fotovoltaica de pico é calculada conforme a Equação 1 (URBANETZ JUNIOR, 2012).

$$P_{PV} = \frac{E.G}{H_{TOT.PR}} \quad (1)$$

P_{FV} : potência fotovoltaica de pico instalada (Wp);

E : energia demandada pelas cargas diariamente (Wh/dia);

G : irradiância nas Condições Padrão de Teste (1.000 W/m²);

H_{TOT} : irradiação solar diária média mensal para a localidade em questão, (Wh/m².dia);

PR : taxa de desempenho ou rendimento global do sistema.

2.3 Fator Efetivo de Capacidade de Carga

Um parâmetro que foi aplicado para análise dos resultados foi o Fator Efetivo de Capacidade de Carga (FECC), que de acordo com Jardim (2007) e Rebechi (2008), é um modelo determinístico que mostra a contribuição da geração fotovoltaica em reduzir o pico de demanda ocorrido num certo instante. É calculado de forma adaptada de Rüther *et al.* (2008), conforme a Equação 2.

$$ELCC = \frac{P_{D_{MAX}} - P_{D_{MAXFV}}}{P_{FVNP}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

FECC: Fator Efetivo de Capacidade de Carga, %;

$P_{D_{MAX}}$: Potência demandada máxima no dia sem a contribuição fotovoltaica;

$P_{D_{MAXFV}}$: Potência demandada máxima no dia com a contribuição fotovoltaica;

P_{FVNP} : Potência fotovoltaica de pico, definida em função do NP (MWp).

2.4 Montante de emissões de CO₂ evitadas

O fator de emissão de CO₂ utilizado para converter a energia elétrica fotogerada em um montante de emissões de CO₂ evitadas, uma vez que na geração de energia elétrica a partir de recurso solar fotovoltaico não há

emissões, corresponde ao fator de emissão da linha de base do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo calculado como uma margem combinada que adota um peso para a margem de operação e margem de construção, sendo estes valores distintos e equivalentes a 75% e 25%, respectivamente (CDM, 2018). Foi feita uma média aritmética dos fatores de emissão da margem combinada, obtidos de 2006 até 2014, conforme a Tabela 1, resultando no fator de emissão de CO₂ da linha de base utilizado nesta pesquisa, equivalente a 363,9944 kgCO₂/MWh (MCTI, 2015).

Tabela 1: Fator de emissão médio do SIN.

Ano	Margem de construção	Margem de operação	Margem combinada
	Fator de emissão médio (kg CO ₂ /MWh)	Fator de emissão médio (kg CO ₂ /MWh)	Fator de emissão médio (kg CO ₂ /MWh)
2006	81,40	323,23	262,78
2007	77,50	290,90	237,55
2008	145,80	476,58	393,88
2009	79,40	247,57	205,53
2010	140,40	478,67	394,10
2011	105,60	291,96	245,37
2012	201,00	517,62	438,46
2013	271,30	593,19	512,72
2014	296,30	583,66	511,82
Média final			363,9944

Fonte: MCTI (2015), adaptado.

3. METODOLOGIA

Este artigo objetiva avaliar quantitativamente os benefícios produzidos pela implantação em larga escala de SFVCRs (CAMPOS, 2015). Foram selecionados, inicialmente, dias específicos para a análise, pertencentes às estações de verão e inverno. Essa seleção de dias específicos objetiva avaliar duas situações extremas: uma de máximo potencial fotovoltaico, que é representado por máxima irradiação solar acumulada ao longo do dia; outra de mínimo potencial fotovoltaico, que se refere à mínima irradiação solar acumulada no dia. Além disso, foram escolhidos dias considerados típicos para as estações do verão e inverno. Os dados de irradiação solar foram obtidos a partir das estações solarimétricas do INMET e do Instituto Tecnológico SIMEPAR (fornecidas por funcionária do SIMEPAR), localizadas em Curitiba e que possuem bancos de dados com registros diários e leituras em intervalos de 15 minutos, como é o caso da estação A807 do INMET

(INMET, 2015; D'ÁVILA, 2014).

Para a escolha dos dias típicos foram analisados histogramas que possibilitaram identificar o intervalo de valores de irradiação que predominaram, considerando o período desde o verão de 2013 até o verão de 2015. Cada intervalo de irradiação predominante identificado é analisado com mais detalhes, sendo calculado um valor médio de irradiação em cada intervalo. A partir do percentual de desvio em relação à média, que é calculado para todos os dias do intervalo, obtém-se o dia com o menor desvio, que é considerado o dia típico.

Para avaliar o potencial da energia solar fotovoltaica, em termos de redução do consumo e do pico de demanda, para os doze dias críticos selecionados, foram obtidas as curvas de carga correspondentes ao sistema elétrico da região analisada. Diferentes cenários para diferentes Níveis de Penetração foram simulados baseados em sistemas em operação em Curitiba, a saber: o do Escritório Verde da UTFPR e o da ELCO Engenharia. As simulações foram sobrepostas às curvas de carga, possibilitando calcular as curvas de carga resultantes e elaborar a análise dos benefícios gerados.

O Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR possui uma potência instalada de 2,1 kWp e cerca de 15 m² de área ocupada na cobertura da edificação, com células fotovoltaicas a base de silício policristalino. O SFVCR está com uma inclinação de aproximadamente 15° e desvio azimutal de 22° para oeste (URBANETZ JUNIOR *et al.*, 2015) (CAMPOS *et al.*, 2014) (CASAGRANDE *et al.*, 2012).

O SFVCR instalado e em operação na empresa ELCO Engenharia possui 8,64 kWp de potência instalada e uma área de 52 m² aproximadamente, com células fotovoltaicas a base de silício monocristalino. O SFVCR está com uma inclinação de aproximadamente 20° e desvio azimutal de 32° para oeste (URBANETZ JUNIOR *et al.*, 2014).

Uma observação a ser feita é que na seleção dos dias críticos que retratam a demanda de potência da Região Metropolitana de Curitiba, finais de semana, dias de feriado nacional, ou dias com outros eventos atípicos foram desconsiderados por não retratarem o perfil de demanda predominante no sistema elétrico. Os dados foram obtidos a partir de curvas de carga fornecidas por trabalhador da própria COPEL (GIMENES, 2015).

3.1 Parâmetros principais

Os cenários de inserção de geração fotovoltaica foram estabelecidos a partir do Nível de Penetração (NP), definido como um percentual a ser atingido em relação à demanda média máxima no sistema elétrico da região analisada (Curitiba e Região Metropolitana de Curitiba), considerando os valores de demanda fornecidos pela COPEL. A Equação 3 ilustra esse conceito.

$$NP = \frac{P_{FVNP}}{P_{D\text{MAX}}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

NP: nível de Penetração (%);

P_{FVNP} : potência fotovoltaica de pico, definida em função do NP (MWp);

$P_{D\text{MAX}}$: demanda média máxima para o dia considerado (MW).

A Equação 4 é uma forma de trabalhar a Equação 1, previamente definida, isolando-se a incógnita referente a energia gerada e utilizando a potência elétrica ao invés da energia gerada, e a irradiância ao invés da irradiação. Assim, pode-se calcular a potência elétrica gerada na conversão fotovoltaica, ou seja, a potência elétrica fotogerada, conforme a Equação 4.

$$P = \frac{P_{FV} \cdot \text{Irradiância} \cdot DI}{G} \quad (4)$$

Onde:

P: potência elétrica fotogerada num instante de tempo i qualquer (kW);

P_{FV} : potência fotovoltaica de pico instalada (kW);

Irradiância: é a incidência de irradiância num instante de tempo i qualquer (kW/m²);

DI: desempenho instantâneo num instante de tempo i qualquer (%);

G: irradiância nas Condições Padrão de Teste (1 kW/m²).

O parâmetro definido como sendo o desempenho instantâneo é oriundo da Equação 4 e calculado conforme a Equação 5. Este parâmetro representa o desempenho do sistema fotovoltaico no instante de tempo considerado.

$$DI = \frac{P \cdot G}{P_{FV} \cdot \text{Irradiância}} \times 100 \quad (5)$$

A máxima redução no pico de demanda devido à contribuição fotovoltaica, do ponto de vista do sistema elétrico, é obtida com a potência elétrica fotogerada no instante do pico de demanda, denominada P_{MAX} e calculada conforme a Equação 6.

$$P_{\text{MAX}} = P_{D\text{MAX}} - P_D \quad (6)$$

P_{MAX} : montante de potência fotogerada capaz de reduzir o pico de demanda ao seu valor mínimo, que é considerado quando atinge o mesmo patamar de demanda do período noturno (considerado após às 18 horas até

às 23:59 horas) (MW)

P_{DMAX} : demanda média máxima para o dia considerado (MW);

P_D : demanda média máxima no período noturno (entre 18 horas e 23:59 horas) (MW).

Quando o pico de demanda ocorre no período noturno, o P_{DMAX} e P_D são iguais e a Equação 6 resulta em um valor nulo. Dessa forma, a contribuição fotovoltaica para redução do pico de demanda seria nula. Em seguida, a Equação 7 ilustra o cálculo da potência fotovoltaica de pico para um sistema fotovoltaico produzir a máxima redução no pico de demanda.

$$P_{FV} = \frac{P_{max.G}}{Irradiancia.DI} \quad (7)$$

Irradiância: é a incidência de irradiância num instante de tempo i qualquer (kW/m^2);

DI: desempenho instantâneo num instante de tempo i qualquer (%);

G: irradiância nas Condições Padrão de Teste ($1 kW/m^2$).

A Equação 8 permite o cálculo da estimativa de geração de energia elétrica anual, ao passo que a Equação 9 mostra o cálculo do Nível de Penetração Energético (NPE), que é um percentual de energia elétrica consumida ao ano suprida pela geração fotovoltaica, considerando a cidade de Curitiba.

$$E_{FVNP} = P_{FVNP} \times H_{TOTAL} \times 365 \times PR \quad (8)$$

E_{FVNP} : energia gerada pelo sistema fotovoltaico, com um certo Nível de Penetração, ao longo do ano (GWh);

P_{FVNP} : Potência fotovoltaica de pico, definida em função do NP (MWp);

H_{TOTAL} : irradiação solar diária média anual para a cidade de Curitiba, ($Wh/m^2.dia$);

PR: taxa de desempenho ou rendimento global do sistema, considerada igual a 0,75.

$$NPE = \frac{E_{FVNP}}{E_{SE}} \times 100 \quad (8)$$

NPE: Nível de Penetração Energético (%);

E_{SE} : energia consumida pelo sistema elétrico da região estudada, ao longo de um ano (MWh).

Para estimativa da geração anual de energia para cada cenário de inserção proposto, foi utilizado o valor de irradiação diária média anual para a cidade de Curitiba, obtido a partir dos dados coletados de irradiação no plano horizontal, em 2012, 2013 e 2014 (INMET, 2015; SIMEPAR, 2014), e

ajustados para o plano inclinado igual à latitude de 25° , através do software Radiasol (UFRGS, 2014). Esse valor é equivalente a $4,622 \text{ [kWh/m}^2 \cdot \text{dia]}$. A taxa de desempenho dos sistemas, encontrada na literatura internacional com o termo em inglês *performance ratio*, foi considerada igual a 0,75.

Em relação ao consumo de energia elétrica considerado para o período de um ano (E_{SE}), foi utilizado o valor registrado em 2014, equivalente a 4.951.764 MWh, ou 4,9 TWh (IPARDES, 2015).

3.2 Seleção de dias críticos para aplicar a metodologia proposta

O caso base consiste nos sistemas fotovoltaicos do Escritório Verde da UTFPR e da ELCO Engenharia, que somados resultam em um sistema de 10,74 kWp. A Tabela 2 representa os dias selecionados.

Tabela 2: Dados para a simulação e análise dos cenários de geração fotovoltaica.

Data	Demanda média máxima (MW)	Instante (h)	Irradiação solar diária ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$)	Irradiância no pico de demanda (W/m^2)	Potência elétrica fotogerada no pico de demanda (kW)	Desempenho instantâneo no pico de demanda (%)
28/01/2013	1573,70	14	8,11	1088,00	6,67	57,12
28/02/2013	1687,37	14:45	5,75	922,51	5,67	57,20
20/03/2013	1589,73	16:30	1,22	54,47	0,42	72,14
24/06/2013	1744,02	17:30	0,30	8,00	0,00	0,00
02/08/2013	1666,97	11:15	4,71	619,58	6,56	98,61
13/09/2013	1699,89	11:15	6,35	829,17	7,66	85,99
24/07/2014	1683,33	16:30	0,91	23,91	0,11	42,84
02/09/2014	1680,29	17:15	3,44	2,77	0,00	0,00
10/09/2014	1676,75	16:30	8,87	477,54	0,21	4,13
22/12/2014	1459,30	11:15	0,43	8,67	0,00	0,00
09/01/2015	1762,57	14:15	8,78	1046,67	7,65	68,10
21/01/2015	1754,31	14:00	4,81	629,72	3,77	55,77

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em resumo, os dias de mínimo potencial foram 20/03/2013, 24/06/2013, 24/07/2013 e 22/12/2014, devido à mínima irradiação solar, que foi equivalente a $1,22 \text{ kWh/m}^2$, $0,30 \text{ kWh/m}^2$, $0,91 \text{ kWh/m}^2$ e $0,43 \text{ kWh/m}^2$, respectivamente. Consequentemente, nestes dias o FECC foi muito baixo, atingindo 3,93% em 20/03/2013 e aproximadamente valores nulos nos outros dias. Outra observação refere-se aos dias 02/09/2014 e 10/09/2014, que retrataram um potencial típico e máximo no inverno de 2014, respectivamente,

mas porque o pico de demanda ocorreu às 17:15 e às 16:30, a geração fotovoltaica não pode contribuir de forma significativa, resultando em FECCs de 0% e 1,97%, respectivamente.

A Tabela 3 resume os resultados considerados para a proposição de um Nível de Penetração apropriado para sistemas fotovoltaicos na região analisada.

Tabela 3: Resultados considerando o FECC máximo.

Data	FECC máximo (%)	NP (%)	P_{FVNP} (MWp)	E_G (MWh/dia)	Emissões (tCO ₂ /dia)
28/01/2013	62,14	2,9757	46,83	265,73	96,70
28/02/2013	52,77	3,3000	55,68	229,79	83,60
02/08/2013	61,10	0,4457	7,43	30,80	11,20
13/09/2013	71,30	2,4000	40,80	200,27	72,90
09/01/2015	58,41	1,0000	17,63	95,32	34,70
21/01/2015	35,12	6,5000	114,03	414,99	151,00

Onde:

P_{FVNP} : potência fotovoltaica de pico, definida em função do NP (MWp);

E_G : Energia elétrica fotogerada para o NP considerado (MWh/dia);

Emissões: representa o montante de emissões de CO₂ evitado com a geração fotovoltaica para o respectivo NP (tCO₂/dia).

Os resultados revelaram que em 2013 o intervalo de potência de 40,8 MWp até 55,7 MWp leva ao máximo FECC, que é superior a 50%, considerando o potencial típico e máximo para as estações de verão e inverno. A exceção a essa análise foi o dia 02 de agosto de 2013, por causa do perfil da curva de carga neste dia. O pico de demanda ocorreu às 11:15, equivalente a 1666,97 MW, e foi muito próximo do pico de demanda no período noturno, registrado às 18:30 e igual a 1662,43 MW. Como resultado, o NP de 0,44% (equivalente a 7,43 MWp) resultou no máximo FECC, equivalente a 61,1%, que diminuiu rapidamente com o incremento de potência do sistema fotovoltaico.

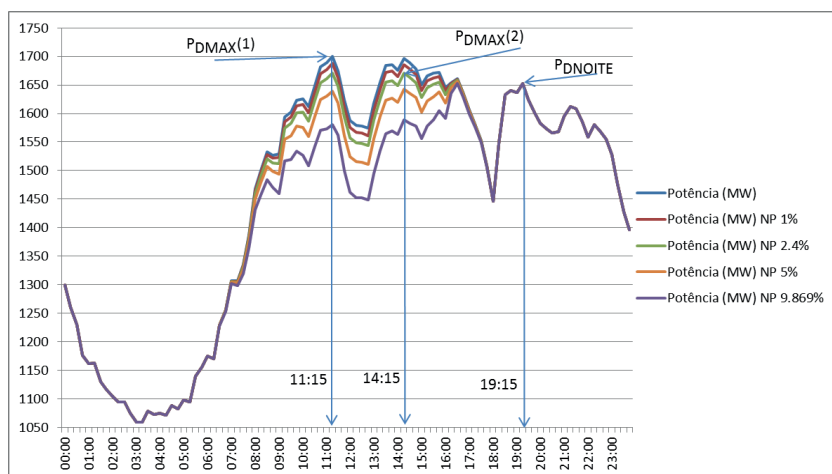
Em 2015, na época do verão, o intervalo de potência fotovoltaica mencionado também resultou em FECC superior a 50%, exceto para 21 de janeiro de 2015, que foi 35,12% até o NP de 6,5% (equivalente a 114,03 MWp), sendo o FECC inferior explicado devido a menor irradiância no instante do pico de demanda (14:00) em comparação com o outro potencial típico de verão, ocorrido em 28/02/2013. Além disso, pode-se inferir que o verão em 2015 teve menores valores de irradiação comparados aos de 2013.

A Figura 1 representa um potencial típico de inverno de 2013. O P_{DMAX}

foi separado em (1) e (2) que significa o pico de demanda original e o pico de demanda resultante para o nível de penetração simulado, respectivamente, além do pico de demanda no período noturno da curva de carga, após às 18 horas (P_{DNOITE}).

Em primeiro lugar, as equações 5, 6, 7 e 3 são aplicadas para se obter o NP representado pela curva em roxo, o qual é considerado como sendo o Nível de Penetração Ótimo, porque leva à máxima redução no pico de demanda devido à geração fotovoltaica. No entanto, este NP ótimo não corresponde ao maior FECC, o que se justifica na Figura 1, quando o pico de demanda é deslocado das 11:15 para às 14:15, conforme o NP mostrado na curva em verde. Este deslocamento do pico de demanda para um instante posterior leva a redução dos níveis de irradiância, portanto, há redução no Desempenho Instantâneo e, conseqüentemente, o FECC diminui. Além disso, as equações 5, 6, 7 e 3 devem ser aplicadas novamente quando o pico é deslocado de forma a considerar o desempenho instantâneo no instante considerado, nesse caso às 14:15. Dessa forma, o NP de 2,4% remete ao FECC máximo para esse dia, ao passo que o NP 9,869% corresponde ao NP ótimo.

Figura 1: Perfil da curva de carga em 13/09/2013: original (1) e resultante (2)



A Tabela 4, por fim, apresenta a projeção da geração de energia elétrica anual para sistemas fotovoltaicos cuja potência corresponde ao FECC máximo, ou seja, maior contribuição para o sistema elétrico da Região Metropolitana de Curitiba.

Tabela 4: Projeção da geração de energia elétrica anual.

Data	P_{FVNP} (MWp)	E_G (GWh/ano)	Emissões (tCO ₂ /ano)	NPE anual (%)
28/01/2013	46,83	59,3	21.567	1,20
28/02/2013	55,68	70,5	25.645	1,42
20/03/2013	131,95	167,0	60.769	3,37
02/08/2013	7,43	9,4	3.422	0,19
13/09/2013	40,80	51,6	18.789	1,04
24/07/2014	16,83	21,3	7.752	0,43
10/09/2014	419,47	530,7	193.187	10,72
09/01/2015	17,63	22,3	8.118	0,45
21/01/2015	114,03	144,3	52.517	2,91

5. CONCLUSÃO

Um dos possíveis desdobramentos em se definir um intervalo apropriado para o Nível de Penetração de energia solar fotovoltaica está numa possível contribuição para a implantação de políticas públicas de incentivo para esta fonte, o que ocasionará aumento significativo do número de instalações, e que requer um acompanhamento e verificação contínuos, do ponto de vista de quantificar os benefícios para o sistema elétrico, tal como a ampliação da capacidade máxima da rede elétrica, através da redução do pico de demanda do sistema, além da contribuição na mitigação de impactos ambientais, através da redução da emissão de GEEs.

Pode-se constatar que ao adotar-se como princípio para escolha do intervalo mais apropriado para investimentos em energia solar fotovoltaica o FECC máximo, que é um parâmetro associado ao aumento da capacidade do sistema elétrico devido a redução do pico de demanda, o intervalo de potências instaladas entre 40,80 MWp e 55,68 MWp aplica-se para o ano de 2013, avaliando dias de máxima irradiação e irradiação típica no verão e inverno, e também aplica-se ao verão de 2015, sendo que os dias de mínimo potencial e os dias em que o instante do pico de demanda ocorre após às 16:30 são desconsiderados. Desta forma, exceto para os dias 02/08/2013 e 21/01/2015, em que o comportamento da curva de carga e da irradiação foi diferente dos demais, pode-se inferir que o intervalo sugerido resulta em FECCs superiores a 50%, além de que contribuem para gerar anualmente entre 51,6 GWh a 70,4 GWh, ou seja, entre 18.790 toneladas e 25.643 toneladas de CO₂ seriam deixadas de emitir na produção de energia elétrica ao ano. Por fim, o estudo proposto permite avaliar o potencial fotovoltaico de uma região determinada e comprovou a eficácia destes sistemas fotovoltaicos, pois possibilitam a redução de impacto ambiental, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa, além de aumentar a capacidade de suprir demandas

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2014-2023)**. Rio de Janeiro: EPE, 2014b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2021 - Ano base 2020: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração – 10 Leilão de Energia de Reserva de 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2015b.

GIMENES, Juan A. S.. **Curvas de Carga – atualização**. [Mensagem Pessoal]. Mensagem recebida por <enghenrique@outlook.com> em 14 setembro 2015.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

IPARDES. **Perfil do município de Curitiba. Curitiba: IPARDES, 2015**. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=5&btOk=ok>. Acesso em: 13 out. 2015.

JARDIM, Carolina D. S.. **A Inserção da geração solar fotovoltaica em alimentadores urbanos enfocando a redução do pico de demanda diurno**. 2007. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2007.

LACCHINI, Corrado; SANTOS, João C. V. dos.. Photovoltaic energy generation in Brazil-Cost analysis using coal-fired power plants as comparison. **Renewable Energy** 52 (2013) 183-189. Philadelphia, Nov. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112006787>>. Acesso em: 09 jun. 2014.

