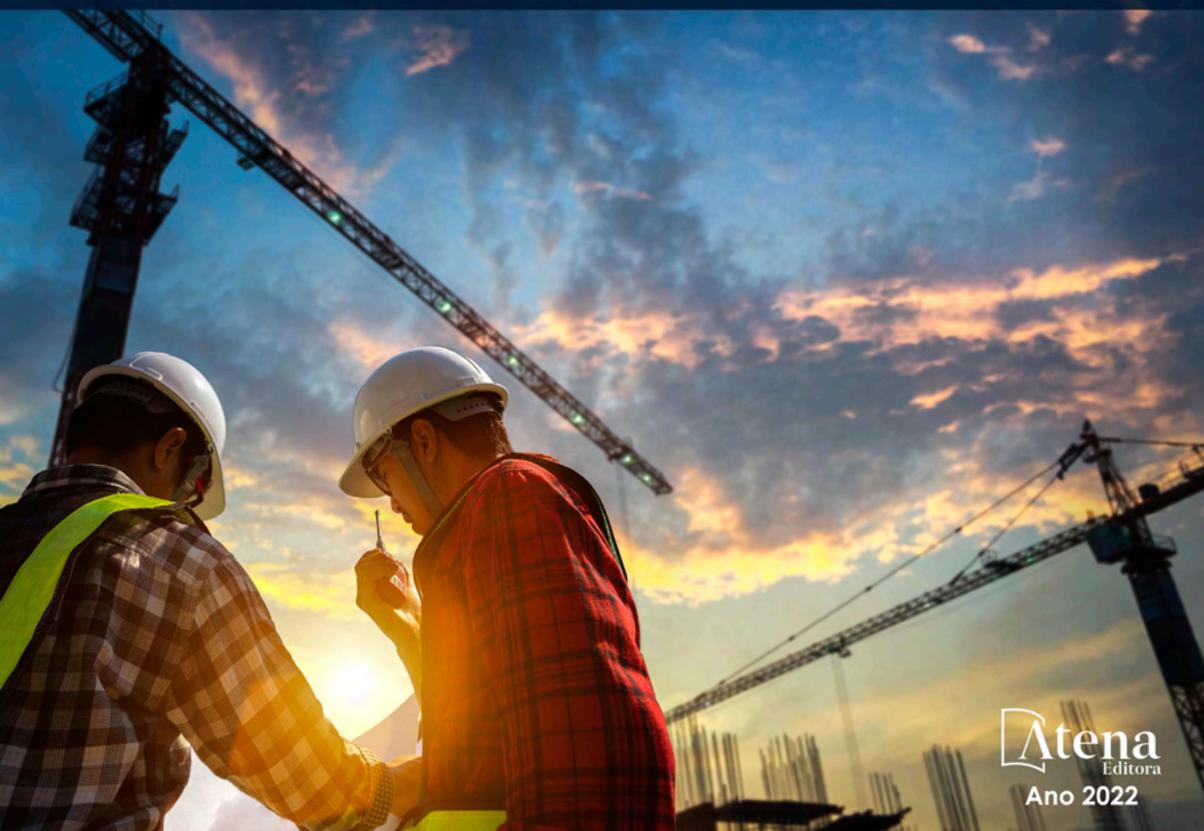


Armando Dias Duarte
(Organizador)

ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e
tecnológicas e aspectos ambientais



Atena
Editora
Ano 2022

Armando Dias Duarte
(Organizador)

ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e
tecnológicas e aspectos ambientais



Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo 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).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Engenharia civil: demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Armando Dias Duarte

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia civil: demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais / Organizador Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0358-6

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.586222706>

1. Engenharia civil. I. Duarte, Armando Dias (Organizador). II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A coleção de trabalhos intitulada “*Engenharia civil: Demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais*” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de diversos trabalhos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar, pesquisas cujos resultados possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no profissional.

Os trabalhos desenvolvidos foram realizados em instituições de ensino e pesquisa no Brasil. Nos capítulos apresentados, são encontrados estudos de grande valia nas áreas de: materiais da construção civil, geração de energia por meio de gás natural, análise de estruturas por meio de métodos numéricos e a análise da gestão de resíduos eletroeletrônicos em uma Instituição de Ensino Superior (IES). A composição dos temas buscou a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos (as), mestres (as) e todos (as) aqueles (as) que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, através de temáticas atuais com resoluções inovadoras, descritas nos capítulos da coleção. Sendo assim, a divulgação científica é apresentada com grande importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, como a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os novos pesquisadores e os que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulguem seus resultados.

Armando Dias Duarte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO ACELERADOR DO TEMPO DE PEGA NO DESEMPENHO DO CONCRETO SOB ALTAS TEMPERATURAS	
Dayane Marzurkiewicz Maria Vânia Nogueira do Nascimento Peres	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.5862227061	
CAPÍTULO 2	13
RECURSOS MINERAIS E A BUSCA DE UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: GERAÇÃO TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL	
Rafaela Baldi Fernandes Eduarda Carvalho de Almeida	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.5862227062	
CAPÍTULO 3	22
A SIMPLIFIED ANALYTICAL-NUMERICAL STRUCTURAL ANALYSIS OF THE DOME OF THE ROMAN PANTHEON	
Fillipe Marinho Faria Davidson de Oliveira França Júnior Lineu José Pedroso	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.5862227063	
CAPÍTULO 4	34
INFLUENCE OF GEOMETRICAL DIMENSIONS OF RESERVOIR ON THE FLUID-STRUCTURE COUPLED DOMINANT MODES IN CONCRETE GRAVITY DAMS	
Davidson de Oliveira França Júnior Selênio Feio da Silva Lineu José Pedroso	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.5862227064	
CAPÍTULO 5	47
GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR LOCALIZADA NO BELO JARDIM – PE	
Paulo Sérgio da Silva Pinheiro Abdeladhim Tahimi Deysianne Cristina Santos da Silva Armando Dias Duarte	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.5862227065	
SOBRE O ORGANIZADOR	62
ÍNDICE REMISSIVO	63

INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO ACELERADOR DO TEMPO DE PEGA NO DESEMPENHO DO CONCRETO SOB ALTAS TEMPERATURAS

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 08/04/2022

Dayane Marzurkiewicz

Centro Universitário Assis Gurgacz
Santa Helena – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/9913586303967816>

Maria Vânia Nogueira do Nascimento Peres

Universidade Estadual do Oeste do Paraná
e Centro Universitário Assis Gurgacz,
Departamento de Engenharia Civil
Cascavel – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/0061273572135567>

RESUMO: Com a elevada competitividade no setor, a construção civil exige otimização de prazos e melhoramento do desempenho dos materiais utilizados, a fim de torná-los mais resistentes e duráveis. O Concreto é um dos insumos mais utilizados do setor, porém apresenta grande perda de resistência quando atingido pelo fogo. Neste contexto, o trabalho aborda a utilização de aditivo acelerador do tempo de pega no concreto e a influência de expor essa mistura a altas temperaturas, objetivando analisar o ganho de resistência inicial da mistura com o aditivo e analisar a diferença da perda de resistência das misturas conforme a idade. Este trabalho traz, através de uma pesquisa exploratória, os resultados de testes de compressão simples do concreto com aditivo elevado a 400°C e os corpos de prova de referência. A comparação da perda de resistência em função da alta

temperatura, do grupo com aditivo e o grupo de referência se mostrou mais significativa nas idades finais da cura do concreto, onde os corpos de prova com aditivo perderam somente 8,74% da resistência enquanto os corpos de prova de referência perderam 27,59%, ou seja, cerca de 3 vezes mais. Comprovou-se assim que o uso do aditivo aumenta as resistências iniciais e finais do concreto e reduz a perda de resistência devido as altas temperaturas em função do tempo de cura. Como resultado, em todo o processo, o grupo com o aditivo se mostrou com resistências superiores aos demais.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto. Altas temperaturas. Aditivos. Resistências.

INFLUENCE OF THE USE OF CURING TIME ACCELERATOR ADDITIVE ON CONCRETE PERFORMANCE UNDER HIGH TEMPERATURES

ABSTRACT: With the high competitiveness in the sector, civil construction requires time optimization and improvement of the performance of the materials used, in order to make them more resistant and durable. Concrete is one of the most used inputs of sector, but it presents a great loss of resistance when hit by fire. In this context, the work addresses the use of an accelerating additive for setting time in concrete and the influence of exhibition this mixture to high temperatures, aiming to analyze the initial sStrength gain of the mixture with the additive and to analyze the difference in the loss of strength of the mixtures according to age. This work brings, through an exploratory research, the results of simple compression tests of concrete with high

additive at 400°C and the reference specimens. The comparison of strength loss as a function of high temperature between the group with additive and the reference group was more significant at the final ages of concrete curing, where the specimens with the additive lost only 8.74% of strength while the reference specimens lost 27.59%, that is, about three times more. It was proven that the use of the additive increases the initial and final strengths of concrete and reduces the loss of strength due to high temperatures as a function of curing time. As a result, along the process, the group with the additive showed superior resistance to others.

KEYWORDS: Concrete. High temperatures. Additions. Resistances.

1 | INTRODUÇÃO

O uso de aditivos na mistura do concreto é tão antigo quanto o próprio cimento. Segundo Coutinho (1997), os romanos adicionavam clara de ovo, sangue, banha ou leite aos concretos para melhorar a trabalhabilidade das misturas. O entendimento de que as propriedades do concreto podem ser modificadas pela adição de certos materiais à mistura, é responsável pelo enorme crescimento da indústria de aditivos nos últimos 40 anos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Neste sentido, como destaca Costa *et al.* (2018), a utilização de aditivos aceleradores de resistência na produção de concretos contribui com o melhoramento do desempenho nas primeiras idades e posterior otimização nos tempos ou processos construtivos.

Outro fator que passou a ganhar visibilidade ao longo dos anos é a resistência e durabilidade do concreto após passar por adversidades, como em um incêndio. De acordo com Metha e Monteiro (1994), só recentemente se iniciou uma conscientização quanto à necessidade de construir obras duráveis. Quando submetidos a altas temperaturas, as características físicas e químicas do concreto podem sofrer alterações, podendo, por sua vez, comprometê-las.

Ao utilizar-se de aditivos para acelerar o processo de cura do concreto e elevar esta mistura a altas temperaturas, tem-se características ainda pouco conhecidas, trazendo à tona uma problemática: como se comporta a mistura de concreto com aditivo acelerador de tempo de pega quando submetido a altas temperaturas?

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a resistência do concreto com a adição de acelerador de tempo de pega após ser elevado à altas temperaturas, verificando também se as qualidades mecânicas não foram abaladas pelo uso do aditivo, através da comparação com os corpos de prova de referência.

Como objetivos específicos, o estudo trouxe as seguintes análises:

- a) Comparar as resistências das misturas de concreto com acelerador do tempo de pega e sem o aditivo em função das altas temperaturas;
- b) Analisar o ganho de resistência inicial da mistura com o aditivo;
- c) Analisar a diferença da perda de resistência das misturas, conforme a idade;

Para tal, foi realizada uma pesquisa do tipo experimental comparativa, com a criação

de corpos de prova de concreto e corpos de prova de concreto com aditivo acelerador de tempo de pega “VEDACIT RAPIDÍSSIMO 150”, os quais foram levados ao forno a altas temperaturas, simulando possíveis incêndios, e então submetidos a ensaios de resistência à compressão. Os ensaios foram regidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015) e pela NBR 5739 (ABNT, 2018), respectivamente.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

O concreto é um material constituído por uma mistura de aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Petrucci (1998) destaca que quando recém misturados, devem oferecer condições de plasticidade, a fim de facilitar as operações ao lançamento na fôrma. Os materiais que geralmente compõem o concreto são: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água.

2.2 Cimento Portland

Segundo Petrucci (1998), o cimento Portland resulta da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pelo cozimento até fusão incipiente de mistura de calcário e argila convenientemente dosada e homogeneizada, de tal forma que toda cal se combine com os compostos argilosos, sem que, depois do cozimento, resulte cal livre em quantidade prejudicial. Após a queima, é feita pequena adição de sulfato de cálcio, de modo que o teor deste material não seja superior a 3%, a fim de regularizar o tempo de início das reações do aglomerante com a água.

2.3 Agregados

De acordo com Petrucci (1998), entende-se por agregado, o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia.

Os agregados para concreto são areia, pedregulho e pedra britada, procedentes de jazidas naturais, por isso, designados como agregados naturais. São derivados de rochas de vários tipos, sendo a maioria composta por minerais. Define-se mineral como toda substância inorgânica de ocorrência natural, com composição química mais ou menos definida e usualmente com estrutura cristalina específica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.4 Aditivos

Segundo Petrucci (1998), entende-se por aditivos as substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto, com a finalidade de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), as finalidades para as quais eles geralmente

são empregados no concreto incluem melhora da trabalhabilidade, aceleração ou aumento do tempo de pega, controle do desenvolvimento de resistência, melhora da resistência à ação do gelo e à fissuração térmica.

De acordo com informações extraídas do site fabricante Vedacit¹ (2019), o aditivo VEDACIT RAPIDÍSSIMO é um aditivo composto por sulfatos que aceleram a pega e o endurecimento do concreto, proporcionando altas resistências iniciais e finais, além de possibilitar grande aderência das camadas de concreto projetadas nas superfícies e baixos índices de reflexão.

2.5 Tempo de pega e tempo de cura

Um cimento misturado com certa quantidade de água, de modo a obter uma massa plástica, começa a perder a plasticidade depois de um certo tempo. Esse período que decorre desde a adição de água até o início das reações com os compostos de cimento é chamado tempo de início de pega. Convencionou-se denominar de fim de pega a situação em que a pasta cessa de ser deformável e torna-se um bloco rígido (PETRUCCI, 1998).

Petrucci (1998) comenta que a determinação dos tempos de início e fim de pega é muito importante, pois através deles se tem a ideia do tempo disponível para trabalhar, transportar, lançar e adensar argamassas e concretos, bem como transitar sobre eles ou regá-los para a execução da cura. O autor ressalta ainda que a duração da pega varia na razão inversa do grau de moagem.

Os dois objetivos da cura são impedir a perda precoce de umidade e controlar a temperatura do concreto durante um período suficiente para que este alcance o nível de resistência desejado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a proteção do concreto deve ser feita nos sete primeiros dias contados do lançamento, sendo desejável nos catorze dias seguintes.

2.6 Resistência do concreto

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência de um material é definida como a capacidade que este tem de resistir à tensão sem ruptura, que se dá a partir do processo de hidratação do cimento.

No projeto das estruturas de concreto, como citam Mehta e Monteiro (1994), considera-se o concreto o material mais adequado para resistir à carga de compressão. As resistências à tração e à flexão poderão ser calculadas na ordem de 10 e 15%, respectivamente, da resistência à compressão.

A resistência mecânica é verificada diretamente através de ensaios de corpos de prova cilíndricos, os quais contêm de altura o dobro do diâmetro. Estes corpos de prova podem ser ensaiados axialmente para a determinação da resistência à compressão (PEDRUCCI, 1998).

¹ Google Inc. Disponível em: <http://www.vedacit.com.br/produtos/vedacit-rapidissimo-150>. Acesso em 15 de maio de dois mil e dezenove.

2.7 Durabilidade

De acordo com o comitê 201 do ACI (1991), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade ou capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente.

Em geral, as causas físicas e químicas da deterioração estão entrelaçadas. Deve ser enfatizado, no entanto, que a distinção entre as causas é puramente arbitrária, na prática, as duas frequentemente se sobrepõem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.8 Ação do fogo

Segundo Petrucci (1998), o comportamento do concreto, sob altas temperaturas, é variável, havendo uma importante diminuição de resistência a temperaturas acima de 300°C. A temperatura de 600°C gera uma redução de 50% da resistência mecânica.

O efeito do aumento de temperatura na pasta de cimento hidratada depende do grau de hidratação e da umidade. Os vários tipos de água presentes no concreto (água livre, água nos poros capilares e água adsorvida) são perdidas ao elevar-se a temperatura do concreto, porém esta temperatura não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido removida. Contudo, esta situação pode causar danos ao concreto sob a forma de lascamento superficial (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para que se atingissem os objetivos previamente estabelecidos, foi necessário utilizar métodos investigativos, que possuem a finalidade de gerar os dados necessários à elaboração da pesquisa. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), pode-se definir metodologia como a aplicação de técnicas que devem ser observadas para a elaboração de uma pesquisa.

3.1 Classificação do estudo e local da pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória. Segundo Prodanov e Freitas (2013), neste tipo de pesquisa, as variáveis relacionadas com o objeto de estudo são manipuladas diretamente a fim de serem observados os efeitos que a variável produz no objeto.

A elaboração da pesquisa deu-se nos laboratórios do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, situada no município de Cascavel – Paraná. Os equipamentos que foram utilizados, como prensa para ensaios de compressão, moldes para a confecção dos corpos de prova e forno para o aquecimento, foram disponibilizados juntamente com o laboratório.

3.2 Caracterização da amostra

Neste item foi caracterizada a amostra, desde a escolha dos materiais utilizados até o processo de produção da mistura, a qual foi estudada, a fim de formular de forma didática e evitar erros nos passos a serem seguidos durante a elaboração da pesquisa.

3.2.1 Materiais utilizados

O aglomerante empregado foi o cimento Portland CP II-E-32, atendendo às exigências da NBR 11578 – Cimento Portland Composto (ABNT, 1991).

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural, classificada como areia média. Já o agregado graúdo foi de origem basáltica, com dimensão característica de 19 mm e classificado como brita 01. A composição granulométrica dos agregados foi determinada com base na NBR NM 248 – Agregados: determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Por fim, a água utilizada para a produção do concreto foi a fornecida pela rede de abastecimento da cidade de Cascavel, Paraná.

O aditivo utilizado foi o acelerador de tempo de pega “VEDACIT RAPIDÍSSIMO 150”, seguindo as recomendações disponibilizadas pelo fabricante, o qual proporciona altas resistências iniciais e finais.

3.2.2 Produção de concreto

O traço unitário empregado na pesquisa foi 1:2 :2,5 (cimento, areia e brita) e relação água / aglomerante de 0,55 para se obter uma resistência de 30 MPa, aos vinte e oito dias.

A mistura de concreto foi realizada com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, a qual seguiu a ordem de colocação: 100 % do agregado graúdo, 50 % da água de amassamento, 100 % de cimento, 100 % do agregado miúdo e 50 % da água de amassamento.

Após a colocação de todo material, o concreto foi misturado por aproximadamente cinco minutos. Ao finalizar o processo de mistura, foi realizado o controle da consistência do concreto, conforme determina a NBR NM 67 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998).

A moldagem dos corpos de prova foi realizada após o processo de mistura, seguindo as recomendações da NBR 5738 - Concreto: Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova (ABNT, 2008).

Para a realização do ensaio de compressão simples foram moldados 36 (trinta e seis) corpos de provas cilíndricos, com dimensões de 100 milímetros de diâmetro e 200 milímetros de altura. A compactação foi mecânica, com a utilização de uma haste metálica.

Após a realização da concretagem e adensamento, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório por vinte e quatro horas. Após esse período, foram desmoldados e submetidos à cura em uma câmara úmida com umidade e temperatura

controlada ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$), onde ficaram armazenados até os vinte e oito dias, idade da realização do ensaio de compressão axial.

Os corpos de prova foram divididos em dois grupos. A composição principal da mistura foi a mesma, assim como foram elaboradas e testadas sob iguais condições. Contudo, um dos grupos teve o aditivo acelerador do tempo de pega “VEDACIT RAPIDÍSSIMO 150” em sua composição, na dosagem disponibilizada pelo fabricante. Foi adotada a adição de 10% de aditivo para o volume de concreto.

3.3 Método de ensaio

Para a realização do ensaio de compressão axial foram moldadas 36 amostras, sendo 18 corpos de prova com a adição de produto acelerador do tempo de pega e as demais formadas apenas pela mistura de concreto (cimento, areia, brita e água). Destes, foram separadas 9 amostras para cada subgrupo. O primeiro grupo foi utilizado para referência, com cura em local com umidade e temperatura controladas (sem grande variação) e a resistência final de controle foi utilizada para comparação com as resistências dos corpos de prova que foram aquecidos.

