



Engenharia Civil UM

desde 1995



Os Editores:

José Barroso de Aguiar

Sandra Cunha

Número:

62

2022

e-ISSN 2795-5982
ISSN 0873-1152



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil



Editores

José Luís Barroso de Aguiar, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Sandra Cunha, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Conselho Editorial

Aires Camões, Universidade do Minho, Portugal

Álvaro Cunha, Universidade do Porto, Portugal

Anabela Paiva, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

António Tadeu, Universidade de Coimbra, Portugal

António Correia, Universidade do Minho, Portugal

António Baptista, Oregon Health & Science University, USA

António Pais Antunes, Universidade de Coimbra, Portugal

António Madaleno, Universidade Agostinho Neto, Angola

António Matos, Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique

Antônio Silva, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Carlito Junior, Universidade de São Paulo, Brasil

Cristina Alvarez, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Daniel Oliveira, Universidade do Minho, Portugal

Eduardo Julio, Universidade de Lisboa, Portugal

Eliane Viviani, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Enio Figueiredo, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Fernando Branco, Universidade de Lisboa, Portugal

Fernando Veloso Gomes, Universidade do Porto, Portugal

Fernando Pacheco Torgal, Universidade do Minho, Portugal

Flávio Silva, Pontfícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Flávio Cunto, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Francisco Martins, Universidade do Minho, Portugal

Glicério Trichês, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Guilherme Parsekian, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Guillermo Etse, National University of Tucumán, Argentina

Gustavo Ayala, National Autonomous University of México, México

Hélder Sousa, Universidade do Minho, Portugal

Holmer Savastano Jr, Universidade de São Paulo, Brasil

Ignacio Perez, Universidad de La Coruña, Espanha

Jaume Avellaneda, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

Joan Casas, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

João Castro Gomes, Universidade da Beira Interior, Portugal

Joaquim Barros, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Brito, Universidade de Lisboa, Portugal

Jorge Pais, Universidade do Minho, Portugal

Jorge Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Jose Adam, Universitat Politècnica de València, Espanha

José Teixeira, Universidade do Minho, Portugal

José Vieira, Universidade do Minho, Portugal

José Valente, Universidade do Porto, Portugal

José Marques, Universidade de Coimbra, Portugal

José Matos, Universidade de Lisboa, Portugal

José Mendes, Universidade do Minho, Portugal

José Catarino, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

José Luís Pinho, Universidade do Minho, Portugal

Juan Marriaga, Universidad Nacional de Colombia, Colômbia

Khosrow Ghavami, Pontfícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Lígia Silva, Universidade do Minho, Portugal

Luis Loria-Salazar, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Luís Lopes, Universidade do Minho, Portugal

Luís Simões da Silva, Universidade de Coimbra, Portugal

Luís Picado Santos, Universidade de Lisboa, Portugal

Maisa Tobias, Universidade Federal do Pará, Brasil

Manuel Matos Fernandes, Universidade do Porto, Portugal
Marcial Blondet, Pontificia Universidad Católica del Perú, Peru
Márcio Farias, Universidade de Brasília, Brasil
Maria Almeida, Universidade do Minho, Portugal
Maria Bortolucci, Universidade Federal de São Carlos, Brasil
Maria Antunes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal
Maria Jacques, Universidade de Brasília, Brasil
Marta Pagola, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Miguel Angel del Val, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha
Naim Haie, Universidade do Minho, Portugal
Newsha Ajami, University of Stanford, USA
Normando Perazzo, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Paulo Lourenço, Universidade do Minho, Portugal
Paulo Vila Real, Universidade de Aveiro, Portugal
Resende Nsambu, Universidade Agostinho Neto, Angola
Ricardo Fakury, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
Rodrigo Alvarado, Universidad del Bío-Bío, Chile
Rui Ramos, Universidade do Minho, Portugal
Said Jalali, Universidade do Minho, Portugal
Tan Yigitcanlar, University of Queensland, Australia
Teresa Barbosa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
Vasco Freitas, Universidade do Porto, Portugal
Vladimir Benincasa, Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Produção Editorial

Assistente Editorial: Juliana Araújo Alves, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal
Apoio Editorial: Vítor Costa, Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Portugal

Design da Capa: Vítor Costa

URL: <https://revistas.uminho.pt/>

E-mail: revistaengenhariacivil@civil.uminho.pt

Centro de Território, Ambiente e Construção
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães - Portugal

© Autores / Centro de Território, Ambiente e Construção



Este trabalho está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

e-ISSN: 2795-5982 | **ISSN:** 0873-1152

A Engenharia Civil UM é financiada por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto UIDB/04047/2020 (financiamento base) e UIDP/04047/2020 (financiamento programático).



Artigos publicados

Avaliação da Eficiência do Transporte Público de Uberaba – MG utilizando
Análise Envoltória de Dados (DEA)

A.L.B. Machado, V.A. Falcão, F.C. Camioto

6

Reabilitação energética da envolvente de edifícios: desempenho económico,
energético e ambiental de ETICS com ICB ou EPS

J. Silvestre, A. Castelo, J. Silva, J. Brito, M. Pinheiro

18

Aplicação do segundo teorema de Castigliano na solução de estruturas
hiperestáticas

A.M. Ilkiu

33

Análise das teorias de viga de Bernoulli e Timoshenko para vigas em diferentes
condições de contorno

T.C. Silva

45

Avaliação da variabilidade das propriedades dos agregados reciclados de RCD

V. Martins Junior, N.C.S. Forti, A.E.P.G. Ávila, L.L. Pimental

55

Avaliação da Eficiência do Transporte Público de Uberaba – MG utilizando Análise Envoltória de Dados (DEA)

Evaluation of Public Transportation Efficiency in Uberaba - MG using Data Envelopment Analysis (DEA)

A.L.B. Machado^{a†}, V.A. Falcão^a, F.C. Camioto^a

^a *Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Departamento de Engenharia Civil, Uberaba, Brasil*