CDM – CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. **Methodological tool: Tool to calculate the emission factor for an electricity system**. 2018. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2015.

MCTI. **Método da análise de despacho: Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. 2015. Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html#>. Acesso em 15 ago. 2015.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A.; Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). CEPEL - GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014, 529 p.

REBECHI, Samuel H.. **O potencial da geração solar fotovoltaica conectada ao sistema de distribuição urbano: estudo de caso para um alimentador com pico de carga diurno**. 2008. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2007.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY (REN21).

Renewables 2020: Global Status Report. França, 2021. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>. Acesso em: 09 mai. 2021.

RÜTHER, Ricardo; KNOB, Paulo J.; JARDIM, Carolina S.; REBECHI, Samuel H.. Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in Brazil. **Energy conversion and management**. V. 49, p. 1074-1079, 2008.

SIMEPAR. **Instituto Tecnológico Simepar**. Disponível em: < <http://www.simepar.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

UFRGS. **Programa RADIASOL**. Laboratório de Energia Solar, 2012. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 02 mai. 2021.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2010.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e dimensionamento de sistemas**. Curitiba, 2012.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CHINVELSKI, Tiago; SIMÃO, Carla A.; MAKISHI, Lilian M.. **Primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica homologado pela COPEL**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, V, 2014, Recife. Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 31 a 3 de abril de 2014.

URBANETZ JUNIOR, Jair; MARIANO, Juliana D'Angela; CAMPOS, Henrique M.; TONIN, Fabianna; CASAGRANDE, Eloy F.; TIEPOLO, Gerson M.. **Acompanhamento e análise de três anos de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica da UTFPR**. CONGRESSO INTERNACIONAL SODEBRAS, XXXIII, 2015. Anais do XXXIII Congresso Internacional Sodebras, Salvador, 29 a 31 de maio de 2015.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas, R.. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2012.

METHODOLOGICAL TOOL TO EVALUATE GRID-CONNECTED SOLAR PV SYSTEMS: A CASE STUDY IN CURITIBA METROPOLITAN AREA

ABSTRACT – This study aims to deepen knowledge of the use of grid-connected solar photovoltaic (PV) systems, while represents a proposed methodology to evaluate the PV potential for a defined region, with Curitiba Metropolitan Area being the focus of this article. In addition, methodological procedures involved the simulation of different scenarios for distributed PV generators by varying their penetration level, so that the effects on actual load curves of the analyzed region were quantified. Twelve critical days were selected for the analysis, which included the photovoltaic contribution in

terms of power consumption reduction and the capacity of photovoltaic systems to reduce daytime peak demand of the electrical grid. Moreover, avoided greenhouse gas emissions were quantified. Results revealed that the most appropriate PV penetration level, in terms of power, is situated between 40.80 MWp and 55.68 MWp, with some exceptions not being taken into consideration. This interval of power results in maximum values of effective load carrying capacity (ELCC) for days of maximum and typical solar irradiation during winter and summer seasons. Therefore, this proposed interval represents the better PV's peak shaving capability, because of its higher ELCC parameter. Thus, this proposed range represents the best capacity to reduce peak demand, in addition to avoiding the emission of greenhouse gases estimated at 18,790 tons of CO₂-eq to 25,643 tons of CO₂-eq.

KEYWORDS: Sustainable Energy; Solar Photovoltaic Energy; Effective Load Carrying Capacity; Solar PV potential; Greenhouse Gas Emission.

EFEITOS DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM GEOPOLÍMEROS A BASE DE METACALINITA

Daniele Silvéria Brandão e Silva

lattes.cnpq.br/3934019582598385

Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais

Paulo Henrique Ribeiro Borges

lattes.cnpq.br/5399317473703342

Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais

Peter Ludvig

lattes.cnpq.br/7848995220297181

Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais

RESUMO - Geopolímeros são materiais alternativos ao cimento Portland, apresentando alta resistência mecânica e durabilidade química e térmica. Trata-se de um polímero inorgânico que apresenta vantagens ambientais em sua produção, além de ser considerado material de alto desempenho. Este trabalho tem o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de argamassas geopoliméricas contendo adição de Nanotubos de

Carbono (NTC) assim como o método de incorporação do nanocompósito a argamassa. Os NTC são materiais promissores como reforços em matrizes geopoliméricas para o desenvolvimento de materiais de construção com aplicação específica visando melhor desempenho. A matriz estudada é resultante da ativação alcalina de metacaulim (MC) com silicato de sódio e hidróxido de sódio. Os NTC foram adicionados em percentuais de 0,1%, 0,3% e 0,5% em massa de metacaulim. As propriedades avaliadas para o compósito resultante foram resistência à compressão, resistência à flexão e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP). Ensaio de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) e Infravermelho (FTIR) foram realizados para a avaliação da dispersão dos NTC no MC (antes da ativação). Os resultados mostram que os NTC quando bem distribuídos na matriz promovem um aumento de resistência à compressão e flexão das amostras.

PALAVRA-CHAVE: Dispersão; Geopolímero; Nanotubos de Carbono.

1. INTRODUÇÃO

Criar tecnologias que sejam sustentáveis e ambientalmente corretas tem sido um grande desafio industrial. Produzir materiais com melhores propriedades e ao mesmo tempo não agressivos ao ambiente tornou-se foco de diversas pesquisas. Para a construção civil, a obtenção de materiais que possam reduzir o uso de cimento Portland, visto como grande poluidor devido a altas taxas de CO_2 liberadas durante sua produção, representaria um grande avanço nos métodos de construção. Motivadas pela necessidade de redução do seu consumo, pesquisas têm sido desenvolvidas em torno de novos materiais que possam surgir como alternativa ao cimento Portland. Cimentos produzidos por ativação alcalina surgem como um promissor substituto devido aos grandes benefícios apresentados. Trata-se de materiais com alta capacidade de redução de CO_2 , pois durante sua produção a emissão não é representativa, tornando-se menos agressivos ao ambiente (SAJAYAN *et al* 2008; SAAFI *et al* 2013). Os geopolímeros fazem parte de uma classe de material com grande potencial tecnológico; são polímeros inorgânicos sintetizados por reações químicas em meio altamente alcalino, apresentando boa estabilidade química, resistência a corrosão e alta resistência inicial (SAAFI *et al* 2015). Sing *et al* (2013) citam que nos últimos anos os geopolímeros tem atraído atenção devido a sua alta resistência inicial à compressão, baixa permeabilidade, boa resistência química e excelente resistência ao fogo, tornando-se um candidato promissor como uma alternativa ao cimento Portland para algumas aplicações específicas.

Os geopolímeros podem proporcionar um desempenho comparável ao cimento Portland em várias aplicações, porém possuem como grande vantagem a redução significativa nas emissões de CO_2 . A seleção de materiais amplia a variedade de propriedades e características, incluindo alta resistência à compressão, baixa retração, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica (DUXON *et al.* 2007).

Devido ao tipo de ligação que ocorre em sua estrutura, o geopolímero pode apresentar defeitos em forma de poros e vazios, tornando uma estrutura frágil a fraturas. Este caráter frágil é bastante similar aos demais materiais cerâmicos, incluindo o cimento Portland e seus produtos. Com o intuito de conseguir uma melhoria nas propriedades e aplicações estruturais, reforços como diferentes fibras têm sido investigados e adicionados para se obter um aumento a resistência e controle de propagação de trincas (SAAFI *et al* 2013;2015).

De acordo com Li *et al.* (2005) fibras curtas são reforços eficazes no fortalecimento de materiais geopoliméricos: fibras de álcool polivinílico (PVA) quando adicionadas como reforço mostraram uma melhora razoável em suas propriedades do geopolímero. Para Mackenzie *et al* (2009), o uso de geopolímeros em aplicações estruturais é possível, e tensões adicionais podem ser transmitidas usando fibras como reforço, como exemplo fibras de carbono, grafite, aramida e vidro. Os nanotubos de carbono (NTC)

vêm sendo considerados como um potencial reforço em compósitos, pois possuem propriedades mecânicas, elétricas, químicas e térmicas superiores às tradicionais (Coleman et al., 2006).

Desde sua descoberta, os NTC têm sido considerados como um dos materiais mais promissores para uma gama de aplicações em virtude de suas excelentes propriedades. É uma forma única de carbono que tem propriedades eletrônicas, química e térmicas desejáveis (O'CONNELL, 2006; MAKAR, 2005). Os NTC são materiais importantes em virtude de sua grande variedade de aplicações científicas e tecnológicas, dependentes de suas propriedades que variam em função de sua estrutura, diâmetro e seu comprimento, assim como de sua pureza e defeitos estruturais (MAKAR, 2005). Chen *et al* (2011) cita que os NTC se tornaram um material de grande importância e interesse, devido as suas propriedades com características distintas e mecânica superior aos demais materiais usados como reforço. De acordo com Bharj *et al* (2013) os NTC são um dos materiais mais importantes no campo da nanotecnologia devido seu desempenho como reforço em polímeros, assim como suas excepcionais propriedades mecânicas que elevam seu potencial para produzir materiais cimentícios de alto desempenho.

Porém um dos obstáculos enfrentados nessas investigações com material nanométrico é a dispersão nas matrizes. Em virtude da grande área superficial disseminada dos NTC, eles tendem a formar aglomerados e feixes mantidos pelas forças de Van der Waals. Isto, juntamente com seu caráter hidrofóbico, a falta de solubilidade e nanodimensões, dificulta o seu manuseio e dispersão. A fim de melhorar as propriedades nanocompósitos, é essencial alcançar tanto uma fina distribuição de NTC individuais em toda a matriz como uma adesão adequada, uma vez que a força de ligação interfacial está diretamente relacionada com a eficiência de transferência de carga da matriz para os NTC (FRAGA *et al*, 2014).

1.1 Uso de NTC em geopolímeros

Assim como em cimento Portland o número de pesquisas usando NTC como reforço em geopolímeros tem apresentado resultados interessantes, com suas propriedades mecânicas significativamente melhoradas e quando comparadas as fibras tradicionais mostrando assim seu potencial como material de reforço.

Kharter *et al* (2016) estudou o comportamento do geopolímero com diferentes adições de NTC (0; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4%). Os resultados mostraram que a adição de NTC reforçou a estrutura, com ensaios de resistência à compressão apresentando um aumento em relação a referência para adição de 0,1% de NTC e queda na resistência à medida que se aumenta o teor de NTC no geopolímero. O ensaio de absorção de água mostrou que amostras contendo 0,1% de NTC apresentou menor absorção, 10% menor que a referência para cura de 7 dias e redução de 20% para uma cura de 90 dias.

Saafi *et al* (2013) analisaram o efeito NTC sobre as propriedades mecânicas e elétricas em compósitos geopoliméricos a partir de cinzas volantes, produziu matrizes contendo diferentes concentrações MWCNTs (0,0%, 0,1%, 0,5% e 1,0% por peso) foram produzidos. Os resultados mostraram que a adição de NTC causa um efeito significativo nas matrizes. Para o ensaio de flexão, as matrizes com adição de NTC até 0,5% apresentaram um aumento na força, rigidez e tenacidade das vigas, com um aumento na resistência à flexão de 126% em relação a referência. Matrizes com teores acima de 0,5% de NTC apresentaram um decaimento nas propriedades devido a aglomeração do material. Para as propriedades elétricas, as concentrações de NTC e sua morfologia causaram um aumento na condutividade elétrica, devido a boa dispersão ocorreu a formação de uma rede condutora no interior da matriz. Ocorreu ainda um aumento da piezorresistividade na matriz de geopolímero com os nanocompósitos, de acordo com os autores, esse aumento pode ser utilizado como uma ferramenta para detectar início da fissura na base geopolimérica- estruturas de concreto possibilitando o desenvolvimento de ações de reparação e manutenção estratégicas.

Goldoni (2014) pesquisou o efeito da adição de diferentes teores de nanotubos de carbono em geopolímeros avaliando os resultados de ensaios de resistência compressão e flexão em combinação com o uso de um superplastificante. De acordo com os resultados a incorporação de NTC aumentaram a resistência à compressão e flexão do geopolímero, com uma tendência de aumento para teores até 0,2% de NTC em relação a massa de metacaulim. Já o uso do policarboxilato como agente dispersante influenciou nas propriedades do geopolímero: nas amostras contendo o superplastificante os valores obtidos foram menores que os encontrados nas amostras que não possuíam o material.

1.2 Dispersão dos Nanotubos de Carbono em matrizes cimentícias

Em virtude da grande área superficial disseminada dos NTC, eles tendem a formar aglomerados e feixes mantidos pelas forças de Van der Waals. Isto, juntamente com seu caráter hidrofóbico, a falta de solubilidade e nanodimensões, dificulta o seu manuseio e dispersão. A fim de melhorar as propriedades nanocompósitos, é essencial alcançar tanto uma fina distribuição de NTC individuais em toda a matriz como uma adesão adequada, uma vez que a força de ligação interfacial está diretamente relacionada com a eficiência de transferência de carga da matriz para os NTC (FRAGA *et al*, 2014).

Chen *et al*. (2011) citam em seu trabalho usando NTC como reforço em cimento Portland que a dispersão insuficiente têm sido um fator chave para diminuir o desempenho dos compósitos cimentícios contendo NTC; a dispersão ineficiente conduz à formação de diversos defeitos no composto e limita suas propriedades mecânicas. Uma melhor dispersão, por sua vez, pode resultar em uma área de contato interfacial maior entre os NTC e a

matriz, bem como tensões mais uniformemente distribuídas. Saafi *et al.* (2013) citam que a dispersão de NTC nas matrizes é um dos principais desafios para a melhoria da fabricação de misturas contendo o nano compósito, onde a dispersão adequada é um desafio mesmo em concentrações muito baixas, limitando assim os seus potenciais benefícios em termos de propriedades mecânicas e elétricas.

Com a intenção de se obter dispersões mais homogêneas, atualmente são utilizados métodos mecânicos ou métodos químicos para dispersar os nanotubos de carbono. O uso de métodos mecânicos, como ultrassom, utiliza-se de agitação com alta taxa de cisalhamento que permite a desagregação dos NTC (KONSTA *et al.*, 2010). Os métodos químicos usam surfactantes ou modificações químicas para alterar a energia de superfície dos NTC, melhorando as características de molhabilidade, aumentando a estabilidade da dispersão no solvente. A funcionalização promove a adição de grupos funcionais aos átomos superficiais do material mudando quimicamente sua superfície, alterando suas propriedades de molhabilidade e adsorção e conseqüentemente suas propriedades de superfície, o que promove uma repulsão, mantendo os NTC em suspensão (BARRETO *et al.*, 2013; BHARJ *et al.*, 2014).

O tratamento prévio de NTC em dispersões líquidas tem sido foco de pesquisas, Li *et al.* (2005) cita o processo de carboxilação para melhorar as ligações entre os NTC e o cimento. É reportado também o uso de goma arábica como um agente dispersante e o uso de policarboxilato e metilcelulose. Hunashyal *et al.* (2011) com o objetivo de obter uma boa dispersão, utilizaram em seu trabalho diferentes técnicas em conjunto: métodos mecânicos (ultrassom e agitação magnética) e tratamento químico (dispersão em solvente orgânico (acetona) e uso de agente tensoativo. Muitos esforços têm sido direcionados para potencializar o uso dos NTC como reforço, de modo diminuir a dificuldade de dispersão, reduzindo com isso a limitação de seu uso.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Como fonte de sílica e alumina foi utilizado para preparar os geopolímeros um metacaulim no qual sua composição química (porcentagens de óxidos) é dada no quadro 1. A solução ativadora utilizada era composta por soluções de hidróxido de sódio 14 mol/L, solução de silicato de sódio de composição química (31,79% de SiO₂, 15% de Na₂O e 53,21% de H₂O). O agregado fino utilizado foi areia normal Brasileira, produzidos pelo IPT-Instituto de Pesquisa Tecnológicas, conforme ABNT 7214/82, com suas características apresentadas no quadro 2. Para produção dos geopolímeros foram utilizados 50% de areia fina (material retido na peneira 50) e 50%

de areia média fina (material retido na peneira 30), sendo pesadas e misturadas previamente. Os NTC utilizados foram cedidos pelo Laboratório de Nanomateriais do Departamento de Física – ICEX (UFMG). Trata-se de nanotubos de carbono de múltiplas camadas (*MWCNT*), tipo HP- 2627, obtidos pelo método de deposição química da fase de vapor, com massa de 50.000 mg e pureza superior a 93%. As concentrações de NTC escolhidas para adição no geopolímero são 0,1, 0,3 e 0,5% em relação a massa de metacaulim (m/m).

Quadro 1: Composição Química do metacaulim

Óxidos	Quantidade (%)
Al_2O_3	53,436
SiO_2	45,731
Fe_2O_3	0,448
K_2O	0,116
SO_3	0,060
CaO	0,058
TiO_2	0,010

Quadro 2: Características Granulométricas Areia normal

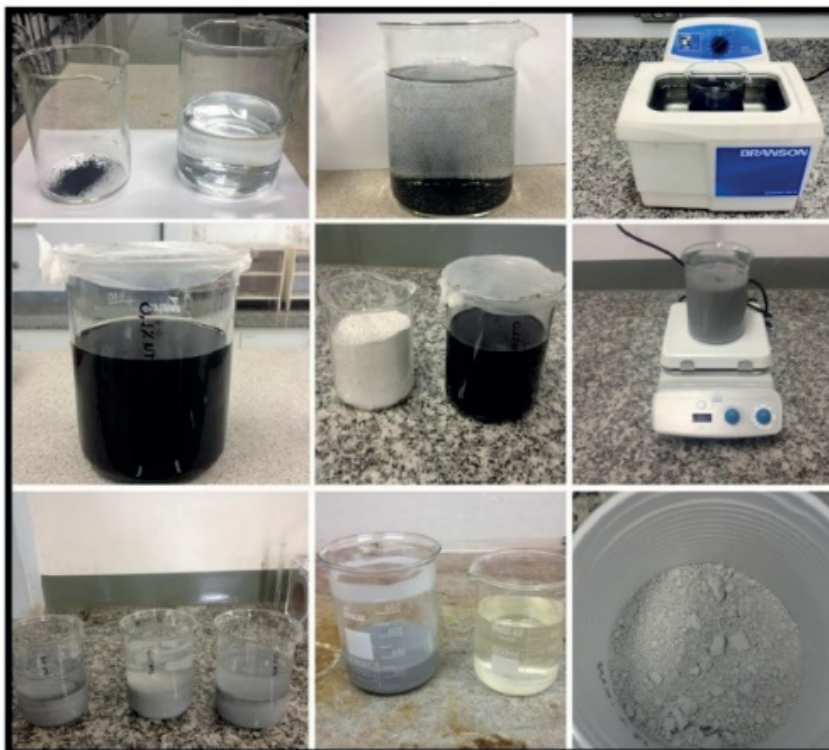
Peneira ABNT		Material retido acumulado	Limites- NBR- 7214/82
Nº	Abertura (mm)	(%)	
8	2,4	0	0
10	2	5	5± 5
16	1,2	30	25± 5
30	0,6	52	50± 5
50	0,3	74	75± 5
100	0,15	98	97 ± 3

2.2 Dispersão dos NTC

Devido à forte tendência de aglomeração dos NTC, muitos são os métodos utilizados para dispersá-los nas matrizes. Tradicionalmente tanto nas matrizes de cimento Portland quanto em geopolímeros, a dispersão dos NTC é feita usando algum tipo de aditivo superplastificantes em conjunto com ultrassom. A metodologia desenvolvida neste trabalho propõe adicionar NTC no metacaulim (antes da fabricação do geopolímero) utilizando um hidrocarboneto como meio de transporte.

Para adição dos NTC no metacaulim, foi utilizado como meio dispersante álcool etílico absoluto (99,0%). Os teores de NTC (0,1%, 0,3% e 0,5%) foram pesados e adicionados em álcool etílico, em seguida levados ao banho de ultrassom por 1 hora numa frequência de 60 Hz. Logo após, o metacaulim foi adicionado ao sistema (NTC + álcool etílico) e novamente levado ao ultrassom por 30 minutos e posteriormente a agitação magnética por 1 hora. Finalmente, a mistura permaneceu em repouso até decantação completa do metacaulim, permitindo retirar a fase superior (álcool etílico). O metacaulim contendo os NTC foi levado a estufa, com temperatura controlada em 80°C, até evaporação completa do álcool etílico. A figura 1 mostra a sequência para adição dos NTC ao metacaulim. Além do álcool etílico foi realizado um teste usando uma solução de hidróxido de sódio e álcool etílico. Para o teste usando a solução de hidróxido de sódio (NaOH) com álcool etílico, primeiro foi preparado uma solução contendo 150g.L⁻¹ de NaOH, 80% de álcool etílico e 20% de água destilada. Dissolveu-se o NaOH em água e logo após o álcool etílico foi adicionado. A sequência utilizada para dispersão do NTC e adição do metacaulim, foi a mesma empregada para dispersão feita em álcool. Neste teste, porém, foi utilizado somente o teor de 0,1% de NTC.