Os corpos de prova, confeccionados para este estudo, foram submetidos ao aquecimento nos fornos com a temperatura previamente configurada de 400°C . Quando a temperatura desejada foi atingida, as amostras foram colocadas no mesmo que permaneceu ligado com temperatura constante por um período de 60 minutos, objetivando homogeneizar a temperatura na superfície das peças e minimizar a influência da forma de aquecimento. Após o período de 60 minutos, o forno foi desligado e aberto até que os corpos de prova resfriassem à temperatura ambiente. Após vinte e quatro horas de resfriamento foram retirados e ensaiados à compressão simples.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme prescrições da NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2007), empregando a prensa computadorizada da marca CONTENCO, modelo I-3058, com capacidade de 100 toneladas.

De acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e dos corpos de provas foram limpos e secos. Os corpos de prova foram cuidadosamente centralizados no prato inferior. O carregamento do ensaio foi aplicado continuamente e sem choques. O ensaio foi finalizado quando houve a ruptura da peça, sendo que a velocidade foi mantida constante em todo o ensaio. A velocidade utilizada nos ensaios foi de aproximadamente $0,5 \text{ MPa/s}$ e apenas a carga de ruptura foi utilizada. A resistência final foi a média aritmética das amostras ensaiadas.

3.4 Análise de dados

Os dados obtidos em laboratório foram comparados segundo a divisão de dois grupos principais: não aquecidos e aquecidos. Ambos foram submetidos a cura em ambiente

com temperatura e umidade controladas até a idade de realização dos ensaios, sendo o segundo grupo submetido à uma temperatura de 400°C, através de aquecimento em forno.

Os subgrupos seguintes levaram em consideração o uso ou não de aditivo. Para o primeiro utilizou-se apenas a mistura de concreto (cimento, areia, brita e água). Contudo no segundo, adicionou-se o VEDACIT RAPIDÍSSIMO, na proporção de 10% como indicado no manual do produto. Neste trabalho foi analisado a capacidade do aditivo de reduzir o tempo de pega e proporcionar maior resistência do concreto em idades iniciais.

Os ensaios aconteceram após 7, 14 e 28 dias após a confecção dos corpos de prova. Em cada idade foram testados à compressão simples 12 amostras, das quais: 3 amostras de mistura simples de concreto não aquecidas, 3 amostras de mistura simples de concreto aquecidas, 3 amostras de mistura de concreto com aditivo não aquecidas e por fim, 3 amostras de mistura de concreto com aditivo aquecidas.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O concreto resiste consideravelmente bem a altas temperaturas, muitas vezes é utilizado para proteger outras estruturas do fogo. Depois de aquecidos, os principais problemas previstos são o descolamento e fissuras. Contudo, apesar da perda de água dos corpos de prova, neste estudo o concreto não apresentou essas características citadas na teoria, pois a temperatura necessária para isto é ainda maior que a utilizada em projeto.

Para melhor entendimento dos resultados, os mesmos foram separados em duas tabelas, conforme divisão dos grupos citados no capítulo 3. A tabela 01 apresenta os resultados dos testes de compressão simples dos corpos de prova referência, os quais não foram aquecidos. Já na tabela 02, é possível observar os resultados dos testes de compressão simples para os corpos de prova que foram ao forno à temperatura de 400°C.

CP	RESISTÊNCIA (MPa) 7 dias	RESISTÊNCIA (MPa) 14 dias	RESISTÊNCIA (MPa) 28 dias	
S/ aditivo	1	16,1	17,1	24,7
	2	15,4	22	25,1
	3	18,2	19,3	24,4
	Média	16,57	19,47	24,73
C/ aditivo	1	18,2	24,9	26,9
	2	21,5	24,9	26,8
	3	20,7	22,1	27,6
	Média	20,13	23,97	27,10

Tabela 01: Resultados de testes de compressão simples para os corpos de prova não aquecidos.

Fonte: Autor, 2019.

CP	RESISTÊNCIA (MPa) 7 dias 400C	RESISTÊNCIA (MPa) 14 dias 400C	RESISTÊNCIA (MPa) 28 dias 400C	
S/ aditivo	1	14,1	15	19,9
	2	15,4	15,7	15,9
	3	14,3	17,4	19
	Média	14,60	16,03	18,27
C/ aditivo	1	18,4	22,2	24,5
	2	16,5	18	25,4
	3	17,5	21,8	25,8
	Média	17,47	20,67	25,23

Tabela 02: Resultados dos testes de compressão simples para corpos de prova aquecidos.

Fonte: Autor, 2019.

Nota-se, comparando as tabelas, uma diferença significativa na resistência do concreto. Em relação ao uso do aditivo, o concreto obteve resultados 8,74% superiores ao concreto de referência nas idades finas. Assim como se encontrou uma notável perda de resistência em relação ao aumento de temperatura. Segundo Petrucci (1998), o comportamento do concreto, sob altas temperaturas é variável, havendo uma importante diminuição de resistência a temperaturas acima de 300°C. Neste estudo, vemos que quando o concreto foi elevado a 400°C a resistência teve uma queda de 6,90% para os corpos de prova com aditivo e 26,12% para os sem.

Há também ganhos expressivos de resistência com o aumento da idade do concreto em todos os casos, como pode-se verificar no gráfico 01. Neste, é analisado a relação dos resultados dos testes de compressão simples pela divisão dos grupos e subgrupos. Obteve-se uma notável diferença com o uso do aditivo.

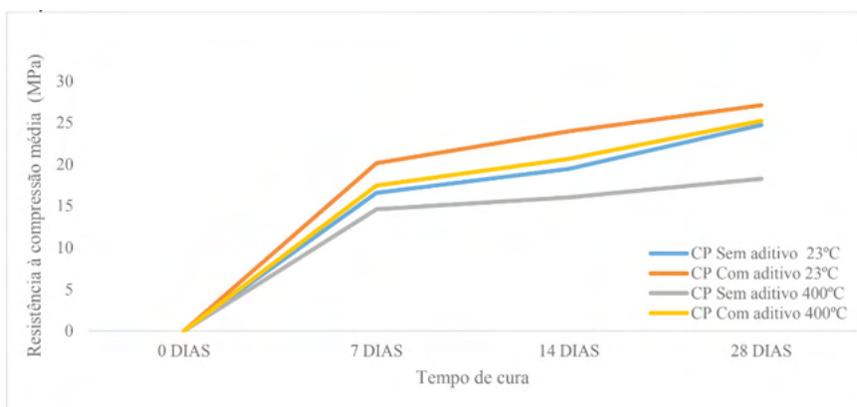


Figura 01: Comparação dos resultados dos ensaios de compressão simples em função do tempo.

Fonte: Autor, 2019.

De modo geral, os corpos de prova com aditivo (aquecidos ou não), ficaram acima dos demais, mesmo os que não foram levados ao forno. Com 7 dias de cura o concreto com Vedacit não aquecido, atingiu 20,13 MPa, ficando 17,68% acima do concreto sem o aditivo. Conforme a idade foi progredindo, a diferença das resistências dos corpos de prova não aquecidos foi afunilando.

Em contrapartida, quando analisamos os corpos de prova aquecidos, conforme a idade avança as curvas vão se distanciando e a maior diferença alcança os 8,33 Mpa, girando em torno de 32,58%, na comparação entre o concreto com aditivo não aquecido e o concreto sem aditivo aquecido.

Ainda para a análise do gráfico 1, é importante frisar que o concreto com Vedacit aquecido perdeu 6,90% de sua resistência se aproximando dos resultados do concreto não aquecido sem o aditivo. Entende-se assim que o concreto com aditivo quando perde sua resistência através do aquecimento proporciona resultados aproximados a máxima do concreto sem aditivo (quando não é aquecido), contudo nesta análise o concreto com o complemento ainda se mostra superior, em torno de 1,98%.

Outro fator importante é a comparação da perda de resistência, como apresentado no gráfico 02, em que se compara em porcentagem a perda de resistência dos corpos de prova com aditivo e referência em função da idade do concreto.

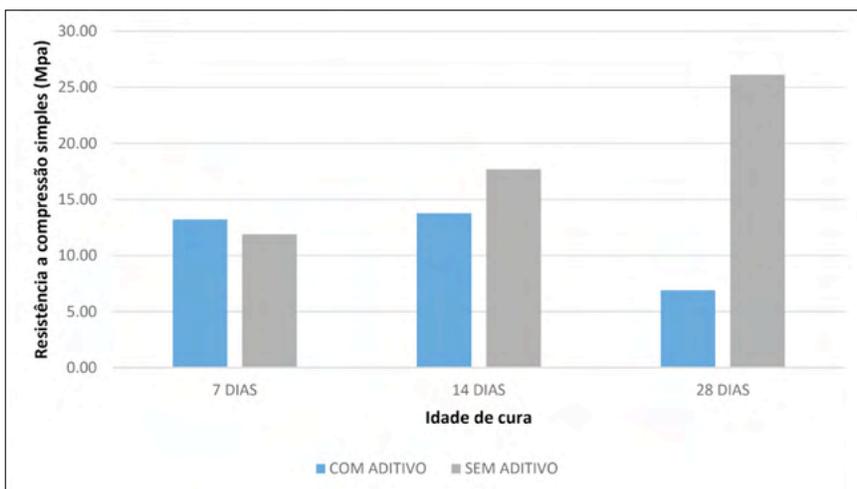


Figura 02: Comparação em porcentagem da perda de resistência.

Fonte: Autor, 2019.

Conforme resultados do gráfico 02, os corpos de prova com aditivo, que foram aquecidos aos 7 dias, apresentaram uma perda de resistência de 13,21% em relação aos que não foram aquecidos. Já os corpos de prova de referência apresentaram apenas 11,89% de perda de resistência quando elevados a altas temperaturas.

Quando analisados aos 14 dias de cura, o concreto com aditivo que foi levado ao forno apresenta uma queda na resistência comparável aos 7 dias, neste caso de 13,77%. Já os corpos de prova de referência tenderam a aumentar esta perda para 17,67%.

No que se refere à cura completa (28 dias), a perda de resistência foi a menor relatada para os corpos de prova com aditivo, somente 6,90% foi perdida com o aquecimento. Contudo para o concreto de referência notou-se a maior diferença: 26,12% de perda.

O aditivo, utilizado na proporção de 10% do peso da pasta de concreto, proporcionou ótimas resistências iniciais. Na primeira semana, para os corpos de prova não aquecidos, verificou-se um aumento na resistência de 3,56 MPa com o uso de VEDACIT (cerca de 17%). Já para os corpos aquecidos constatou-se um aumento de 2,87 MPa (16,42%), na primeira semana.

E mesmo com a cura completa o grupo com o VEDACIT, teve resistência superior ao outro grupo, atingindo em seu ápice 27,10 MPa, quando não aquecido e 25,23 MPa quando aquecido. Comparando com 24,73 MPa (não aquecido) do outro grupo e 18,27 MPa (aquecido).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa avaliou a influência de um aditivo acelerador do tempo de pega e também a influência de altas temperaturas sobre essa mistura. Utilizou-se o aditivo VEDACIT RAPIDÍSSIMO na proporção de 10% da mistura. Os resultados encontrados foram:

- a) Os corpos de prova com aditivo (aquecidos ou não), ficaram acima dos demais, mesmo os que não foram levados ao forno. Sendo importante frisar que o concreto com VEDACIT aquecido quando perdeu resistência se aproximou dos resultados do concreto não aquecido sem o aditivo.
- b) Com 7 dias de cura o concreto com VEDACIT não aquecido, atingiu 20,13 MPa, ficando 17,68% acima do concreto sem o aditivo. Conforme a idade foi progredindo, a diferença das resistências dos corpos de prova foi afunilando.
- c) O concreto com aditivo se mostrou com resistência maior durante todo o período, e mesmo com a cura completa teve acréscimo de 8,74% no concreto de referência e 27,59% no concreto aquecido.
- d) A comparação da perda de resistência com ou sem o aditivo se mostrou mais significativa nas idades finais da cura do concreto. Sendo que o uso do aditivo garantiu uma redução considerável nesta perda aos 28 dias de idade, principalmente comparado com os resultados do concreto sem o uso do aditivo.

REFERÊNCIAS

ACI. **Manual of concrete practice**. Detrid, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. 2015.

_____. **NBR 5738: Concreto– Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. 2015.

_____. **NBR 5738: Concreto– Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. 2008.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. 2007.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. 2003.

_____. **NBR NM 67: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 1998.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland Composto**. 1991.

COSTA, Felipe Lima; SANTOS, Iago Lopes dos; SILVESTRO, Laura. **Influência do uso de aditivo acelerador de resistência baseado em nitrato de cálcio no desempenho de argamassas de cimento Portland com adição de cinza volante**. Revista matéria, 2018.

COUTINHO, Arlindo de Sousa. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, José Melaragno. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

PETRUCCI, Eladio. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, 1998.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico**. 2. Ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

XIAO, Jianzhuang; KÖNIGB, Gert. **Study on Concrete at High Temperature in China: an overview**. 2014.

CAPÍTULO 2

RECURSOS MINERAIS E A BUSCA DE UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: GERAÇÃO TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL

Data de aceite: 01/06/2022

Rafaela Baldi Fernandes

Eduarda Carvalho de Almeida

RESUMO: Nos últimos anos, as discussões sobre energia têm sido pautadas pela transição energética e por questões econômicas associadas a baixos teores de carbono. A COP21, realizada em dezembro de 2015 em Paris, reuniu mais de 100 países com o compromisso de firmar um novo acordo global para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, visando a redução do aquecimento global. O principal instrumento para alcançar este objetivo é via transição energética, ou seja, por meio de modificações estruturais, a longo prazo, no sistema energético dos países, migrando de um modelo majoritariamente baseado em combustíveis fósseis para uma matriz cada vez mais focada na geração de energia por fontes renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Minerais, Termelétrica, energia.

ABSTRACT: In recent years, discussions on energy have been guided by energy transition and economic issues associated with low carbon content. COP21, in December 2015 in Paris, brought together more than 100 countries with a commitment to sign a new global agreement to reduce greenhouse gas emissions to reduce global warming. The main instrument for

achieving this goal is through energy transition, that is, through structural changes in the long term in the energy system of countries, migrating from a model mainly based on fossil fuels to a matrix increasingly focused on the generation of energy from renewable sources.

KEYWORDS: Minerals, Thermoelectric, Energy.

Nos últimos anos, as discussões sobre energia têm sido pautadas pela transição energética e por questões econômicas associadas a baixos teores de carbono. A COP21¹, realizada em dezembro de 2015 em Paris, reuniu mais de 100 países com o compromisso de firmar um novo acordo global para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, visando a redução do aquecimento global.

O principal instrumento para alcançar este objetivo é via transição energética, ou seja, por meio de modificações estruturais, a longo prazo, no sistema energético dos países, migrando de um modelo majoritariamente baseado em combustíveis fósseis para uma matriz cada vez mais focada na geração de energia por fontes renováveis. Como combustíveis fósseis tem-se o petróleo, carvão mineral e gás natural e, como fontes renováveis, tem-se a geração de energia solar fotovoltaica, eólica, geotermal ou de biomassa.

Nesse cenário, surgem novos termos que,

¹ 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

constantemente são apresentados como sinônimos mas que apresentam certas distinções. “*Green energy*” são formas de geração de energia provenientes de fontes naturais, como a água, por exemplo. Energia limpa (*Clean energy*) são tipos que dispersam poucos poluentes no ar, ao passo de que energia renovável (*Renewable energy*) é proveniente de fontes que são constantemente reabastecidas, como energia elétrica, eólica ou solar. Os termos “*renewable energy*” and “*green energy*” são, na maioria, associados a um mesmo cenário, mas ainda é necessário muito debate sobre o tema. Por exemplo, uma barragem hidrelétrica, onde desvia-se cursos d’água e há grande impactar no meio ambiente, pode realmente ser chamada de “verde?”

No extremo oposto, do que se pode dizer, literalmente, “*black energy*”, tem-se o petróleo, utilizado como matéria-prima para uma variedade de produtos, que vão, desde combustíveis, até industrializados, como plásticos e alguns tecidos. É uma base da economia produtiva mundial, com altos índices poluentes, mas de grande importância geopolítica, sendo as maiores reservas mundiais situadas no Oriente Médio, com cerca de 2/3 da totalidade. Existem muitas teorias sobre a origem do petróleo, entretanto, a mais aceita atualmente é sua origem orgânica, ou seja, formado a partir da decomposição de matéria orgânica acumulada em rochas sedimentares, como restos de animais e vegetais depositados no fundo de lagos e mares, ao longo do tempo geológico. O petróleo constitui uma mistura de hidrocarbonetos (moléculas de carbono e hidrogênio) que se encontram em estado líquido, quando em temperatura e pressão ambientes. É constituído, também, por compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, resinas, asfaltenos e metálicos como ferro, cobre e zinco. De uma forma genérica, apresenta em sua composição cerca de 82% de carbono, 12% de hidrogênio, 4% de nitrogênio, 1% de oxigênio, 0,5% de sais e 0,5% de metais.

O Brasil produz mais petróleo bruto do que a sua demanda interna. Em janeiro de 2020, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o país produziu média de 3,032 milhões de barris diários, sendo que no acumulado de janeiro, a produção brasileira somou 94 milhões de barris. Segundo a AIE, o Brasil terminou o ano de 2021 como sétimo maior produtor de petróleo do mundo, com média próxima de 3 milhões de barris diários. O ranking é liderado pelos Estados Unidos, com cerca de 16,6 milhões de barris diários, seguido por Rússia, Arábia Saudita, Canadá, China e Iraque. O Brasil é o maior produtor da América Latina, à frente do México e Venezuela, tradicionais produtores da região, em decorrência das extrações do pré-sal. Todavia, cerca de 70% da produção brasileira é de petróleo mais pesado e a estrutura de refino não é totalmente adequada para o processamento desse tipo de petróleo. Sendo assim, ainda é necessário importar petróleos leves, de modo a aumentar a produção de derivados leves e médios, tais como gás de cozinha, gasolina, nafta petroquímica e óleo diesel. O excedente de petróleo pesado brasileiro é exportado.

É inegável que a transformação energética e o avanço do processo de

descarbonização irá ampliar a demanda por metais, como por exemplo, cobre e níquel, à medida em que seja requerido novos dispositivos para a geração de energia por fontes renováveis, limpas ou “verdes”. Nessa caso, não necessariamente, significa menor uso dos minerais. A expectativa de implantação dessas fontes energéticas mais sustentáveis deve-se, majoritariamente, ao caráter ambiental, uma vez que reduzem os efeitos negativos associados ao uso de combustíveis fósseis, tornando-se uma solução, ecologicamente, mais sustentável. Mas, as questões associadas a ampliação de insumos e matérias-primas para o desenvolvimento destas soluções, não pode ser negligenciada.

Nessa situação oportuna, o gás natural, embora seja de origem fóssil, possui menor emissão de CO_2 quando comparado com outros combustíveis da mesma categoria, principalmente o petróleo. O gás natural emite cerca de 20 a 30% menos CO_2 , quando comparado com o óleo combustível, e 40-50% menos do que combustíveis sólidos como o carvão. Com estes números atrativos, se revela como uma alternativa intermediária de curto/médio prazo na transição energética, fazendo um balanço da emissão de poluentes a medida que oferece maior estabilidade e segurança de suprimento de energia.

O GÁS NATURAL

O gás natural é um combustível fóssil mais limpo e eficiente, sendo basicamente a mistura de hidrocarbonetos leves no estado gasoso nas condições ambiente de temperatura e pressão. O principal componente é o metano (CH_4), mas também apresenta proporções variáveis de outros hidrocarbonetos gasosos mais pesados, tais como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) e butanos (C_4H_{10}). Além desses hidrocarbonetos, o gás natural também pode conter dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), água (H_2O), oxigênio e metais pesados. Sua composição pode variar bastante em função dos fatores naturais que determinaram o seu processo de formação e das condições de acumulação do seu reservatório de origem.