[†] *Autor para correspondência: analaurabmachado@outlook.com*

RESUMO

No Brasil, quase 25% da população utiliza o transporte coletivo por ônibus, sendo, desta forma, um modal imprescindível para a mobilidade urbana. Por outro lado, a eficiência de uma empresa é algo que precisa ser buscado em função da alta competitividade do mercado, e, quando se trata de empresas de transporte público e da pequena margem com que trabalham, é vital que sejam eficientes. O presente estudo objetiva avaliar a eficiência do transporte público coletivo na cidade de Uberaba – MG através da Análise Envoltória de Dados (DEA) e seu modelo VRS (Variable Return Scale). A escolha do método levou em conta os resultados satisfatórios encontrados em pesquisas com outros modais, como no transporte aéreo, somado ao número, não tão expressivo, de pesquisas relacionadas ao transporte coletivo. Foram coletados dados de input e output referentes ao ano de 2015 de 40 linhas de ônibus da cidade de Uberaba, sendo elas geridas por duas diferentes empresas, Piracicabana e Líder, os quais foram processados pelo software SIAD. Constatou-se que apenas 7 linhas atingiram a eficiência de 100%, e buscou-se identificar possíveis alternativas e/ou soluções a curto prazo que pudessem levar as 33 DMUs restantes ao score máximo.

ABSTRACT

In Brazil, almost 25% of the population uses public transportation by bus, being, then, an essential modal for urban mobility. On the other hand, the efficiency of a company is something that needs to be sought due to the high competitiveness of the market, and when it comes to public transportation companies and the small margin they work with, it is vital that they are efficient. The present study aims to evaluate the efficiency of public transport in the city of Uberaba, Minas Gerais State, Brazil, through Data Envelopment Analysis (DEA) and its VRS (Variable Return Scale) model. The choice of the method considered the satisfactory results found in research with other modals, such as air transportation, in addition to the not so expressive number of research related to public transportation. Input and output data for the 2015 year were collected from 40 bus lines in the city of Uberaba, managed by two different companies, Piracicabana and Líder, which were processed by SIAD software. It was found that only 7 lines reached 100% efficiency, and an attempted was made to identify possible alternatives and/or short-term solutions that could take the remaining 33 DMUs (Decision Make Units) to the maximum score.

Palavras-chave:

Transporte público;
Análise Envoltória
de Dados; Uberaba,
BCC.

Keywords:

Public
Transportation; Data
Envelopment
Analysis; Uberaba;
BCC.

1. Introdução

Desde a popularização da indústria automobilística no Brasil, cresce exponencialmente o número de automóveis nas ruas e avenidas do País, de forma a exaurir a infraestrutura das cidades, haja visto o crescimento contínuo e crescente dos municípios, e, por outro lado, certa estagnação do crescimento de vias e modais, o que tem gerado assustadores índices de poluição, congestionamento de vias, e acidentes frequentes.

Neste cenário, descobre-se indispensável a implantação e melhoria de transportes coletivos, os quais sejam eficientes no que tange a recursos dispendidos: pessoas empregadas, frota; e resultados gerados: pessoas transportadas, em uma generalização simples.

Para [1], a mobilidade pode ser definida como um “atributo relacionado aos deslocamentos realizados por indivíduos nas suas atividades de estudo, trabalho, lazer e outras.” Neste contexto, o transporte público coletivo é mais uma vez destacado, uma vez que, segundo indicadores da [2], aproximadamente um quarto da população brasileira (24%) utiliza deste modal como principal meio de locomoção para suas atividades diárias, o que pode estar diretamente ligado a fatores externos como a renda dos usuários e o porte das cidades, e internos, como disponibilidade de linhas e horários, tarifa razoável e acessível e tempo de percurso.

Justifica-se assim o feito do trabalho em questão, no fato de que a eficiência dos meios de transportes, salvo as particularidades das variáveis consideradas, impulsiona a racionalização dos recursos dispendidos, permitindo que ações mais assertivas sejam tomadas no que tange ao planejamento e logística da rede de transportes.

Desta forma, avaliando-se a eficiência, diretamente ligada à produtividade, é possível que ineficiências sejam detectadas, buscando-se assim que falhas sejam sanadas através de um estudo das linhas consideradas benchmarking (dotadas das melhores práticas) do sistema.

Ademais, nota-se quão inexplorado é o estudo da eficiência de sistemas de transporte, o que acaba por evidenciar uma falha entre a disposição de recursos e o acompanhamento real dos resultados.

O presente estudo foi realizado na cidade de Uberaba – Minas Gerais, localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro, a 481 km da capital do Estado, a aproximadamente 500 km de grandes centros econômicos do País, tais como São Paulo e Brasília.

A boa funcionalidade do método é perceptível observando-se trabalhos realizados anteriormente na área, como a análise do desempenho de empresas brasileiras e européias realizado por [3]. O mesmo constatou, como principal resultado, que um maior número de passageiros transportados por veículo, somado a um custo operacional por km menor, são fatores determinantes para uma alta eficiência.

O estudo objetiva, em uma análise macro, avaliar a eficiência das principais linhas de ônibus de transporte público de Uberaba – MG, utilizando a técnica da Análise Envoltória de Dados (DEA). E, em uma análise micro, estabelecer referenciais teóricos de forma a compreender o assunto; identificar e coletar variáveis de inputs e outputs do transporte coletivo de Uberaba (MG) por meio de revisão e consulta aos órgãos gestores; aplicar o modelo DEA VRS e avaliar os resultados.

2. Revisão da literatura

2.1. Transporte Público Coletivo - Ônibus

Segundo [4], o transporte público coletivo está diretamente ligado à fixação e ocupação de diferentes áreas no desenho urbano, e a consequente mobilidade e acessibilidade da população, uma vez que permite aos usuários o acesso a bairros e/ou locais afastados dos grandes centros, e, de forma análoga, permite que a população de tais áreas periféricas acesse regiões centrais de forma menos exclusiva, permitindo uma ocupação mais igualitária do perímetro urbano.

Desta forma, predomina no que tange a número de pessoas atingidas, uma vez que serve a um grande número de pessoas simultaneamente, aproximadamente 70 passageiros [5], permite pontos de subida/descida durante o percurso, apresenta custos de implantação relativamente

baixos, se comparado a implantação de uma linha férrea ou ao transporte aeroviário, e possibilita incrementos na demanda, até que se atinja o limite de densidade de tráfego [4].