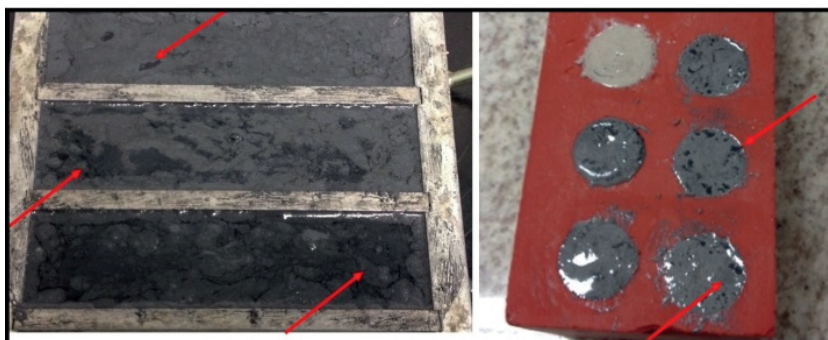
Figura 1: Sequência de dispersão dos NTC no metacaulim



2.3 Produção do geopolímero

A definição das razões molares em geopolímeros são parâmetros de ativação que devem ser seguidos para a produção de materiais com resistência mecânica e durabilidade adequados. Com base nas razões molares estabelecidas em estudos anteriores (BORGES,2014) e uma vez determinada a composição química das matérias primas, pode-se calcular a quantidade de cada constituinte no processo de geopolimerização. Determinou-se que a composição da matriz geopolimérica deveria obedecer às razões que se segue: Solução/Sólidos: 1,30; Na_2SiO_3 / NaOH (em massa) na solução alcalina: 2.0 e o agregado miúdo que é inerte assim como nas matrizes de cimento Portland, decidiu-se manter neste trabalho a relação 2:1 em massa entre o agregado miúdo e ligante (metacaulim). Foram produzidas 4 formulações de geopolímero, referência (0 % de NTC); 0,1% de NTC; 0,3% de NTC e 0,5% de NTC. Para produção do geopolímero com o auxílio de um agitador mecânico, o metacaulim foi incorporado em pequenas quantidades na solução ativadora até sua totalidade. A pasta foi misturada de forma contínua e, em seguida, procedeu-se a adição da areia com agitação constante até completa homogeneização da argamassa. Foram moldados corpos de prova em uma forma de silicone com formato cilíndrico nas dimensões ($\varnothing$ 20 x 55) mm e corpos de prova prismáticos com dimensões (40x40x160) mm. Logo após a moldagem as formas foram vibradas e logo após várias aglomerações eram visíveis como manchas e pontos escuros correspondente a nanotubos de carbono na superfície das amostras de geopolímeros (figura 2). A cura do material foi realizada durante 24 horas a uma temperatura de 60°C e mais 24 horas em temperatura ambiente. Para Duxon *et al* (2007), a cura térmica auxilia na transição de estrutura amorfa para cristalina do geopolímero, em temperaturas em torno de 70°C. Para que ocorra a geopolimerização, o fornecimento de calor é fundamental, já que a taxa de ativação é baixa.

Figura 2: Pontos NTC na superfície das amostras



2.4 Caracterização da qualidade de Dispersão

Após a dispersão dos NTC no metacaulim foram feitas nas amostras imagens de microscopia eletrônica de varredura (MeV) e análise de infravermelho (FTIR) a fim de avaliar a qualidade da dispersão.

2.5 Ensaios Mecânicos

Após 48 horas de cura foram realizados ensaios de compressão nos corpos de prova cilíndricos, sendo rompidos 6 corpos de prova cada formulação. Os resultados foram expressos apresentando a média dos valores, assim como seu desvio padrão. Os ensaios de resistência a flexão também foram realizados após 48 horas de cura, sendo rompidos 3 corpos de prova para cada formulação, os resultados apresentaram a média dos valores, assim como seu desvio padrão.

3. Resultados experimentais

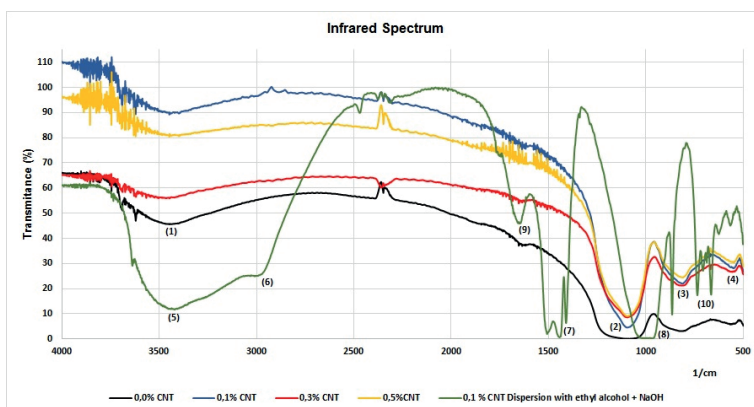
3.1 Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de Infravermelho é uma técnica instrumental simples e rápida que é utilizada para evidenciar a presença de vários grupos funcionais baseada nas vibrações e rotações das ligações entre átomos de uma molécula, com essas vibrações sendo específicas para de cada tipo de ligação química proporcionando os picos e bandas de frequência de estiramento (PEREIRA, 2016; FIORINI, 2000; SKOOG, 2008). A análise de FTIR foi utilizada para analisar o comportamento do metacaulim após o processo de dispersão usando álcool etílico absoluto e solução de álcool etílico + NaOH (etóxido de sódio), o objetivo era avaliar se o uso do álcool etílico como dispersante dos NTC causaria alguma alteração nas características do metacaulim.

O espectro típico do metacaulim apresenta bandas entre 3450 cm^{-1} a 1650 cm^{-1} , provenientes do grupo OH presente na água adsorvida da atmosfera, uma banda de estiramento a 1088 cm^{-1} proveniente da ligação Si-O, uma banda de vibração a 810 cm^{-1} da ligação Si-O-Al e uma banda de vibração a 450 cm^{-1} para ligação Al-O (BARBOSA *et al*, 2000; ABBASI *et al* 2016). A figura 3 apresenta o resultado do ensaio de FTIR das amostras de metacaulim, analisando o espectro das amostras de metacaulim puro (MC), metacaulim com adição de 0,1% NTC, metacaulim com adição de 0,3% de NTC e metacaulim com adição de 0,5% de NTC. Nota-se uma semelhança nas bandas geradas, indicando materiais com características similares. Em todas as amostras pode-se perceber bandas entre 3450 cm^{-1} a 1650 cm^{-1} (1), uma banda de estiramento a 1088 cm^{-1} (2), uma banda de vibração a 810 cm^{-1} (3) e uma banda de vibração a 450 cm^{-1} (4), todas elas correspondendo a bandas típicas do metacaulim. Analisando o resultado do ensaio e baseado

nas características do espectro do metacaulim, conclui-se que o método de dispersão utilizado não causa alterações no mesmo, indicando que o uso do álcool etílico como meio dispersante apresentou ser eficaz. No entanto, o mesmo não acontece com a amostra de metacaulim com adição de 0,1% de NTC dispersos com a solução de álcool etílico e hidróxido de sódio. Comparando os espectros do metacaulim referência e da amostra, nota-se a presença de grupos funcionais não característicos do metacaulim. No espectro gerado identificou-se a presença de bandas de adsorção em torno de 2923 cm^{-1} provenientes dos alongamentos simétricos e assimétricos do grupo CH_2 (6), bandas de 1463 cm^{-1} vibrações simétricas e assimétricas do grupo CH_3 (7) que, de acordo com Li *et al* (2005) podem ser atribuídos a adsorção do sódio do etóxido de sódio. Há ainda a presença de bandas características típicas da formação de geopolímeros, tais como: (i) 1006 cm^{-1} (8) atribuído ao estiramento assimétrico de ligações Al-O e Si-O, encontradas devido a organização estrutural onde Al^{3+} são incorporados no tetraedro SiO_4 , formando vibrações de estiramento Si-O-Al (ABBASI *et al*, 2016); (ii) bandas de vibração do estiramento de ligação de O-H entre 3430 e 1600 cm^{-1} (5); (iii) bandas de vibração do estiramento de CO_2 em 1400 cm^{-1} (9) e (iv) bandas de estiramento Si-O-Si em 700 cm^{-1} (10). De fato, Kharter *et al* (2016) citam que os espectros da análise de infravermelho do geopolímero apresentam as seguintes bandas: Vibração de estiramento de ligação de O-H entre 3430 e 1600 cm^{-1} , vibração de estiramento de CO_2 localizada em 1410 cm^{-1} , vibração de estiramento assimétrico (Si-O-Si) relacionado com partículas não solubilizadas em 1100 cm^{-1} , vibração de estiramento assimétrica (Si-O-Si ou Al-O-Si) em 975 cm^{-1} , vibração de estiramento simétrico de (Si-O-Si) atribuído ao α -quartzo a cerca de 797 cm^{-1} , vibração simétrica em 778 cm^{-1} para (Al-O-Si), vibração de estiramento simétrico (Si-O-Si) na região $676\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ e vibração de flexão (Si-O-Si e O-Si-O) na região de $430\text{--}445\text{ cm}^{-1}$.

Figura 3: Análise de espectroscopia de infravermelho das amostras de metacaulim



Com a análise dos resultados do ensaio e baseado nas características de um espectro de metacaulim, conclui-se que o método de dispersão utilizado não causa alterações no mesmo, indicando que o uso do álcool etílico como meio dispersante apresentou ser eficaz.

3.2 Microscopia Eletrônica de varredura (MeV)

Um dos maiores desafios no uso de NTC como adição em materiais é sua difícil dispersão. Encontrar um método que possibilite sua incorporação é de grande importância, visto que, uma melhor dispersão tem influência direta na eficiência dos NTC e na incidência ou não de defeitos na estrutura. Após a incorporação dos NTC ao metacaulim, imagens foram feitas com o objetivo de avaliar a eficiência do método utilizado.

As imagens do metacaulim com adição de NTC obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MeV) estão apresentadas nas figuras 4 a 6, respectivamente para teores de 0,1, 0,3 e 0,5% de NTC, com as imagens agrupadas levando em consideração o teor de NTC disperso no metacaulim. Analisando as imagens obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), nota-se que o nanocompósito está presente em todos os pontos da amostra, apresentando uma boa distribuição no metacaulim. No entanto, as figuras 5 e 6 apresentam uma maior quantidade de aglomerados de NTC, indicando uma fraca dispersão nas amostras com adição de 0,3 e 0,5% de NTC. Tal fato pode ser atribuído a um tempo insuficiente de dispersão em ultrassom para o sistema álcool + NTC, de forma que à medida em que a quantidade de NTC a ser incorporada na amostra aumenta, maior a dificuldade de dispersão.

Quando foi utilizada uma solução composta de álcool e NaOH, as imagens de MEV indicam a formação de estruturas aciculares não obtidas quando a dispersão se deu somente com álcool (figura 7). Desta forma, é provável que tenha ocorrido reação entre o metacaulim e o hidróxido de sódio, visto que este último tende a quebrar as ligações do aluminossilicato, o que é a base da ativação alcalina destes materiais.

Figura 4: Metacaulim com 0,1% NTC

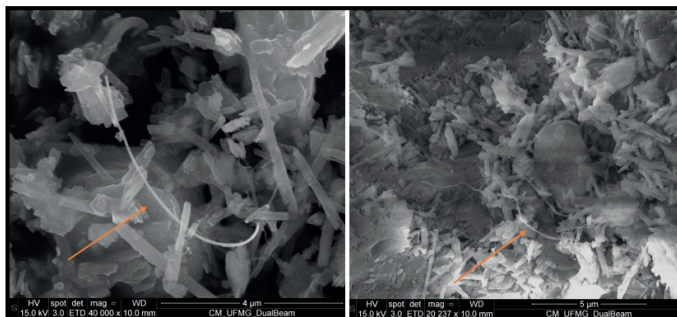


Figura 5: Metacaulim com 0,3% NTC

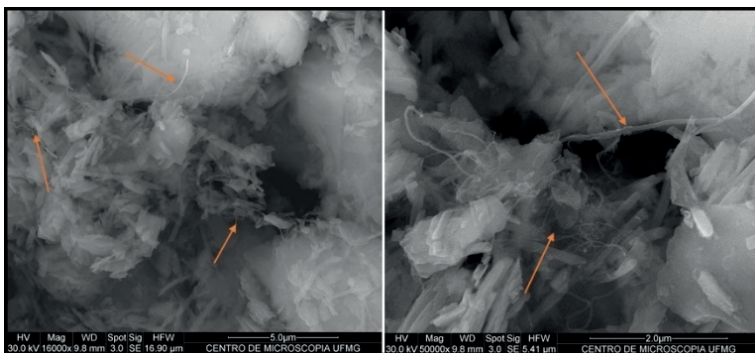


Figura 6: Metacaulim com 0,5% NTC

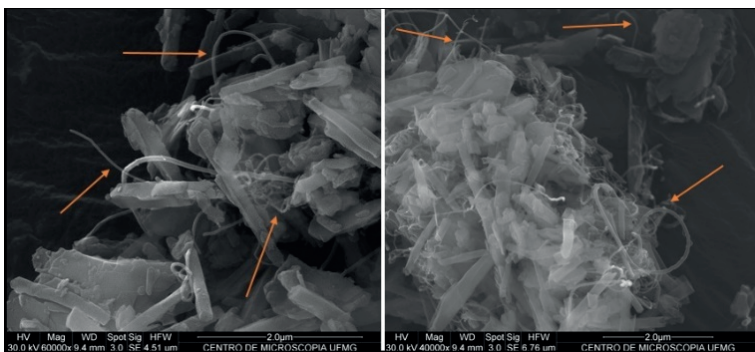
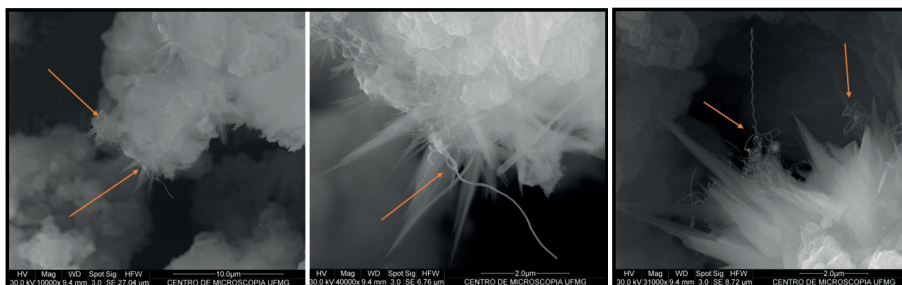


Figura 7: Metacaulim com 0,1% de NTC disperso em solução de NaOH e álcool etílico

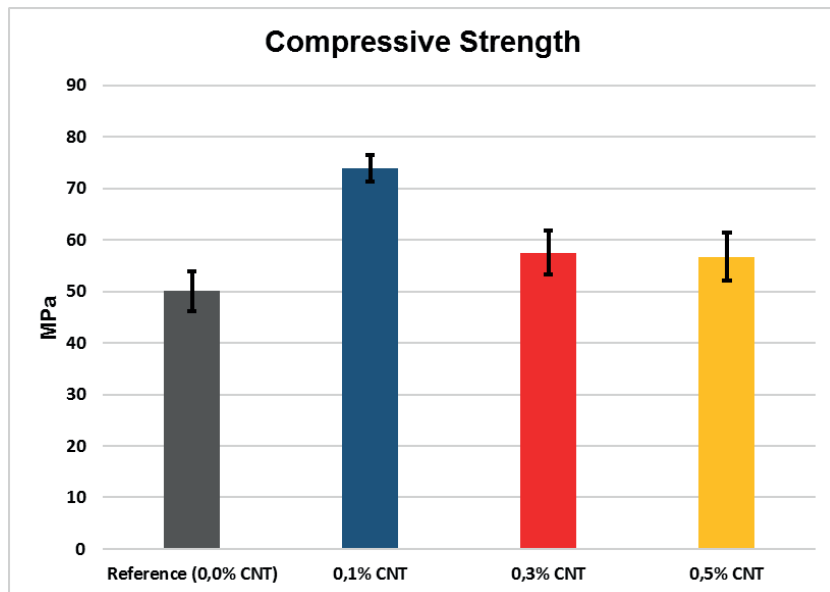


3.3 Ensaio de Resistência à Compressão de geopolímeros com NTC

A figura 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova de geopolímeros. Com análise dos resultados verificou-se que a adição de NTC ao geopolímero contribui

para um acréscimo na resistência à compressão em comparação ao geopolímero de referência. É importante observar ainda, que os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos para a formulação que continha menor teor de NTC, ou seja, 0,1%. A figura indica ainda que, para a concentração de 0,1 % de NTC, o aumento significativo na resistência à compressão (~40%) acompanhado de um menor desvio padrão, mostra uma distribuição de valores mais próximos a média encontrada, ao passo que nas amostras com concentrações mais elevadas os resultados obtidos tendem a ter uma variação maior. Pode-se dizer que a adição dos NTC causa um efeito favorável na resistência a compressão, com o melhor desempenho ligado diretamente ao fator de uma melhor dispersão dos NTC no metacaulim e ao teor de nanocompósitos adicionado. Para Li *et al* (2005) a aglomeração de NTC pode ser o principal fator de influência na redução das propriedades mecânicas. De um modo geral, teores mais elevados de NTC podem requerer um tempo maior no seu processo de dispersão. A redução da resistência mecânica com o aumento do teor de NTC também foi observado para matrizes de cimento Portland por CHEN *et al* 2011 e SAAFI *et al*, 2013 em geopolímeros. De acordo com os autores, altos teores de NTC (valores acima de 0,5% NTC) provocam má distribuição e severa aglomeração.

Figura 8: Resistência à compressão de espécimes de geopolímero com adição de NTC

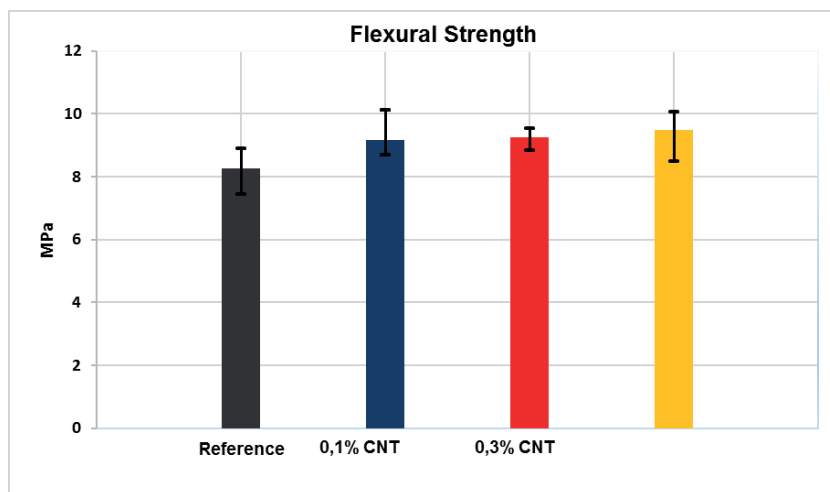


3.4 Ensaio de Resistência à Flexão de geopolímeros com NTC

A figura 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência

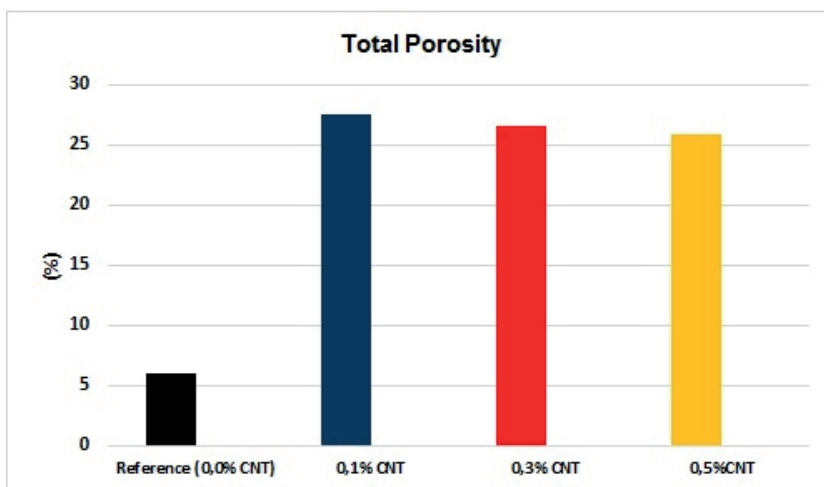
à flexão em três pontos dos corpos de prova retangulares (40x40x160) mm, para o geopolímero de referência e para os geopolímeros com as demais adições de NTC: 0,1%; 0,3% e 0,5%. Analisando os resultados, todas as amostras apresentaram um aumento médio na resistência à flexão em comparação à referência, com aumento de aproximadamente 10% para os teores de 0,1% e 0,3% de NTC e 15% para amostras com adição de 0,5% de NTC. Em comparação aos resultados obtidos no Ensaio de Resistência à compressão pode-se dizer que aumento apresentado não tão significativo, fator que pode ser atribuído à aglomeração dos NTC na superfície da amostra (figura 2). Bharj *et al* (2013) cita em seu trabalho que para conseguir um reforço eficaz, dispersão uniforme é o fator chave. Para Goldoni (2014) a maior homogeneidade na dispersão dos NTC permite que eles atuem mais efetivamente como reforço do geopolímero.

Figura 9: Resistência à flexão de espécimes de geopolímero com adição de NTC

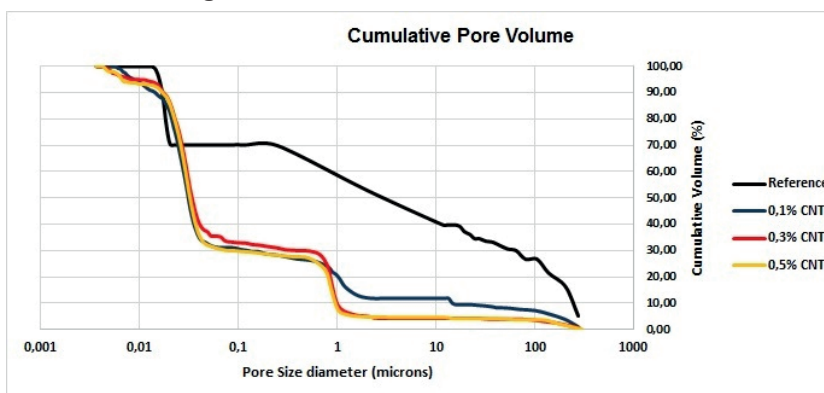


4.3.5 Porosidade – Método MIP (Porosimetria por Intrusão de Mercúrio)

A porosimetria por intrusão de mercúrio foi utilizada com o objetivo de avaliar o efeito das adições de NTC na distribuição dos tamanhos de poros na argamassa geopolimérica em comparação a referência. A análise da porosidade total das amostras (figura 10) mostra que ocorreu um aumento significativo da porosidade nas amostras que continham NTC em comparação com a referência. De acordo com Li *et al* (2015) esse aumento do volume de poros pode ser atribuído ao emaranhado formado pelos NTC nos poros, devido a fatores que podem ter ocorrido durante a dispersão, que por sua vez promovem sua subdivisão em poros menores.

Figura 10: Porosidade Total

Analisando a curva do volume acumulado de mercúrio em função do diâmetro dos poros das amostras podemos observar que, as formulações contendo adições de NTC possuem um formato semelhante, indicando uma estrutura porosa similar. Aproximadamente 20% dos poros se encontram acima de $1\ \mu\text{m}$ e o maior percentual de poros se dá entre $0,01$ - $0,1\ \mu\text{m}$. Por outro lado, a formulação de referência, ainda que tenha menor porosidade total (figura 10), esta contém 60% dos poros acima de $1\ \mu\text{m}$; isto indica o refinamento de poros quando os NTC são adicionados em qualquer percentual estudado.