Quando ocorre associado a reservatórios convencionais, ou seja, em estruturas geológicas ou condições estratigráficas tipicamente limitadas por um contato inferior com um aquífero com condições mínimas de porosidade e permeabilidade, podem ser produzidos o gás associado e, também, gás não-associado (Figura 1). Ao mesmo tempo, o gás natural também pode estar relacionado a reservatórios não convencionais e, neste caso, as acumulações de hidrocarbonetos podem estar difundidas através de grandes áreas e, não necessariamente, associadas à existência de uma estrutura geológica ou condição estratigráfica. Esses tipos de reservatórios demandam tecnologias especiais para a extração do recurso mineral.

Independentemente do tipo de reservatório, o gás natural vem ganhando destaque com uma participação expressiva na matriz energética brasileira, além de configurar uma perspectiva ascendente da sua participação na matriz energética mundial, ao contrário dos

outros combustíveis fósseis (Figura 2). Nesse contexto, a geração termelétrica a gás natural é uma alternativa para complementar a geração das fontes renováveis intermitentes, como a eólica e a solar, com um importante papel no planejamento da transição energética de longo prazo.

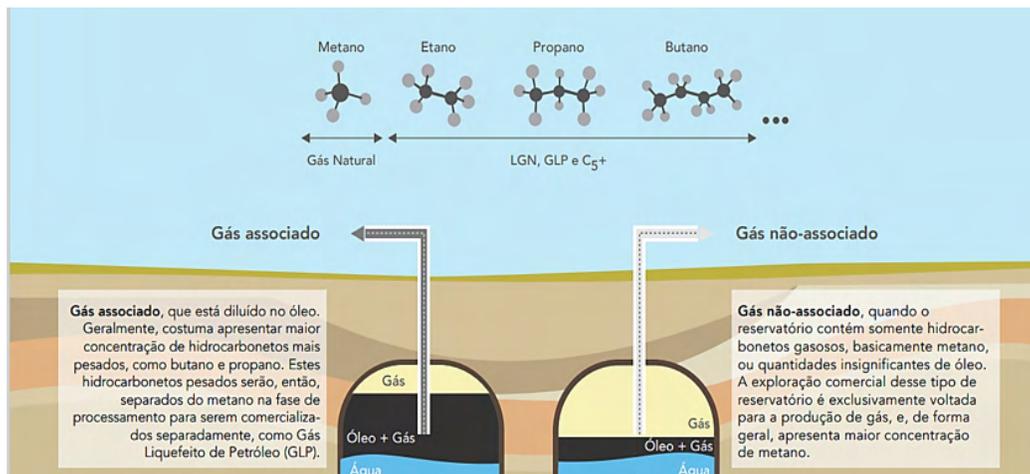


Figura 1 – Como o gás natural pode ser encontrado na natureza.

Fonte: FGV, 2014

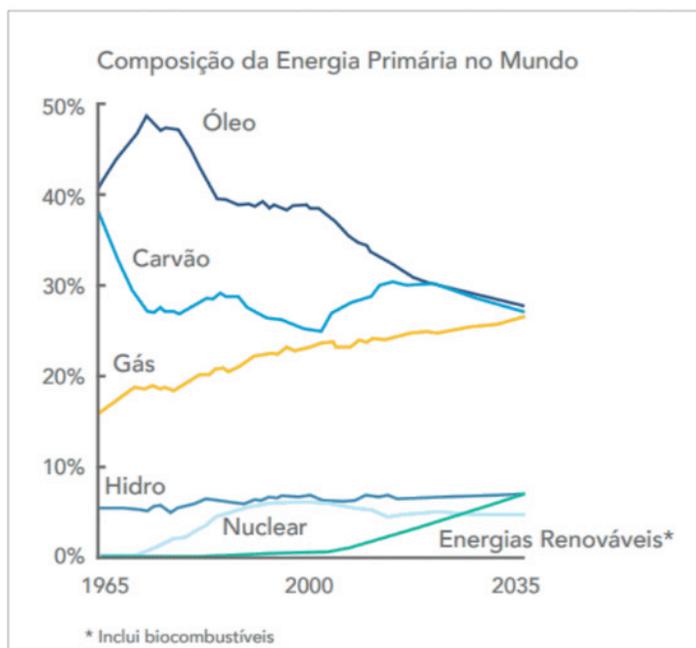


Figura 2 – Composição da energia primária no mundo, destaque para a ascensão do gás natural.

Fonte: FGV, 2014

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL

Uma termelétrica é uma unidade industrial onde há a geração termelétrica, ou seja, conversão de energia térmica em energia mecânica e, em seguida, a conversão desta em energia elétrica. O gás natural é um combustível com alta eficiência térmica e sua queima resulta na energia térmica que alimenta essa unidade. As tecnologias de geração termelétrica a gás natural podem ser divididas em *i)* usinas de ciclo simples; *ii)* usinas de ciclo combinado e *iii)* usinas de cogeração, como será visto a seguir.

i) Usinas de ciclo simples

Essa usina utiliza a combustão interna para a geração de energia elétrica, sendo que a mistura de ar comprimido com o gás no sistema de combustão resulta em gases com alta temperatura, que acionam o compressor e a turbina para gerar a energia elétrica (Figura 3).

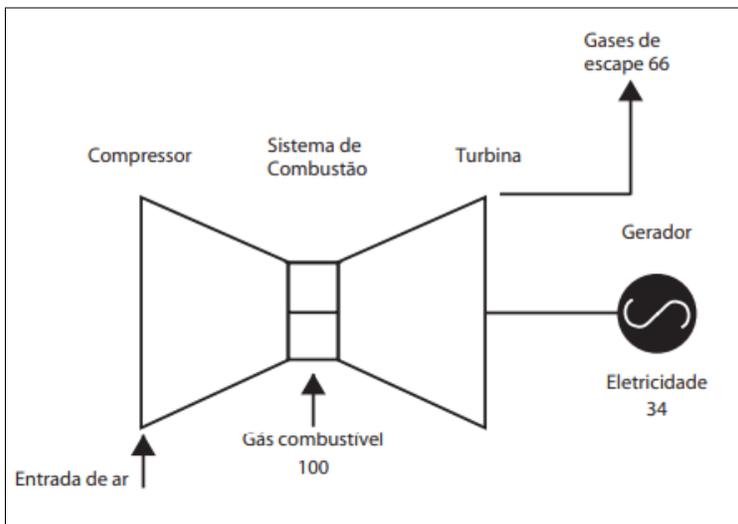


Figura 3 - Fluxograma de uma turbina a gás ciclo simples.

Fonte: MME, 2007

ii) Usinas de ciclo combinado

Uma usina de ciclo combinado consiste na acoplagem de sistemas térmicos a vapor e a gás, na qual a energia térmica contida na descarga, sob altas temperatura dos gases na turbina a gás, é utilizada para a geração de vapor. Nesse sistema ocorre a mistura de ar comprimido com o gás no sistema de combustão e, em seguida, os gases se expandem e acionam a turbina a gás gerando parte da energia elétrica do ciclo. Os gases vão em direção a caldeira de recuperação (HRSG) gerando vapor para mover a turbina subsequente, que é condensado e reconduzido à caldeira de recuperação (Figura 4).

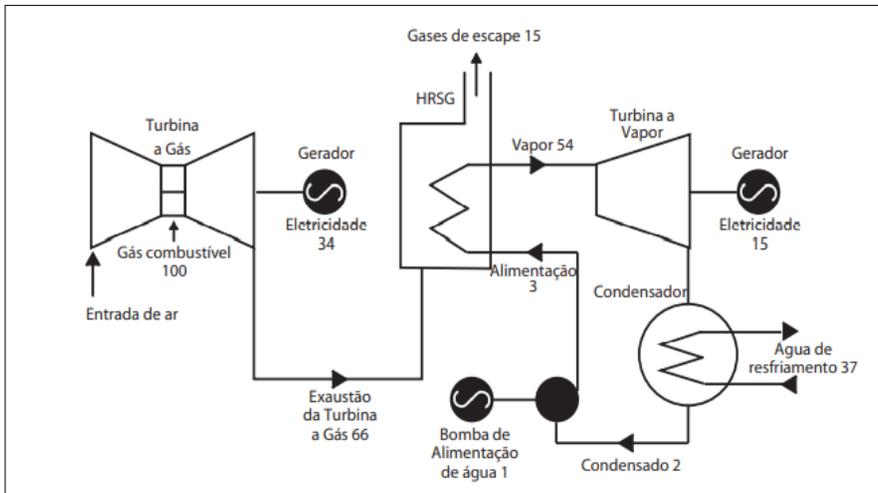


Figura 4 - Fluxograma de uma termelétrica ciclo combinado.

Fonte: MME, 2007

iii) Usinas de cogeração

Esse tipo de usina é caracterizado pela produção combinada de energia eletromecânica e calor, ocorrendo a produção combinada de calor útil e energia mecânica, sendo composta por duas configurações dos sistemas de cogeração. No *Topping* o gás é, primeiramente, queimado em uma máquina térmica produzindo energia mecânica ou elétrica, sendo o calor rejeitado e utilizado para outros processos, como por exemplo, refrigeração (Figura 5A). No *Bottoming*, essa energia térmica rejeitada, através de gases de exaustão, é aproveitada em caldeiras recuperadoras para gerar vapores que podem ser utilizados para gerar energia mecânica (Figura 5B).

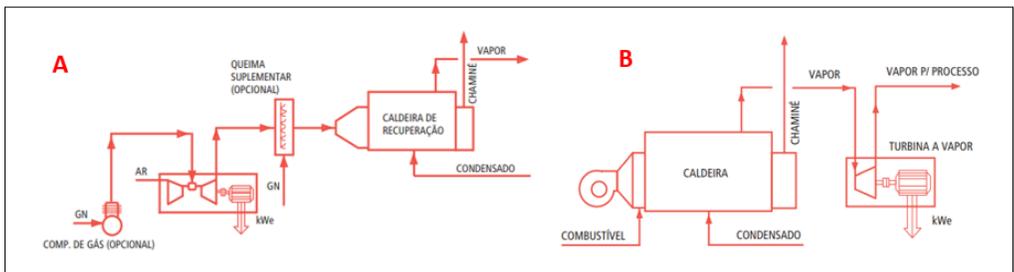


Figura 5 – configuração dos sistemas de cogeração: A) *Topping* e B) *Bottoming*.

Fonte: MME, 2007

PANORAMA BRASILEIRO

Em 2021 haviam 38 usinas termelétricas (UTES) a gás natural, em operação, no Brasil, distribuídas em todas as regiões, com concentração predominante no sudeste e nordeste (Tabela 1), totalizando, aproximadamente, 14 mil MW de potência. A relação espacial das principais usinas termelétricas por região, existentes e planejadas, pode ser visualizada na Figura 6, em valores atualizados para o ano de 2021. Essas usinas apresentam-se estratégicas para o mercado energético nacional, principalmente em momentos de seca e baixo nível dos reservatórios, quando ocorreu uma redução na capacidade de geração pelas usinas hidrelétricas.

Gradualmente as termelétricas movidas a gás natural vem se consolidando no panorama energético brasileiro. O primeiro leilão de Reserva de Capacidade², ocorreu em 2021, sendo as termelétricas a gás natural as mais contratadas, com nove projetos, totalizando 3.499 MW (EPE, 2021).

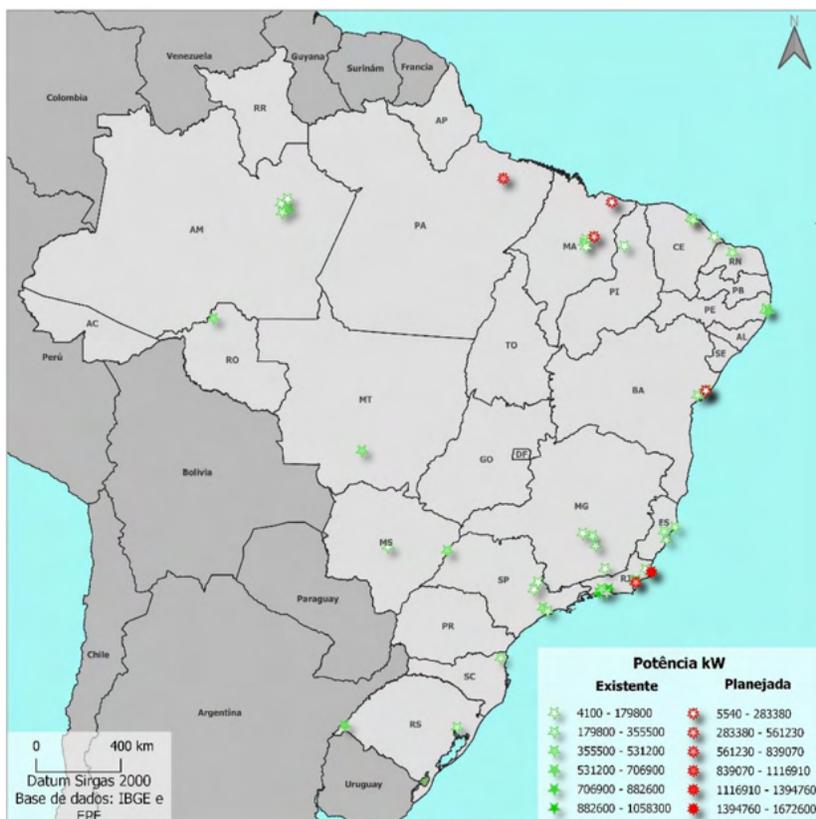


Figura 6 – Mapa com as principais termelétricas a gás natural

² Leilão para Contratação de Potência Elétrica e de Energia Associada, denominado “Leilão de Reserva de Capacidade, de 2021” realizado pelo Ministério de Minas e Energia para contratação de energia e potência a serem entregues ao sistema em 2026 e 2027.

UTES em operação					
Usina	Tipo de Térmica	Combustível	Potência (MW)	Consumo Específico (mil m ³ /d/MW)	UF
Aureliano Chaves (Ex-Ibirité)	cc	GN	226	4,38	MG
Seropédica (Antiga Barbosa Lima Sobrinho)	ca	GN/OD	379	5,86	RJ
Cuiabá (Antiga Mario Covas)	cc	GN/OD	529	4,57	MT
Euzébio Rocha (Ex-Cubatão)	cc	GN	250	5,28	SP
Nova Piratininga (Antiga Fernando Gasparian)	cc	GN	565	5,02	SP
Termorio (Antiga Gov. Leonel Brizola)	ccv	GN	1.058	4,89	RJ
Juiz de Fora	ca	GN/ET	87	5,98	MG
Luiz O. R. de Melo (Ex-Linhares)	ca	GN	204	5,66	ES
Três Lagoas (Antiga Luiz Carlos Prestes) ⁽¹⁾	ca	GN	385	7,46	MS
Santa Cruz	cc	GN	200	4,26	RJ
Termomacae (Antiga Mário Lago)	ca	GN	923	5,86	RJ
William Arjona	ca	GN/OD	206	7,34	MS
Baixada Fluminense	cc	GN	530	-	RJ
Norte Fluminense - (1 a 4)	cc	GN	869	4,74	RJ
TOTAL Sudeste/Centro-Oeste	-	-	6.411	-	-
Canoas (Antiga Sepé Tiaraju)	cc	GN/OC	249	4,25	RS
Uruguiana ⁽²⁾	cc	GN/OD	640	4,37	RS
Araucária	cc	GN	484	4,57	PR
TOTAL Sul	-	-	1.373	-	-
Camaçari	ca	GN/OD	347	7,77	BA
Termobahia (Antiga Celso Furtado)	cav	GN	186	7,40	BA
Vale do Açu (Antiga Jesus Soares Pereira)	cav	GN	368	6,43	RN
Termo Ceará	ca	GN/OD	242	6,56	CE
Termofortaleza	cc	GN	347	4,78	CE
Termopernambuco	cc	GN	533	4,02	PE
Prosperidade I	ca	GN	28	n/d	BA
Porto Sergipe I	cc	GN	1.551	n/d	SE
TOTAL Nordeste	-	-	3.601	-	-
Maranhão III ⁽³⁾	cc	GN	519	3,85	MA
Maranhão IV ⁽⁴⁾	ca	GN	338	5,91	MA
Maranhão V ⁽⁴⁾	ca	GN	338	5,91	MA
MC2 Nova Venécia	ca	GN	176	5,91	MA
Bloco Mauá III	ca	GN/OC	120	n/d	AM
Aparecida	ca	GN/OC	166	n/d	AM
Cristiano Rocha	Motor	GN/OC	85	n/d	AM
Manauara	Motor	GN/OC	85	n/d	AM
UTE Parnaíba IV			56		MA
Jaraquí	Motor	GN/OC	75	n/d	AM
Tambaqui	Motor	GN/OC	75	n/d	AM
Mauá III	cc	GN	591	4,44	AM
Ponta Negra			66		AM
TOTAL Norte Interligado	-	-	2.692	-	-
TOTAL GERAL	-	-	14.076	-	-

LEGENDA:

ca - Turbina em Ciclo Aberto
cav - Turbina em Ciclo Aberto com produção de vapor
cc - Turbina em Ciclo Combinado
ccv - Turbina em Ciclo Combinado com produção de vapor
Motor - Motor a gás natural

GN - Gás natural
OC - Óleo Combustível
OD - Óleo Diesel
ET - Band

Tabela 1- Usinas Termelétricas a Gás por Região.

Fonte: MME, 2022

REFERÊNCIAS

EPE (2021). Empresa de Pesquisa Energética (site). MME publica as diretrizes para o Leilão de Reserva de Capacidade, de 2021. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-publica-as-diretrizes-para-o-leilao-de-reserva-de-capacidade-de-2021>>. Acesso em: 23 de **abril** de 2022.

FGV (2014). Fundação Getúlio Vargas. **Cadernos FGV Energia: Gás Natural**. FGV: Rio de Janeiro, 2014 80p.

MME (2007). Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética: Brasília: 2007, 166p.

MME (2022). Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Acompanhamento de Gás Natural**. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Departamento de Gás Natural, nº 178, 19p. Disponível em:<<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/12-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-dezembro-de-2021.pdf/view>>. Acesso em: 23 de **abril** de 2022.

A SIMPLIFIED ANALYTICAL-NUMERICAL STRUCTURAL ANALYSIS OF THE DOME OF THE ROMAN PANTHEON

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 13/04/2022

Fillipe Marinho Faria

University of Brasilia (UnB), Postgraduate
Program in Structures and Civil Construction
(PECC)
Brasilia (DF)
<http://lattes.cnpq.br/9089685420678338>

Davidson de Oliveira França Júnior

University of Brasilia (UnB), Postgraduate
Program in Structures and Civil Construction
(PECC)
Brasilia (DF)
<https://orcid.org/0000-0001-8822-7178>

Lineu José Pedroso

University of Brasilia (UnB), Postgraduate
Program in Structures and Civil Construction
(PECC)
Brasilia (DF)
<https://orcid.org/0000-0002-2734-3260>

ABSTRACT: The interest in the recovery and maintenance of historical heritage requires mastery of the structural behavior of old buildings. The historical curiosity of contemporary scholars in the builders of the past, and in the construction methods adopted in ancient times, has currently sparked the development of knowledge, tools and innovative theoretical approaches, which allow the understanding of monumental works of architectural and historical interest, which has resisted time, as is the case with the Roman

Pantheon. In order to understand how these monuments were built, it is necessary to understand their structural response (displacements, efforts, tensions, etc.), which is characterized by a complex problem. Current computational tools provide more realistic approaches, which in turn also provide the opportunity for robust testing of more consistent analytical theories, which allow in a simplified way to investigate the behavior of these structures, aiming to shed light on the understanding of this “art of construction”. Thus, in this work, the static structural response of the hemispherical dome of the Roman Pantheon with simplified geometry is investigated. A progressive analytical methodology through the membrane and bending theory of spherical shells, as well as the finite element method (FEM) using the SAP2000 software are used and compared to model the problem. The results obtained have a good correlation with each other, which corroborates with the methodology used. In addition, with the analysis of the membrane and bending efforts of the hemispherical dome, it was possible to discuss and relate them to the structural and architectural conception adopted at the time, and also to discuss the subtleties that different kind of supports can make in the stresses of shell structures.