2.2. *Análise Envoltória de Dados - DEA*

A Análise Envoltória de Dados, DEA, do inglês ‘Data Envelopment Analysis’, desenvolvida por Abraham Charnes, William Cooper e Edward Rhodes, em 1978, mede a eficiência de unidades produtivas em situações nas quais o aspecto financeiro não seja o único a se considerar. Desta forma, busca um monitoramento da produtividade, sendo possível a comparação entre diferentes fatores, em diferentes unidades de medida [6].

O conceito de máxima eficiência, pelo método abordado, diz respeito à máxima saída/produção/lucro (outputs) observada, mantendo-se as mesmas entradas/recursos dispendidos (inputs), ou ainda, mantendo-se as saídas (outputs), o valor mínimo de entradas (inputs) necessário. Sendo assim, trata-se da observação, dentre as unidades produtivas, aqui chamadas DMUs (Decision Make Units), aquela mais eficiente, mais produtiva. Entenda-se produtividade como a razão entre o que foi produzido e o que foi dispendido para tal [7].

Desta forma, utilizando-se de programação linear (resolução de problemas de otimização, nos quais todas as funções e restrições são lineares), os resultados da pesquisa DEA são apresentados sob a forma de um gráfico em que é estabelecida uma ‘fronteira de eficiência’, segundo o conceito de Pareto-Koopmans, em que constam as máximas do que foi produzido para cada nível [7].

2.2.1. *DEA Aplicado ao Transporte Público*

Azambuja [8] analisou a eficiência do transporte público urbano, ônibus, em 76 municípios brasileiros, dividindo-os em 3 grupos de acordo com a quantidade de habitantes. Os dados foram provenientes do Anuário da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), e se seguem: número médio de passageiros transportados/ano, quilômetros em serviço/ano, como outputs, como inputs: número total de ônibus, número total de linhas e número total de funcionários (motoristas, cobradores, despachantes/fiscais, manutenção, pessoal na administração das operadoras, pessoal na gestão, outros). A autora concluiu como satisfatória a análise pelo método DEA, e constatou que o tamanho dos municípios não interfere em sua eficiência, e sugeriu que órgãos gestores também a façam, uma vez que permite um benchmarking de informações, e a possibilidade de crescimento de DMUs vistas ineficientes.

Sampaio et al. [3] analisaram a eficiência do transporte público nordestino e estabeleceram uma comparação com demais sistemas brasileiros e europeus através do DEA, utilizando-se de 1 output e 3 inputs com retorno variável de escala. Assim, atribuíram como insumos (inputs): custo operacional do sistema, número total de veículos e número de empregados. E como produto (output): número de passageiros transportados. Os resultados mostraram uma eficiência de 100% em 31% dos sistemas brasileiros analisados, e em 50% dos sistemas nordestinos analisados. Já a Europa apresentou 62% de eficiência máxima. Os principais fatores apontados como predominantes entre as DMUs eficientes indicaram: maior número de passageiros transportados por veículo; custo operacional por km em serviço menor; maior extensão das linhas em relação à área coberta; número de passageiros transportados, salvas as proporções do porte das cidades; e frota mais jovem.

Santos et al. [9] utilizaram DEA na análise do desempenho de 31 empresas de transporte rodoviário interestadual de passageiros, a partir de dados do Anuário Estatístico da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT). Como inputs constam: número total de veículos; número de motoristas; distância percorrida e idade média da frota. Como outputs: número de passageiros.km transportados e número de passageiros transportados. Do total de empresas analisadas, somente 4 foram consideradas eficientes segundo o modelo CCR, e 11, pelo modelo BCC.

Sonza et al. [10] mediram as eficiências (operacional, em vendas e global) do transporte público urbano na cidade de Santa Maria (RS). As variáveis consideradas no estudo da eficiência

operacional como inputs foram as despesas fixas com veículos, quilômetros rodados, consumo e gastos com combustível. E, como outputs, número de passageiros e o número de pessoas por quilômetro. Como alternativa e benchmarking para as empresas consideradas ineficientes, pôde-se notar: excesso de consumo de combustível, podendo ser fruto de rotas não otimizadas; fornecedor acima do preço de mercado; excesso de consumo de forma geral; gastos exacerbados com despesas fixas, fazendo-se necessária uma renovação da frota ou revisão dos custos do veículo; há DMUs em que faz-se necessário aumentar o número de passageiros [10].

Viton [11] analisou empresas americanas de transporte público coletivo – ônibus, públicas e privadas. Adotou como inputs: velocidade média, idade média da frota, distância percorrida, galões de combustível consumidos pela frota, mão de obra (manutenção, transporte, administrativa) e custos gerais (serviços, seguros e demais). E como outputs: veículos/distância percorrida e passageiros transportados. Assim, constatou que, das 217 empresas analisadas, 80% foram consideradas eficientes, e, dentre as 20% consideradas ineficientes, de 1% a 1,5% foram consideradas extremamente ineficientes.

Hussain *et al.* [12] analisaram a eficiência técnica de 46 empresas de transporte público na Malásia. Foram adotados número de empregados e custos com mão-de-obra como inputs, e, como outputs: quantidade total de serviço oferecido (produção total) e receita. Assim, constataram que empresas de maior porte, com receita maior, apresentam maior eficiência.

No Canadá, 30 sistemas de transporte público de diferentes municípios foram analisados por [13] através do método DEA e foram utilizados como inputs: número de ônibus da frota, litros de combustível utilizados (diesel, gasolina) e o total de horas pagas para funcionários. Como output: serviço total oferecido aos passageiros, como a quilometragem percorrida. O autor concluiu que a eficiência técnica média dos sistemas canadenses é 78%, o que implica em uma ineficiência de 22%. Concluiu também que a maioria deles (56%) apresentaram retornos de escala crescentes, enquanto que, 29%, apresentaram retornos decrescentes.

Rubem, Beltrán e Mello [14] analisaram a eficiência de 69 empresas de transporte aéreo brasileiras entre os anos de 2007 e 2010 segundo o modelo SBM-NDEA (Network Data Envelopment Analysis). O modelo considera como inputs: custo de combustível, pessoal total (total de pessoas empregadas na empresa) e capacidade da frota (peso máximo de decolagem de todas as aeronaves pertencentes à frota no ano em questão), como outputs intermediários: assentos.km e toneladas.km oferecidas, e ainda, como outputs finais: passageiros.km transportados e toneladas.km transportadas. Dentre as 69 DMUs, 9 foram consideradas globalmente eficientes, ou seja, eficiente em todos os estágios de análise. 3 delas referem-se ao ano de 2010 (Rico, Sol e TAM), 3 a 2009 (Abaeté, Puma e Sol), 2 a 2008 (Abaeté e TAM) e somente 1 a 2007 (Mega).