Figura 11: Volume de Poros Acumulados

Nas amostras que contém NTC a maior quantidade de poros está

distribuída nas faixas de 0,1-1 μm e 0,01-0,1 μm (aproximadamente 60%); para a formulação de referência, a maior concentração de poros encontra-se distribuída em diâmetros maiores que 10 μm , ou seja, 40%. Assim sendo, a adição de NTC pode reduzir a quantidade de macroporos no geopolímeros; de acordo com Li *et al* (2005) e Monteiro (2008) essa redução é benéfica visto que, os macroporos causam um efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de materiais cimentícios.

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado apresentou uma investigação na produção de geopolímeros com adição de nanotubos de carbono, com a expectativa de conseguir um melhor desempenho nas propriedades mecânicas e de transporte, pode-se concluir que:

O método de dispersão utilizado para adicionar os NTC no metacaulim mostrou-se satisfatório. O uso do álcool etílico como meio dispersante mostrou-se interessante, pois ele não provoca alterações nas propriedades do metacaulim, não reagindo com o mesmo e após o uso sua recuperação é quase total.

Os resultados do ensaio de compressão demonstraram que a incorporação dos NTC no geopolímero contribuiu de forma benéfica na resistência à compressão. Compósitos com 0,1% de NTC apresentaram melhores resultados, cerca de 40% de aumento na resistência em comparação a referência, indicando que melhores resultados estão diretamente ligados a uma melhor dispersão e incorporação do material. Com relação ao comportamento à flexão, o melhor resultado foi observado para compósitos com maior teor de NTC (0,5%), com um aumento de 15% em comparação a referência. Para os demais teores, a melhoria dos resultados chegou a 12% para os dois casos.

A adição de NTC nos geopolímeros não alterou significativamente a densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente em comparação à matriz de referência. No entanto, ensaios de porosimetria indicam um refinamento nos poros com a adição de NTC em geopolímeros, o que está de acordo com a melhoria nas propriedades mecânica do geopolímero.

Apesar de suas propriedades não permitirem uma boa distribuição e homogeneidade, a incorporação dos NTC levou a uma melhora nas propriedades mecânicas, especialmente no caso de resistência à compressão. Nos parâmetros relacionados a fratura apesar de não serem tão expressivos, também foram notadas melhorias na resistência a flexão. Baseado nas observações acima, pode-se concluir que os NTC podem exercer um papel importante no aumento da compressão e resistência à flexão.

REFERÊNCIAS

ABBASI, Saloumeh Mesgari; AHMADI, Hamidreza; KHALAJ, Gholamreza; GHASEMI, Bahar. **Microstructure and mechanical properties of a Metakaolinite-based geopolymer nanocomposite reinforced with carbon nanotubes**. *Ceramics International*. Volume 42, pag 15171–15176. Ano 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216309117>.

BARBOSA, Valeria F.F.; MACKENZIE Kenneth J.D., THAUMATURGO, Clelio. **Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers**. *International Journal of Inorganic Materials* 2 (2000) 309–317. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466604900000416>.

BORGES, P. H. R.; FONSECA, L. F.; NUNES, V. A.; PANZERA, T. H.; MARTUSCELLI, C. C. **Andreasen particle packing method on the development of geopolymer concrete for civil engineering**. Ano 2014. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, p. 692-697. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000838](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000838).

BHARJ, Jyoti; SINGH, Sarabjit; CHANDER, Subhash; SINGH Rabinder. **Role of Dispersion of Multiwalled Carbon nanotubes on Compressive Strength of Cement Paste**. *Journal of Mathematical, Computational, Statistical, Natural and Physical Engineering*. Volume 8, 340-343, 2014. Disponível em: <http://waset.org/publications/9997523/role-of-dispersion-of-multiwalled-carbon-nanotubes-on-compressive-strength-of-cement-paste>.

CHEN, S.J.; COLLINS, F.G.; MACLEOD, A.J.N.; PAN, Z., DUAN, W.H.; WANG, C.M. **Carbon nanotube–cement composites: A retrospect. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**. n 4, 254-265. 2011. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/loi/tiea20>.

COLEMAN, J.N, KHAN, U; GUN'KO, Y.K. Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes. *Advanced Materials*. Vol 18, pag 689-706. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.200501851/abstract>.

DUXSON, P; JIMÉNEZ, A. Fernández; *et al.* **Geopolymer technology: the current state of the art**. *Journal of Materials Science*. Vol. 42, 2917-2933. 2007. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10853-006-0637-z>.

FIORINI, Edval de Jesus. **Fourier Transform Infrared Spectroscopy. FTIR**. UNICAMP. Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/FTIR.pdf>

GOLDONI, Alessandro Graeff. **Resistência à flexão e compressão em geopolímeros com adição de nanotubos de carbono**. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129279>.

KONSTA, Maria S., METAXA, Zoi S., SHAH, Surendra P. **Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials**. Cement and Concrete Research, n 40, 1052-1059. 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610000542> .

MAKAR, J; MARGESON, J; LUH, J. **Carbon nanotube/cement composites – early results and potential applications**. 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, B.C Canada; 2005. p. 1–10. Disponível em: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=20377873>.

O'CONNELL, MICHAEL J. **Carbon Nanotubes. Properties and Applications**. 1^a Edition. MICHAEL J. O'CONNELL, editor. CRC Press. California. (EUA). 2006

PALOMO, A.; VARELA, M.T. Blanco; GRANIZO, M.L.; PUERTAS, F.; VAZQUEZ, T.; GRUTZECK, M.W. **Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin**. Cement and Concrete Research, n 29, 997–1004. 1999. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884699000745>

PROVIS, John L.; *et al.* **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications**. 1^a Edition. Editor John L. Provis and Jannie S J Van Deventer. CRC Press LLC. USA. 2009

SAAFI, Mohamed; TANGB, Leung; FUNGA, Jason; RAHMANA, Mahbubur; LIGGATC, John. **Enhanced properties of graphene/fly ash geopolymeric composite cement**. Cement and Concrete Research, n 67, 292-299. 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884614002063>.

SAAFI, Mohamed; ANDREW, Kelly; TANG, Pik Leung; MCGHON, David; TAYLOR, Steven; RAHMAN, Mahubur; YANG, Shangtong; ZHOU, Xiangming. **Multifunctional properties of carbon nanotube/ fly ash geopolymeric nanocomposites**. Construction and Building Materials, n 49, 46-55. 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181300737X>.

SKOOG; WEST; HOLLER; CROUCH. **Fundamentos de Química Analítica**. 8^a Edição. Editora Thompson. Ano 2008.

EFFECTS OF ADDING CARBON NANOTUBE ON METACAULINITE-BASED GEOPOLYMERS

ABSTRACT - Geopolymers are alternative materials to Portland cement, with high mechanical strength and chemical and thermal durability. It is an inorganic polymer that has environmental advantages in its production, in addition to being considered a high-performance material. This study investigates to evaluate the mechanical properties of geopolymer mortars containing the addition of Carbon Nanotubes (CNT) as well as the method of incorporating the nanocomposite into the mortar. CNT are promising materials as reinforcements in geopolymer matrices for the development of high-performance building materials. The matrix studied is the result of alkaline

activation of metakaolin (Mk) with sodium silicate and sodium hydroxide. CNT were added at 0.1%, 0.3% and 0.5% of metakaolin mass. The properties evaluated for the resulting composite were compressive strength, flexural strength and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). Scanning Electron Microscopy (MEV) and Infrared (FTIR) assays were performed to evaluate the dispersion of NTC in the MK (before activation). The results presented that the CNT, when well distributed in the matrix, may promote an increase in the compressive strength as well as a pore refinement in the matrices.

KEYWORD: Dispersion; Geopolymer; Carbon Nanotubes.

A low-angle, upward-looking photograph of a modern skyscraper with a glass and steel facade. The building's structure is composed of a dense grid of dark metal beams and large glass panels. The perspective creates a sense of height and scale, with the lines of the building converging towards the top of the frame. The sky is a pale, clear blue.

CIÊNCIA OFFSHORE

SEÇÃO 2

ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS OFFSHORE TIPO UNIDADE FLUTUANTE DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA (FPSO): CONEXÕES ENTRE UM REFORÇADOR LONGITUDINAL DO COSTADO E UMA ANTEPARA TRANSVERSAL

Mariana Rezende Caire de Barros de Castro

lattes.cnpq.br/9829517497647583

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro e RJ

Gilberto Bruno Ellwanger

lattes.cnpq.br/2639351643523334

COPPE/UFRJ/LACEO, Rio de Janeiro e RJ

RESUMO – O trabalho desenvolve uma análise de fadiga estrutural de conexões entre um reforçador longitudinal do costado e uma antepara transversal de uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO) convertida a partir de um navio petroleiro. A análise foi realizada pelo Método Simplificado de fadiga (com auxílio da fase ISE, do programa FPSO eagle, desenvolvido pelo ABS) e pelo Método dos Elementos Finitos (com auxílio da fase TSA do programa FPSO eagle, do NASTRAN e do FEMAP) baseados na distribuição de Weibull com o intuito de estabelecer as características favoráveis e desfavoráveis de cada método. Foram determinados o dano pregresso e o dano de alto e baixo ciclo como FPSO. A partir

desses valores, foi possível estimar a vida remanescente do FPSO. Conhecendo-se as vantagens/desvantagens e as diferenças entre os dois métodos, conclui-se que inicialmente deve ser utilizado o Método Simplificado. O Método Simplificado é rápido e serve para se ter uma noção geral da situação do FPSO. No caso de alguma conexão apresentar vida remanescente menor do que a vida de projeto, indica-se a realização do Método dos Elementos Finitos, que leva a resultados mais confiáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga; Dano; Estrutura Offshore.

1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo e gás está caminhando para águas cada vez mais profundas com grandes afastamentos da costa, fazendo com que estruturas como plataformas fixas percam sua viabilidade técnica e econômica. Desta forma, as estruturas offshore têm adquirido uma importância cada vez maior. Um FPSO (unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência) é um tipo popular de estruturas offshore flutuante, que suporta no seu convés uma planta de

processo (*topside*), armazena o óleo produzido e ainda permite a transferência da produção para outro navio (aliviador).

Perante este cenário e ao conhecimento de que estruturas offshore apresentam problemas de fadiga de maneira frequente, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de fadiga em um FPSO. Para a análise, foram utilizados o Método Simplificado de fadiga e o Método dos Elementos Finitos baseados na distribuição de Weibull de dois parâmetros com o intuito de estabelecer as vantagens/desvantagens de cada método (BARROS, 2015).

2. FADIGA

A fadiga é um processo no qual o dano é acumulado em uma estrutura submetida à variação de tensão. Muitas estruturas não experimentam variação de tensão suficiente para dar origem a problemas de fadiga. Entretanto, outras estruturas, tais como pontes, guindastes e estruturas offshore apresentam estes problemas de maneira frequente.

2.1. Concentração de Tensões

Normalmente, estruturas possuem imperfeições como mudanças bruscas de geometria, entalhes, orifícios ou qualquer outro detalhe que altere a seção. Essas imperfeições geram uma concentração de tensão.

Em regiões distantes destas imperfeições, a tensão pode ser calculada através das equações de tensão nominal. Entretanto, na região da imperfeição, a tensão deve ser ajustada através de fatores de concentração de tensão definidos pela razão entre a tensão máxima na região de concentração de tensão e a tensão nominal.

De acordo com o ABS (2013), a distribuição de tensões de uma região próxima à solda até uma região afastada da solda pode ser dividida em 3 regiões. Na Região I, atua a tensão nominal modificada pela presença da solda e pela presença de outra estrutura (tensão *Notch*). Na Região II, atua a tensão nominal modificada apenas pela presença de outra estrutura. No pé da solda, esta tensão é chamada de tensão *hotspot*. Na Região III, atua a tensão nominal.

2.2. Curvas S-N

As curvas S-N são formadas por pares de dados S e N, sendo que N representa o número de ciclos para que uma variação de tensão constante S leve a estrutura à ruptura. No ABS, as curvas S-N de alto ciclo são traçadas para um número de ciclos variando de 10^4 até 10^8 .

Os dados necessários para a elaboração destas curvas são coletados através de experimentos em que os corpos de prova são submetidos a variações de tensão diferentes. Quanto maior a variação de tensão aplicada

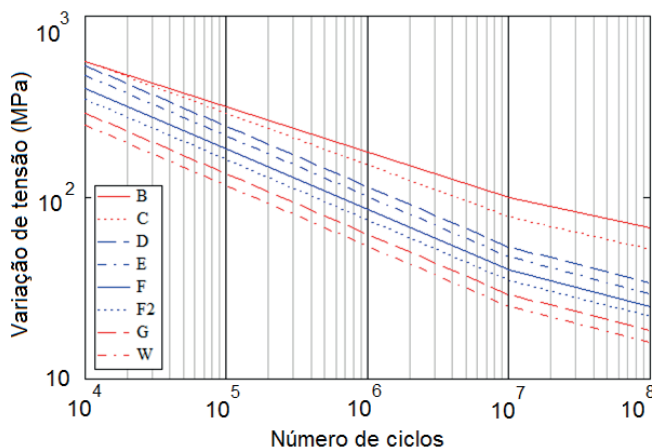
ao corpo de prova, menor será o número de ciclos necessários para ruptura.

As curvas S-N da norma do ABS (Figura 1) possuem um ponto de inflexão para um número de ciclos (NQ) igual a 10^7 . Quando o número de ciclos (N) necessários para levar a estrutura à ruptura é menor do que NQ, a relação S-N pode ser descrita pela equação (1). Caso contrário, a relação será determinada pela equação (2). Cada classe é relacionada a um detalhe estrutural. Maiores informações sobre estes detalhes podem ser encontradas na norma.

$$N = A \times S^{-m} \quad (1)$$

$$N = C \times S^{-r} \quad (2)$$

Figura 1: Curvas offshore S-N do ABS para detalhes não tubulares no ar



A curva S-N da norma do ABS (2013) de baixo ciclo é formada por um segmento com o número de ciclos variando entre 100 e 10^4 .

3. FATORES DE SEVERIDADE AMBIENTAL

Devido à similaridade estrutural entre FPSOs e navios petroleiros, o ABS aproveitou nas análises de FPSOs, o programa desenvolvido para navios já aceito e calibrado experimentalmente. Entretanto, o carregamento em um FPSO é diferente do carregamento encontrado nas regras de navios. Para corrigir essa diferença, o ABS desenvolveu o sistema de avaliação do ambiente de uma locação específica (SEAS) cuja principal função é calcular fatores de severidade ambiental (ESF).

Os ESF “alfa” são responsáveis pelo ajuste do dano devido à fadiga no Método Simplificado. O dano de fadiga é calculado para condição ambiental do Atlântico Norte e para a condição da rota/locação e, em seguida, é

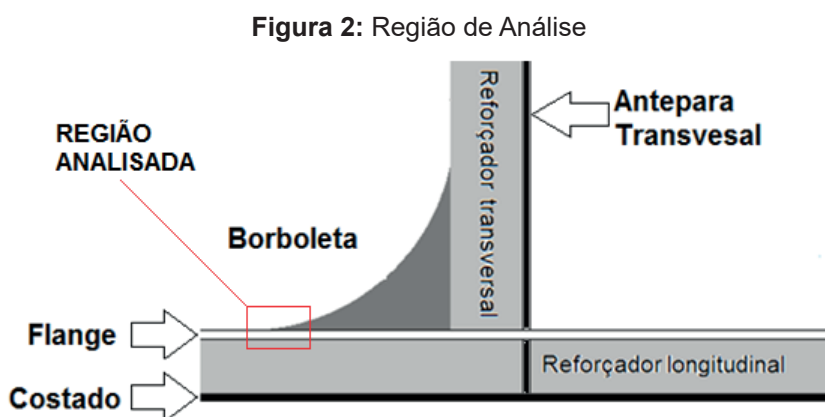
determinado o ESF “alfa” que adequará a condição ambiental para a locação do FPSO.

Os ESF “beta” são responsáveis pelo ajuste do carregamento dinâmico no Método dos Elementos Finitos. Com a aplicação dos fatores “beta”, o carregamento dinâmico, calculado inicialmente para condição ambiental do Atlântico Norte, passa a considerar as condições ambientais da locação do FPSO.

4. ANÁLISE DE FADIGA

Serão apresentados dois métodos para a análise de fadiga de uma conexão de reforçador longitudinal do costado com antepara transversal. A avaliação da fadiga será focada no flange dos reforçadores longitudinais nas proximidades da solda com a conexão.

O Método Simplificado consiste em representar um reforçador por elemento de viga, incluindo a borboleta (pedaços de chapa com forma triangular que servem para manter o ângulo da conexão invariável) na idealização estrutural (Figura 2).



No Método dos Elementos Finitos, a idealização estrutural da conexão é feita através um modelo de elementos finitos de malha refinada, onde todos os detalhes devem ser representados de acordo com a realidade.

Os pressupostos para avaliar a resistência à fadiga da conexão a partir do Método Simplificado são (ABS, 2013):

- i. O dano segue a regra de Palmgren-Miner (dano linear);
- ii. A tensão nominal é base do método (tensão da Região III);
- iii. O efeito das tensões médias é desprezado.
- iv. As Curvas S-N utilizadas serão as curvas do ABS (2013) para

detalhes não tubulares no ar. Os fatores de concentração de tensões das Regiões I e II devem estar embutidos nas curvas. Normalmente, são utilizadas as curvas F ou F2 para este tipo de detalhe.

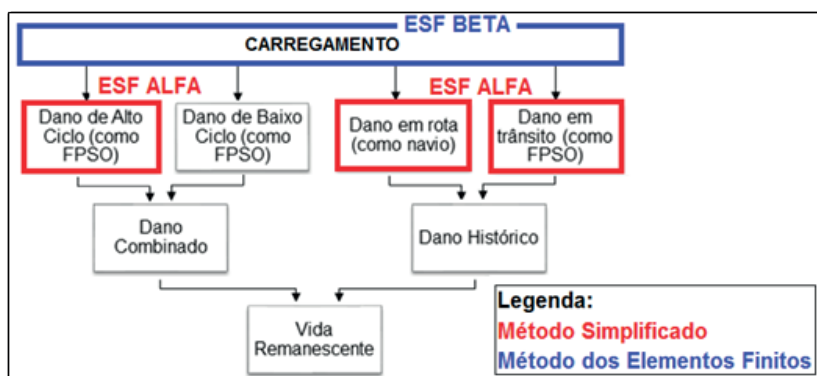
v. A variação de tensão de longo prazo é descrita pela distribuição de probabilidade de Weibull de dois parâmetros. Dados empíricos podem ser utilizados para estabelecer os parâmetros da distribuição, obtendo-se uma resposta rápida na fase preliminar do projeto.

vi. A vida de projeto é igual a 20 anos.

No Método dos Elementos Finitos, os pressupostos do Método Simplificado continuam válidos, exceto que, a tensão utilizada é a *hotspot*. A curva S-N “E” do ABS (2013) não possui concentração de tensão devido à geometria da estrutura, apenas concentração de tensão devido à solda. Desta forma, esta curva é a mais recomendada neste método, pois a concentração de tensão da Região II é levada em consideração na tensão *hotspot*.

Em ambas as metodologias, o objetivo é calcular a vida remanescente das conexões analisadas. Um navio convertido a FPSO possui dano de fadiga devido aos anos de serviço. Para calcular este dano e determinar a vida remanescente, uma avaliação de fadiga de detalhes estruturais de conexão deve ser realizada de acordo com as etapas apresentadas na Figura 3. No Método dos Elementos Finitos, o carregamento é modificado pelos ESF “beta” e no Método Simplificado, os danos de alto ciclo, em rota e em trânsito são modificados pelos ESF “alfa”. A determinação do dano histórico não será abordada nesse trabalho.

Figura 3: Determinação da vida remanescente



5. MODELO

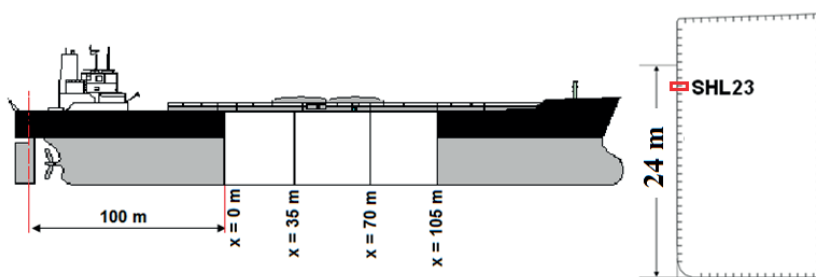
O modelo utilizado para os dois métodos tem o comprimento longitudinal de três tanques situados na região central do navio. Neste caso, a região de interesse começa a cem (100) metros da perpendicular de ré e se estende por cento e cinco (105) metros (Figura 4). Os tanques possuem trinta e cinco (35) metros com seis cavernas por tanque.

As informações a seguir são necessárias para fornecer o projeto básico do FPSO: Comprimento de 330 m; Boca de 59,4 m; Pontal de 29,7 m e Calado de Projeto de 24m.

As chapas do convés e do fundo são de aço HT36 (escoamento 355 MPa) e as outras chapas são de aço MILD (escoamento 235 MPa).

No tanque central do modelo de três tanques longitudinais, os resultados são mais precisos, pois são pouco afetados pelas condições de contorno. Desta forma, uma conexão dentro deste tanque foi escolhida para análise. A região analisada será no costado, a ré da antepara transversal, no flange do reforçador 23 (SHL23).

Figura 4: Região analisada



Para elaboração do modelo utilizado no Método Simplificado, devem ser fornecidas posições das anteparas transversais, características das conexões e das chapas e reforçadores longitudinais e informações sobre a seção mestra.