KEYWORDS: Roman Pantheon, domes, membrane theory, bending theory, finite element method.

RESUMO: O interesse pela recuperação e manutenção do patrimônio histórico exige o domínio do comportamento estrutural dos edifícios antigos. A curiosidade histórica dos

estudiosos contemporâneos pelos construtores do passado e pelos métodos construtivos adotados na antiguidade têm impulsionado atualmente o desenvolvimento de conhecimentos, ferramentas e abordagens teóricas inovadoras, que permitem a compreensão de obras monumentais de interesse arquitetônico e histórico, que resistiu ao tempo, como é o caso do Panteão Romano. Para entender como esses monumentos foram construídos, é necessário entender sua resposta estrutural (deslocamentos, esforços, tensões, etc.), que se caracteriza por um problema complexo. As ferramentas computacionais atuais fornecem abordagens mais realistas, que por sua vez também oferecem a oportunidade de testes robustos de teorias analíticas mais consistentes, que permitem, de forma simplificada, investigar o comportamento de tais estruturas, visando esclarecer o entendimento dessa “arte de construção”. Assim, neste trabalho, investiga-se a resposta estrutural estática da cúpula hemisférica do Panteão Romano com geometria simplificada. Uma metodologia analítica progressiva através das teorias de membrana e de flexão de cascas esféricas, bem como o método dos elementos finitos (MEF) utilizando o software SAP2000, são utilizados e comparados para modelar o problema. Os resultados obtidos apresentam boa correlação entre si, o que corrobora com a metodologia utilizada. Além disso, com a análise de membrana e esforços de flexão da cúpula semiesférica, foi possível discuti-los e relacioná-los com a concepção estrutural e arquitetônica adotada na época, e também discutir as sutilezas que diferentes tipos de apoios podem fazer com as tensões em estruturas de casca.

PALAVRAS-CHAVE: Panteão romano, cúpulas, teoria de membrana, teoria flexional, método dos elementos finitos.

1 | INTRODUCTION

Due to its very long age and unlike some other famous buildings, there is relatively little to say that is absolutely certain about the Pantheon; its structure, design and intentions are still posing enigmas. The name Pantheon (Fig. 1), in latin *Pantheum*, probably comes from the ancient Greek *Pantheon* (Πάνθειον), a term that conveyed different meanings, mainly the idea of “a temple of all the gods”, according to Marder and Jones (2015). Although, for these authors, we cannot be absolutely sure that it was a pagan temple, we know that, as shown in MacDonald (1976), about the year 609 the Byzantine emperor Phocas in Constantinople gave permission for the Pope Boniface IV to consecrate it as a Church, Sancta Maria ad Martyres. But before that, says the author, where the Pantheon stands, in the formerly grand *Campus Martius* district (a public area of about 2 km²), there had been another construction – a rectangular sanctuary. From Marder and Jones (2015), this construction was completed in either 27 or 25 BC, build by Agrippa, a consul, general and statesman who served under Augustus, as we see from the inscription below the pediment that still stands in the Pantheon: “M · AGRIPPA · L · F · COS · TERTIVM · FECIT” (Marcus Agrippa, son of Lucius, thrice consul). This building was damaged by fire in AD 80 (restored by the emperor Domitian), burned again in AD 110 by a lightning and rebuild in its present form in around AD 125-8 during the reign of Hadrian. The beginning of the construction is not precise; it was previously thought to be in the time of Hadrian, but a new interpretation

says it was in the reign of Trajan.

It is not by chance that the Pantheon was erected in one of the periods of greatest prosperity in ancient Rome, providing a visual reminder of the greatness that was its empire. It is almost certain, according to Addis (2009), that Apollodorus of Damascus played an important part in its realization, as he was the author of great projects in Rome and one of the great builders of the time, first as a military engineer and later as chief engineer of public works (*praefectus fabrum*).



Figure 1 – Roman Pantheon: (a) The outside (b) The dome and its *oculus* inside

Source – Faria (2019)

The Pantheon is divided into 3 main parts: the entrance portico with its 16 Corinthian columns, entablature with the inscription of Agrippa, triangular pediment, intermediate block and bronze door; the cylindrical *rotunda*; and the semicircular dome with an *oculus*.

The greatness of the Roman Empire can be briefly glimpsed by analyzing the stones of the Pantheon columns, as seen in Marder and Jones (2015): near-white marble from the quarries on Mont Pentelicon near Athens and granite from Egypt; the rose granite from Aswan and the gray granite from Mons Claudianus (between the Red Sea and the Nile). Also, that was a great time of innovation in the use of concrete technology that the Pantheon exemplified.

However, the most important structural part of the Pantheon that makes its building so famous is its dome with 43.30 m in diameter, the largest dome in the world for at least 13 centuries and still today the largest dome in unreinforced concrete in the world.

According to Salvadori (1980), a dome can be idealized as a perfect hemisphere of a small thickness in relation to its span. A dome must carry its own weight and the weight of the live load to be channeled to the ground, and a dome does this along its curved vertical lines or *meridians*, which become more and more compressed as they get closer to the dome's support. The continuity of the dome's surface introduces an action along its

horizontal sections or *parallels* that prevents the meridians from opening up.

Salvadori (1980) also says that the dome can be thought of as a series of identical arches set around a circular base and meeting at their top, where they have a common keystone. The continuity of the dome's surface is what allows its thickness to be relatively small, as it introduces, along the parallels, an action that prevents the meridians from opening up. The dome tends to come down at the top and to open at the bottom.

In the upper part of the dome, continues Salvadori (1980), the parallels are compressed because they resist inward motions, while in the lower part they are tensed in resisting outwards motions. In domes, the deformations that occur are very small, as the alterations caused by compression or traction are minute when compared to those caused by bending. The tendency of the upper dome parallels is to shrink under load; the tendency of the lower ones is to elongate. But at some point, you need a parallel that neither shrinks nor elongates. In a dome under dead load this parallel makes an angle of about 52° with its vertical axis. All parallels above it are in compression, and those below are in tension.

Given the complexity of the spherical shell, several studies are applied in the area, in which the Group of Dynamics and Fluid-Structure Interaction (GDFE) of the University of Brasilia (UnB) has developed many studies on domes and other types of shells, e.g., we mention the works of Pedroso (1995), Pedroso (2010), Nunes (2009), Lustosa (2011) and Faria (2020), among others.

Therefore, in this work a simplified analysis of the dome of the Roman Pantheon is performed using analytical and numerical methods; also, it is based on a previous paper published in XLII CILAMCE and III PANACM (2021). The study was divided into three cases: domes with roller, hinge and fixed supports. With regard to analytical calculations, two theories were used – membrane theory and bending theory. The two theories interact to obtain the response of the dome structure through the force method. The numerical analysis of the dome was performed using the finite element method (FEM) using the SAP2000 software. The values of normal efforts in the meridians and parallels obtained by the analytical theory and numerical discretization were investigated and compared, in which they demonstrated a good agreement with each other, validating the analyses. Schematic sections were also made, favoring a better understanding of the normal efforts in the dome for different boundary conditions.

2 | THEORETICAL FOUNDATION

2.1 Expressions for the primary (membrane theory) and secondary (bending theory) solution

In this work, which is still under development until the submission date, the opening (*oculus*) at the top of the dome is not included, as well as other more realistic characteristics – due to difficulties of its geometry, constructive characteristics, materials used and

boundary conditions – of the building, as a first step towards the complete treatment (through a progressive analysis) of the approach of analysis of this highly complex structure. The simplifying assumptions adopted in this work are: closed shells, thin (in relation to the average thickness), of constant thickness and axisymmetric, whose material is homogeneous, isotropic and linear elastic.

The membrane theory is based on the hypothesis that there are no bending and twisting moments in a shell, only normal forces in the main sections. The name *membrane* is due to the fact that the shells are very thin and do not have considerable stiffness for bending and torsion, so as to resist internal efforts with only normal forces. It is a theory that describes with a good approximation the structural behavior of real shells, as long as they satisfy certain geometric, support and load conditions. This means that, although there are bending and twisting moments, they are very small, and the actual torsional state resembles that predicted in the membrane theory. It is important to emphasize that this theory is valid for certain boundary conditions: In this case, only normal forces that are parallel to the direction of the meridians can be present at their edges. Figure 2 contains a diagram of the dome and membrane stresses and Fig. 3, bending stresses.

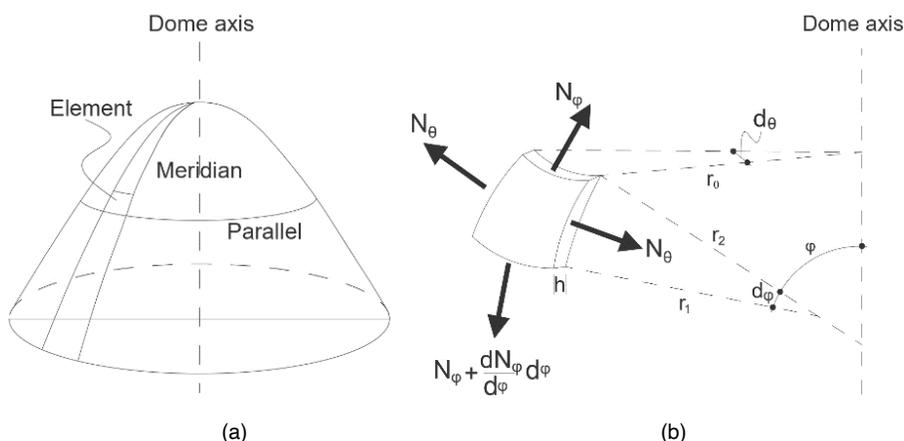


Figure 2 – Dome: (a) General structure (b) Infinitesimal surface element

Source – adapted from Rabello et al. (2016)

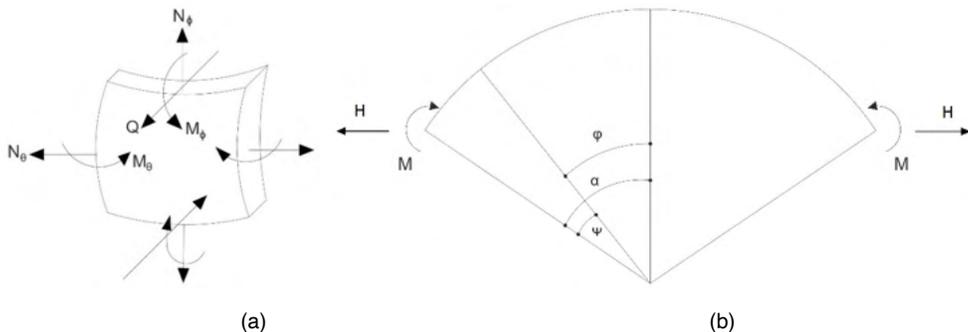


Figure 3 – General shell under load: (a) Designations of differential element (b) Bending moment acting on the edge of the shell

Source – (a) adapted from Baker (1972) (b) adapted from Ramaswamy apud Pedroso (2010)

In the effort analysis by the membrane theory, Rabello et al. (2016) and Pedroso (1995), after a series of algebraic manipulations, for a dome with roller support (primary solution) under dead load, N_ϕ (normal force per unit of length in the direction of the meridian) is given by:

$$N_\phi = -\frac{ap}{1 + \cos \phi} \quad (1)$$

Where ϕ is the angle between the vertical line that passes through the center of the dome and the straight line that passes through its center and through some point of its meridian, $\alpha=r_1=r_2$ is the average radius of the dome, $p=Yh$ is the force per unit area, Y is the specific weight of the dome material, h is the thickness of the dome (very small compared to r_1 e r_2) and $r_0=r_2 \sin \phi$ is the radius that is in a plane perpendicular to the axis of the dome. Furthermore, N_θ (normal force per unit of length in the direction of the parallel) is given by:

$$N_\theta = ap \left(\frac{1}{1 + \cos \phi} - \cos \phi \right) \quad (2)$$

Where θ is the angle between two points on the same parallel of the dome.

In the analysis with bending theory, Pedroso (2010) presents that for a dome with roller support under horizontal forces and moment on the free edge (secondary solution), it is provided the following expression for N_ϕ :

$$N_\phi = -\sqrt{2} \cot(\alpha - \psi) \sin \alpha e^{-\lambda\psi} \sin \left(\lambda\psi - \frac{\pi}{4} \right) H - \frac{2\lambda}{a} \cot(\alpha - \psi) e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi) M \quad (3)$$

Where $\psi=\alpha-\phi$ (in the case of a hemispherical dome we have $\alpha=90^\circ$), λ is a coefficient that attenuates the stresses of the dome (specially near the supports), H is a horizontal load on the edge of the dome and M is a moment on the edge of the dome. N_ϕ is given by:

$$N_{\theta} = -2\lambda \sin \alpha e^{-\lambda \psi} \sin \left(\lambda \psi - \frac{\pi}{2} \right) H - \frac{2\sqrt{2}\lambda^2}{a} e^{-\lambda \psi} \sin \left(\lambda \psi - \frac{\pi}{4} \right) M. \quad (4)$$

The two theories, as stated by Baker et al. (1972), can be combined into an engineering method, called the force method (described below), which simplifies the problem and makes it possible to analyze complicated shells in a relatively short time.

2.2 Force method

The force method, as shown in Baker (1972), is an analytical tool in which the deflection relationships of the shell are expressed in terms of the redundant edge loads and/or moments (X_1 and X_2). The solution for the redundant leads to the solution for the shell. The final solution can be obtained by the superposition of the primary and secondary solutions, which are dependent on corrective edge loadings (Fig. 4).

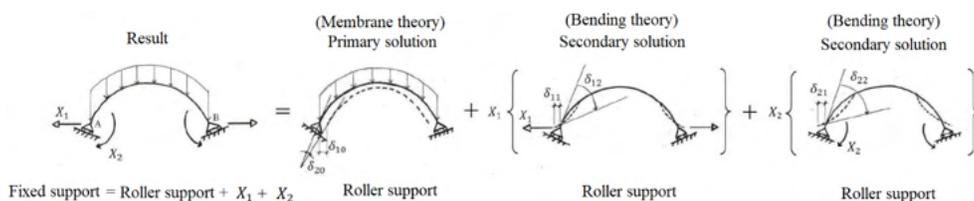
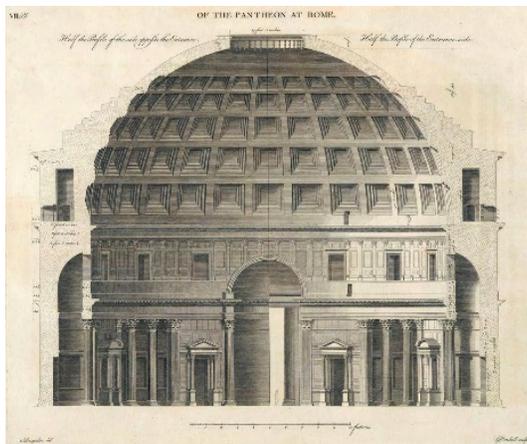


Figure 4 – The force method solution

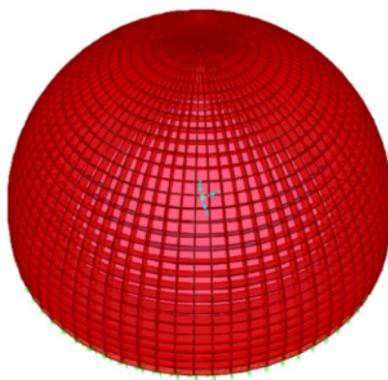
Source – adapted from Pedroso (2010)

3 | DESCRIPTION OF THE MODELS

Numerical analyzes for the simplified dome were broken down into 3 cases for a better understanding of the problem. The domes with roller, hinge and fixed supports are under dead load. The numerical analysis procedures are performed using the SAP2000 software, based on finite elements. In the static analysis of the shell, the *Shell Thin* element is used in the modeling, which consists of a finite element area, is a quadrilateral (four nodes), has six degrees of freedom and is suitable for evaluating membrane and bending efforts. Thus, the study of the convergence of the finite element mesh was carried out, adopting the final mesh with refinement presented in the numerical model of Fig. 5b of the Pantheon dome (Fig. 5a), with 80 subdivisions in the angular direction and 30 subdivisions in height. The study of mesh convergence can be found in Faria (2020).



(a)



(b)

Figure 5 – Analyzing the Pantheon: (a) Drawing of the geometry of the Pantheon: back cross section (b) Mash of the numerical model

Source – (a) Desgodetz (1682)

Table 1 presents the main parameters needed for the analysis of results, which were taken from Marder and Jones (2015), MacDonald (1976), Solheiro (2017), Masi et al. (2018) and Archeoroma (2020). Furthermore, for the simplified analysis some parameters were calculated (cases of h , p and λ) and can be found in detail in Faria (2020).

Description	Nomenclature	Value
Average dome thickness	h	1.13 m
Radius of the dome	a	21.65 m
Weight of the dome	R	50 000 kN
Force per unit area in the dome	p	16.98 kN/m ²
Attenuation coefficient	λ	5.7
Specific mass of roman concrete	γ	15 kN/m ³
Modulus of elasticity of roman concrete	E	2.9 Gpa
Poisson ratio of roman concrete	ν	0.2

Table 1 – Summary of the main parameters of the Pantheon’s dome

Source – Marder and Jones (2015), MacDonald (1976), Solheiro (2017), Masi et al. (2018) and Archeoroma (2020)

4 | RESULTS AND DISCUSSIONS

With the help of SAP2000, the numerical analysis of the dome with roller support is illustrated in Fig. 6. Based on these figures, transverse and radial sections of the dome structure were extracted to evaluate the numerical results. In addition, the results were also

obtained analytically, plotted through eqs. (1) and (2), and compared with the numerical results. Figure 7 presents the comparative graphs.

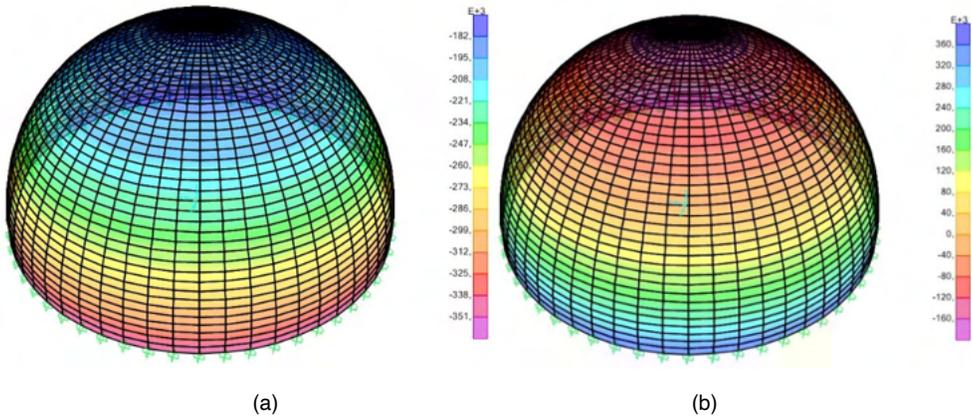


Figure 6 – Membrane stress: (a) N_ϕ (b) N_θ

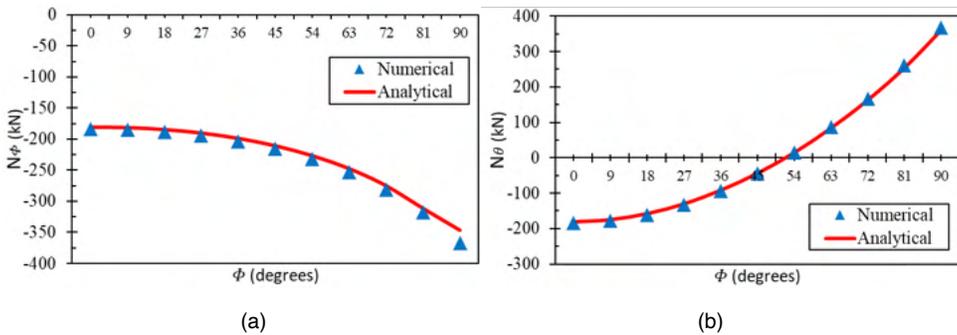


Figure 7 – Comparative graphics for the roller supported dome: (a) N_ϕ (b) N_θ

The results of the above graphs are consistent with Salvadori's words, shown in the introduction: A dome must carry its own weight and the weight of the live load to be channeled to the ground, and a dome does this along its curved vertical lines or *meridians*, which become more and more compressed as they get closer to the dome's support. This sentence reflects exactly what is mathematically exposed in the graph of N_ϕ in Fig. 7a.