3. Metodologia

A primeira etapa restringiu-se à escolha do tema, fundamentada na definição da grande área de estudo para posterior detalhamento dos objetivos gerais e específicos. Definido isto, fez-se imprescindível o estabelecimento de referenciais teóricos que, além de embasar o tema proposto com definições dos fatores que interferiam diretamente na problemática, nortearam o estudo através de trabalhos previamente realizados em outros cenários do transporte público.

Seguiu-se a identificação e coleta das variáveis de inputs e outputs. Foi possível obter um cenário de eficiência do ano de 2015 segundo dois inputs e dois outputs, os quais se seguem: inputs: frota (nº de veículos) e quilômetros percorridos pelos ônibus da linha durante o ano (km); outputs: nº de passageiros transportados e receita arrecadada (R\$), apresentados no Quadro 1.

De posse das variáveis, foi definido o modelo DEA BCC orientado a outputs como o mais apropriado e fiel à realidade, hajam vistos os trabalhos já realizados na área. Assim, o software utilizado foi o Sistema Integrado de Apoio à Decisão (SIAD), sob domínio da Universidade Federal Fluminense (UFF) para o processamento dos dados.

O equipamento utilizado para o funcionamento do software foi um HP Intel Core i3, 4,00 GB de memória RAM, sistema operacional 64 bits, processador com base em x64.

3.1. Modelo de DEA - BCC

O modelo BCC ou VRS (Variable Return Scale), introduzido por Banker, Charnes e Cooper, em 1984, trabalha com retornos variáveis de escala. Isto significa que, com uma variação de x vezes nos inputs, não necessariamente os outputs serão acrescidos em x vezes, eles poderão ser acrescidos (retornos crescentes) ou diminuídos (retornos decrescentes) em valor maior que x [7].

O modelo é apresentado graficamente sob a forma de uma curva convexa.

4. Resultados e discussão

Já na avaliação dos resultados, de posse das informações geradas pelo modelo, foram analisadas as DMUs individualmente, destacando-se aquelas consideradas eficientes, e, principalmente, as consideradas ineficientes, de forma a levantar hipóteses e traçar meios de levá-las à eficiência.

Na Tabela 1, as variáveis consideradas no estudo.

Tabela 1 - Dados de inputs e outputs das linhas consideradas referentes ao ano de 2015.

Linhas	Inputs		Outputs	
	Frota (dias úteis)	Distância Percorrida (km/ano)	Passageiros Transportados (n°)	Receita (R\$)
10	3	295.738,80	495.110	R\$ 1.106.048,40
11	3	221.895,00	405.045	R\$ 963.797,80
12	1	94.932,00	40.068	R\$ 123.919,06
13	5	80.486,40	95.532	R\$ 211.766,35
14	8	577.829,40	1.704.497	R\$ 3.543.992,40
15	2	146.716,80	90.214	R\$ 212.392,05
16	1	94.665,60	49.241	R\$ 148.298,93
17	1	74.012,40	97.111	R\$ 190.109,30
18	3	191.797,20	427.817	R\$ 909.447,25
19	1	107.368,80	88.797	R\$ 230.132,40
20	1	29.685,60	27.288	R\$ 59.092,15
21	5	446.350,80	892.313	R\$ 2.083.348,60
22	1	81.750,00	153.382	R\$ 336.245,15
23	2	220.953,60	228.511	R\$ 449.400,45
24	2	214.787,40	245.908	R\$ 495.096,65
25	9	1.184.366,40	1.266.151	R\$ 2.934.013,26
26	2	220.215,60	332.328	R\$ 807.734,70
27	4	362.057,40	443.041	R\$ 1.062.182,90
110	1	211.008,00	210.567	R\$ 458.400,30
120	4	467.668,80	505.851	R\$ 1.177.107,35
50	4	239.010,00	692.498	R\$ 1.459.682,85
51	2	147.285,00	268.474	R\$ 644.652,90
52	2	134.659,20	221.103	499.391,60
53	8	597.394,80	1.267.162	2.849.667,40
54	3	300.286,20	467.707	R\$ 1.077.147,25
55	3	423.321,60	486.173	R\$ 1.031.807,53
56	1	126.219,60	163.369	R\$ 348.678,40
57	3	379.624,80	410.557	R\$ 930.089,40
58	2	278.846,40	147.161	R\$ 424.854,75
59	8	563.684,40	1.296.865	R\$ 2.419.645,35
60	3	232.194,60	569.350	R\$ 1.328.134,10
61	1	77.787,60	27.230	R\$ 99.303,36
62	1	118.524,00	143.155	R\$ 346.285,65
63	1	22.099,20	1.853	R\$ 12.693,42
64	1	108.847,20	155.315	R\$ 348.281,30
65	6	468.264,60	977.340	R\$ 2.158.352,40
66	1	106.122,60	133.444	R\$ 277.707,60

67	1	104.988,00	48.632	R\$ 111.897,60
111	1	226.046,76	195.258	R\$ 432.110,15
121	4	375.240,00	556.291	R\$ 1.309.969,80

Dados: Superintendência de Transporte Coletivo – Uberaba

O cenário em que vigoravam as variáveis na Tabela 1 discriminadas, era mantido por um valor de tarifa de R\$3,10, reajustada em 19 de janeiro de 2015. A mudança no valor de R\$2,80, que vigorava desde 31 de dezembro de 2012, justificada pela inflação que aumentou em 13,46 pontos percentuais no período, somada a um aumento de 30% no preço do óleo diesel e de 15% no custo da mão de obra, gerou um inconformismo geral na população. Porém, pôs em prática exigências de modernização da frota (15 novos ônibus), integrações pelo preço de uma única passagem, além da implantação da primeira linha do sistema VETOR/BRT da cidade, não considerada no estudo pelas diferentes condições e tempo de vigência [15].

Além disso, o quadro de linhas era gerido por duas empresas concessionárias, sendo elas, Viação Piracicabana Ltda. e Empresa de Transporte Líder Ltda.