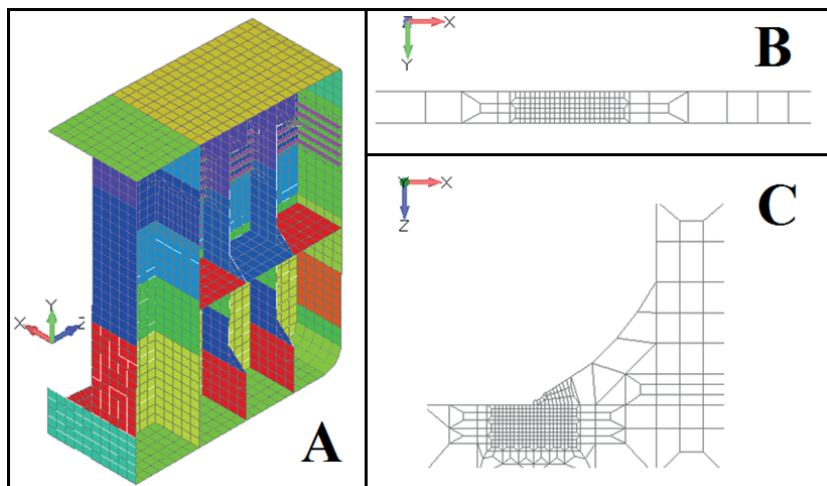
No Método dos Elementos Finitos, é necessária a elaboração de dois modelos: o modelo global responsável por determinar a resposta global da viga navio e obter condições de contorno apropriadas para o modelo local e o modelo local (modelo refinado - Figura 5).

O modelo global elaborado possui 67.058 nós, 70.058 elementos de placa, 48.912 elementos de viga, 21.757 elementos de treliça e 2 elementos rígidos (condições de contorno). O modelo local elaborado possui 5.028 nós, 5.069 elementos de placa, 1.824 elementos de viga e 521 elementos de treliça.

No modelo local, a conexão foi modelada com elementos de placa e

a malha na região de análise foi refinada até que os elementos ficassem com tamanho próximo a espessura do flange (19 mm). As condições de contorno foram aplicadas nos nós contidos nos planos $X = 65$ m, $X = 75$ m e $Z = 0,63$ m, onde o sistema de coordenadas é o mesmo do modelo global.

Figura 5: Modelo Local (A) e Flange (B) e Alma (C) do reforçador SHL23



6. DANO DE ALTO CICLO

A tensão induzida pelas ondas gera o dano de alto ciclo. Na análise de fadiga de alto ciclo, apenas a variação de tensão provocada pelo carregamento dinâmico deve ser considerada. Para determinar o dano de alto ciclo de um FPSO de casco simples, quatro calados devem ser considerados. Os calados devem variar entre 0,4 e 0,9 do calado de projeto. Para cada calado, são considerados oito casos de carregamento com o mesmo padrão de enchimento dos tanques.

As variações de tensão são determinadas somando-se a componente dinâmica de tensão dos casos de carregamento. Levando-se em consideração que são 4 calados e que cada calado possui 4 combinações de caso de carregamento, 16 variações de tensão devem ser calculadas.

No método simplificado, a variação de tensão é obtida através de fórmulas definidas em ABS (2013). No método dos elementos finitos, a variação de tensão é resultado da análise de elementos finitos.

A variação de tensão é utilizada para determinação do parâmetro de escala δ da distribuição de Weibull de dois parâmetros. O parâmetro de escala é utilizado para calcular o dano obtido por cada uma das 16 variações de tensão (equação (3)), onde: μ é um coeficiente de tensão que leva em consideração a mudança na inclinação das curvas S-N definido em

ABS (2013); $\Gamma(x)$ é a função Gama; NL é o número de ciclos para vida de projeto esperada; m, A são parâmetros da curva S-N; γ , δ são parâmetros da distribuição de Weibull.

$$DM_{i,j-k} = \frac{NL}{A} \times \delta^m \times \mu \times \Gamma\left(1 + \frac{m}{\gamma}\right) \quad (3)$$

O dano de cada calado pode ser determinado pelo somatório do dano obtido pela equação (3) para cada variação de tensão multiplicado pelo fator $f_{i,j-k}$ relacionado à direção de incidência das ondas considerando o sistema de amarração do FPSO (equação (4)). O dano total de alto ciclo, incluindo os quatro calados, é obtido através da equação (5).

$$DM_i = f_{i,1-2} \times DM_{i,1-2} + f_{i,3-4} \times DM_{i,3-4} + f_{i,5-6} \times DM_{i,5-6} + f_{i,7-8} \times DM_{i,7-8} \quad (4)$$

$$DM_{ac} = 0,15 \times DM_1 + 0,35 \times DM_2 + 0,35 \times DM_3 + 0,15 \times DM_4 \quad (5)$$

7. DANO DE BAIXO CICLO

Na fadiga de baixo ciclo, a variação de tensão total é formada por uma parcela dinâmica (alto ciclo) e uma parcela estática (carregamento/descarregamento dos tanques). Após corrigir a variação de tensão com o fator de plasticidade k_e , necessário para evitar a análise elastoplástica, é obtida a Pseudo-Variação de tensão SL. O dano para Pseudo-Variação de tensão pode ser determinado pela equação (6), onde: N_{bc} é o número de ciclos de carregamento e descarregamento dos tanques; B, q são parâmetros da curva S-N de baixo ciclo.

$$DM_{i-j} = \frac{N_{bc} \times S_L^q}{B} \quad (6)$$

O dano de baixo ciclo deve ser calculado pela equação (7), onde o dano para cada variação de tensão deve ser multiplicado pelos fatores $f_{i,j-k}$ (análogo a equação (4)).

$$DM_{bc} = f_{1-2} \times DM_{1-2} + f_{3-4} \times DM_{3-4} + f_{5-6} \times DM_{5-6} + f_{7-8} \times DM_{7-8} \quad (7)$$

8. VIDA REMANESCENTE

A determinação da vida remanescente de fadiga para a conexão analisada é dada pela equação (8), onde DM_{comb} é a combinação do dano de alto e baixo ciclo definida em ABS (2013) e D_{hist} é o dano acumulado antes do FPSO chegar a sua locação.

$$Vida = \frac{20}{DM_{comb}} \times (1 - D_{hist}) \quad (8)$$

9. EXEMPLO DE APLICAÇÃO – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

Serão apresentados os resultados de uma análise de fadiga, em um FPSO convertido considerando as condições ambientais do Atlântico Norte, desta forma, não serão calculados os fatores de severidade ambiental. Foram realizadas cinco análises: duas pelo Método dos Elementos Finitos e três pelo Método Simplificado

No Método Simplificado, foi utilizada a fase ISE do programa FPSO eagle v 2.0 desenvolvido pelo ABS. No Método dos Elementos Finitos, foram utilizados o programa FEMAP para confeccionar o modelo global e o local, a fase TSA do programa FPSO eagle v 2.0 para aplicação dos carregamentos e das condições de contorno e o programa NASTRAN para a análise de elementos finitos e, em seguida, a análise de fadiga (modelo local).

As três análises pelo Método Simplificado utilizam a variação de tensão nominal e o fator de concentração de tensão embutido nas curvas S-N “F2”, “F” e “E” para determinação do dano. É importante mencionar que a curva “E” não representa uma análise real, pois ela não considera a concentração de tensão devido à geometria. Ela foi apresentada apenas para demonstrar o quanto a concentração de tensão afeta o cálculo da vida remanescente.

As duas análises pelo Método dos Elementos Finitos utilizam a variação de tensão *hotspot* e o fator de concentração de tensão devido à solda embutido nas curvas S-N “E”. Foram utilizados dois modelos que representam a mesma conexão. A Figura 5 apresenta o Modelo Local 1 desta conexão. Este modelo foi construído considerando apenas as informações fornecidas para a análise simplificada. O Modelo Local 2 é praticamente igual, entretanto, foram adicionados elementos unidimensionais no contorno da conexão representando melhor a realidade.

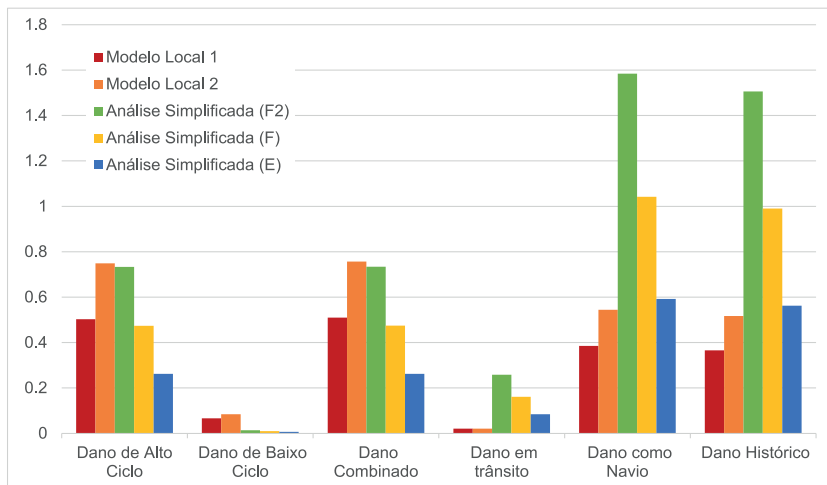
Desta forma, as análises realizadas com as curvas “F” e “F2” para o Método Simplificado e com o modelo local 2 para o Método dos Elementos Finitos são mais condizentes com a realidade. As demais análises serão apresentadas apenas para fins comparativos. A Tabela 1 e a Figura 6 apresentam os resultados de dano de alto (DM_{ac}) e baixo (DM_{bc}) ciclos, dano combinado (DM_{comb}), dano em trânsito (D_t), dano como navio (D_o), dano histórico (D_{hist}) e vida remanescente em anos na conexão para as cinco análises.

Tabela 1: Método Simplificado x Elementos Finitos (x = 70 m)

Análise	DM_{ac}	DM_{bc}	DM_{comb}	D_t	D_o	D_{hist}	Vida
Modelo Local 1	0,503	0,066	0,510	0,021	0,385	0,366	25
Modelo Local 2	0,749	0,084	0,757	0,021	0,544	0,517	13
Simplificado (F2)	0,733	0,014	0,734	0,258	1,584	1,506	ROMPE

Simplificado (F)	0,474	0,010	0,475	0,161	1,042	0,991	0
Simplificado (E)	0,262	0,007	0,262	0,084	0,592	0,563	33

Figura 6: Método Simplificado x Elementos Finitos (x = 70 m)



A análise simplificada considerando a curva “F2” apresentou um dano histórico maior do que 1,0 (um) para a conexão. Isso significa, teoricamente, que a conexão não resistiria à vida pregressa, tendo rompido antes da conversão. A análise com curva “F” apresentou a vida remanescente de 0 anos e a análise com a curva “E” apresentou uma vida remanescente de 33 anos. Isso mostra que os resultados de dano são sensíveis ao fator de concentração de tensão relacionado à Região II. Uma má classificação de um detalhe pode fazer com uma região com baixa resistência às solicitações da fadiga passe despercebida.

O modelo local 1 apresentou a vida remanescente maior do que o modelo 2 (12 anos). Uma má representação de um detalhe estrutural também pode impactar a vida remanescente.

Os valores de dano histórico obtidos pelo Método dos Elementos Finitos são menores do que os danos obtidos pelo Método Simplificado. Pode-se afirmar que o Método Simplificado é mais conservativo para o dano histórico nesta conexão para a condição ambiental do Atlântico Norte. Os danos de alto e baixo ciclo no Método dos Elementos Finitos apresentaram-se maior do que o dano obtido pelo Método Simplificado (comparando-se o modelo local 2 com a análise com a curva “F2”). Pode-se afirmar que o Método Simplificado é menos conservativo para os danos de alto e baixo ciclo nesta conexão para a condição ambiental do Atlântico Norte. É importante observar que nenhum fator de segurança foi utilizado por motivo de simplificação,

entretanto, fatores de segurança são sugeridos em ABS (2013) em função da criticidade da estrutura e dificuldade de inspeção.

10. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma análise de fadiga estrutural da conexão entre uma antepara transversal e reforçador longitudinal do costado de um FPSO. Foram adotados o Método dos Elementos Finitos e o Método Simplificado com o intuito de compará-los e apresentar suas vantagens e desvantagens.

A vantagem do Método Simplificado é a rapidez na detecção de áreas com vida remanescente menor do que a vida de projeto. Isso se torna extremamente vantajoso no momento de uma conversão de navio para FPSO, pois ainda no estaleiro é possível reparar ou modificar as conexões que apresentaram problema, evitando assim intervenções quando o FPSO estiver na locação. A desvantagem deste método é que não se sabe se a tensão devido à presença de outra estrutura é considerada de forma adequada, ou seja, se as tensões na Região II são corretamente representadas pela curva S-N. Cada detalhe estrutural deve ser classificado baseado na geometria da ligação e direção predominante do carregamento. Entretanto, nem sempre a quantidade de curvas S-N disponíveis é suficiente para representar o detalhe estrutural a ser analisado.

No Método dos Elementos Finitos, a concentração de tensões devido à Região II é calculada considerando a geometria modelada (que deve representar todos os detalhes da conexão) e, desta forma, o fator de concentração da geometria é mais acurado. A desvantagem deste método é que a tensão é extremamente sensível à malha. Uma malha mal representada pode gerar tensões irreais. Além disso, o tempo gasto neste método é consideravelmente maior do que o tempo gasto no Método Simplificado. É necessário confeccionar o modelo global e o local, além de fazer as análises para as condições de navio e de FPSO em trânsito e na locação.

Conhecendo-se as vantagens/desvantagens e as diferenças entre os dois métodos, conclui-se que inicialmente deve ser utilizado o Método Simplificado. O Método Simplificado é rápido e serve para se ter uma noção geral da situação do FPSO. No caso de alguma conexão apresentar vida remanescente menor do que 20 anos, indica-se a realização do Método dos Elementos Finitos, que leva a resultados mais acurados.

Para estudos futuros, recomenda-se investigar o comportamento dos dois Métodos em conexões diferentes dos tipos de conexão estudada e em áreas diferentes (por exemplo, fundo ou antepara longitudinal).

REFERÊNCIAS

ABS, 2013, **Floating Production Installations**, Houston, American Bureau of

Shipping.

BARROS, M.R.C., **Análise de fadiga em estruturas offshore tipo unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO)**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

SIMPLIFIED FATIGUE ANALYSIS IN OFFSHORE STRUCTURES TYPE FLOATING PRODUCTION, STORAGE AND OFFLOADING UNIT (FPSO)

ABSTRACT - This work develops an analysis of structural fatigue of connections between a longitudinal stiffener of side shell and a transverse bulkhead of a floating production, storage and offloading (FPSO) unit converted from an oil tanker. The analysis is performed by the simplified method of fatigue (with ISE phase from FPSO eagle software developed by ABS) and by the finite element method (with TSA phase from FPSO eagle software, NASTRAN and FEMAP) based on the Weibull distribution, with the objective of establish the advantages and disadvantages of which method. Both the damage in the previous life as a ship and the damage of high and low cycle as FPSO have been assessed. From these numbers, it was possible to estimate the remaining life of the FPSO. Knowing the advantages and disadvantages between the two methods, one concludes that first the analysis should be made using the Simplified Method. The Simplified Method is faster and serves to give a general idea of the FPSO situation. When a connection has remaining fatigue life lower than the design life, using the Finite Element Method is recommended, as it leads to more reliable results.

KEYWORDS: Fatigue; Damage; Offshore Structures.

REFORÇO ESTRUTURAL DE UMA PLATAFORMA OFFSHORE DO PORTO DO ITAQUI COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (CFRP)

Jefferson Sousa Farias

lattes.cnpq.br/4012236138552644

Instituto De Tecnologia, Programa De Pós-Graduação Em Processos Construtivos E Saneamento Urbano, Universidade Federal Do Pará, Belém, Brasil.

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

lattes.cnpq.br/1324105476558186

Instituto De Tecnologia, Programa De Pós-Graduação Em Processos Construtivos E Saneamento Urbano, Universidade Federal Do Pará, Belém, Brasil.

Alcebiades Negrão Macêdo

lattes.cnpq.br/8313864897400179

Instituto De Tecnologia, Programa De Pós-Graduação Em Processos Construtivos E Saneamento Urbano, Universidade Federal Do Pará, Belém, Brasil.

RESUMO - Este trabalho apresenta detalhes de um reforço estrutural utilizando polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) em uma plataforma *offshore* de concreto armado no Porto do Itaqui em São

Luís – MA. A necessidade de reforço foi constada após a fissuração da laje em balanço que recebe o impacto dos navios durante a atracção. Após inspeção verificou-se que as armaduras já não existiam em algumas partes da estrutura, consumidas pela corrosão. Optou-se então por recompor estas armaduras e empregar técnica de reforço estrutural com laminados de CFRP envelopando a laje em balanço, reforçando-a à flexão e confinando-a parcialmente para minimizar os efeitos da fissuração interna permanente da laje. Apesar desta técnica ser consolidada, pouco se sabe sobre o desempenho do reforço ao longo do tempo quando exposto ao ambiente marinho. Foram adotadas as principais prescrições normativas para dimensionamento de estruturas de concreto armado da NBR 6118 (ABNT, 2014) e Model Code 2010 (*fib*, 2010), além das recomendações da norma ACI 440.2R (ACI, 2008) para o dimensionamento do reforço com CFRP. Apresenta-se um panorama geral da estrutura após 17 anos da execução do reforço que comprovou o bom desempenho da técnica empregada.

PALAVRAS-CHAVE: CFRP; Fibra de carbono; Reforço estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Diante do desenvolvimento de novos materiais com características específicas e potencializadas para os fins a que se destinam, o concreto perdura na contemporaneidade por sua maior amplitude em utilização. Isto pode ser atribuído devido às suas características básicas que o qualificam como um bom material, como sua resistência à compressão e durabilidade, além da abundância natural dos materiais que o constituem. Quando armado torna-se versátil pela elevada resistência à flexão que possibilita a confecção de elementos estruturais das mais variadas formas com custos acessíveis ao mercado consumidor. De acordo com a declaração Ambiental de Produto (EPD) apresentada na ISO 14025 [1], o concreto armado é o material de construção mais durável e sustentável, visto como o melhor para estruturas na atualidade. Apesar das importantes vantagens, o concreto armado também apresenta várias limitações que o torna desvantajoso, como sua baixa relação resistência/peso, elevada porosidade e baixa capacidade de deformação do concreto sob tração, possibilitando que as armaduras de aço sofram ataques de agentes agressivos, como os íons cloreto. A corrosão das armaduras pode diminuir o fator de segurança das estruturas e comprometer sua aparência, depreciando-as significativamente e gerando custos elevados com manutenção e até mesmo com reforço [2].

Dependendo da função do elemento estrutural e da gravidade do quadro patológico, escolhe-se a técnica de recuperação ou reforço a ser aplicada. Dentre as técnicas de reforço estrutural mais empregadas tem-se o encamisamento com concreto armado, a fixação de chapas de aço na superfície dos elementos estruturais e, mais recentemente, a utilização de laminados de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP). Esta última tem sido intensamente aplicada no reforço de estruturas por ser leve, de fácil instalação e com curto período de cura final de seus componentes, além do fato de não ser susceptível à corrosão. Por ser resistente ao ataque de íons cloreto, o reforço com CFRP é uma alternativa que vem apresentando resultados satisfatórios em ambientes marinhos, submersos ou não. Entretanto, são raros os trabalhos descrevendo suas etapas executivas, dificuldades e desempenho ao longo do tempo nessas condições. Este trabalho traz exatamente isso, uma visão geral das etapas executivas deste sistema de reforço aplicado em uma plataforma *offshore* localizada no Porto do Itaqui, cidade de São Luís, e uma breve avaliação das condições em que a estrutura se encontra, ou seja, se o reforço vem desempenhado satisfatoriamente sua função.

2. O PORTO DO ITAQUI EM SÃO LUÍS E A PLATAFORMA D10

A Ilha de São Luís divide o Golfão Maranhense em duas partes: a primeira formada pela Baía de São Marcos, que recebe as contribuições dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, e a segunda formada pela Baía de São José, que recebe contribuições dos rios Itapecuru e Munim. O porto do Itaqui

está localizado na Baía de São Marcos em São Luís (MA), nacionalmente conhecida por possuir as maiores amplitudes de maré do Brasil (até 8,0 m). O canal de acesso a esse porto apresenta profundidade natural mínima de 23,0 m, largura aproximada de 0,5 Km e comprimento de 101,0 km. Com idade aproximada de 28 anos, trata-se de um cais com capacidade para atracação de navios de até 155.000 TBP (tonelada de porte bruto), sendo atualmente utilizado para 74.999 TBP. O porto é composto por oito berços de atracação, sendo que a estrutura de estudo localiza-se no berço 106, mais precisamente a plataforma de atracação D10, que se apoia em sete estacas de concreto armado com aproximadamente 25 m de comprimento, revestidas por camisas metálicas de diâmetro médio 1,35 m e espessura da camisa de 9,0 mm [3].

O reforço estrutural foi caracterizado pela substituição de parte do concreto e reposição das armaduras de flexão da laje em balanço visando atender o projeto estrutural original e pela utilização do CFRP tanto para resistir a esforços de flexão quanto para confinar esta laje que permaneceria fissurada. Visando detalhar as etapas do reforço desde o seu dimensionamento, apresenta-se o procedimento para determinação do momento solicitante proveniente da força de atracação, calculando-se, em seguida, a quantidade de fibra de carbono necessária para a execução do reforço. Ressalta-se que para a execução do reforço foi necessário verificar todas as restrições naturais e devidas precauções a serem implementadas considerando, por exemplo, a velocidade do vento, horário das marés e o período de chuvas.