Again, repeating Salvadori's words: In a dome under dead load this parallel (that neither shrinks nor elongates) makes an angle of about 52° with its vertical axis. All parallels above it are in compression, and those below are in tension. And that is what is in the graph of N_θ in Fig. 7b.

Similar to what was done above, comparatives of analytical and numerical results are presented for the dome under dead load with hinge (Fig. 8) and fixed (Fig. 9) supports.

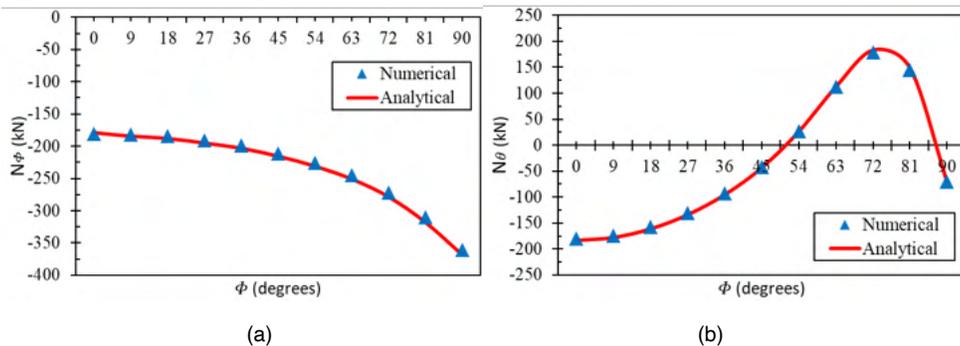


Figure 8 – Comparative graphics for the hinge supported dome: (a) N_ϕ (b) N_θ

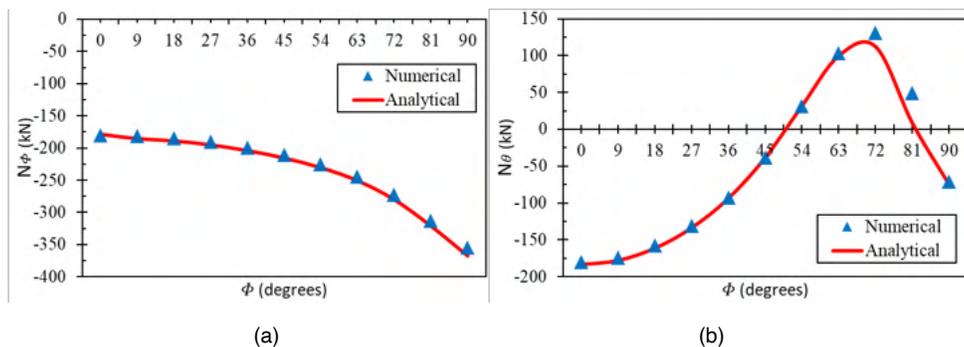


Figure 9 – Comparative graphics for the fixed supported dome: (a) N_ϕ (b) N_θ

It can be seen that the analytical and numerical results are in good agreement. Furthermore, the efforts of N_ϕ are practically coincident in all three types of support. However, the graphs of N_θ diverge a lot in the regions close to the edges, where efforts that appear in the domes with hinge and fixed supports did not exist in the dome with the roller support; it is also noticed that the efforts are quite similar for $0 < \phi < 60^\circ$. However, for $\phi > 60^\circ$, the bonds at the edges influence the efforts and impose a certain difference.

Now a comparative graphic is made for the analytical results (Fig. 10) of the domes for the three types of supports.

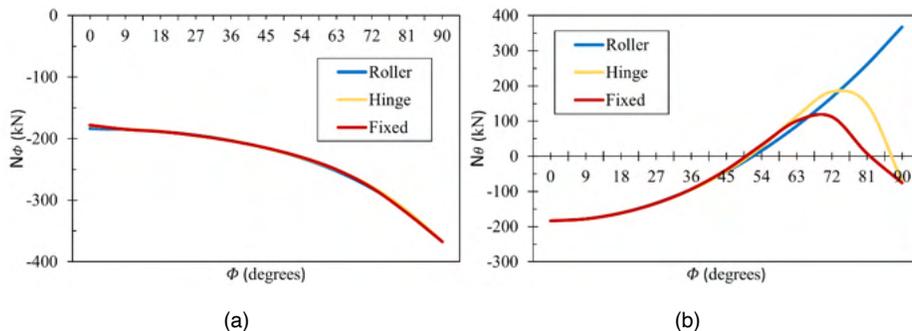


Figure 10 – Comparative graphics for the roller, hinge and fixed supported domes (analytical results): (a) N_ϕ , (b) N_θ

The analysis of the graphics is consistent with the theoretical concepts found in the literature on the subject, as the results, considering the three types of support, are practically coincident for the entire dome on the meridians and, for angles greater than 30° starting from their bases, also for the parallels.

5 | CONCLUSIONS

This work showed, in a simplified way, the result of the main efforts of a dome – inspired by the geometry of the Roman Pantheon – under dead load. The simplifications, together with analytical calculations and numerical modeling, proved to be coherent, revealing good results.

REFERENCES

ADDIS, W. **Edificação: 3000 anos de projeto, engenharia e construção**. Bookman, 2009.

ARCHEOROMA. **Pantheon**. Available in: <https://www.archeoroma.org/sites/pantheon/>. Access: 13 jul 2020.

BAKER, E. H.; KOVALEVSKY, L.; RISH, F. L. **Structural analysis of shells**. McGraw-Hill, Inc., 1972.

DESGODETZ, A. B. **Les edifices antiques de Rome, dessinés et mesurés tres exactement**. Chez Jean Baptiste Coignard, 1682.

FARIA, F. M. **Panteão Romano: descrição histórico-conceitual de elementos estruturais característicos e análise simplificada de sua cúpula semiesférica**. BSc thesis, Universidade de Brasília, 2020.

FARIA, F. M.; França Júnior, D. O.; Pedroso, L. J. **Simplified analytical-numerical study of the static behavior of the hemispherical dome of the Roman Pantheon**. 42nd Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (XLII CILAMCE) and 3rd Pan American Congress on Computational Mechanics (III PANACM), Rio de Janeiro, 9-12 November 2021 (online).

LUSTOSA, I. A. A. **Um estudo comparativo analítico-numérico de esforços e deslocamentos em cascas cilíndricas abertas ou com conexões de borda**. MSc thesis, Universidade de Brasília, 2011.

MACDONALD, W. L. **The Pantheon: design, meaning, and progeny**. Harvard University Press, 1976.

MARDER, T. A.; JONES, M. W. **The Pantheon – from antiquity to the present**. Cambridge University Press, 2015.

MASI, F.; STEFANO, I.; VANNUCI, P. **A study on the effects of an explosion in the Pantheon of Rome**, 2018. Available in: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-study-on-the-effects-of-an-explosion-in-the-of-Masi-Stefanou>. Access: 20 aug 2020.

NUNES, P. C. C. **Teoria do Arco de Alvenaria: Uma Perspectiva Histórica**. MSc thesis, Universidade de Brasília, 2009.

PEDROSO, L. J. **Acoplamento de Cascas Esféricas com Anel de Borda – Aspectos Teóricos e de Projeto**. Didactic publication. Universidade de Brasília, 2010.

PEDROSO, L. J. **Teoria de Placas e Cascas – Uma Abordagem Analítica e Numérica**. Didactic publication. Universidade de Brasília, 1995.

RABELLO, F. T.; MARCELLINO, N. A.; LORIGGIO, D. D. **Automatic procedure for analysis and geometry definition of axisymmetric domes by the membrane theory with constant normal stress**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., v. 9, n. 4, p. 544-557, 2016.

SALVADORI, M. G. **Why buildings stand up: the strength of architecture**. W. W. Norton & Company, Inc., 1980.

SOLHEIRO, A. R. F. **Análise de estruturas de casca pelo método dos elementos finitos**. MSc thesis, Instituto Superior Técnico, 2017.

INFLUENCE OF GEOMETRICAL DIMENSIONS OF RESERVOIR ON THE FLUID-STRUCTURE COUPLED DOMINANT MODES IN CONCRETE GRAVITY DAMS

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 13/04/2022

Davidson de Oliveira França Júnior

Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE)
Brasília-DF
<https://orcid.org/0000-0001-8822-7178>

Selênio Feio da Silva

Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém-PA
<http://lattes.cnpq.br/6377530179701831>

Lineu José Pedroso

Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE)
Brasília-DF
<https://orcid.org/0000-0002-2734-3260>

ABSTRACT: Properly determining the dynamic structural response of a dam is complex as it involves aspects related to fluid-structure interaction (FSI). The coupled response depends on numerous variables, and among them is the fluid domain, which has a significant influence on the coupled dominant modes. In the design phase, such a reservoir is idealized as an acoustic cavity that must have dimensions and boundary conditions appropriate to the problem. However, depending on these geometric parameters

considered for the reservoir, the natural frequency ranges and the order of the fluid vibration modes are different, directly influencing the coupled fluid-structure vibrations, this is because the coupled response depends on the decoupled frequency range of the structure and fluid domain in isolation. Thus, in this paper the uncoupled and coupled fluid-structure free vibrations of the Koyna gravity dam located in India are studied. The natural frequencies, vibration modes of the structure and hydrodynamic pressures are investigated and compared under different numerical modeling (reservoir dimensions) using the finite element method (FEM) by means of ANSYS®. For validation of the numerical approaches presented here the results obtained are compared with values available in the literature.

KEYWORDS: Dams, Fluid-Structure Interaction, Reservoir Dimensions, Finite Element Method.

INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DO RESERVATÓRIO NOS MODOS DOMINANTES ACOPLADOS FLUIDO-ESTRUTURA EM BARRAGENS DE GRAVIDADE

RESUMO: Determinar adequadamente a resposta estrutural dinâmica de uma barragem é uma tarefa complexa, pois envolve aspectos relacionados à interação fluido-estrutura (FSI). A resposta acoplada depende de inúmeras variáveis, e entre elas está o domínio fluido, que tem uma influência significativa nos modos dominantes acoplados. Na fase de projeto, tal reservatório é idealizado como uma cavidade acústica que deve ter dimensões e condições de contorno adequadas ao problema. No entanto,

dependendo desses parâmetros geométricos considerados para o reservatório, as faixas de frequência natural e a ordem dos modos de vibração do fluido são diferentes, influenciando diretamente nas vibrações acopladas fluido-estrutura, isso porque a resposta acoplada depende da faixa de frequência desacoplada da estrutura e domínio fluido isoladamente. Assim, neste artigo são estudadas as vibrações livres, desacopladas e acopladas fluido-estrutura, da barragem de gravidade de Koyna, localizada na Índia. As frequências naturais, os modos de vibração da estrutura e as pressões hidrodinâmicas no fluido são investigadas e comparadas sob diferentes modelagens numéricas (dimensões do reservatório) usando o método dos elementos finitos (MEF) por meio do ANSYS®. Para validação das abordagens numéricas aqui apresentadas os resultados obtidos foram comparados com valores disponíveis na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens, Interação Fluido-Estrutura, Dimensões do Reservatório, Método dos Elementos Finitos.

1 | INTRODUCTION

Concrete gravity dams are generally large structures, which may have different uses and purposes, according to the needs of the region of their implementation. In the area of dam engineering, it is essential to ensure meticulous safety conditions, because the failure of such structures can generate considerable damage, not only structural, but also economic, social and environmental. In dynamic analysis, two relevant means can be highlighted in the investigation: the structure and the reservoir fluid. When analyzed together, these means form the fluid-structure coupled system, which is essential in analyses because it presents a high degree of complexity and criticality, directly impacting the design of the project.

The dam-reservoir interaction (DRI) is quite significant for the development of the dynamic response in free vibrations, because the presence of the pressure distribution of the liquid (hydrodynamic pressures) directly influences the vibration modes of the structure and, consequently, its natural frequencies. During the vibration motion, the structure initially moves by applying pressure to the fluid. In turn, the fluid responds with a hydrodynamic pressure at the interface with the structure. This response pressure is referred to as the impulsive pressure. Therefore, the dam-reservoir coupled frequencies depend, among other variables, mainly on the frequency range of the structure as well as on the frequency range of the reservoir domain (fluid). However, depending on these geometric parameters considered for the reservoir, the natural frequency ranges and the order of the fluid vibration modes are different, directly influencing the dam-reservoir coupled vibrations, because the coupled response depends on the uncoupled frequency range of the structure and fluid domain in isolation. Thus, the sequence of the coupled modes dominant structure additional mass (AM), cavity dominant (CD) or mixed modes (MM) undergo changes, arising from the diversity of frequency ranges.

Westergaard (1933) considered only the inertial coupling aspects of the fluid

(additional mass) assuming the displacement of the dam as rigid-mobile, with the fluid represented by Laplace's equation, where the effects of fluid compressibility are neglected. Later, in the works by Chopra (1970), Chopra and Chakrabarti (1972) and in Chopra (1978) the effect of the frequency range and compressibility of the fluid on the dam-reservoir interaction was investigated, emphasizing that considering the fluid as incompressible can produce significant errors and the effects of compressibility cannot be ignored. Thus, for dynamic analyses of dam-reservoir systems involving more complex situations, several formulations have been improved and, among them, the finite element method (FEM) is a robust technique. In the works by Chopra et al. (1981), Hall and Chopra (1982), Sharan (1987), Ftima and Léger (2006) and many others, analytical and FEM analyses involving the dynamic effects on DRI are presented. In Brazil, many studies on dams, dynamic structure-fluid interaction and related studies have been developed, as for example, the works of Pedroso (2003), Silva (2007), Silveira et al. (2018), Mendes et al. (2021), Silveira et al. (2021), among others.

Therefore, knowing that the fluid impounded in a dam is a practically infinite system due to the extensive length of the reservoir and that in design formulations and simulations the length of the reservoir needs to be limited to a certain distance away from the dam, i.e., it must be finite, in this paper the uncoupled and coupled fluid-structure free vibrations of the Koyna gravity dam, located in India, are studied. The natural frequencies, structural vibration modes and hydrodynamic pressures are investigated for different L/H (length/height) ratios of the reservoir using finite element method (FEM) through U-P formulation (structure displacement and pressure to fluid) by means of ANSYS® software. Helmholtz's formulation (wave equation) is used to validate the acoustic cavity. The results obtained by FEM are compared with analytical values for acoustic cavity and with values presented by Chopra (2012) and by Huang (2011) for uncoupled dam and dam-reservoir interaction. This study provides a discussion of the uncoupled and coupled dam-reservoir frequency ranges and their involved effects.

2 | THEORETICAL FOUNDATION

2.1 Structure domain (DAM)

For continuous systems, the dynamic equation of motion by the finite element method is written in its matrix form, in which the global matrices are made based on the elementary matrices (of each finite element), which in turn have an approximation field due to the interpolation functions of the finite element and the resolution through numerical integration in the structural domain. In general, the equation of motion for uncoupled structure is given by:

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [C_s]\{\dot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_E\} \quad (1)$$

where $\{F_E\}$ is an external force vector, $\{U\}$ is the structure displacement vector, $\{\dot{U}\}$ is the structure velocity vector, $\{\ddot{U}\}$ is the structure acceleration vector, $[M_s]$ is the structure mass matrix, $[K_s]$ is the structure stiffness matrix and $[C_s]$ is the structure damping matrix. In the system above undamped free vibrations are established if $\{F_E\} = 0$ and $[C_s] = 0$.

2.2 Fluid domain (reservoir)

The analysis of the acoustic behavior of cavities is related to the length of the acoustic waves along with the dimensions of the medium, in which they present natural frequencies and acoustic modes. Based on Pedroso (2003) the wave equation in acoustic media for two-dimensional cavities (2D model) is given by:

$$\frac{\nabla^2 P}{\partial x^2} + \frac{\nabla^2 P}{\partial y^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

The eq. 2 is the Helmholtz's formulation (wave equation), where c is the velocity of propagation of the wave in the acoustic cavity, P is the pressure and $\nabla^2 P$ is the Laplacian pressure operator. The complete solution for the natural frequencies and pressure vibration modes for two-dimensional cavity with rigid ($\partial P / \partial n = 0$) and open ($P = 0$) boundary condition in the two opposite directions (x and y) are found in Pedroso (2003), França Júnior (2018).

2.3 Dam-reservoir interaction

The analysis of the dam-reservoir coupled problem is based on the (U-P) formulation, with pressure as the variable in the fluid domain and displacement as the variable for the structure. This formulation evaluates the fluid force by performing the integration of the pressures at the fluid-structure interface and, consequently, performs the coupling by applying this fluid force to the structure's equation of motion. With this, we have the fluid-structure (FS) coupling matrix, which couples the effects. The complete U-P formulation can be found in França Júnior (2018), Mendes (2021), and many others. In compact form the U-P formulation is given by:

$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ \rho_f [FS] & [M_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}\} \\ \{\dot{P}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & [-FS] \\ [0] & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_E\} \\ [0] \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Where $[P]$ is the fluid pressure matrix, ρ_f is the fluid density, $[M_f]$ is the fluid mass matrix, $[K_f]$ is the fluid stiffness matrix, $[C_f]$ is the fluid damping matrix, $[FS]$ is the fluid-structure coupling matrix. In the system above undamped free vibrations are established if $\{F_E\} = 0$, $[C_s] = 0$ and $[C_f] = 0$.

3 | DESCRIPTION OF THE MODELS

The Koyna dam located in the state of Maharashtra, India. According to Chopra (2012), the concrete of Koyna dam has physical properties such as: specific mass (ρ_e)

equivalent to 2643 kg/m³, modulus of elasticity (Ec) of 31027 MPa, Poisson's ratio (ν) of 0,20. In this work, the modeling of the dam structure was done according to a plane state of deformation (Fig. 1), in which used the PLANE183 finite element to discretize the structure. The PLANE183 element used was in the quadrilateral geometry with eight nodes of two degrees of freedom at each node, capturing translations and/or rotations in the x and y nodal directions. The boundary condition of the dam was clamped at the base, with the foundation assumed rigid.

The rectangular reservoir attached to the dam was assumed to be 91,74 m high and with three distinct lengths of 91,74 m, 385 m e 642,18m (lengths adopted in this work). The distinct lengths reflect in three different length/height (L/H) ratios of the reservoir. The fluid specific mass corresponds to 1000 kg/m³ and the wave propagation velocity in the fluid (c) is equal to 1440 m/s, in agreement with Huang (2011) and Silveira et al. (2018).

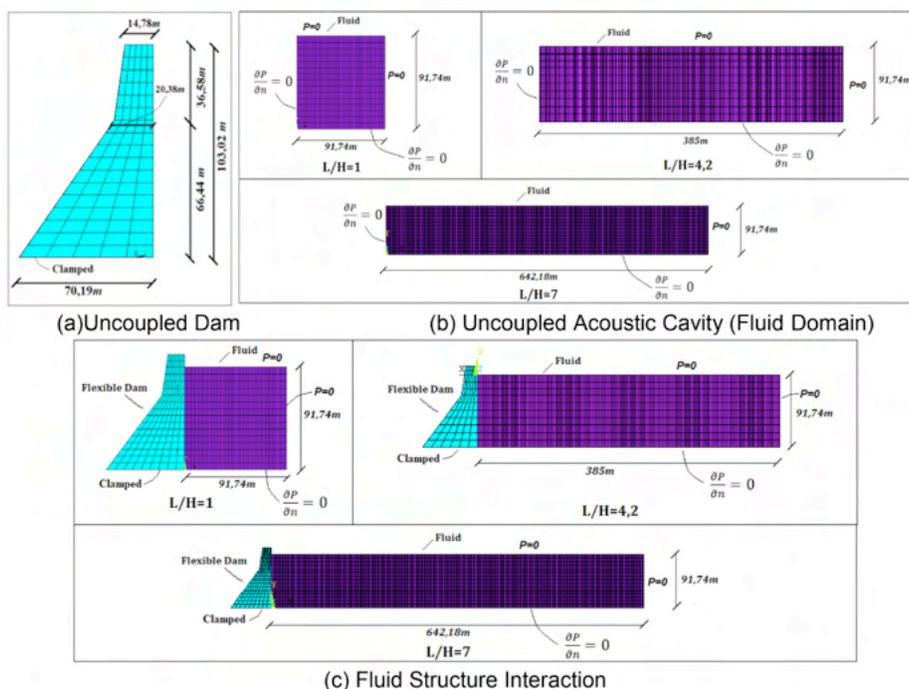


Figure 1. Geometric dimensions and boundary conditions of the models analyzed in this work.