Importante frisar que as variáveis selecionadas são representativas no que tange a diferentes cenários enfrentados pelas empresas gestoras, como é o caso de quilômetros percorridos e número de passageiros atendidos, variáveis cruciais para o cálculo do Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK), um dos atributos que definem o cálculo tarifário. Além destas, tem-se a quantidade de veículos, que representa o capital bruto da DMU, e a receita, parâmetro diretamente ligado ao número de passageiros, pagantes, transportados.

Porém, inclusive como um parâmetro para futuros trabalhos na área, é importante salientar que, na análise da correlação das variáveis pelo software Excel 2007, as mesmas apresentaram alto índice de correlação, conforme consta na Tabela 2:

Tabela 2 - Índice de Correlação entre as Variáveis.

	Frota	Distância Percorrida	Passageiros Transportados	Receita
Frota	1			
Distância Percorrida	0,86286698	1		
Passageiros Transportados	0,930695372	0,842981624	1	
Receita	0,931979832	0,865257271	0,994858303	1

O resultado acima não invalida os resultados posteriormente apresentados, porém, discrimina a redundância de se utilizar variáveis como receita e passageiros transportados (correlação 0,994858303).

A decisão por manter as variáveis remete à dificuldade em se encontrar outras variáveis padronizadas para todas as linhas do estudo, e principalmente porque, apesar de por hora redundantes, não trazem interferências negativas para o resultado final da análise.

A definição do período de análise deveu-se à disponibilidade dos dados na Superintendência de Transporte Coletivo da Prefeitura Municipal de Uberaba, optando-se pela amostra mais atual e padronizada, no que tange às variáveis escolhidas.

De posse dos dados do Quadro 1, foi feito o processamento no software SIAD [16], considerando-se orientação a outputs, uma vez que, já sendo dispendidos os recursos para o transporte público, a intenção é que os mesmos sejam gastos de forma eficiente e eficaz, e não, de forma a minimizá-los. Assim sendo, considerou-se fixas as entradas, os inputs, buscando-se otimizar as saídas, os outputs.

A simulação foi feita conforme o modelo BCC, uma vez que foge da linearidade do método CCR e é o mais indicado, hajam vistos os trabalhos realizados anteriormente na área, e as eficiências, bem como o ranking das linhas, seguem-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Eficiências dadas pelo modelo BCC orientado a outputs e ranking das linhas.

Linha Pira	Eficiência (%)	Ranking	Linha Líder	Eficiência (%)	Ranking
14	100,00	1	50	100,00	1
20	100,00	1	60	100,00	1
22	100,00	1	63	100,00	1
110	100,00	1	64	96,25	2
21	93,78	5	56	94,40	3
26	90,56	7	111	94,26	4
25	82,79	8	62	93,34	6
10	82,72	9	51	82,58	10
18	81,89	11	66	81,29	12
11	75,69	18	65	81,09	13
17	72,13	20	54	80,52	14
120	66,10	23	53	80,41	15
19	63,84	24	59	78,02	16
24	61,10	25	55	77,00	17
27	59,68	26	121	73,56	19
23	56,39	27	52	70,00	21
13	52,65	28	57	69,41	22
16	42,56	30	58	47,25	29
12	35,54	31	61	31,51	36
15	27,31	38	67	31,24	37

Em comparação das empresas Piracicabana e Líder nota-se que a Piracicabana aparece com somente uma linha a mais na fronteira de eficiência. Desta forma, é possível inferir que as empresas dispunham de condições de gestão bastante parecidas, uma vez que ambas estavam submetidas ao sistema licitatório da Prefeitura Municipal.

Buscando-se uma análise mais minuciosa, ver Tabelas 4 e 5:

Tabela 4 - Classes de desempenho na empresa Piracicabana.

Classe de Desempenho	Nº de Linhas	%
0 a 20%	0	0%
20 a 40%	2	10%
40 a 60%	4	20%
60 a 80%	5	25%
80 a 99%	5	25%
100%	4	20%
Total	20	100%

Tabela 5 - Classes de desempenho na empresa Líder

Classe de Desempenho	Nº de Linhas	%
0 a 20%	0	0%
20 a 40%	2	10%
40 a 60%	1	5%
60 a 80%	5	25%
80 a 99%	9	45%
100%	3	15%
Total	20	100%

Nota-se que, na Piracicabana, as DMUs concentram-se (50% do total de linhas da empresa) em classes de desempenho entre os valores de 60% e 99%. Já na Líder, a porcentagem de linhas com eficiência entre 60 e 80% permanece inalterada, porém, há uma diminuição na quantidade de DMUs de médio a baixo desempenho (40 a 60%), número que aparece justificado na

quantidade de DMUs de alta eficiência (80 a 99%). Desta forma, é possível inferir que a empresa Líder conseguiu atingir valores de eficiência média mais altos (78,106355%) que a empresa Piracicabana (72,23651%), porém, próximos, o que reitera a afirmação de que ambas estão submetidas ao mesmo sistema de gestão por parte da Prefeitura Municipal.

Na Tabela 6, uma transcrição das informações das linhas 14, de eficiência máxima, e da linha 15, menor eficiência entre as DMUs.

Tabela 6 - Transcrição dos dados das linhas 14 e 15.

Linhas	Inputs		Outputs	
	Frota (dias úteis)	Distância Percorrida (km/ano)	Passageiros Transportados (n°)	Receita (R\$)
14	8	577.829,40	1.704.497	R\$ 3.543.992,40
15	2	146.716,80	90.214	R\$ 212.392,05

Em uma simples divisão, nota-se a diferença entre a demanda das linhas. Cada veículo da linha 14 atendeu, em média, 213 mil passageiros/ano, já os veículos da linha 15 atenderam uma média de 45 mil passageiros/ano. Isto revela uma possível causa da diferença considerável entre as eficiências, porém, traz a tona um fato curioso e possivelmente um ponto a ser considerado em posteriores pesquisas, uma vez que o baixo índice de lotação dos veículos não pode ser sanado simplesmente com a extração de um dos veículos da linha, já que 45 mil passageiros/ano dependiam do itinerário no horário estipulado.