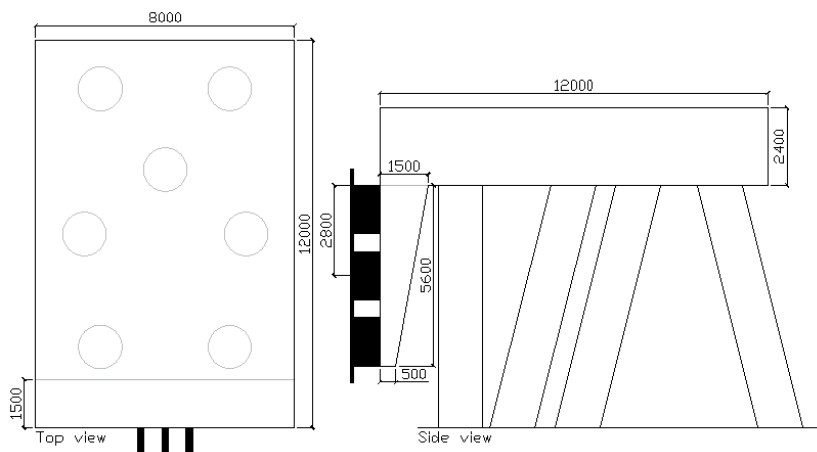
2.1 A constatação do problema

O Berço 106 no porto do Itaqui apresenta o maior calado recomendado, 18,5 m [3]. Consequentemente, abarca maiores navios, tem a maior capacidade de carga e é reservado para o transporte de combustíveis. Em 2002 houve um choque lateral na plataforma de atracação D10, ocasionando um acidente que expôs as armaduras, acelerando ainda mais o processo de corrosão das armaduras. O ambiente marinho é tratado na NBR 12655 [4] em condição especial e na NBR 6118 [5] é classificado como ambiente de agressividade forte a muito forte às estruturas de concreto. As normalizações estabelecem parâmetros para a obtenção de um concreto de qualidade, onde são determinados pela relação água/aglomerante e classe do concreto, enquanto para garantir a durabilidade da estrutura deve-se observar a espessura de cobrimento. A exposição das armaduras a este tipo de ambiente, desconsiderando as recomendações da normalização, acarretará na deterioração da estrutura num breve intervalo de tempo, sendo necessário restabelecer suas condições originais de projeto através da recuperação e/ou reforço da estrutura. A Figura 1 mostra a plataforma D10 após a colisão, onde é possível observar a exposição de suas armaduras já bastante danificadas pela corrosão, e a Figura 2 mostra as dimensões da plataforma.

Figura 1: Plataforma D10 do Berço 106 após o impacto



Figura 2: Dimensões da plataforma D10



3. DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL COM CFRP

3.1 Esforços solicitantes

O impacto do navio na estrutura é a principal ação a ser considerada no dimensionamento do reforço estrutural. Esta força pode ser determinada a partir da equivalência de energia cinética do navio e a energia de deformação da estrutura, considerando que há perdas na transmissão desses esforços entre a estrutura e o navio, principalmente devido ao giro do navio e deslocamentos das defensas. De forma mais simplificada, compreende-se que o esforço de impacto do navio pode ser determinado considerando a energia de deformação da estrutura mais a energia de deformação da defesa, como o saldo da energia cinética do navio após o giro. Essa energia

é função do tamanho do navio, da velocidade de manobra na atracação e dos movimentos do navio sob ação da maré e da corrente. A energia cinética característica transmitida pelo navio ao sistema defesa/estrutura pode ser determinada conforme recomendação da norma NBR 9782 [6], ou seja, $E_c = \frac{1}{2} \cdot (M_1 + M_2) \cdot V^2 \cdot C_e \cdot C_r$, onde E_c é a energia cinética característica nominal, M_1 é a massa deslocada pelo navio carregado, M_2 é a massa de água adicional deslocada pelo navio no momento da atracação, V é a velocidade de aproximação do navio perpendicular à linha de atracação, C_e é o coeficiente de excentricidade e C_r é o coeficiente de rigidez. A velocidade V de é influenciada pelo tamanho do navio, condições de abrigo, uso de rebocadores, habilidade do piloto e condições meteorológicas. Já o coeficiente C_e está relacionado à energia gasta no movimento de rotação do navio, enquanto que C_r leva em consideração a parcela de energia da atracação absorvida pela deformação do sistema defesa/estrutura, e a norma NBR 9782 [6] recomenda valores entre 0,90 e 0,95, dependendo da rigidez do sistema de defensas. Para avaliar a transmissão da força de atracação para o cais, os fabricantes de defesa fornecem curvas relacionando a energia absorvida pela defesa com sua deformação e a força transmitida por elas, que são obtidas por ensaio de compressão. Usualmente os dados fornecidos pelos fabricantes de defensas são os diagramas força-deslocamento, onde se pode obter os valores de energia absorvida em função da força ou do deslocamento.

O navio tipo Flagship IVY e o ângulo de atracação de 15° foram considerados os mais adequados para determinação da energia de atracação. Definida esta energia, pôde escolher o tipo de defesa e com o gráfico de curva da defesa fornecido pelo fabricante, determinou-se a força normal que a defesa exerceu sobre o cais. A defesa escolhida foi a SUC 1150H. Como a energia final (E_c) considerada no cálculo foi de 372,9 kN·m, com o auxílio da tabela e do gráfico, chegou-se na força de atracação do navio. Essa força de atracação pôde ser comparada com a força de amarração, nas devidas direções (transversal e longitudinal), para a escolha da maior a ser aplicada na estrutura. Normalmente, calcula-se ambas as forças, atracação e amarração, separadamente, mas a força de amarração não foi considerada neste artigo pelo fato do reforço estrutural considerar apenas a situação mais crítica, ou seja, a força de impacto normal à estrutura extraída do gráfico de curva de defensas, 1.121,4 kN. Admitindo-se que a força tangencial máxima é da ordem de 25% da força normal, conforme NBR 9782 [6], tem-se o valor de 280,4 kN. Assim, a força normal de atracação aplicada a 2,8 m do engastamento da defesa (Figura 2) gerou um momento solicitante de 3.139,9 kN·m. Como o momento resistente nesta seção era de apenas 2.479,5 kN·m, resultado em um coeficiente de segurança de apenas 1,27, optou-se pelo reforço para atingir o coeficiente de segurança 1,4.

3.2 Quantidade de CFRP

De acordo com a NBR 6118 [5] e o Model Code 2010 [7], no estado limite de serviço as estruturas devem trabalhar parcialmente nos estádios I e II. Estas fases são definidas pelo momento de fissuração. Seguindo as recomendações da norma, adotou-se $\alpha = 1,5$, que é o fator que correlaciona, aproximadamente, a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta para seção retangular, a resistência do concreto à tração direta, $f_{ct} = 1,44$ MPa, segundo o item 8.2.5 da norma, considerando o valor de $f_{ctk,inf}$ o momento de inércia da seção de concreto de $31.636.800 \cdot 10^4$ mm⁴, a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada de 780mm, resultando em um momento de fissuração para o estádio I de 876,1 kN·m. Para o estádio II desprezou-se a resistência do concreto à tração e considerou-se uma altura útil de 1.450 mm e resistência à compressão do concreto de 18 MPa, e obteve-se a posição da linha neutra igual a 472,2 mm, possibilitando a determinação das deformações iniciais do concreto na compressão e na tração, 0,15‰ e 0,35‰, respectivamente. Esta deformação de tração é menor que o valor de 9,82‰ relativa ao momento resistente desejado de 4.395,9 kN·m, considerando as recomendações da norma ACI 440.2R [8] para a distribuição das tensões e deformações em seções transversais com CFRP, ratificando a necessidade de reforço. A diferença entre as deformações de tração definiu o valor da tensão no reforço e utilizando a força relativa ao momento resistente desejado (756,6 kN), obteve-se a área da seção transversal de fibra de carbono de 501,1 mm², equivalente a 3 camadas de CFRP do sistema MBrace CF-130®, totalizando 205,2 m² de reforço.

4. EXECUÇÃO DO REFORÇO COM CFRP

Após o dimensionamento, foi confeccionado o projeto executivo do reforço estrutural. Para evitar que a laje em balanço fosse perdida, caindo na água, optou-se por executar mãos francesas fixadas na superfície inferior do bloco da plataforma e nesta laje. Para o reforço com CFRP ficou estabelecido que a laje em balanço seria parcialmente envelopada (face frontal e laterais) para restabelecer sua rigidez, uma vez que a fissuração interna causada pelo impacto do navio seria permanente, contribuindo também para sua resistência à flexão. A Figura 3 mostra detalhes do projeto executivo. A execução do reforço estrutural iniciou-se pela montagem da estrutura provisória de acesso e do pórtico metálico para proteção dos trabalhos, como mostrado na Figura 4, sendo que a atracação dos navios não foi interrompida. Em seguida foi realizado o procedimento para restabelecer o prumo da defesa, ou seja, da laje em balanço, utilizando cilindros hidráulicos, e as mãos francesas metálicas foram executadas e posteriormente protegidas com concreto armado. Todas as fissuras visíveis foram colmatadas, sendo aplicado adesivo estrutural epóxi nas fissuras com aberturas menores ou iguais a 3 mm e argamassa ou concreto nas demais. O concreto danificado foi retirado e as armaduras foram posicionadas para posterior concretagem com concreto de resistência

à compressão de 45 MPa e, finalmente, o reforço com CFRP foi executado e protegido com uma camada de 200 mm concreto armado. A Figura 5 mostra o núcleo metálico da mão francesa e a armadura para o concreto de proteção, além do reforço com CFRP finalizado e com os pinos para fixação da proteção mecânica de concreto armado instalados. Já a Figura 6 mostra o aspecto da plataforma após 17 anos da execução do reforço, sem qualquer sinal visível de corrosão ou fissuração.

Figura 3: Detalhes do reforço estrutural

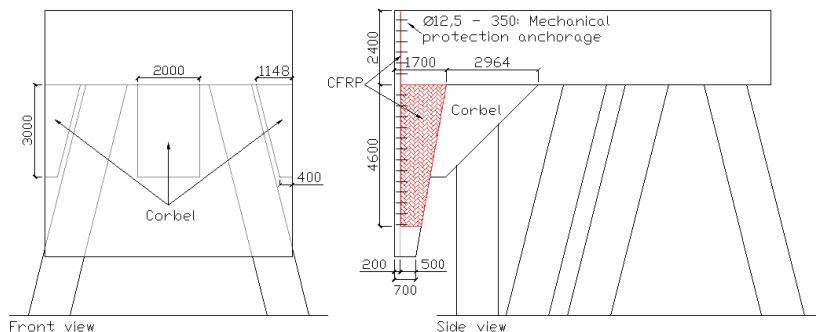


Figura 4: Estrutura provisória de acesso (A) e pórtico metálico de proteção (B)

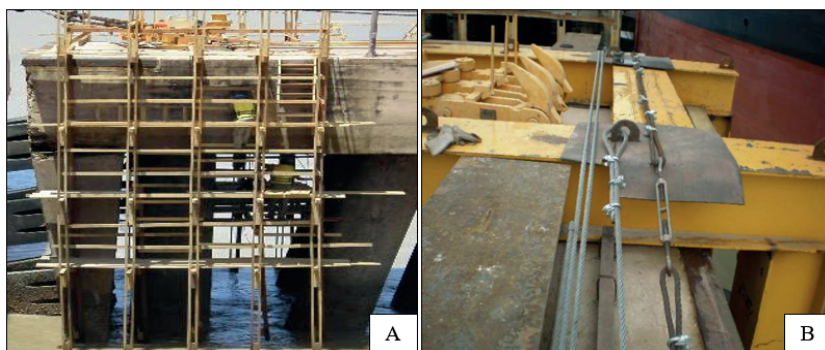
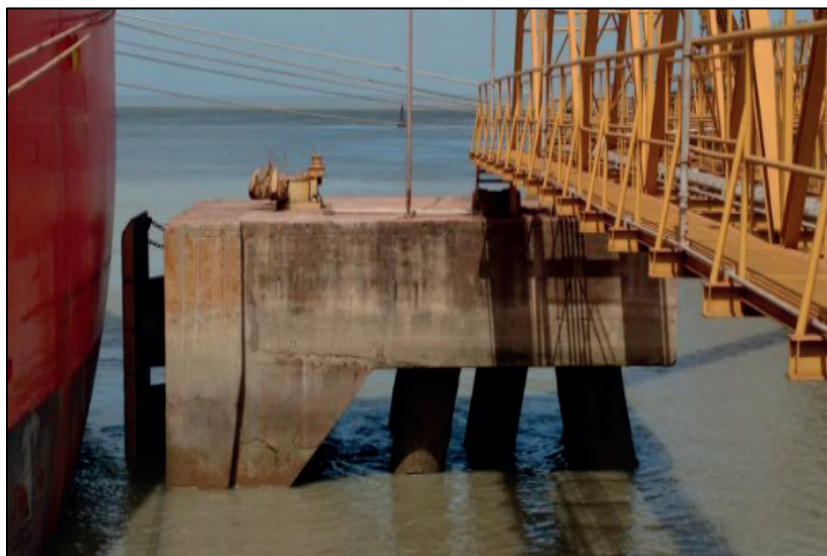


Figura 5: Armadura para proteção da mão francesa (A) e reforço com CFRP finalizado (B)



Figura 6: Aspecto da plataforma D10 após 17 anos do reforço estrutural



5. CONCLUSÕES

O reforço estrutural da plataforma *Offshore* do Porto do Itaqui com CFRP e concreto armado apresentou desempenho satisfatório ao longo de quase duas décadas. Além de restabelecer a capacidade resistente da plataforma, os cobrimentos e a resistência à compressão do concreto de 45 MPa impediram ou retardaram a corrosão das armaduras e das mãos francesas, aumentando consideravelmente a vida útil da estrutura, uma vez que nenhum produto de corrosão foi observado na superfície do concreto ou mesmo fissuras. As etapas do reforço foram realizadas sem qualquer

dificuldade, exceto pela ação das marés, e permitiram que as atividades de atracação não fossem comprometidas. Do exposto, pode-se afirmar que a técnica empregada é viável e pode ser aplicada com sucesso a estruturas em ambiente marinho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14025. **General principles on reliability of structures**. Geneva: ISO/TC, 2015.
- [2] JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 1999.
- [3] FURTADO, J. G. C. **Estudo de impactos ambientais causados por metais pesados em água do mar na baía de São Marcos: correlações e níveis de background**. Dissertação de Mestrado em Química Analítica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2015.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9782. **Ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais - Procedimento**, Rio de Janeiro, 1987.
- [7] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Model Code 2010. Lausanne, 2010.
- [8] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R-08. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008.

STRUCTURAL STRENGTHENING OF AN OFFSHORE PLATFORM AT ITAQUI PORT WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)

ABSTRACT - This work presents details of a structural strengthening carbon fiber reinforced polymer (PRFC) in a reinforced concrete offshore platform at Itaqui Port in São Luís - MA. The need for strengthening was made after the cracking of the cantilever slab that receives the impact of the ships during the attraction. Upon inspection it was found that the reinforcement no longer existed in some parts of the structure, consumed by corrosion. It was then decided to recompose these reinforcements and employ structural strengthening technique with CFRP laminates by enveloping the cantilever slab, strengthening it to bending and partially confining it to minimize the effects of

permanent internal cracking of the slab. Although this technique is well established, little is known about strengthening performance over time when exposed to the marine environment. The main normative requirements for the design of reinforced concrete structures of NBR 6118 (ABNT, 2014) and Model Code 2010 (*fib*, 2010) were adopted, as well as the recommendations of ACI 440.2R (ACI, 2008) for the design of CFRP strengthening. An overview of the platform is presented after 17 years of the structural strengthening, which proved the satisfactory performance of the technique.

KEYWORDS: CFRP; Carbon fiber; Structural strengthening.

CAPÍTULO 8

CAMPOS DE FETCH NO RESERVATÓRIO DA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

Marcelo Marques

lattes.cnpq.br/0855863872309532

Universidade Estadual de Maringá

Alejandro Victor Hidalgo Valdivia

lattes.cnpq.br/5538035382284444

Universidad Católica de Santa
Maria, Arequipa, Peru

Elaine Patricia Arantes

lattes.cnpq.br/5673783965584352

Universidade Estadual de Maringá

Fernando Oliveira de Andrade

lattes.cnpq.br/5175699449525205

Universidade Tecnológica Federal
do Paraná

direção e a localização dos maiores comprimentos. Determinou-se que os máximos comprimentos de fetch variam de 30,5 a 39,1 quilômetros. Os resultados contribuíram para uma definição segura do comprimento do fetch neste importante reservatório no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Onda; Vento; ONDACAD.

1. INTRODUÇÃO

O vento é o principal forçante da geração dos fenômenos de circulação e perturbação da superfície livre em lagos e reservatórios de barragens. A ação local do vento ocasiona a transferência de momento pela fricção direta sobre o corpo d'água, forçando correntes, gerando seiches e gerando ondas progressivas.

As perturbações geradas pelo vento provocam a erodibilidade das margens e promovem a mistura na coluna líquida, ocasionando desestratificação térmica do corpo hídrico. Os movimentos podem se propagar até o fundo provocando ressuspensão de sedimentos, promovendo o desprendimento de gases, como os de efeito estufa, dissolvidos no sedimento. Estes

RESUMO - Pelo presente estudo é ampliada a compreensão do fetch através de um conceito bidimensional via processamento automatizado. Para tanto foi desenvolvido um programa computacional em linguagem LISP denominado ONDACAD. O modelo apresentado permitiu, além da obtenção dos mapas de distribuição do fetch, a determinação segura dos valores máximos para cada

fenômenos são intensificados no caso de lagoas costeiras, caracterizadas pela pouca profundidade (Marques, 2005).

A quantificação do efeito do vento sobre espelhos d'água é feita com base no fetch. Na oceanografia o fetch é definido como a distância do ponto considerado em meio oceânico até atingir-se a costa a barlavento. Já em águas interiores, o fetch é influenciado pelo formato das margens, geralmente de aspecto irregular e dendrítico. Neste ambiente continental é amplamente utilizado o método apresentado por Saville (1954) e recomendado por *U. S. Army Coastal Engineering Research Center* (1984). Portanto, devido à presença das margens, é comum que em águas interiores o fetch tenha valores inferiores aos obtidos em águas oceânicas. A extensão do fetch é comumente utilizada conjuntamente com a intensidade e direção do vento, permitindo a estimativa da magnitude de elementos como: (1) oscilações na superfície líquida devido aos seiches (Andrade et al., 2005); (2) altura de ondas progressivas geradas pela ação do vento (Marques & Guetter, 2011); (3) profundidade de mistura provocada pela onda ao propagar-se (Marques & Guetter, 2012); (4) correlação com o desenvolvimento de bancos de macrófitas em reservatórios de barragens (Pierini, 2005); (5) erodibilidade de margens; (6) gases de efeito estufa em reservatórios (Mannich et al, 2013).

A necessidade de aplicação do método proposto por Saville de forma automatizada e precisa levou à execução de um aplicativo em linguagem LISP em ambiente CAD, o qual permite determinar a distribuição do fetch para cada uma das dezesseis direções, através de um mapa georeferenciado.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí se localiza no Rio Tocantins, a cerca de 300 km ao sul de Belém, no estado do Pará, com uma capacidade geradora instalada de 8.370 MW.

Em potência instalada, Tucuruí é a maior usina hidroelétrica totalmente Brasileira, já que a UHE de Itaipu tem potência instalada maior, 14.000 MW, mas é dividida entre o Brasil e o Paraguai. Seu vertedouro, com capacidade para 110.000 m³/s, é o segundo maior do mundo.

A UHE Tucuruí é a principal usina integrante do Subsistema Norte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Em períodos de cheia no rio Tocantins, a Usina de Tucuruí também complementa a demanda do restante do país através do SIN. Uma eclusa e um canal de 5,5 km possibilitam a navegação fluvial entre Belém e Santa Isabel.

A barragem de Tucuruí, de terra, tem 11 km de comprimento e 78 m de altura. O desnível da água varia entre 58 e 72 m. O reservatório tem 200 km de comprimento e 2.850 km² de superfície quando cheio. O reservatório tem volume total de 45,5 km³ (para cota de 72 m), correspondendo a uma profundidade média de 16 metros.

Figura 1: Localização do Reservatório de Tucuruí



3. MÉTODO

A determinação da distribuição do fetch é feita com base no método geométrico de Saville (1954) pelo traçado apresentado esquematicamente para vento nordeste, conforme Figura 2

a. De acordo com o método, o fetch em cada ponto e para determinada direção é definido pela equação 1.

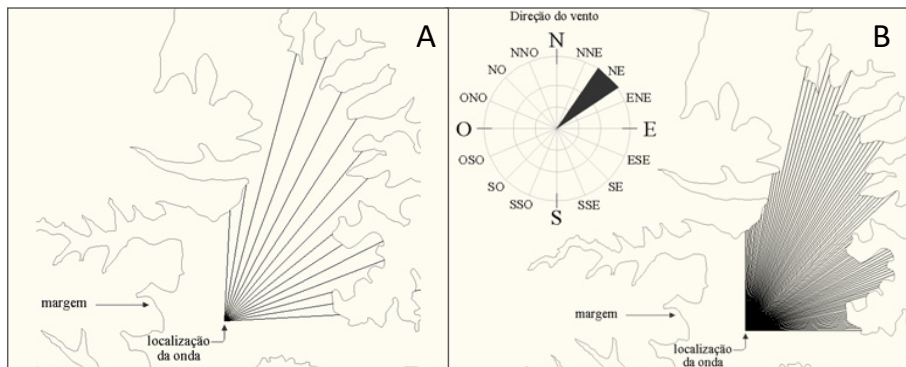
$$F = \sum_i x_i \cos \alpha_i / \sum_i \cos \alpha_i \quad [1]$$

na qual α_i é o ângulo entre a direção do vento e a direção secundária; e x_i é o comprimento na direção secundária.

Pelo presente trabalho é introduzido um importante aperfeiçoamento. O fetch passa a ser determinado por um método integral, ao invés de um somatório, conforme Figura 2b e equação 2.

$$F_{ef} = \frac{\int_{-\alpha}^{\alpha} F \cos \varphi d\varphi}{\int_{-\alpha}^{\alpha} \cos \varphi d\varphi} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \quad [2]$$

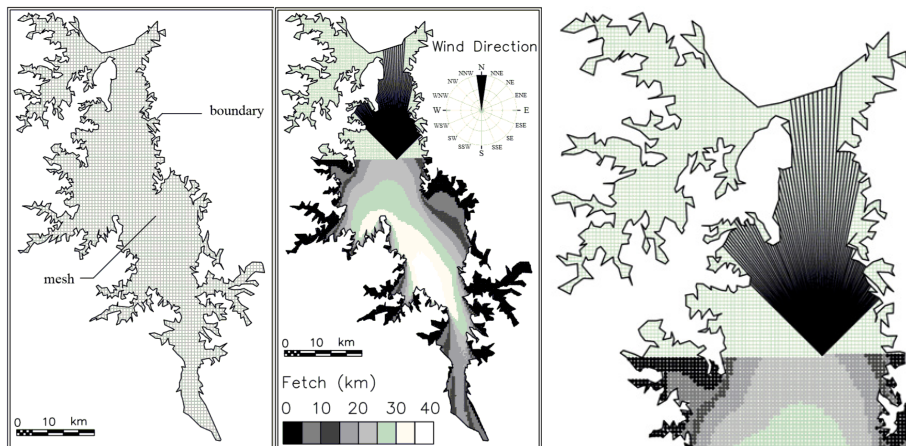
Figura 2: Traçado esquemático para determinação do fetch: (a) pelo método de Saville (1954); (b) pelo aumento da resolução angular entre linhas radiais



A distribuição do fetch de modo automatizado é realizada por um programa concebido em linguagem LISP denominado ONDACAD podendo ser interpretado por programas de projeto assistido por computador, como o AutoCAD, zwcAD e CorelCAD.