The FLUID29 element used was in the quadrilateral geometry with four nodes of two degrees of freedom at each node, capturing translations in the x and y nodal directions and pressures.

In Figure 5 it is evidenced that the fluid boundary conditions are zero pressure ($P=0$) at the free surface and at the finite end of the reservoir, as well as the rigid boundary condition ($\partial P/\partial n=0$) is applied at the uncoupled cavity interface (dam positioning location)

and at the reservoir base (rigid foundation at the reservoir base). In the coupled problem the fluid-structure condition is applied at the dam-reservoir interface.

4 | RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 Structure domain (DAM)

The results obtained through FEM referring to the four initial natural frequencies and respective vibration modes of the dam structure agree with results presented by Chopra (2012). The small percentage difference can be observed, demonstrating that the modeling of the structure was validated. The frequencies are presented in Tab. 1.

Vibration Mode	ω (Hz) Chopra (2012)	ω (Hz) Numerical (FEM)	Difference (%)
1° (Flexure)	3,07	3,07	0,01
2° (Flexure)	8,20	8,16	0,49
3° (Axial)	10,75	10,81	0,53
4° (Flexure)	15,87	15,93	0,38

Table 1. Natural frequencies (ω) of the uncoupled dam (Hz).

It is evidenced that the numerical model adequately represents the vibration phenomenon, as modal deformations of the dam were captured and compared with Chopra (2012), presenting good agreement.

It is evident from the graph (Fig. 2) that the four vibration modes of the decoupled dam are predominantly bending modes (U_x), except for the third vibration mode which is an axial mode, where the normalized displacement presented in the graph is in the vertical direction of the dam (U_y).

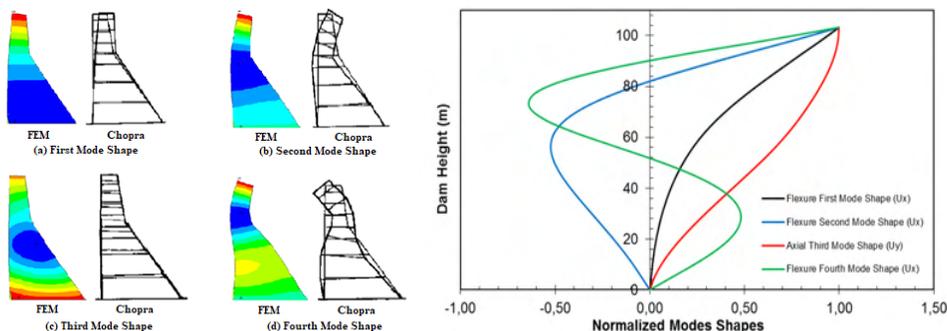


Figure 2. Vibration modes of the decoupled dam for the four natural frequencies.

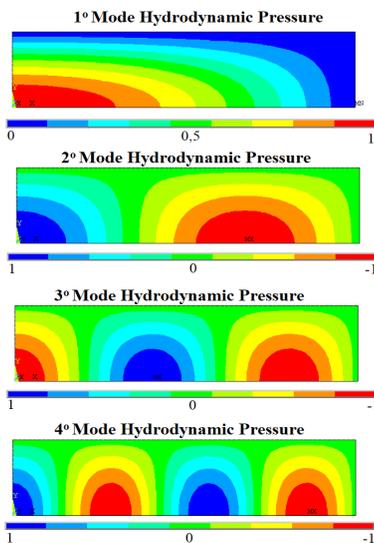
4.2 Fluid domain (RESERVOIR)

The results concerning the four natural frequencies and vibration modes of the fluid domain (Tab. 2) were studied through the analytical solutions and the finite element method. In the results the small percentage differences of the numerical model compared to the analytical solutions demonstrates that the modeling was validated for the acoustic cavity.

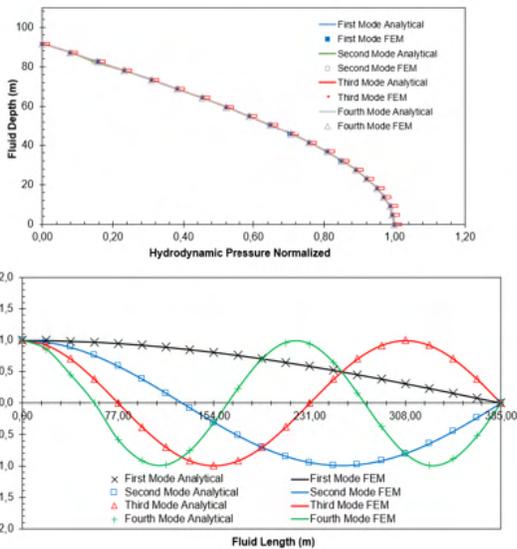
<i>L/H=1</i>				<i>L/H=4,2</i>				<i>L/H=7</i>			
Mode (i, j)	ω (Hz) Analytical	ω (Hz) Numerical	Diff. (%)	Mode (i, j)	ω (Hz) Analytical	ω (Hz) Numerical	Diff. (%)	Mode (i, j)	ω (Hz) Analytical	ω (Hz) Numerical	Diff. (%)
1° (1,1)	5,57	5,55	0,36	1° (1,1)	4,03	4,04	0,25	1° (1,1)	3,96	3,97	0,25
2° (1,2)	12,40	12,41	0,08	2° (2,1)	4,82	4,83	0,21	2° (2,1)	4,27	4,27	0,00
3° (2,1)	12,41	12,42	0,08	3° (3,1)	6,10	6,11	0,16	3° (3,1)	4,82	4,82	0,00
4° (2,2)	16,65	16,66	0,06	4° (4,1)	7,63	7,65	0,26	4° (4,1)	5,55	5,55	0,00

Table 2. Natural frequencies (ω) of the uncoupled fluid (Hz).

The modal pressure deformations for each vibration mode were compared and are presented in Fig. 3. In the graphs presented it is possible to notice that the hydrodynamic pressures obtained through the analytical technique coincide with the results obtained by the finite element method. At the rigid boundary interface, the hydrodynamic pressures are equally distributed along the height for the four pressure modes, i.e., the pressure at the cavity interface is independent of the mode, and this fact is explained by the rigid boundary condition assumed at this location. On the other hand, pressure waves are visualized in the longitudinal direction of the reservoir, where pressure waves propagate in the acoustic cavity with acoustic modes consistent with the rigid boundary condition and zero pressure in opposite directions. Such modes are critical for further evaluation of the fluid-structure coupled problem. In Fig. 4 the hydrodynamic pressure modes for the ratio's $L/H=1$ and $L/H=7$ is presented. For the cavity with ratio $L/H=1$ transverse modes arise and, in agreement with Tab. 2, the frequency range increases.

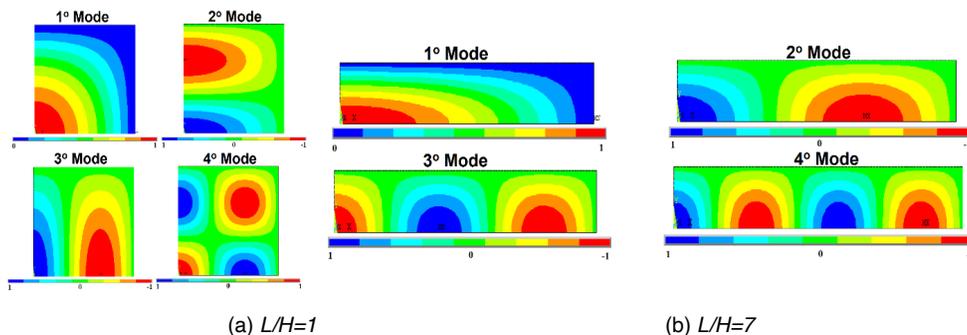


(a) Numerical Results



(b) Comparison of Pressures

Figure 3. Hydrodynamic pressures of the uncoupled fluid for the $L/H=4,2$.



(a) $L/H=1$

(b) $L/H=7$

Figure 4. Hydrodynamic pressures of the uncoupled fluid for the $L/H=1$ and $L/H=7$ ratio.

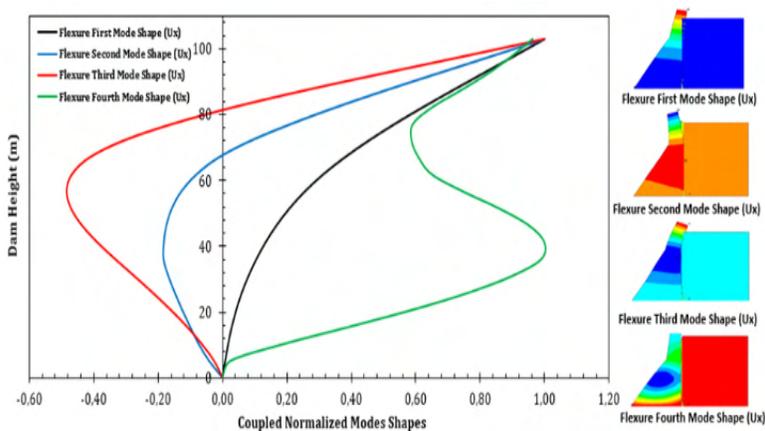
4.3 Dam-reservoir interaction

In the coupled fluid-structure analysis, results were obtained for the four natural frequencies and vibration modes for different L/H ratios. To validate the models, the results studied by Huang (2011) for an $L/H=4.2$ ratio were compared. The natural frequencies are shown in Tab. 3.

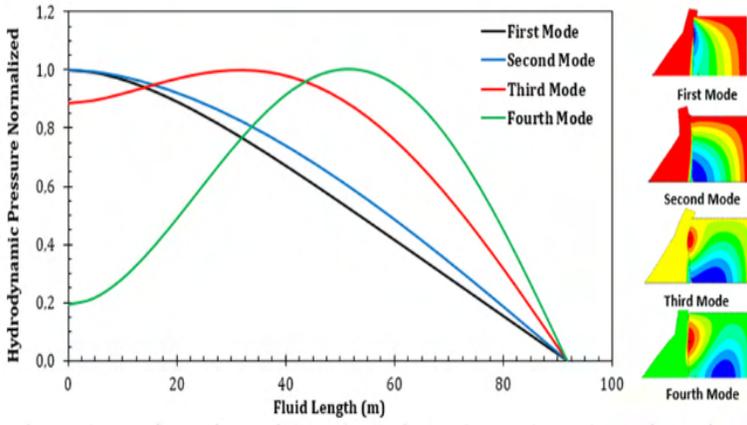
L/H=1			L/H=4.2					L/H=7		
Mode	ω (Hz) Numerical	Mode Type	Mode	ω (Hz) Huang (2011)	ω (Hz) Numerical	Diff. (%)	Mode Type	Mode	ω (Hz) Numerical	Mode Type
1°	2,80	AM	1°	2,79	2,78	0,36	AM	1°	2,78	AM
2°	5,27	CD	2°	4,05	4,05	0,00	CD	2°	3,98	CD
3°	8,01	CD	3°	4,79	4,79	0,00	CD	3°	4,27	CD
4°	10,71	CD	4°	5,98	5,99	0,17	CD	4°	4,80	CD

Table 3. Natural frequencies (ω) coupled dam-reservoir (Hz).

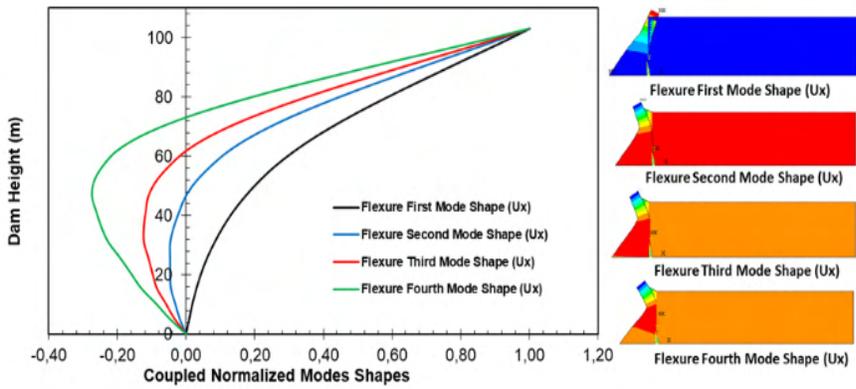
Based on Tab. 3, it can be stated that the modeling was validated. When analyzing the table, it is clear that the additional mass mode (AM) is the fundamental mode of the structure, that is, for different L/H ratios, the first frequency remains of the same value and behavior during vibration, in which the structure predominates, and the fluid follows the structural deformation of the dam. The effect of the additional fluid mass occurs near the dam interface. On the other hand, from the second to fourth coupled mode the frequencies change for all different reservoir discretization's (L/H), that is, the cavity predominates over the system and changes the coupled modes to dominant cavity (CD) modes and, consequently, the frequencies.



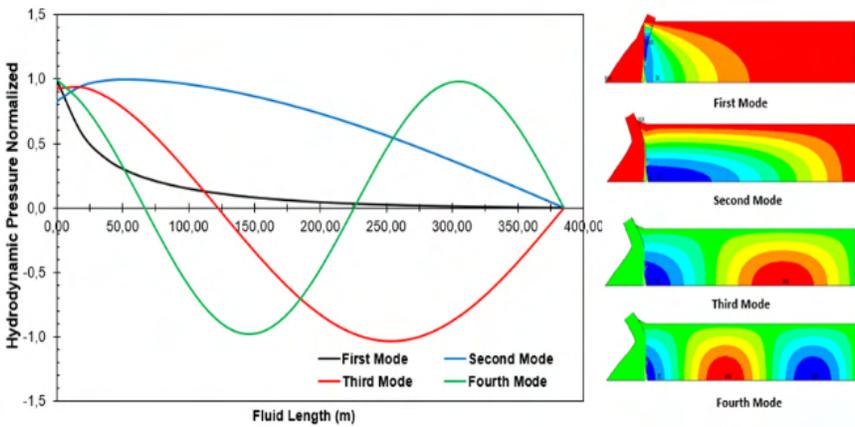
(a) Structure coupled vibration modes for L/H=1



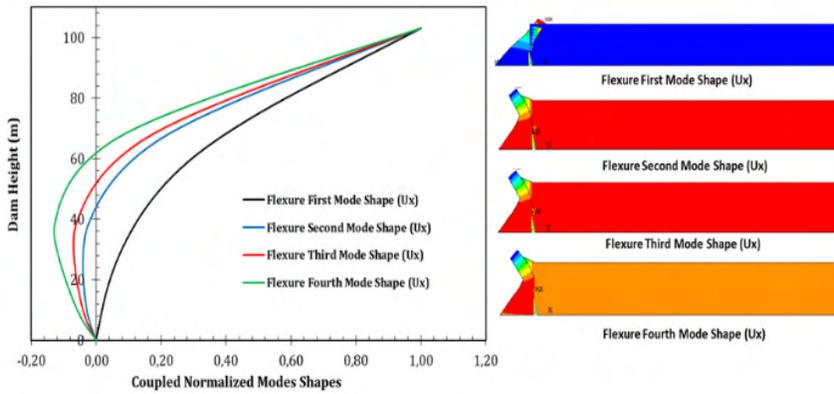
(b) Fluid pressure coupled vibration modes for L/H=1



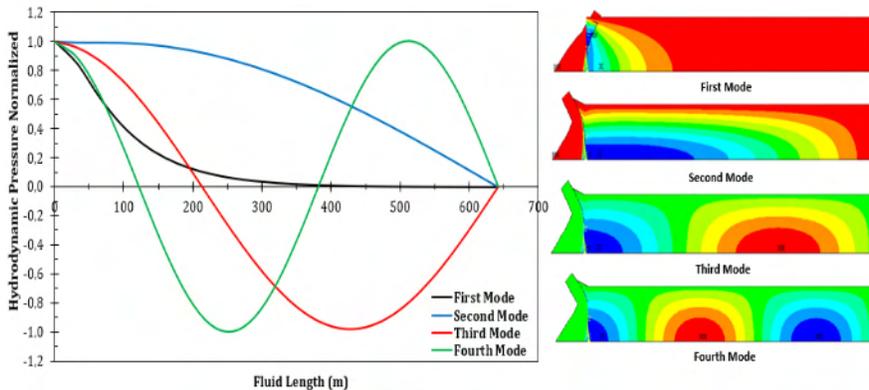
(c) Structure coupled vibration modes for L/H=4.2



(d) Fluid pressure coupled vibration modes for L/H=4.2



(e) Structure coupled vibration modes for $L/H=7.0$



(f) Fluid pressure coupled vibration modes for $L/H=7.0$

Figure 5. Structure vibration modes and hydrodynamic pressures of the reservoir-dam coupled system for the ratio $L/H=1$, $L/H=4.2$ and $L/H=7$.

Thus, in Figure 5 it is observed that in cavity modes the fluid vibrates with pressure modes and, consequently, the dam is disturbed and follows the effects of the acoustic cavity. Note that the fourth mode of the deformation of the coupled dam in the $L/H=1$ ratio is changed due to the CD transverse mode. Dominant cavity modes in DRI are similar to uncoupled fluid modes. Thus, in the present work, the analysis presented contribute to the understanding of the fluid-structure dynamic coupling between dam-reservoir.

5 | CONCLUSIONS

This work showed the influence of different reservoir length discretization's on fluid-structure coupled free vibrations in gravity dams. The analysis of the dominant modes shows that the fundamental mode is not altered by the length of the reservoir, but from the second mode onwards investigations in different domains and dimensions of the fluid

are necessary. Finally, it is stated that the frequency ranges of the fluid influence the fluid-structure coupled phenomena and that the results were satisfactory in the DRI.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the resources received for research and the University of Brasília (UnB).

REFERENCES

Westergaard, H. M. "**Water pressures on dams during earthquakes**". Trans. ASCE 98: 418- 432, 1933.

Chopra, A. K. "**Earthquake response of concrete gravity dams**". International of the Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 96, pp. 443-454, 1970.

Chopra, A. K. e Chakrabarti, P. "**The earthquake experience at Koyna dam and stresses in concrete gravity dams**". In: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 1, 151-164, 1972.

Chopra, A. K. "**Earthquake resistant design of concrete gravity dams**". In: Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, pp. 953-971, 1978.

Chopra, A. K. e Chakrabarti, P. "**Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-fluid-foundation rock interaction**". In: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 9, 363-383, 1981.

Hall, J.F. e Chopra, A.K. "**Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects**". In: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10 ,305-332, 1982.

S. K. Sharan, "**Time domain analysis of infinite fluid vibration**". International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24, 945-958, 1987.

Ftima, M. B.; Léger, P. "**Seismic stability of cracked concrete dams using rigid block models**". Computers & structures, v. 84, n. 28, 1802-1814, 2006.

L. J. Pedroso. "**Interação fluido-estrutura**". In: Notas de Curso e Apostila Didática. Universidade de Brasília: UnB-FT/ENC, Vs.3, 2003.

S. F. Silva. "**Interação dinâmica barragem-reservatório: modelos analíticos e numéricos**". PhD Thesis, Universidade de Brasília, 2007.

I. V. Silveira and L. J. Pedroso. "**Analysis of natural frequencies and modes of vibration involving interaction dam-reservoir-foundation for concrete gravity dams**". In Third Int. Dam World Conference, p. 11, 2018.

Mendes, N. B., Pedroso, L. J. e Ribeiro, P. M. V. "**A simplified numerical and analytical study for assessing the seismic response of a gravity concrete lock**". IBRACON Structures and Materials Journal, vol.14, n 1, 2021.