Na Tabela 7, em uma outra análise, as DMUs que obtiveram menores desempenhos:

Tabela 7 - Transcrição dos dados das linhas de menor eficiência.

Linhas	Inputs		Outputs	
	Frota (dias úteis)	Distância Percorrida (km/ano)	Passageiros Transp.(n°)	Receita (R\$)
12	1	94.932,00	40.068	R\$ 123.919,06
15	2	146.716,80	90.214	R\$ 212.392,05
61	1	77.787,60	27.230	R\$ 99.303,36
67	1	104.988,00	48.632	R\$ 111.897,60

Voltando-se a uma análise crítica, há que se considerar a que condições as linhas estavam sujeitas. Sabe-se que a linha 12 fazia a conexão entre Capelinha do Barreiro, comunidade rural Uberabense, e Uberaba, desta forma, é compreensível que a mesma possua uma baixa relação passageiros/veículo/ano. O mesmo ocorre com as linhas 15 e 61, responsáveis pelas conexões Uberaba – Distritos Industriais 02 e 03 (regiões afastadas da área urbana), respectivamente, e que atendiam, por este motivo, um público escasso, porém, fiel.

Já a linha 67 atendia o bairro Jardim Anatê, neste caso, uma solução seria a junção de dois ou mais itinerários que atendam regiões próximas, buscando-se uma otimização da lotação dos ônibus, e a diminuição de viagens ociosas.

Ademais, considera-se como alternativa, a execução de pesquisas operacionais do transporte coletivo como um todo, que, de um modo geral, visam mapear as condições a que as linhas estão sujeitas, entender e quantificar a demanda de passageiros, além de propor itinerários eficazes e eficientes.

A respeito das demais variáveis, sabe-se que a receita também é um ponto que merece delicada análise, uma vez que a linha 17 (eficiência = 72,12%), Terminal Oeste – UFTM, atende, majoritariamente, o público universitário, que paga o valor referente à metade da tarifa.

Como exemplo, as linhas 17, citada acima, e 22, DMU de eficiência máxima:

Tabela 8 - Transcrição das informações das linhas 17 e 22.

Linhas	Inputs		Outputs	
	Frota (dias úteis)	Distância Percorrida (km/ano)	Passageiros Transp. (n°)	Receita (R\$)
17	1	74.012,40	97.111	R\$ 190.109,30
22	1	81.750,00	153.382	R\$ 336.245,15

Observa-se que cada passageiro da linha 17 pagou, em média, R\$1,96 pela passagem, enquanto que na linha 22, que atende Terminal Oeste – Vila Militar, a média de valor pago foi de R\$2,19. O valor não é tão expressivo em se tratando de somente uma passagem, porém, considerando-se um montante de aproximadamente 100 mil passageiros transportados, já é nítida a interferência.

Observando-se as DMUs consideradas eficientes, é possível inferir que as variáveis apresentaram pesos diferentes entre as linhas. Isto porque, no modelo considerado, é encontrada uma solução de um Problema de Programação Linear (PPL) específica para cada DMU, o que permite que altos pesos sejam atribuídos para algumas linhas, em detrimento de pesos muito pequenos, inclusive nulos, para outras, como pode-se observar na Tabela 9.

Tabela 9 - Pesos atribuídos a cada variável pelo modelo BCC orientado a outputs.

Linha	Pesos (Pesos Inputs = v; Pesos Outputs = u)				
	Frota	Distância Percorrida	Passageiros Transportados	Receita	v_* (fator de escala)
10	0,3918128	0,00000013	0	0,0000009	-0,0044315
11	0,09882849	0,00000553	0	0,00000104	-0,20155759
12	3,4284937	0,00000763	0	0,00000807	-1,3385215
13	0	0,0000315	0	0,00000472	-0,63621085
14	0,12520912	0	0,00000059	0	-0,00167297
15	0,4497139	0,00002506	0	0,00000471	-0,91551474
16	2,8648603	0,00000637	0	0,00000674	-1,1184728
17	0,54319398	0,00002494	0,0000103	0	-1,0025355
18	0,14788354	0,00000508	0,00000062	0,00000081	-0,19606111
19	1,846136	0,00000411	0	0,00000435	-0,72075171
20	1,6154392	0,00009008	0,00000005	0,0000169	-3,2895889
21	0,21158191	0	0	0,00000048	0,00844862
22	1,2017019	0,00000285	0,00000324	0,0000015	-0,43446266
23	0,83249799	0,00000194	0,00000438	0	-0,31954674
24	0,77360211	0,0000018	0,00000407	0	-0,2969401
25	0	0	0	0,00000034	1,2078992
26	0,52598423	0,00000117	0	0,00000124	-0,20535
27	0,40799369	0,00000013	0	0,00000094	-0,00461451
110	1,0135423	0	0,00000475	0	-0,01354235
120	0,37447636	0	0	0,00000085	0,01495312
50	0,09193139	0,00000316	0,00000038	0,0000005	-0,12188084
51	0,14816603	0,00000826	0	0,00000155	-0,30163217
52	0,19116326	0,00001066	0,00000001	0,000002	-0,38927403
53	0,15468432	0	0	0,00000035	0,00617666
54	0,40232561	0,00000013	0	0,00000093	-0,0045504
55	0,42721036	0	0	0,00000097	0,01705883
56	1,1644495	0,00000271	0,00000612	0	-0,44696329
57	0,47393172	0	0	0,00000108	0,01892445
58	1,0375284	0	0	0,00000235	0,04142929
59	0	0,0000023	0,00000077	0	-0,01649084
60	0,07171767	0,00000401	0	0,00000075	-0,14626592
61	0,96185726	0,00005361	0	0,00001007	-1,9581216
62	1,2268938	0,00000273	0	0,00000289	-0,47899277
63	0	0,00180934	0,00053967	0	-38,985003
64	1,2198637	0,00000271	0	0,00000287	-0,47624814

65	0,2007846	0,00000007	0	0,00000046	-0,00227092
66	1,4255789	0,00000332	0,00000749	0	-0,54719542
67	3,796826	0,00000845	0	0,00000894	-1,4823224
111	1,0201077	0	0	0,00000231	0,04073366
121	0,33649545	0	0	0,00000076	0,01343651

Os fatores de escala que aparecem discriminados na última coluna do quadro acima, indicam, quando positivos, retornos decrescentes de escala e, quando negativos, retornos crescentes de escala, características do modelo BCC orientado a outputs. Isto porque, se a variação nos inputs é menor que a variação nos outputs, a DMU apresenta retornos crescentes de escala e, se a variação nos inputs é maior que a variação nos outputs, a DMU apresenta retornos decrescentes de escala [17].