Um dos módulos do modelo ONDACAD gera a distribuição do fetch com base na discretização da superfície do corpo de água pela geração de uma malha estruturada quadrangular (Figura 3a). Os nós da malha são percorridos respeitando-se a direção do vento fornecida e aplicando o método de Saville (1954) com resolução de um grau entre as linhas radiais (Figura 3b e Figura 3c).

Figura 3: (a) geração de uma malha estruturada quadrangular; (b) processamento propositalmente interrompido para mostrar os nós da malha sendo percorridos; (c) ampliação de parte da Figura 3c



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

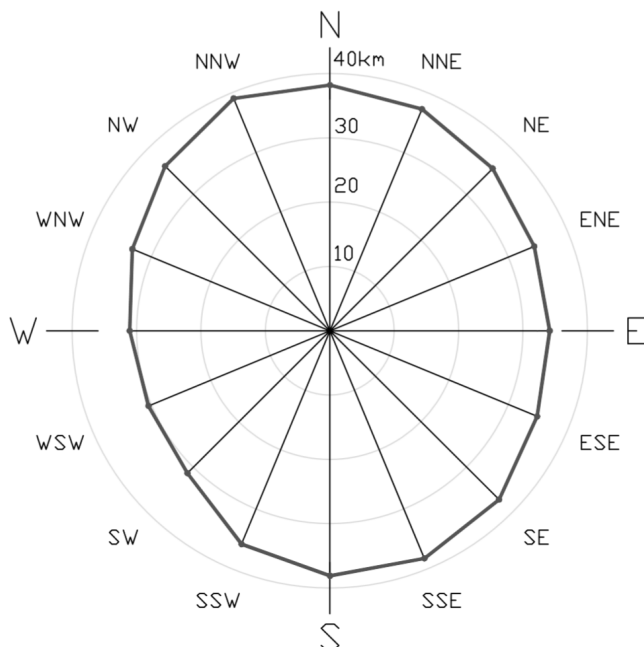
Na aplicação do modelo foi gerada uma malha de 900m de resolução totalizando pouco mais de 15 mil nós. Foram gerados 16 mapas, um para cada direção. A representação das ocorrências dos maiores valores de fetch é representada pela Tabela 1 e pela Figura 4.

Figura 4: Distribuição do fetch para as 16 direções



Tabela 1: Maior comprimento do fetch para cada direção

Direção	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW
Fetch máx (km)	34,1	34,3	35,7	37,3	38,2	39,1	36,2	33,2
Direção	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESSE
Fetch máx (km)	31,1	30,5	31,3	35,9	38,1	38,3	37,1	34,8

Figura 5: Valores de fetch máximos para cada direção

A maior dimensão livre do reservatório tende a seguir a direção nortesul, coincidindo com a calha original do rio Tocantins. A diferença entre o comprimento máximo (direção NNW) e o comprimento mínimo (direção WSW) foi de 22% com um fetch extremo médio de 35 km. Deste modo, a tendência dos comprimentos máximos acompanharem a direção do corpo principal do reservatório ocorreu de modo bastante discreto. O valor médio dentre o maior fetch para cada direção é de 70,4 km e a maior extensão é de 82 km para vento vindo tanto de SW como de WSW.

O comprimento máximo foi de 39,1 km para vento NNW.

Aplicando o Método Rápido apresentado por Marques et al. (2013) obtêm-se, respectivamente, os comprimentos $L_1 = 85.360,0\text{m}$ e $L_2 = 42.670,0\text{m}$.

5. CONCLUSÕES

O método gráfico proposto por Saville para a determinação pontual do fetch é reconhecidamente de aplicação trabalhosa pelo projetista por exigir uma excessiva quantidade de operações gráficas. O método pôde ser aprimorado pelo aumento da resolução angular e aplicado com sucesso pela utilização de processamento computacional. O estudo permitiu a obtenção confiável da distribuição do fetch, representado por mapas temáticos. Para o reservatório de Tucuruí, os máximos comprimentos determinados pelo estudo variam de 30,5 a 39,1 quilômetros. Para fins comparativos, pelo método Rápido, de determinação do fetch máximo, foi obtido um comprimento máximo de 42,7 quilômetros, correspondendo a um erro de 8,4%. Os resultados contribuíram para uma definição segura do comprimento do fetch neste importante reservatório no Brasil, além de comprovar o resultado confiável do método Rápido.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. O.; GONÇALVES, R. C.; GUETTER, A. K. (2005). Efeito do vento sobre o reservatório de Itaipu: cenários de vento e impacto no balanço hídrico. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. João Pessoa/PB, Brasil, Nov/2005.
- MANNICH, M. (2013). Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios e Lagos - Contribuições para o Monitoramento e Modelagem 1D-Vertical. Tese de doutorado pelo Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- MARQUES, M. (2005). Sistema automatizado para estimativa de ondas geradas por vento em reservatórios de barragens. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- MARQUES, M. (2013). Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- MARQUES, M.; ANDRADE, F. O.; ARANTES, E. P.; GUETTER, A. K. (2013). Método Rápido para a determinação do fetch máximo. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013. v. 1
- MARQUES, M.; ANDRADE, F. O.; GUETTER, A. K. (2013). Conceito do campo de fetch e sua aplicação ao reservatório de Itaipu. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, p. 243-253.
- MARQUES, M.; GUETTER, A. K. (2011). Estimativa com modelo paramétrico dos campos de ondas gerados por ventos severos no reservatório de Itaipu. In: XIX

Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, Alagoas.

MARQUES, M.; GUETTER, A. K. (2012). Estimativa da profundidade de mistura gerada por ventos severos no reservatório de Itaipu. In: XVI Congress of the Iberian Association of limnology. Guimarães, Portugal.

PIERINI, S. A. (2005). Fatores determinantes da distribuição de plantas submersas e da estrutura das assembleias de macrófitas aquáticas no Reservatório de Rosana. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais. Maringá: Universidade Estadual de Maringá.

SAVILLE, T. (1954). The effect of fetch width on wave generation. Journal Technical Memorandum, n. 70, 1954.

U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (1984). Shore Protection Manual. Third Edition. Washington, D. C.: Department of the Army Corps of Engineers. Volumes 1. 1984.

FETCH FIELDS DETERMINATION IN THE TUCURUÍ HYDROELECTRIC RESERVOIR

ABSTRACT - The present work proposes to extend the concept of fetch by means of two-dimensional representations via automated processing. A computational program was developed in the LISP language and named ONDACAD. The model allowed the distribution of the fetch and the determination of the maximum safe values for each direction in the Tucuruí reservoir.

KEYWORDS: Wave; Wind; ONDACAD.

CONCEITO DE PROFUNDIDADE DE MISTURA APLICADO AO RESERVATÓRIO DA UHE DE LAJEADO

Marcelo Marques

lattes.cnpq.br/0855863872309532

Universidade Estadual de Maringá

Fernando Oliveira de Andrade

lattes.cnpq.br/5175699449525205

Universidade Tecnológica Federal
do Paraná

Cristhiane Michiko Passos Okawa

lattes.cnpq.br/1268747202598728

Universidade Estadual de Maringá

Elaine Patrícia Arantes

lattes.cnpq.br/5673783965584352

Universidade Estadual de Maringá

RESUMO: Pelo presente trabalho, o conceito de profundidade de mistura ao reservatório da hidrelétrica de Lajeado. Trata-se da profundidade máxima perturbada pela onda ao se propagar. As profundidades são determinadas com base em representações bidimensionais da superfície do corpo hídrico, obtidas pela aplicação da técnica de simulação denominada Modelagem Paramétrica Bidimensional (MPB), recentemente desenvolvida. Pelas

conclusões do estudo, o reservatório de Lajeado dificilmente atinge uma condição de estratificação térmica, devendo ser comum a ressuspensão de sedimentos do fundo. As maiores profundidades foram atingidas para ventos orientados na direção do comprimento predominante do reservatório. A aplicação do conceito de profundidade de mistura via modelagem paramétrica bidimensional mostrou-se viável. O reduzido tempo de processamento na geração dos mapas e a demanda somente das informações sobre o vento (intensidade e direção) pode tornar oportuna a incorporação do modelo em sistemas de previsão em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE: ONDACAD; Vento; Fetch.

1. INTRODUÇÃO

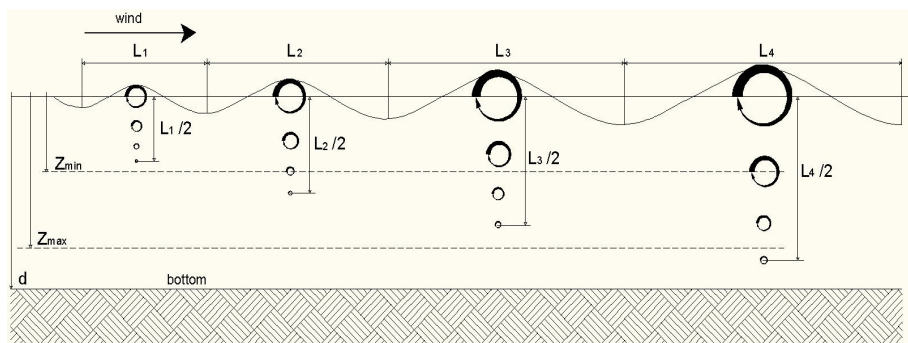
A ação do vento em reservatórios se torna mais importante à medida que o eixo longitudinal do corpo hídrico é orientado na sua direção predominante. A profundidade média destes corpos hídricos também se constitui em um fator importante, pois, corpos de água mais rasos têm uma resposta mais rápida a processos

de aquecimento e resfriamento ou a ação de ondas. Estas ondas podem induzir processos de mistura em toda coluna d'água tendendo a destruir a estratificação vertical favorecendo a criação de gradientes longitudinais e transversais mais intensos (Smith, 1994). Estudos em corpos hídricos desse tipo frequentemente demandam informações relacionadas à dinâmica da massa hídrica.

O termo profundidade de mistura é definido como a profundidade máxima afetada pela onda ao se propagar. O efeito da dispersão longitudinal provocado por ondas geradas pela ação do vento constitui-se em um processo de importante impacto no ambiente podendo provocar ressuspensão de sedimentos e desestratificação térmica do corpo hídrico.

O conceito se baseia na constatação de que a propagação de uma onda de determinado comprimento, perturba a massa líquida a uma profundidade máxima equivalente à metade de seu comprimento. Desse modo, ao determinar a metade do comprimento da onda em um ponto se está determinando a profundidade de mistura, como mostrado pela Figura 1.

Figura 1: Representação da profundidade de mistura



Por meio do presente trabalho esse conceito foi aplicado à Lagoa dos Patos de maneira a obter a representação da profundidade de mistura em toda a superfície livre para 16 direções de vento e para intensidades de 5, 10, 15 e 20ms⁻¹. A técnica de modelagem computacional empregada foi a paramétrica bidimensional.

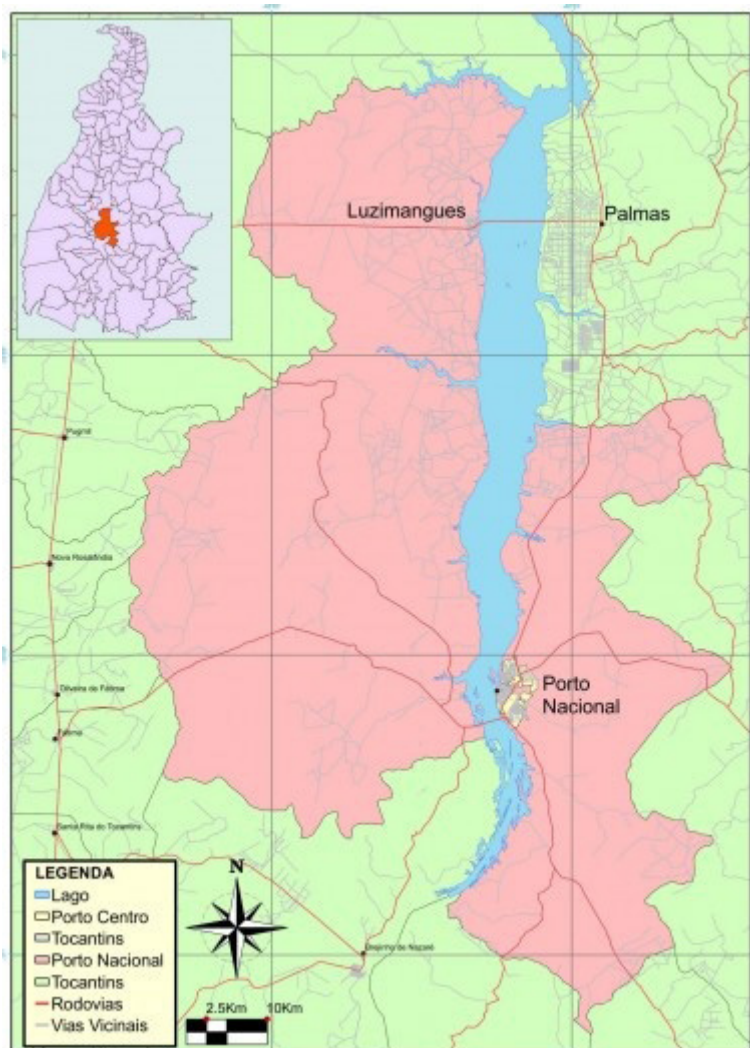
2. ÁREA DE ESTUDO

A usina hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães situada no Estado do Tocantins entre os municípios de Miracema do Tocantins e Lajeado é uma das maiores obras civis no país construída com recursos da iniciativa privada. Sua localização está representada pela Figura 2. A barragem apresenta 2.100 m de comprimento e vertedouros com 14 vãos e capacidade para escoar

49.870 m³/s de água. De acordo com Pereira (2002), o reservatório encontra-se em área de cerrado com baixo tempo de retenção (24 dias) e morfometria pouco complexa. Os estudos foram desenvolvidos no período de março de 2016 com visitas de campo e no segundo semestre de 2016 por meio de atividades de simulação computacional.

O reservatório possui profundidade média de 3m, uma superfície de 626 km², área de drenagem de 184.219,0 km² e a velocidade média do rio Tocantins de 300m/h (Pereira, 2002).

Figura 2: Localização do reservatório da UHE de Lajeado



3. MODELO ONDACAD

A determinação da distribuição do *fetch* foi feita com base no método geométrico de Saville (1954), pelo traçado apresentado esquematicamente para vento nordeste, conforme Figura 3a. De acordo com o método, o *fetch* em cada ponto e para determinada direção é definido pela equação 1.

$$F = \sum_i x_i \cos \alpha_i / \sum_i \cos \alpha_i \quad (1)$$

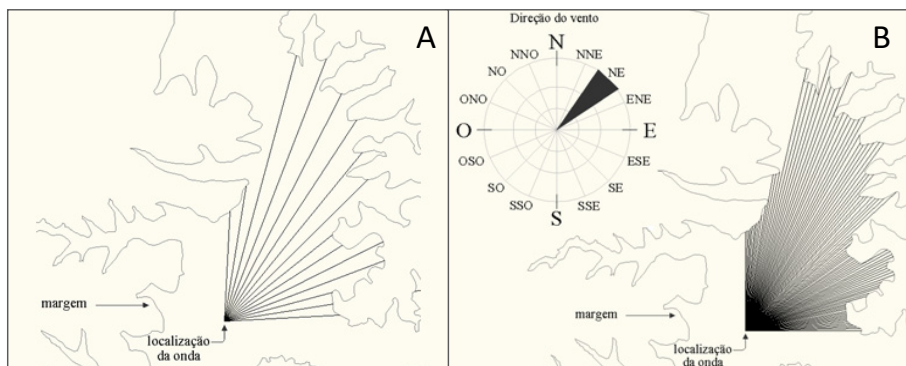
Onde α_i é o ângulo entre a direção do vento e a direção secundária; e x_i é o comprimento na direção secundária.

No presente trabalho foi introduzido um importante aperfeiçoamento. O *fetch* passa a ser determinado por um método integral, ao invés de um somatório, conforme Figura 3b e as equações (2) e (3),

$$F = \int_{-\alpha}^{\alpha} F \ddot{u} \varphi d\varphi / \int_{-\alpha}^{\alpha} \ddot{u} \varphi d\varphi \quad (2)$$

$$0 \leq \alpha \leq \pi / 4 \quad (3)$$

Figura 3: Traçado esquemático para determinação do *fetch*: (a) pelo método de Saville (1954); (b) pelo aumento da resolução angular entre linhas radiais

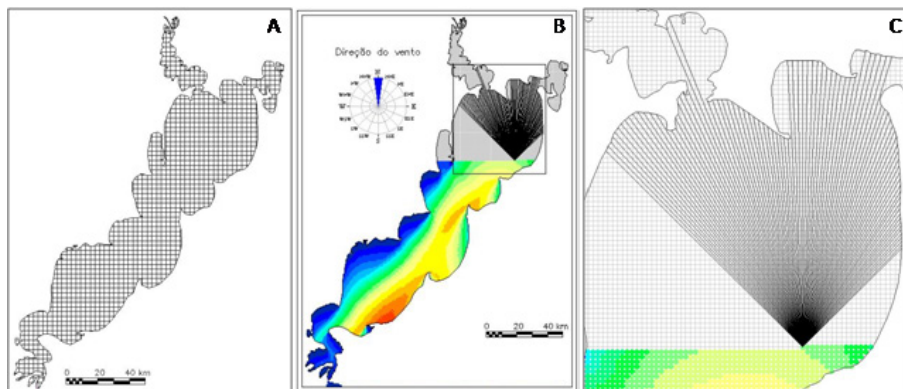


A distribuição do *fetch* de modo automatizado é realizada por um programa concebido em linguagem LISP denominado ONDACAD podendo ser interpretado por programas de projeto assistido por computador, como o AutoCAD, zwcAD e CorelCAD.

Um dos módulos do modelo ONDACAD gera a distribuição do *fetch* com base na discretização da superfície do corpo de água pela geração de uma malha estruturada quadrangular (Figura 4a). Os nós da malha são

percorridos respeitando-se a direção do vento fornecida e aplicando o método de Saville (1954) com resolução de um grau entre as linhas radiais (Figura 4b e Figura 4c).

Figura 4: (a) Geração de uma malha estruturada quadrangular; (b) Processamento propositalmente interrompido para mostrar os nós da malha sendo percorridos; (c) Ampliação de parte da Figura 4b



4. PROFUNDIDADE DE MISTURA

Pela técnica de modelagem adotada, um campo de fetch é convertido em um campo de profundidade de mistura através de uma equação paramétrica. A equação paramétrica é obtida com base na teoria linear de ondas, pela qual o comprimento da onda em águas profundas é definido como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

Onde T é o período da onda, L o comprimento e g a aceleração gravitacional.

Para a determinação do período da onda é adotado o modelo SMB, conforme equação seguinte:

$$T = 7,54 \frac{U_{10}}{g} \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \quad (5)$$

Segundo Bretschneider (1966), o método referido como SMB foi inicialmente proposto por Sverdrup e Munk (1947) e posteriormente modificado pelo autor, recebendo as letras iniciais do sobrenome de seus idealizadores.

O método SMB foi objeto de inúmeras revisões e é um dos mais importantes modelos paramétricos de previsão de ondas (Cardone e Ross, 1979). É bastante empregado em função de sua simplicidade e eficiência (Kinsman, 1965; Wiegel, 1970).

Substituindo a equação (5) na equação (4) e assumindo que a profundidade de mistura (pfm) é a metade do comprimento da onda (L) se obtém:

$$pfm = \frac{4,52U_{10}^2}{g} \left\{ \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \right\}^2 \quad (6)$$

Pela condição assumida de campo de ondas que são limitadas pelo fetch, as informações sobre a duração do vento tornam-se prescindíveis. Foi através da equação (6) que o campo de fetch foi transformado em um campo de profundidade de mistura pela utilização do modelo ONDACAD.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do modelo computacional ONDACAD permitiu a geração de 16 mapas, um para cada direção, para cada intensidade do vento, totalizando 64 mapas. As profundidades máximas perturbadas pela onda ao se propagar foram atingidas para vento sul, de modo que os resultados referentes ao vento soprando naquela direção estão mostrados pelas Figuras 5 e 6 de modo ilustrativo. As profundidades máximas atingidas para todas as direções e intensidades de vento das simulações são apresentadas pelas Tabelas 1 e 2.