Silveira, I. V., Pedroso, L. J. e Marotta, G. S. "**Study of the influence of the foundation and the reservoir on the dynamic response in a concrete gravity dam profile**". IBRACON Structures and Materials Journal, vol.14, n 4, 2021.

Chopra, A. K. "**Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**". 4. ed. Berkeley: University of California at Berkeley, 944 p. 2012.

J. Huang. "**Seismic response evaluation of concrete gravity dams subjected to spatially varying earthquake ground motions**". Ph.D. Dissertation, Drexel University, Drexel, 2011.

D. O. França Júnior. "**Estudo analítico-numérico em vibrações livres fluido-elásticas em cascas cilíndricas para diferentes condições de contorno**". Ph.D. dissertation, Universidade de Brasília, 2018.

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR LOCALIZADA NO BELO JARDIM – PE

Data de aceite: 01/06/2022

Paulo Sérgio da Silva Pinheiro

Autarquia Educacional do Belo Jardim - AEB/
FBJ
<http://lattes.cnpq.br/4309047796768727>

Abdeladhim Tahimi

Universidade Federal de Alagoas - UFAL
<http://lattes.cnpq.br/5738544207877627>

Deysianne Cristina Santos da Silva

Mestrado Profissional em Rede Nacional em
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos -
ProfÁgua
<http://lattes.cnpq.br/6201990672041441>

Armando Dias Duarte

Autarquia Educacional do Belo Jardim - AEB/
FBJ
<http://lattes.cnpq.br/5704187021277285>

RESUMO: Em uma sociedade que depende cada vez mais de equipamentos de processamento de dados, a maior dificuldade é a quantidade de características associadas ao descarte e uso de materiais valiosos, principalmente na sua correta destinação final. Nessas circunstâncias, espera-se que as Instituições de Ensino Superior (IES) desempenhem um papel importante como disseminadoras de valores socioeconômicos, e ambientais e o pioneirismo nas soluções de tais problemas. Dado o exposto, esse artigo tem como objetivo investigar o processo, a quantidade e elaborar indicativos de vida útil dos equipamentos de informática na Autarquia Educacional do Belo

Jardim - AEB/FBJ com o intuito de estabelecer diretrizes sustentáveis para o fluxo atual de equipamentos de informática dentro da AEB/FBJ. **PALAVRAS - CHAVE:** Logística Sustentável, Equipamentos de Informática, Gestão de Resíduos.

ABSTRACT: In a society that increasingly depends on data processing equipment, the greatest difficulty is the number of characteristics associated with the disposal and use of valuable materials, especially in their correct final destination. Under these circumstances, it is expected that Higher Education Institutions (HEIs) play an important role as disseminators of socioeconomic and environmental values and pioneering solutions to such problems. Given the above, this article aims to investigate the process, the quantity and to elaborate indications of the useful life of computer equipment in the Educational Authority of Belo Jardim - AEB/FBJ in order to establish sustainable guidelines for the current flow of computer equipment. within the AEB/FBJ.

KEYWORDS: Sustainable Logistics Plan, Electronic Waste, Computer Equipment, Waste Management.

1 | INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial, o modelo de desenvolvimento econômico adotado mundialmente é baseado na produção intensiva de bens de consumo. Desde então, a maioria das *commodities* no mercado não tem considerado

mitigar o impacto ambiental do processo de produção. Ao contrário da situação populacional dos séculos XVIII e XIX, hoje existe mais de sete bilhões de habitantes no planeta e se aproxima de 8 bilhões. Com isso, o consumo cresceu e a demanda por matérias-primas continuou aumentando para atender à produção de bens de consumo. Como resultado, a degradação e o descarte inadequado de resíduos aumentaram (REIDLER, 2012; HONDA, 2014).

Um dos problemas decorrentes desse modelo de produção insustentável é o consumo e a exacerbação dos problemas relacionados à destinação de resíduos. Independentemente do aumento da produção de bens de consumo no destino após o uso, isso significa que a geração de resíduos aumentou significativamente. De acordo com a Agenda 21, ferramenta de planejamento participativo nacional para o desenvolvimento “sustentável”, desenvolvida durante a Eco 92, a melhor forma de solucionar o tratamento inadequado de resíduos é modificar os padrões de consumo para minimizar a produção de produtos não sustentáveis. Essa exposição levanta algumas questões, como a necessidade da sociedade por substitutos adequados e novas práticas de gestão, que são economicamente viáveis, têm menos impacto sobre o meio ambiente e a saúde das pessoas e produzem benefícios econômicos, ambientais e sociais (MINÉU, 2017).

Dentre os resíduos sólidos presentes um dos materiais mais desafiadores para responder a essas perguntas é o lixo eletrônico, pois em uma sociedade que depende cada vez mais de equipamentos de processamento de dados, a maior dificuldade em sua cadeia está no seu descarte, nos componentes complexos que utilizam materiais preciosos em sua composição e, principalmente, após o uso o descarte a correta destinação final (REIDLER, 2012).

Babbit (2009) realizou um estudo que demonstra que a vida útil de equipamentos elétricos e eletrônicos diminui com o tempo. Portanto, não só é difícil o descarte desses resíduos, mas sua quantidade está aumentando rapidamente, aumentando as preocupações com o meio ambiente e a saúde pública (REIDLER, 2012).

No Brasil, atendendo ao disposto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e à promulgação da Lei nº 12.305 / 2010, as IES precisam ter um cuidado maior com relação ao descarte adequado desses resíduos e à primazia da integração gestão, incluindo descarte final adequado, logística reversa e ciclo de vida do produto. Embora as IES tenham alcançado alguns casos de sucesso na gestão de resíduos eletrônicos, o Brasil ainda não formulou uma legislação nacional específica para resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.

Conforme enfatizado por Silva (2013), Reidler (2012) e o MMA (2013), às IES, desempenham um papel na sociedade, gerando conhecimento, propondo e desenvolvendo soluções tecnológicas, e como disseminadoras de valores socioeconômicos e ambientais. Assim, as IES tornam a gestão transparente, incentivando a verificação das condições de separação, coleta e armazenamento, registro e controle dos materiais coletados e

seus destinos, identificação de facilitadores, processo de análise de obstáculos e, por fim, divulgação de seus resultados.

1.1 REEE e sua Classificação

A expressão, Resíduos Sólidos e Resíduos Eletro-Eletrônicos (REEE) vêm sendo bastante empregadas nos meios técnicos científicos de publicações, também na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), bem como nas Diretivas da Comunidade Europeia que tratam desse assunto (CE, 2003; CE, 2012). Os REEE's pertencem a um leque de produtos, que se destacam por suas características como o tempo, vida útil, volume, obsolescência, depreciação e o latente impacto sobre o meio ambiente e saúde se forem manuseados de forma inadequada. Essas diferenças se refletem nas particularidades de gerenciamento pós-consumo de cada grupo, isto é, nos processos de coleta, logística e reciclagem, assim como nas atitudes dos consumidores no momento do descarte (OLIVEIRA, 2016; BALDÉ *et al.*, 2017).

As classificações mais usadas estão preconizadas no Anexo I da Directiva nº 19 de 2012 da Comunidade Europeia, que são referentes aos REEE, onde constam 10 categorias, e estão representadas no Quadro 1. Já no Anexo 3 desta mesma diretiva, estão previstas seis categorias listadas no Quadro 2, onde passarão a ter legitimidade a partir de 15 de agosto de 2018 (CE, 2012). Segundo Baldé *et al.* (2017) foram analisadas as categorias propostas no Anexo 3 da Diretiva, foi utilizada de forma metodológica na elaboração a diretiva em nível mundial sobre a problemática dos REEE, segundo estes pesquisadores, no estudo, elas coincidem com os REEE no ato da classificação após a sua coleta para serem administrados.

Categorias de EEE	Exemplos de EEE por Categoria
1. Eletrodomésticos de grande porte	Refrigeradores, Máquinas de lavar roupas, fogões, aparelhos micro-ondas.
2. Eletrodomésticos de pequeno porte	Aspiradores, torradeiras, secadores de cabelo e máquinas de café.
3. Equipamentos de informática e telecomunicações	Computadores portáteis, impressoras, telefones e telefones celulares.
4. Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos	Instrumentos musicais, amplificadores de áudio e painéis fotovoltaicos.
5. Equipamentos de iluminação	Lâmpadas e aparelhos de iluminação.
6. Ferramentas elétricas e eletrônicas	Serras, máquinas de costura e furadeiras.
7. Brinquedos e equipamentos de desporto e lazer	Aparelho de vídeo game, trens e carros elétricos e computadores para ciclismo.
8. Aparelhos Médicos	Equipamentos de cardiologia, radioterapia e diálise.
9. Instrumentos de monitoramentos e controle	Detectores de fumaça, regulador aquecimento ou esfriamento e termostatos.

10. Distribuidores automáticos	Caixa de autoatendimentos, como os de bebidas, produtos sólidos e dinheiro.
--------------------------------	---

Quadro 1- Classificação conforme Anexo 1 da Diretiva Europeia

Fonte: Adaptado de CE (2012).

Categorias de EEE	Exemplos de EEE em cada categoria
1. Equipamentos de regulação da temperatura	Congeladores, equipamentos de ar condicionado, equipamentos desumidificadores, bombas de calor.
2. Telas monitores e equipamentos com tela plana superior a 100 cm ²	Telas, aparelhos de televisão, monitores, computadores portáteis.
3. Lâmpadas	Lâmpadas fluorescentes, tradicionais e compactas, lâmpadas de sódio de baixa pressão, LED.
4. Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior 50 cm)	Máquinas de lavar roupas, secadora de roupas, máquinas de lavar louça, fogões, fornos elétricos, equipamentos informáticos e de telecomunicação, aparelhos de iluminação, equipamentos para reproduzir sons ou imagens, equipamento musical, ferramentas elétricas e eletrônicas, brinquedos e equipamentos de desporto e lazer, dispositivos médicos, instrumentos de monitorização e controle distribuidores automáticos, painéis fotovoltaicos.
5. Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)	Equipamento musical, ferramentas elétricas e eletrônicas, brinquedos e equipamentos de desporto e lazer, dispositivos médicos, instrumentos de monitorização e controle, aspiradores, aparelhos utilizados na costura, aparelhos de iluminação, microondas, equipamentos de ventilação, ferros de passar, torradeiras, cafeteiras elétricas, relógios máquinas de barbear elétricas, aparelhos de rádio, câmeras de vídeo.
6. Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)	Aparelhos Celulares; impressoras; telefones.

Quadro 2 - Classificação conforme Anexo três da Diretiva Europeia

Fonte: Adaptado de CE (2012).

A política Nacional de Resíduos Sólidos, é o regulador federativo para a gestão de resíduos sólidos, declara “produtos eletroeletrônicos”, mas não preconiza em seu texto tampouco no texto do seu decreto, um marco ou definição para estes produtos ou seus resíduos, nem define categoria (BRASIL, 2010). No contexto brasileiro, usualmente de forma simplificada foram criados quatro grupos: com as linhas branca, marrom, azul e verde (ABDI, 2013). No Edital nº 01/2013 do Ministério do Meio Ambiente, o chamamento para a elaboração de Acordo Setorial, definem-se como objeto da logística reversa os resíduos oriundos de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes com tensão nominal não superior a 220 volts (MMA, 2013). O Estudo de Viabilidade Técnico Econômico da Logística Reversa de REEE, onde os produtos são identificados conforme a sua linha,

indicado no Quadro 3, onde a classificação não abarca boa parte das categorias definidas na Directiva nº 19 de 2012 da Comunidade Europeia (CE, 2012, ABDI, 2013).

1.2 A geração mundial de REEE

Para Ilankoon *et al.* (2018) diferentes estudos mostram que existem variações nas projeções dos volumes dos REEE's, contudo este volume apresenta-se crescente a cada ano.

A Tabela 1 mostra os resultados dos estudos realizados nos anos de 2014 a 2016 em nossos continentes, uma iniciativa da Universidade das Nações Unidas (ONU).

	2014		2016		
	Total (Mt)	kg/hab	Total (Mt)	kg/hab	Taxa de REEE documentados (%)
Total	41,8	5,9	44,7	6,1	20
África	1,9	1,7	2,2	1,9	0
Américas	11,7	12,2	11,3	11,6	17
Asia	16	3,7	18,2	4,2	15
Europa	11,6	15,6	12,3	16,6	35
Oceania	0,6	15,2	0,7	17,3	6

Tabela 1 – Dada da geração global de REEE

Fonte: Adaptado de Baldé *et al.* (2016).

O estudo acima mostra que em 2016 foram produzidas 44,7 milhões de toneladas de REEE, e se comparado a 2014 houve um aumento de 2,9 milhões de toneladas. Muitos estudos citam uma taxa de crescimento na geração de REEE de aproximadamente de 3-5% por ano (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Conforme a Tabela 1 o levantamento de dados foi realizado por continente, se levarmos em conta o fator econômico podemos observar a disparidade na produção dos REEE. Em 2016 foram produzidos 11,33 Mt somente nas Américas, à América do Norte gerou 7 Mt, e 3 Mt na América do Sul e 1,2 Mt para a América Central (BALDÉ *et al.*, 2017). O continente que tem o fator econômico mais forte se destaca dos continentes com menor desenvolvimento Africano e Europa, ou entre as Américas do Norte e Central.

Os cinco países que mais geraram REEE (EUA, China, Japão, Alemanha e Índia) correspondem por 45% do total (ZHANG *et al.*, 2017). A relação entre o Produto Interno Bruto (PIB) se apresenta como o elo entre os países e a produção dos REEE (ZHANG *et al.*, 2017). Já Kumar *et al.* (2017) observou que os dados do estudo de Balde *et al.* (2017) mostram a relação direta do PIB e a população de cada país com a produção dos REEE.

O estudo mostra que não existe uma relação entre o tamanho da população com a produção dos REEE. Outro estudo apresenta uma relação direta entre a geração dos

REEE com o poder econômico da população, para cada um mil dólares gastos por ano, são gerados 0,5 kg/hab. De REEE por igual período (KUSCH e HILLS, 2017).

Outros vários fatores são apontados como responsáveis pela crescente geração dos REEE. Aumento da demanda de equipamentos eletrônicos (associada ao poder de compra) e a obsolescência destes, causada pela inovação são considerados os principais fatores (JAISWAL *et al.*, 2015). Araújo *et al.* (2012) mostra em seus estudos que uma variável importante na geração dos REEE é a vida útil dos equipamentos. Por outro lado, Echegaray (2016) mostra que a obsolescência subjetiva do consumidor, em descartar o equipamento para adquirir um novo com tecnologia mais atual, supera o motivo de falha técnica (vida útil) na geração dos REEE.

1.3 Geração no Brasil

No Brasil, a falta de credibilidade nas informações e dados imprecisos, dificultam estudos mais aprofundados nesta pauta. Os dados conflitantes dificultam a realização de estudos assertivos do ciclo de vida dos REEE e a não coerência dos agentes públicos envolvidos no ciclo de vida e a estrutura deficitária das coletas e reciclagens, dificultando ainda mais qualquer estudo na área (Araújo *et al.*, 2012). Dias *et al.* (2018) apontam que os governos locais não têm qualquer controle da geração de REEE. De fato, não há dados oficiais sobre a geração de REEE no Brasil (RODRIGUES; BOSCOV e GÜNTHER, 2020).

	Araújo <i>et al.</i> (2012)	InfoDev (The World Bank Group) (2012)	Balde <i>et al.</i> (2014)	Balde <i>et al.</i> (2017)
	2008	2011	2014	2016
Total (Mt)	0,71	1,29	1,41	1,53
kg/hab	3,77	6,5	7	7,4

Tabela 2 - Linha do tempo e estimativa de geração total dos REEE no Brasil

Fonte: Araújo *et al.*(2012); Balde (2016) e Forti *et al.*(2020).

Os levantamentos de informações sobre a geração do REEE, a nível nacional pode ser relevante para tomadas de decisões estratégicas dos governantes, criações de leis e normativas, porém, não possuem informação útil para planejamento local, pois não detalham os efeitos das diferenças sociais econômicas e da própria composição dos REEE (HUISMAN *et al.*, 2007). Para avaliar a viabilidade da coleta ou reciclagem, é necessário conhecer a dinâmica local da quantidade e da composição dos resíduos (WANG *et al.*, 2012).

Os resíduos gerados por equipamentos elétricos e eletrônicos são dispersivos, mas duas fontes principais podem ser identificadas, instituições e residências, e seus fluxos são diferentes. O primeiro inclui REEE de instituições públicas ou privadas, incluindo

empresas de todos os setores da economia, e o segundo inclui REEE gerado em casas (RODRIGUES; GUNTHER e BOSCOV, 2015).

Ongondo, Williams e Cherrett (2011) observam que devido aos diversos métodos utilizados, aos tipos de REEE abrangidos no estudo (sejam REEE armazenados ou apenas REEE descartados) e outros fatores existem grandes diferenças entre as estimativas de geração de resíduos fornecidas na literatura. Além disso, poucos países coletam dados e publicam estatísticas oficiais sobre REEE, estima-se que em 2016, cerca de 44,7 milhões de toneladas de REEE foram gerados globalmente, com média de 6,1kg por pessoa, em 2017 esse número vai ultrapassar 46 milhões de toneladas (BALDÉ *et al.*, 2017). Também é estimado que o Brasil produziu 1,5 milhões de toneladas de REEE em 2016, tornando-se o segundo maior produtor de REEE do continente americano depois dos Estados Unidos. As taxas de crescimento geradas pelos REEE, há maior convergência entre os autores.

1.4 Gestão De Resíduos Eletroeletrônicos Nas Instituições Públicas De Ensino Superior

Nas instituições de ensino superior, os problemas dos REEE residem principalmente na sua quantidade, diversidade e velocidade de geração. Portanto, a determinação das práticas de descarte ao final do ciclo de vida dos EEE é a base para a formulação de políticas de prevenção de impactos ambientais e à saúde (REIDLER, 2012). Silva (2013) acredita que a primeira experiência de gestão de resíduos e eficiência energética teve início nos Estados Unidos na década de 1980, e foi somente na reunião do Rio de Janeiro em 1992 que as IES se retiraram da fase de discussão do desenvolvimento sustentável. Como pioneira do conhecimento, a atuação das IES é um tema essencial (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF UNIVERSITIES, 1993). Entre as IES, a maior fonte de lixo eletrônico é a eletrônica de escritório (CHATTERJEE e KUMAN, 2009). A principal característica da gestão de resíduos de equipamentos de informática nas universidades públicas é o armazenamento de longo prazo de um grande número de equipamentos obsoletos, e a principal destinação ainda é o descarte ou doação. O estudo de caso realizado pelos autores Zhang *et al.* (2011) enfatizaram em três medidas para alcançar um sistema de resíduos institucional sustentável: mudanças na infraestrutura, prestação de serviços e, o mais importante, mudanças de comportamento. Em um estudo de Babbit (2009), os resultados mostram que, em uma universidade americana, a maior parte dos REEE é revendida para pessoas físicas ou pequenas empresas que reparam e revendem resíduos. O mesmo estudo concluiu que esta situação está a mudar à medida que as universidades respondem progressivamente às questões ambientais e procuram estabelecer parcerias com entidades recicladoras. Em um estudo conduzido na Noruega por Flygansaer *et al.* (2008) Constatou-se que a falta de coordenação entre o fluxo desses materiais aumentará os custos e reduzirá o nível de serviços de gerenciamento desses resíduos. O exemplo Brasileiro de sucesso na gestão dos REEE, e a Universidade Estadual de Campinas

(UBICAMP) e da Universidade de São Paulo (USP), cujo primeiro projeto criado em maio de 2008: Reciclagem/ Reutilizar computadores inutilizáveis ou obsoletos. Segundo Paes (2015), a universidade estima que 16.000 computadores sejam atualizados a uma taxa de 6% ao ano. A maioria dos itens inúteis é tratada como lixo. Foi então estabelecida uma parceria entre a Coordenação de Informática-CTIC, o Centro de Manutenção de Computadores-CEMEC e a Administração Geral-DGA, com o objetivo de aumentar a vida útil dos equipamentos, possibilitando o uso contínuo das unidades nas universidades, e a doações para instituições externas. Para tanto, foram estudados os procedimentos internos, desde a disponibilização de equipamentos da unidade ou agência da UNICAMP, sua movimentação interna até o destino final. No segundo caso, na USP, foi criado em 2009 o Centro de Tratamento e Reutilização de Resíduos de Computadores (CEDIR).