Em uma análise minuciosa dos resultados, vê-se que, pesos muito pequenos, ou quase nulos, em DMUs eficientes, se aumentados, poderiam trazer malefícios para a eficiência da linha. O que nota-se na linha 14, por exemplo, no qual três variáveis apresentam valores insignificantes (distância percorrida, passageiros transportados e receita). Assim, se a variável receita fosse forçada a ter um peso maior, poderia tornar a DMU ineficiente, o que revela um ponto crítico da linha.

5. Conclusões

O presente estudo sustentou-se na apuração de variáveis de entrada e saída (*inputs/outputs*) referentes ao funcionamento de linhas de transporte público coletivo, na escolha do método DEA, e no processamento dos dados pelo software SIAD, o que objetivava preencher lacunas na literatura referentes a avaliações do transporte público atual, bem como, traçar meios de se alcançar a fronteira de eficiência.

Desta forma, 40 linhas de transporte público coletivo da cidade de Uberaba foram analisadas, sendo elas pertencentes a duas empresas concessionárias, Piracicabana e Líder.

Do total de linhas consideradas, apenas 7 delas alcançaram a eficiência, o que representa 17,5% do total de linhas. Para que se entenda tal resultado, há que se atentar aos gaps encontrados, como o itinerário restrito de algumas linhas, que impossibilita a lotação dos veículos, e linhas que transportam, majoritariamente, estudantes, os quais pagam somente metade da tarifa, o que faz com que a variável ‘receita’ destas, termine prejudicada.

A respeito da lotação de veículos comprometida, uma sugestão para possíveis pesquisas seria considerar a receita como o líquido, ou seja, os valores de entrada (passageiros pagantes) subtraídos dos valores de saída, como o gasto com combustível, por exemplo. Isto porque, uma vez que a demanda é menor, uma sugestão seria a redução da capacidade de transporte dos ônibus, como a utilização de um micro-ônibus, o que reduziria os custos com combustível e equilibraria as receitas (entendidas neste outro cenário), não prejudicando a eficiência das linhas.

Ademais, constatou-se problemas como baixa demanda de passageiros em linhas que percorrem itinerários interurbanos. Neste ponto, e buscando-se diminuir o número de DMUs consideradas ‘medianas’ na análise de eficiência, apresentam-se necessárias pesquisas operacionais do transporte coletivo, sejam elas: pesquisas de oferta, que visam mapear as condições operantes, e pesquisas de demanda, que buscam mensurar a real necessidade de determinados itinerários em horários específicos, diminuindo, assim, o número de viagens ociosas.

A avaliação da eficiência de qualquer meio, entretanto, torna atentos os órgãos gestores para a destinação de recursos e apresenta-se como um caminho de fácil visualização dos principais gaps que precisam ser sanados pontualmente. Neste cenário, [18] defende que a técnica DEA garante a neutralidade da análise, visto que permite, a cada DMU, a definição dos pesos de suas variáveis. Desta forma, o método garante a imparcialidade na avaliação, o que apresenta-se como caminho essencial para monitoramento de objetivos e busca pela eficiência.

No entanto, nota-se que a análise da eficiência de linhas de transporte coletivo está sujeita a fatores não mensuráveis, e que é preciso se atentar a tais fatores para que as inferências não

ajam contra o direito à mobilidade urbana e o bem-estar social.

Variações de modelo, inclusive dentro da Análise Envoltória de Dados, como a orientação simultânea a inputs e outputs, modelo SBM, e a escolha mais criteriosa, caso haja a disponibilidade de variáveis, levando-se em conta os fatores acima citados, seriam sugestões para futuras pesquisas na grande área.

Vê-se, na literatura, que o transporte público coletivo ainda é um potencial não explorado, mas pesquisas pontuais podem ser o caminho para uma maior democratização da mobilidade urbana no País.

Referências

- [1] R. C. Magagnin, A. N. R. Silva. A percepção do especialista sobre o tema mobilidade urbana. *Transportes*, 16 (2008) 25-35. <https://doi.org/10.14295/transportes.v16i1.13>.
- [2] Confederação Nacional de Indústria. Retratos da Sociedade Brasileira. Brasília, 2015.
- [3] B. R. Sampaio, L. M. B. Sampaio, Y. Sampaio. Eficiência de sistemas de transporte público no Nordeste com Análise Envoltória de Dados. *Revista Econômica do Nordeste*, 37(2006) 261-275.
- [4] M. R. M. Araújo, J. M. Oliveira, M. S. Jesus, N. R. Sá, P. C. Santos, T. C. Lima. Transporte público coletivo: discutindo acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. *Psicologia & Sociedade*, 23 (2011) 574-582. <https://doi.org/10.1590/S0102-71822011000300015>.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15570: Transporte – Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros, 2009.
- [6] J. C. C. B. S Mello, A. L. Meza, E. G. Gomes, B. P. Serapião, M. P. E. Lins. Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras. *Pesquisa Operacional*, 23(2003) 325-345.
- [7] A. S. Guerreiro. Análise da eficiência de empresas de comércio eletrônico usando técnicas da análise envoltória de dados. Dissertação de M.Sc., PUC-Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [8] A. M. V. Azambuja. Análise de eficiência na gestão do transporte urbano por ônibus em municípios brasileiros. Tese de PhD, UFSC, Santa Catarina, SC, Brasil, 2002.
- [9] P. F. Santos, N. G. C. Morais, C. M. C. Ferreira. Aplicações da Análise Envoltória de Dados em sistemas de transporte público de passageiros. In: XXXIX SBPO A pesquisa operacional e o desenvolvimento sustentável. 28-31 de Agosto, Fortaleza, Brasil, 2007.
- [10] I. B. Sonza, V. F. D. Corte, F., P. J. Marion. Eficiência produtiva no transporte público urbano em Santa Maria (RS). XXXI Encontro da ANPAD, 23-26 de Setembro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [11] P. A. Viton. Technical Efficiency in Multi-Mode Bus Transit: A production frontier analysis. *Transp. Res.*, 26 (1997) 23-29. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(96\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(96)00019-7).
- [12] N. Husain, M. Abdullah, S. Kuman. Evaluating public sector efficiency with data envelopment analysis (DEA): a case study in road transport department. *Total Qual. Manag.*, 11 (2000) 830-836. <https://doi.org/10.1080/09544120050008282>.
- [13] A. K. Boame. The technical efficiency of Canadian urban transit systems. *Transportation Research*, 40 (2004) 401-416. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.09.002>.
- [14] A. P. S. Rubem, P. M. Beltrán, J. C. C. B. S. Mello. Avaliação da eficiência das companhias aéreas brasileiras utilizando um modelo DEA em rede baseado em folgas. In: Anais do XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. São Paulo, SP, 2014.
- [15] Prefeitura Municipal de Uberaba. Correção da tarifa do ônibus será abaixo da inflação. www.uberaba.mg.gov.br/portal/conteudo,33966 (acesso em 19 novembro 2017).
- [16] L. Angulo Meza, L. Biondi Neto, J.C.C.B. Soares de Mello, E. G. Gomes. ISYDS– Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio a Decisão): a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, 25 (2005) 493-503.
- [17] J. Benicio, J. Mello, L. Ângulo-Meza. Análise da eficiência sob retornos variáveis de escala: um estudo das instituições de ensino superior privado. In: XLVII SBPO, Porto de Galinhas,