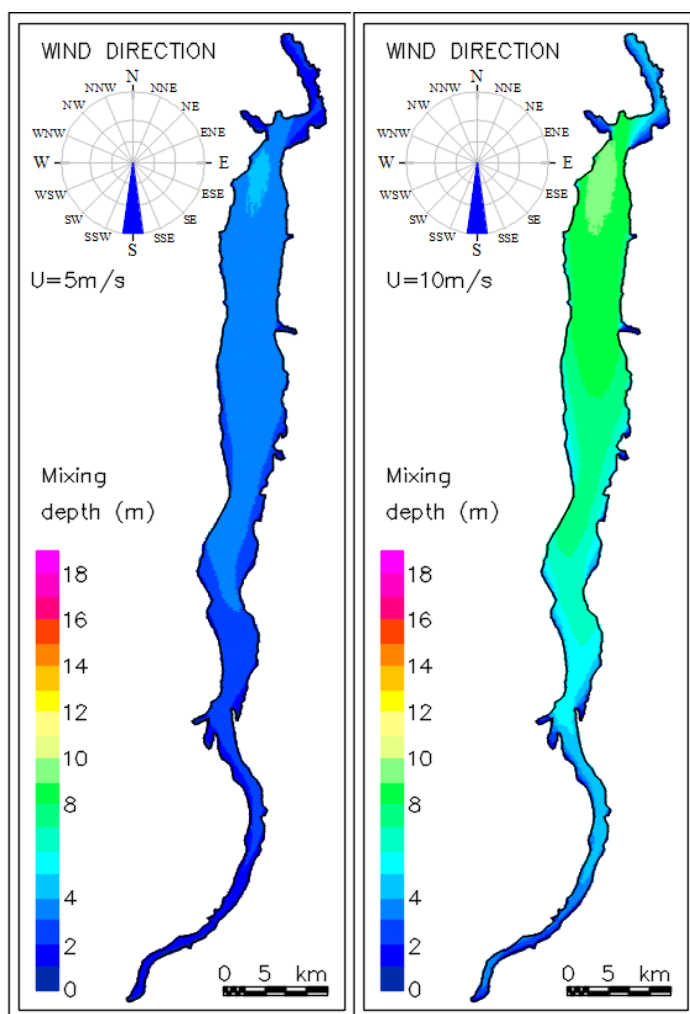
Tabela 1: Profundidades máximas (unidade em metros) atingidas pela onda para direções E a WNW

U (m/s)	Direção	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW
	Fetch máx (km)	8,5	9,60	14,10	14,90	15,20	14,90	13,10	9,30
5	PFM máx (m)	3,2	3,35	3,89	3,97	4,00	3,97	3,78	3,31
10		4,5	4,62	4,95	5,00	5,01	5,00	4,89	4,59
15		8,2	8,26	8,53	8,57	8,58	8,57	8,48	8,23
20		14,6	14,71	14,94	14,98	14,99	14,98	14,90	14,69

Tabela 2: Profundidades máximas (unidade em metros) atingidas pela onda para direções W a ESE

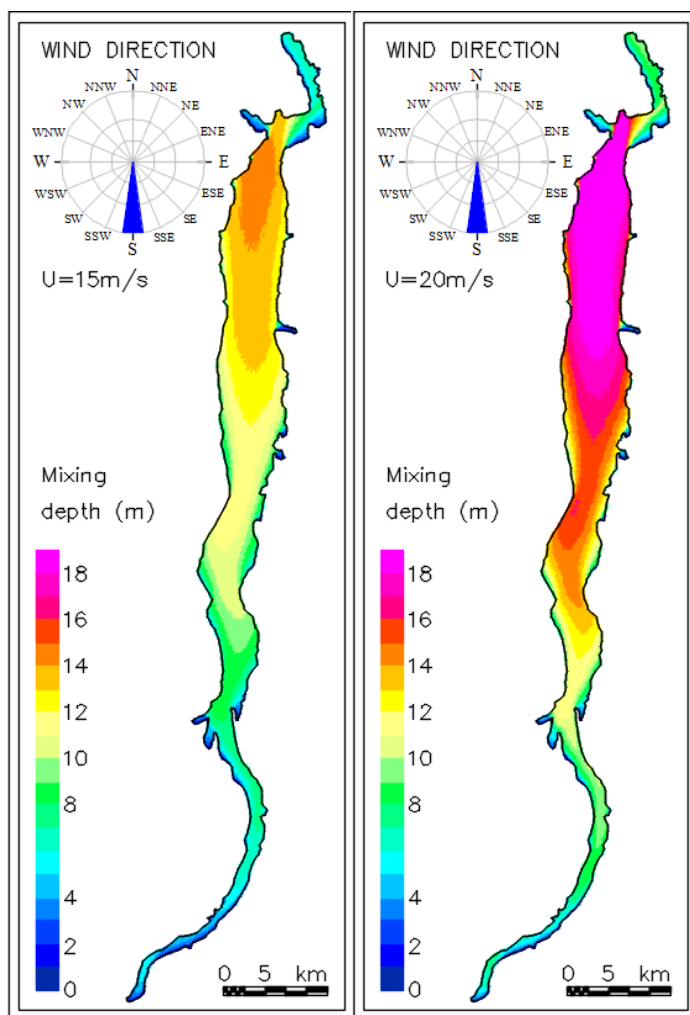
U (m/s)	Direção	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE
	Fetch máx (km)	8,30	10,10	14,30	15,80	15,90	15,40	13,60	9,20
5	PFM máx (m)	3,16	3,42	3,91	4,06	4,07	4,02	3,84	3,29
10		4,49	4,66	4,96	5,05	5,05	5,03	4,92	4,58
15		8,15	8,29	8,54	8,61	8,61	8,59	8,50	8,22
20		14,62	14,74	14,95	15,01	15,01	14,99	14,92	14,69

Figura 5: Distribuição das profundidades atingidas pelas ondas geradas por vento S



Com base na tabela 2, observa-se que a menor profundidade perturbada pelas ondas foi de 3,2 metros, atingida pelo vento de 5m/s no sentido transversal leste. Ventos provenientes da direção sul permitem a combinação aos maiores comprimentos de fetch, gerando ondas que atingem as maiores profundidades. Por meio da Tabela 2 pode-se verificar que ventos soprando a 20 ms⁻¹ geraria ondas que, ao se propagar, atingiriam 15 metros de profundidade caso as condições batimétricas assim permitissem.

Figura 6: Distribuição das profundidades atingidas pelas ondas geradas por vento S



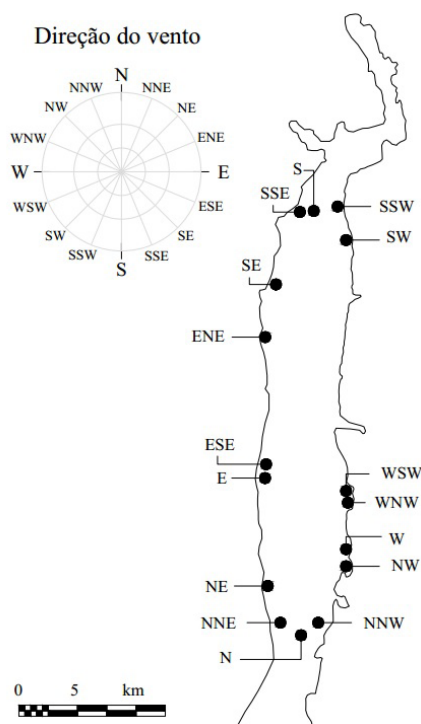
A profundidade média do reservatório é de 3m e um vento que

sopra na direção do maior comprimento livre atinge esta profundidade, mesmo soprando com intensidade de 5ms-1. Esta intensidade do vento é considerada de pequena intensidade e grande probabilidade de ocorrência. Portanto, estima-se que na área de estudo seja bastante comum que as perturbações geradas pela propagação das ondas atinjam o fundo. Deste modo, através dos resultados obtidos é possível constatar que se trata de um local que dificilmente atinge uma condição de estratificação térmica, devendo ser comum a ressuspensão de sedimentos do fundo.

Através dos mapas gerados para as quatro intensidades do vento foi elaborado um mapa de localização das maiores profundidades atingidas, conforme Figura 7.

Por esta figura se observa que a intensidade do vento não interfere na localização da maior profundidade atingida. Ventos de diferentes intensidades soprando da mesma direção não alteraram a posição da profundidade máxima atingida pela onda. Outro aspecto a destacar é que esta localização coincide com a localização do maior comprimento de fetch tornando os mapas de distribuição do fetch valiosas ferramentas na localização de profundidades extremas atingidas pelas ondas de vento ao se propagar.

Figura 7: Localização das maiores profundidades atingidas para cada direção



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método gráfico de determinação do fetch, de aplicação trabalhosa pelo projetista, por exigir uma excessiva quantidade de operações gráficas, pôde ser aprimorado e aplicado com sucesso pela utilização de processamento computacional viabilizando a aplicação do conceito de campo de fetch e sua transformação para campo de profundidade de mistura. A técnica foi validada para altura de ondas, tornando oportuna a validação da profundidade de mistura por estudos futuros.

Pelas conclusões do estudo, o reservatório de Lajeado dificilmente atinge uma condição de estratificação térmica, devendo ser comum a ressuspensão de sedimentos do fundo. As maiores profundidades foram atingidas para ventos orientados na direção do comprimento predominante do reservatório. A aplicação do conceito de profundidade de mistura via modelagem paramétrica bidimensional mostrou-se viável. O reduzido tempo de processamento na geração dos mapas e a demanda somente das informações sobre o vento (intensidade e direção) pode tornar oportuna a incorporação do modelo em sistemas de previsão em tempo real.

Um importante desdobramento que pode ser empreendido por trabalhos futuros é a incorporação da batimetria do lago no processo de modelagem, de modo a permitir o mapeamento das tensões no fundo geradas pela onda ao se propagar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

ARANTES, E. P.; MARQUES, M.; ANDRADE F. O.; OKAWA, C. M. P.; SOUZA, M. L. 2015. Conceito da profundidade de mistura gerada pela ação de ondas aplicado à Lagoa dos Patos, RS, Brasil. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21. (SBRH), Brasília. Anais. São Paulo, 2015.

BRETSCHNEIDER, C. L. 1966. Wave generation by wind, deep and shallow water. In: A.T. Ippen (Editor), Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, New York, pp. 744.

CARDONE, V. J.; ROSS, D. B. 1979. Wave Prediction Methods and Data Requirements, Ocean Wave Climate, edited by M. D. Earle and A. Malahoff, Plenum Publishing Corp.

FERNANDEZ, R. L. ; BONANSEA, M. ; MARQUES, M. . 2014. Monitoring Turbid Plume Behavior from Landsat Imagery. Water Resources Management, v. 28, p. 3255-3269, 2014.

KINSMAN, B. 1965. Wind Waves; Their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Prentice Hall, Inc., 676 pp.

MARQUES, M. 2013. Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 219 pp.

MARQUES, M.; ANDRADE, F. O. 2017. Automated computation of two-dimensional fetch fields: case study of the Salto Caxias reservoir in southern Brazil. *Lake and Reservoir Management*, v. 32, p. 1-12, 2017.

MARQUES, M.; ANDRADE, F. O. ; GUETTER, A. K. 2013. Conceito do Campo de Fetch e sua Aplicação ao Reservatório de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 243-253, 2013.

MARQUES, M.; MACIEL, G. F. ; DALL'AGLIO SOBRINHO, M. 2007. Estimativa das máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira - Estado de São Paulo -. *Acta Scientiarum. Technology (Impresso)*, v. v. 29, p. 79-84, 2007.

MELO, M. S.; CARVALHO, M. S. B. S.; SOARES, A. M. L.; BARRETO, R. N. C. 2007. Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Ministério da Integração Nacional, Agência Nacional das Águas. Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. Fortaleza: Funceme, 108p.

PEREIRA, V. L. R. 2002. A Limnologia e o gerenciamento integrado do reservatório da Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães - UHE Lajeado Tocantins. Tesis Doctoral de La Universidade Estadual de São Paulo, CRHEA-EESC-USP, Brasil: 262 p

SAVILLE, T. 1954. The effect of fetch width on wave generation. *Technical Memorandum No. 70*, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 9 pp

SMITH, N.P. 1994. Water, salt and heat balance of coastal lagoons. In B. Kjerfve (ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography Studies, 60:69-101.

SVERDRUP, H.U.; MUNK, W.H. 1947. Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting. Publication 601, *Hydrographic Office*, U.S. Navy, pp. 50

WIEGEL, R. L.; NODA, E. K.; KUBA, E. M.; GEE, D. M.; TORNBORG, G. F. 1970. Water waves generated by landslides in reservoir, J. of the Waterways and Harb. Div., *Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng.* 96 (WW2): pp. 307–333.

MIXING DEPTH CONCEPT APPLIED TO THE LAJEADO HPP RESERVOIR

ABSTRACT: In the present work, the concept of mixing depth to the Lajeado hydroelectric reservoir. It is the maximum depth disturbed by the wave as it propagates. The depths are determined based on two-dimensional representations of the surface of the water body, obtained by applying the simulation technique called Two-dimensional Parametric Modeling (MPB), which was recently developed. According to the study's conclusions, the Lajeado reservoir hardly reaches a condition of thermal stratification, and the resuspension of bottom sediments should be common. The greatest depths were reached for winds oriented in the direction of the predominant length of the

reservoir. The application of the mixing depth concept via two-dimensional parametric modeling proved to be feasible. The reduced processing time in the generation of maps and the demand only for information about the wind (intensity and direction) may make it timely to incorporate the model into real-time forecasting systems.

KEYWORDS: ONDACAD; Wind; Fetch.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aço 48-53, 56, 100, 108,
Ações 9, 21, 32-34, 45, 78, 115
Adição 10, 11, 75-93
Alto 75, 77, 87, 95, 96, 99, 101-104
Ambiental 9, 44, 45, 51, 60, 70, 76, 97, 98, 103, 104, 108, 125, 137
Análise 9, 12, 24-26, 32, 34-36, 38-43, 48, 50, 53, 56, 59, 61-64, 67, 68, 72, 73, 83-86, 88, 94-106
Analítico 26-28, 30
Antepara 9, 12, 94-106
Aplicação 27, 34, 51, 75, 98, 103, 118, 121, 125, 127, 132, 136, 137
Areia 80, 82
Armazenamento 9, 12, 94-106
Aspectos 11, 44-58

B

Baixo 67, 95, 97, 102-104, 129
Base 11, 47, 49, 55, 56, 60, 61, 63, 64, 67, 72, 75-93, 95, 96, 98, 105, 106, 118-120, 127, 128, 130, 131, 134, 137

C

Cálculo 21, 25, 27, 33, 35, 66, 103, 111
Canteiro 45-47, 56
Capacidade 29, 37, 45, 51, 59, 60, 62, 70, 76, 108, 109, 114, 118, 128
Caracterização 83
Carbono 9-12, 75-93, 107-116
Carregamento 11, 13-43, 50, 97-103, 105

Caso 11, 18, 33-35, 50, 52-55, 57, 59-74, 90, 95, 97, 100, 101, 105, 118, 134

CFRP 107-116

Chapas 11, 13-43, 100, 108

Ciclo 60, 95-97, 99, 101-104

Cimentícias 54, 78

Comparação 35, 54, 60, 68, 87, 88, 90, 103

Composta 9, 10, 34-36, 38, 53, 79, 85

Compressão 10, 75-78, 83, 86-88, 90, 91, 108, 111-114

Concentrações 78-80, 87

Conectados 10, 11, 59-74

Conexões 9, 12, 94-106

Constatação 109, 128

Consumo 45, 47, 50-53, 59-62, 64, 67, 76

Costado 9, 12, 94-106

Críticos 59, 64, 67

Cronograma 14, 45

Curitiba 10, 11, 59-74, 125, 137

Curvas 59, 64, 72, 96-98, 101, 103, 105, 111

D

Dano 95-99, 101-104

Desenvolvimento 11, 44-48, 55, 56, 59-75, 78, 108, 118

Diafragmas 9, 14, 16-19, 21-24, 27, 28, 30, 32-35, 40, 42

Dimensionamento 19, 34, 42, 48, 50, 55, 61, 62, 73, 107, 109, 110, 112

Dispersão 40, 75, 77-81, 83-85, 87, 88, 90, 128

Durabilidade 10, 46, 54, 75, 82, 90, 108, 109

E

Edificações 14, 18, 20, 42, 44, 47, 50, 54, 55, 57

Efeito 10, 11, 14, 16, 33, 35, 36, 38, 42, 50, 59, 60, 70, 75-93, 98, 107, 117, 118, 125, 128

Elementos 9, 15, 17-22, 27-29, 32-36, 38, 40, 42, 45-47, 51, 56, 95, 96, 98-101, 103-105, 108, 118

Elétrica 11, 15, 59-74, 77-79

Eletrônica 75, 77, 83, 85

Emissão 59, 60, 62, 63, 70, 72, 76

Energia 45, 59-62, 64-73, 79, 110, 111

Ensaio 19, 22-25, 27, 28, 32, 36, 37, 39, 40, 75, 77, 78, 83, 85-88, 90, 111

Esforços 17-21, 26, 28, 34-36, 38, 50, 79, 109, 110

Especificações 46, 49

Espectroscopia 83, 84

Estruturas 9, 12, 14, 15, 18, 24, 29, 30, 32, 34, 42, 43, 47, 48, 51, 52, 78, 85, 94-109, 112, 115

Estufa 10, 59, 60, 70, 81, 117, 118, 125

Execução 9, 14, 15, 29, 42, 45, 46, 49, 55, 56, 107, 109, 112, 113, 118

Exemplo 28, 47, 52, 76, 103, 105, 109

Exequibilidade 54, 57

F

Fadiga 9, 12, 94-106

Fatores 33, 42, 44, 45, 48, 54, 63, 72, 88, 96-99, 102, 103, 105, 126

Fechamentos 49, 50, 55

Fibra 9, 12, 76, 77, 107-116

Finitos 32, 38, 42, 95, 96, 98-101, 103-105

Flexão 10, 20, 21, 28, 32, 37, 75, 78, 83, 84, 87-91, 107-109, 112

Flexibilidade 49, 50, 54

Flutuante 9, 12, 94-106

Formulação 25-28, 38, 83, 87, 89, 90

Fotogerada 62, 65, 68

Fotovoltaicos 10, 11, 59-74

G

Gases 10, 59, 60, 70, 74, 117, 118, 125

Geopolímeros 10, 11, 75-93

Granulométricas 80

I

Industrialização 14, 44-47, 55-57

Infravermelho 75, 83, 84

Instalações 15, 44, 49, 53, 54, 56, 70

Insumos 45, 47

Interdisciplinaridade 54

Intrusão 75, 88

Investimento 45, 54, 70

Itaqui 12, 107-116

L

Largura 48, 109

Ligação 20, 25, 33, 35, 76-78, 83, 84, 105

Livre 48, 117, 123, 128, 135

Logística 44, 49, 50, 54-56

Longitudinal 9, 12, 22, 36, 94-106, 111, 127, 128

M

Madeira 9, 11, 13-43

Manutenibilidade 54

Mão 14, 45, 46, 54, 56, 112-114
Matrizes 75, 77-80, 82, 87
Mecânico 10, 35, 79, 82, 83
Mercúrio 75, 88, 89
Metacaulinita 11, 75-93
Metodologia 10, 11, 22, 36, 38, 48, 59-74, 80, 99
Métodos 22, 33, 36, 45, 47, 76, 79, 80, 95, 98, 100, 103, 105
Microscopia 75, 83, 85
Modelo 14, 26-28, 30, 33, 36, 38-41, 62, 98, 100, 101, 103-105, 117, 120, 121, 125, 127, 130-132, 136
Modular 11, 44-58
Montagem 14, 46, 47, 49-51, 56, 57, 112
Montante 10, 15, 16, 59, 62, 65, 68

N

Nanotubos 10, 11, 75-93
Normal 17, 20, 25, 35, 79, 80, 96, 99, 109, 111
Normatização 45, 49
NTC 10, 75, 77-90, 93
Numérico 14, 38, 39

O

Obras 45-47, 128
Offshore 9, 10, 12, 94-116
OSB 11, 13-43

P

Padronização 14, 46, 47, 49
Parâmetros 14, 23, 24, 28, 32, 46-48, 55-57, 64, 73, 82, 90, 96, 99, 101, 102, 109
Perpendicular 11, 32-43, 100, 111
Piso 9, 11, 13-43, 48, 49

Plataforma 9, 12, 14, 95, 107-116
Polímero 9, 12, 75-77, 107-116
Porosidade 89, 90, 108
Porto 12, 107-116
Potencial 10, 45, 59, 60, 63, 64, 67, 68, 70, 72, 76, 77, 79, 108
Problema 46, 56, 96, 105, 109,
Produção 9, 12, 46, 47, 56, 57, 70, 75, 76, 79, 82, 90, 94-106
Proposta 10, 38, 48, 51, 53-56, 59, 61, 67
Protótipos 9, 14, 22-28

Q

Qualidade 14, 16, 46, 47, 56, 73, 83, 109
Quantidade 45, 80, 82, 85, 89, 105, 109, 112, 125, 136
Química 10, 75-77, 79, 80, 82, 83, 92, 115

R

Racionalização 14, 44, 46, 47, 56
Redistribuição 34-36
Reforçador 9, 12, 94-106
Reforço 9, 12, 75-79, 88, 107-116
Reformas 55
Região 10, 11, 59-74, 84, 96, 98-101, 104, 105
Remanescente 9, 95, 99, 102-105
Resistência 9, 10, 14, 22, 28, 32-37, 42, 75-78, 82, 83, 86-91, 98, 104, 108, 112, 114
Reuso 54
Rigidez 9, 14-16, 19-22, 28, 32-36, 42, 78, 111, 112
São Luís 109, 115
Seleção 63, 64, 67, 76

S

Severidade 97, 103
Sistemas 9, 10, 11, 14, 18, 19, 32,
34, 35, 44-50, 53-57, 59-74, 127,
136
Solar 10, 59-64, 66, 67, 70-74
Solicitantes 110
Submetido 11, 13-43, 96
Sustentabilidade 11, 44-58, 60

T

Tensões 76, 79, 96, 98, 105, 112,
136
Teóricas 47
Transferência 9, 12, 18, 20, 77,
78, 94-106, 117
Transporte 45, 47, 49, 50, 51, 54,
80, 90, 109
Transversal 9, 12, 15, 21, 22, 36-
38, 94-106, 112, 134

U

Unidade 9, 12, 47, 94-106
Utilização 10, 14, 16, 29, 44, 48,
108, 109, 125, 132, 136

V

Vão 21, 22, 33-35, 40, 42, 45, 48,
128
Variáveis 23, 45
Varredura 75, 83, 85
Verticais 15, 16, 18, 20, 32, 33,
36, 51, 54
Viabilidade 11, 44-58, 95
Vida 9, 10, 45, 46, 54, 95, 99, 102-
105, 114
Viga 9, 11, 13-43, 78

SOBRE O ORGANIZADOR

Altevir Castro dos Santos

Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (1991), Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1993), Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Paraná (1999). Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2005) e Pós-Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018). Atualmente é professor Associado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, lecionando nos cursos de graduação em Engenharia Agrícola, Engenharia Civil e especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho. Tem atuado principalmente no que diz respeito à análise e modelagem estrutural, estruturas em concreto armado, estruturas de madeira, construções rurais, sistemas construtivos, ambiência e segurança do trabalho.



Estudos Avançados em Engenharia Civil

www.bookerfield.com 

contato@bookerfield.com 

[@bookerfield](https://www.instagram.com/bookerfield) 

Bookerfield Editora 



Estudos Avançados em Engenharia Civil

www.bookerfield.com



contato@bookerfield.com



[@bookerfield](https://www.instagram.com/bookerfield)



Bookerfield Editora



ISBN 978-658992940-6



9

786589

929406