2 | METODOLOGIA

2.1 Local de estudo

A Autarquia Educacional do Belo Jardim – AEB mantenedora da Faculdade do Belo Jardim - FBJ, é uma Instituição de Ensino Superior (IES), de caráter público municipal, localizada no Agreste Meridional de Pernambuco, fundada em meados de 1975, logo tornou-se referência em ensino superior nesta região. Atualmente conta com 757 discentes, 96 docentes, 54 no administrativo e técnicos, dispendo de 12 cursos entre Bacharelado e Licenciaturas, 09 cursos de pós-graduação. A coleta de dados foi realizada com os gestores de cada setor alocados dentro da IES, pois o contato é mais frequente com os EEE.

Este trabalho buscou auxiliar em uma formulação para futura diretriz de um Plano de Logística Sustentável e Destinação correta dos REEE dentro da IES. Trata-se de um estudo descritivo, exploratório que aproximou-se do estudo de Babbit (2009). A relativa disponibilidade de informações, análise do fluxo e da vida útil envolvendo o levantamento de informações quantitativas e qualitativas através do sistema planilhas de controles, informações coletadas dentro da IES, pesquisa bibliográfica. Esse método foi escolhido porque entende que é o melhor construir e desenvolver uma compreensão dos processos no plano de manejo atual da IES.

A partir das informações coletadas entre abril de 2021 até novembro 2021 foi percebido que a IES trabalha com um Sistema de Patrimônio e Tombamento (SPT), e com a Central de Processamento de Dados (CPD) onde são realizadas as configurações e triagem dos REEE. Este período foi escolhido, pois através da coleta das informações *in loco* foi possível a realização da amostragem eficiente e confiável, onde foi capaz de gerar um grande número de registros, refletindo pelo menos o ciclo de vida útil.

2.2 Coleta de dados

Para o auxílio na elaboração do procedimento operacional padrão para todas as

etapas do ciclo de vida dos EEE, o diagnóstico foi realizado em duas etapas. 1) A primeira etapa foi aplicada um questionário aos responsáveis por cada setor da AEB-FBJ; 2) A segunda etapa foi realizada através de contagem direta no campus da AEB-FBJ, onde foram contados cada EEE das áreas administrativa e pedagógica tais como salas aulas, laboratórios e biblioteca.

2.3 Método de estimativa de geração de REEE

Esse método é adequado para países com limitações na obtenção de outros dados necessários para estimativa, como quantidades de vendas e estoques de produtos. Araújo (2015) utilizou a aproximação de Robinson para quantificar REEE de fluxos domésticos na Ilha de Fernando de Noronha - PE. Os autores Araujo *et al.* (2017); Alavi *et al.* (2015) consideram este método muito atraente e direto, pois requer dados prontamente disponíveis, como: peso do EEE [W], número do EEE [N] e tempo de vida média útil do EEE [L] de A geração de REEE, em kg.ano⁻¹, é dada pela Equação (1) abaixo:

$$E = \frac{WN}{L} \quad (1)$$

O número de unidades EEE [N] consiste em duas partes: equipamento em uso [O] e equipamento em armazenamento [S]. Portanto, a Equação (1) acima é reescrita conforme mostrado na Equação (2) abaixo:

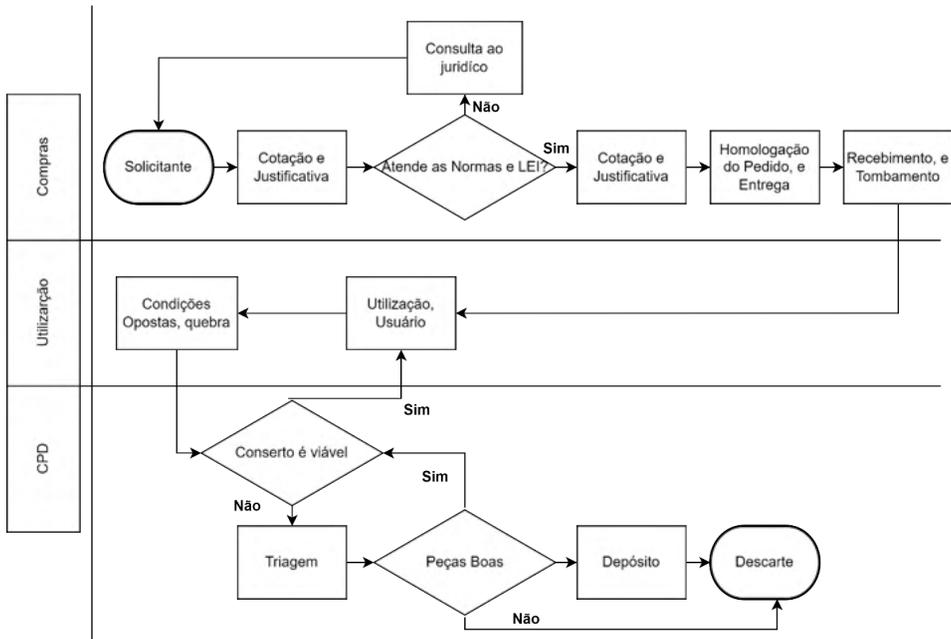
$$E = \frac{W(O+S)}{L} \quad (2)$$

O, S e L podem ser facilmente obtidas por meio de questionários, enquanto para os valores de W podem ser utilizadas informações na literatura ou na ficha técnica do produto.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Fluxo de aquisição de produtos e geração de resíduos

Por meio das informações obtidas, foi possível a construção do fluxo do processo demonstrada através do Fluxograma 1. Assim permite a visualização do caminho percorrido dos EEE desde a compra até o descarte. Este fluxo tenta ser o mais fidedigno, apresentando-se em três etapas: Aquisição, Utilização e a CPD.



Fluxograma 1 - Fluxo do processo de aquisição dos EEE

Fonte: Autores (2022).

3.2 Quantidades e Distribuições

Conforme mostrado na Figura 1, é possível observar que os bens provêm basicamente de dois departamentos: o Administrativo (toda gestão, e os serviços ao público interno e externo) e o Pedagógico (toda monitoria dos cursos).

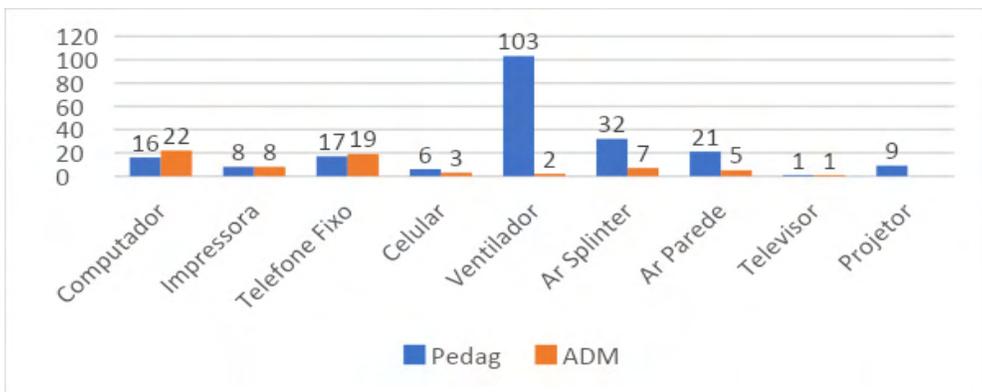


Figura 1 - Distribuição dos EEE dentro da IES

Fonte: Autores (2022).

Já a Figura 2 apresenta o quadro por tipo de EEE, onde é possível visualizar com maior clareza quais são as quantidades.

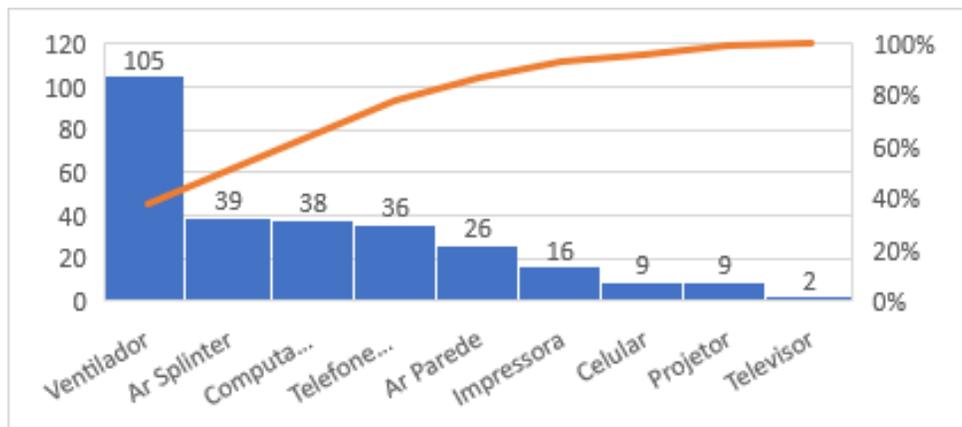


Figura 2 - Quantidade por tipo de EEE

Fonte: Autores (2022).

Na Figura 3 todos os equipamentos foram divididos e classificados em dois grupos, o primeiro grupo dos Climatizadores, que são compostos por todos dos ventiladores e Ar-condicionados da IES, a manutenção e peças tem valor acessível e de fácil aquisição. O segundo grupo reúne todos os computadores, impressoras, celulares, projetores e televisores, onde a manutenção é qualificada e restrita e as peças possuem um custo elevado.

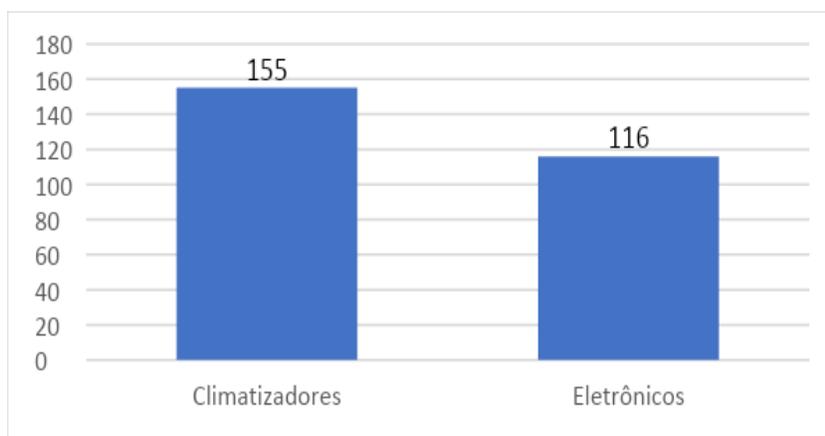


Figura 3 - Dois grandes grupos

Fonte: Autores (2022).

3.3 Diagnóstico de vida útil

Uma vez determinada, a importância deste indicador, pode não apenas determinar a depreciação desses ativos, mas também determinar o ciclo de vida e ajudar no planejamento do gerenciamento dos equipamentos. Atualmente, a AEB/ FBJ não utiliza indicadores de vida útil.

Equipamento	Quantidade	Peso (kg)	Vida útil (ano)	Geração de REEE (kg/ano)
Ar – janela	25	36,1	15	60,17
Ar – Sprinter	39	13,5	15	35,10
Televisor 42”	2	17	6	5,67
Ventilador	95	6,75	5	128,25
Datashow	10	2,4	6	4,00
Computador	40	22	4,5	195,56
Telefone	40	0,37	5	2,96
Impressora	23	3,9	3	29,90
Celular	12	0,15	3	0,60
Roteador	17	0,42	3	2,38
Total de EEE	303	-	-	464,58

Tabela 3 - Vida útil e peso dos EEE.

Fonte: Autores (2022).

Por meio da análise dos dados, conforme o período selecionado, é possível notar a real percepção da vida útil de cada equipamento através da geração de REEE $\text{kg}\cdot\text{ano}^{-1}$. Cujas estimativas de quantos serão descartados, apresentada na Tabela 3. Robinson (2009) afirma, que o conceito de ciclo de vida adotado tem interferido amplamente na forma como os dados são interpretados. Embora a vida útil média de um EEE seja de 4 anos e meio. O tempo de espera entre o depósito e o descarte não foi levado em consideração.

4 | CONCLUSÕES

Por meio das informações obtidas com os gestores dos setores, foi possível montar o fluxograma da vida útil dos EEE da instituição com o objetivo de contribuir para o auxílio da gestão da IES. Contudo, ainda é difícil chegar a boas práticas de gestão e principalmente em novas medidas sustentáveis, uma vez que o consenso sobre boas práticas de logística reversa ainda não foram alcançadas por meio dos acordos setoriais. Nesse cenário, as IES torna-se um ambiente fértil para implementação de práticas e modelo para outras organizações, através de desdobramentos por meio de acordos setoriais. Através da consulta bibliográfica é perceptível que esta questão não se trata de uma exclusiva das IES, mas também das residências, indústrias, distribuidores, comerciantes, órgãos públicos que

manifestam as mesmas dificuldades. Além disso, a disponibilidade aliada a confiabilidade dos dados existentes no ambiente das IES, permitem pesquisas e estudos nesta área. Através das análises do ciclo de vida útil e por meio das estimativas de geração de resíduos eletrônicos em geral, são possíveis determinar ações que visam as práticas sustentáveis em relação às leis já existentes, nos diálogos nacionais por meio de acordos setoriais, e alternativas como “arrendamento”, compras compartilhadas e medidas de TI verde, como soluções para a minimização dos problemas ambientais.

REFERÊNCIAS

ABDI. Gestão de REEE no Brasil: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Abdi, 2013.

ALAVI, N., SHIRMARDI, M., BABAEI, A., TAKDASTAN, A., & BAGHERI, N. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) estimation: A case study of Ahvaz City, Iran. *Journal of the Air and Waste Management Association*, v. 65, n. 3, p. 298–305, 2015.

ARAÚJO, M. G., MAGRINI, A., MAHLER, C. F., & BILITEWSKI, B. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment 81 in Brazil. *Waste Management*, v. 32, n. 2, p. 335–342, 2012.

BABBITT, C. Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management: A Case Study of Personal Computers in Higher Education. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 10, p. 5106-5012, 2009.

BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. The Global E-waste monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos>>. Acesso em 15 de novembro de 2021

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Plano de Logística Sustentável (PLS). Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidadesocioambiental/a3p/plano-de-logistica-sustentavel-pls>>. Acesso em 15 de novembro de 2021.

CE. Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de janeiro de 2003 relativas aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) 2003.

CE. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.

CHATTERJEE, S.; KUMAN, K. Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors. *International Journal of Physical Sciences*, v.4, n.13, p.893-905, 2009.

CUCCHIELLA, Federica et al. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and 95 future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 51, p. 263–272, 2015.

DIAS, Pablo et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 174, p. 7–16, 2018.

ECHEGARAY, F. Consumers' reactions to product obsolescence in emerging markets: the case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 134, p. 191–203, 2016.

FLYGANSVAER, B. M., et al. Coordinated action in reverse distribution systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 38, Iss: 1, p. 5-20.

HONDA, A.N. O ecodesing por meio da Avaliação do Ciclo de Vida no Processo de Desenvolvimento de Produto: Uma proposta baseada em estudo de caso. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014, 165p.

HUISMAN, J. et al. Countering WEEE Illegal Trade (CWIT) Summary report Market Assessment, Legal Analysis Crime Analysis and Recommendations Roadmap Lyon France. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281344533_Countering_WEEE_Illegal_Trade_CWIT_Summary_Report_Market_Assessment_Legal_Analysis_Crime_Analysis_and_Recom_mendations_Roadmap>.

ILANKOON, I. M. S. K. et al. E-wast in the international context – a review of trade flows, regulations, hazard, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste management*, [s. l.], v. 82, p. 258-275, 2018.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF UNIVERSITIES. Education for sustainable development. 1993. Disponível em: <<http://portal.unesco.org/education>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2021

JAISWAL, A. et al. Go green with WEEE Eco friendly approach for handling e waste *Procedia Computer Science*, [s. l.], v. 46, n. Icict 2014, p. 1317–1324, 2015.

KUSCH, S.; HILLS, C. D. The Link between e-Waste and GDP-New Insights from Data from the Pan-European Region. *Resources*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 15, 2017

KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation & Recycling*, [s. l.], v. 122, p. 32–42, 2017.

MINÉU, H.F. O custo de oportunidade do aterro sanitário de Ituiutaba, MG: componentes e repercussão econômica em longo prazo. Tese de doutorado da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

MMA. Edital nº 01/2013. Chamamento para a Elaboração de Acordo Setorial para a Implementação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes. Brasil 2013.

OLIVEIRA, U. R. Contribuições para a Melhoria da Gestão de Resíduos de Eletroeletrônicos no Brasil, no Contexto da Sustentabilidade Ambiental. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2016.

ONGONDO, F. O., WILLIAMS, I. D, CHERRETT, T. J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, v. 31. n. 4, p. 714-730, 2011.

PAES, C.E. Logística Reversa e Gestão de Resíduos de Equipamentos de Informática na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2015, 158p.

REIDLER, N.M.V.L. Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos em instituições de ensino superior: um estudo de caso e diretrizes para gestão integrada. São Paulo, 2012, 210p.

ROBINSON, B. H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 2, p. 183–191, 2009.

RODRIGUES, A. C.; GUNTHER, W. M. R.; BOSCOV, M. E. G. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 437–447, 2015.

RODRIGUES, A. C.; BOSCOV, M. E. G.; GÜNTHER, W. M. R. Domestic flow of e-waste in São Paulo, Brazil: Characterization to support public policies. *Waste Management*, [s. l.], v. 102, p. 474–485, 2020.

SILVA, B.V. Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, 149p.

WANG, F. et al. The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. *Waste Management*, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 2134–2146, 2012.

ZHANG, N.I.D. et al. Greening academia: Developing sustainable waste management at Higher Education Institutions. *Waste Management*, v. 31, ed. 7, p.1606-1616, 2011.

ZHANG, S. et al. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE *Waste Management*, [s. l.], v. 65, p. 113-127,2017.

SOBRE O ORGANIZADOR

ARMANDO DIAS DUARTE - Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pernambuco (2016), com um período de três meses, através de um intercâmbio realizado na cidade de Hof – Alemanha, desenvolvendo trabalhos de gestão de resíduos sólidos, em conjunto com a Educação Ambiental. Em 2018 concluiu o mestrado acadêmico em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco com ênfase em tecnologia ambiental. Atualmente (2019) realiza o doutorado na área de otimização em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência nas áreas da Educação Ambiental, Análise de Ciclo de Vida, Gestão Ambiental, Recursos Hídricos e Sustentabilidade. Atua com consultorias empresariais e acadêmicas.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aditivos 1, 2, 3

Altas temperaturas 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11

B

Barragens 34, 35

Bending theory 22, 25, 27

C

Carbono 13, 14, 15

Combustível fóssil 15

Concreto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

D

Dimensões do reservatório 35

Domes 22, 25, 28, 31, 32, 33

E

Economia 13, 14, 53

Equipamentos 5, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 61

F

Finite element method 22, 25, 34, 36, 40

G

Gás natural 13, 15, 16, 17, 19, 21

Gestão de resíduos 47, 48, 50, 53, 60, 62

I

Informática 47, 49, 53, 54, 60

Interação fluido-estrutura 34, 35, 45

L

Logística sustentável 47, 59

M

Membrane theory 22, 25, 26, 27, 33

Metano 15

Método dos elementos finitos 23, 33, 35

P

Pressão 14, 15, 50

R

Resistências 1, 2, 4, 6, 7, 10, 11

Roman pantheon 22, 24, 25, 32

T

Temperatura 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 17, 50

ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e
tecnológicas e aspectos ambientais



 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br


Ano 2022

ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e
tecnológicas e aspectos ambientais



 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br


Ano 2022