Pernambuco-PE, 2015.

- [18] F. L. Casado. Análise envoltória de dados: conceitos, metodologia e estudo da arte na educação superior. *Revista Sociais e Humanas*, 20 (2009) 59-71.

ORCID

A. L. B. Machado 0000-0001-8989-671X (<https://orcid.org/0000-0001-8989-671X>)
V. A. Falcão 0000-0003-0850-4281 (<https://orcid.org/0000-0003-0850-4281>)
F. C. Camioto 0000-0002-8818-0557 (<https://orcid.org/0000-0002-8818-0557>)

Reabilitação energética da envolvente de edifícios: desempenho económico, energético e ambiental de ETICS com ICB ou EPS

Energy retrofit of buildings' envelope: economic, energy and environmental performance of ETICS with ICB or EPS

J. Silvestre^{a†}, A. Castelo^a, J. Silva^b, J. Brito^a, M. Pinheiro^a

^a *Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Lisboa, Portugal*

^b *Universidade de Évora, Departamento de Arquitectura, Évora, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt*

RESUMO

Este estudo apresenta uma comparação entre sistemas de ETICS (Sistema compósito de Isolamento Térmico pelo exterior) utilizando dois materiais de isolamento diferentes: Aglomerado de Cortiça Expandida (ICB) e Poliestireno Expandido (EPS), durante um período de estudo de 50 anos. O balanço do impacto ambiental é dado por Estudos do ciclo de Vida (ACV) "Cradle to Grave" (C2G), com ênfase nas emissões de carbono e na quantidade de energias primárias renovável (PE-Re) e não renovável (PE-NRe) utilizada por estes materiais. O balanço energético considera as principais características de isolamentos destes materiais, incluindo o desempenho energético da envolvente dos edifícios após a aplicação destes materiais e as correspondentes poupanças energéticas que estes permitem. O balanço final entre o desempenho ambiental e energético inclui uma estimativa C2G da redução das emissões de carbono e da redução do consumo das PE-RE e PE-NRe.

ABSTRACT

This study presents a comparison between ETICS (External Thermal Insulation Composite System) using two different insulation materials: Insulation Cork Board (ICB) and Expanded Polystyrene (EPS), during a study period of 50 years. The environmental impact balance is given by "Cradle to Grave" (C2G) Life Cycle Studies (LCA), with emphasis on carbon emissions and on the amount of renewable (PE-Re) and non-renewable (PE-NRe) primary energies used by these materials. The energy balance considers the main insulation characteristics of these materials, including the energy performance of the buildings' envelope after the application of these materials and the corresponding energy savings. The final balance between the environmental and energy performances includes a C2G estimate of the reduction of the carbon emissions and of the PE-RE and PE-NRe consumption.

Palavras-chave:

Estudos do ciclo de Vida; ETICS; ICB; EPS; NPV.

Keywords:

Life Cycle Assessment; ETICS; ICB; EPS; NPV.

1. Introdução

Uma solução existente para o isolamento externo contínuo nas paredes dos edifícios são os ETICS (Sistema compósito de isolamento térmico pelo exterior). Os ETICS são aplicados como um

sistema de revestimento e isolamento exterior de paredes que permite melhorar a eficiência energética da envolvente dos edifícios novos ou reabilitados.

Os ETICS (Figura 1) são constituídos por uma placa de isolamento fixa sobre o substrato (colada, fixa mecanicamente ou ambos), sobre a qual são aplicadas uma ou duas camadas finas de revestimento reforçado. O revestimento também poderá ser utilizado para fixar o material de isolamento, que deverá ter uma boa aderência ao substrato, elevada resistência à fissuração, baixa capilaridade e uma resistência significativa à perfuração e ao impacto [1]. Os ETICS podem ser constituídos por diferentes materiais a diferentes espessuras, e podem diferir na percentagem de matéria orgânica existente nas camadas de revestimento, nos materiais de reforço utilizados e nas soluções de fixação [2].

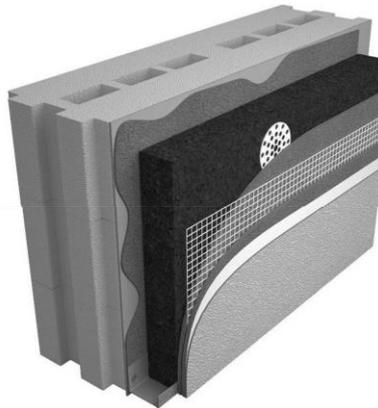


Figura 1 - ETICS com ICB aplicado como solução de revestimento e isolamento de uma fachada de um edifício.

A aplicação de um isolamento térmico exterior no edifício permite uma redução das pontes térmicas e uniformiza o coeficiente de transmissão térmica em toda a fachada. Esta técnica: permite economizar energia; reduz o risco de condensações superficiais; melhora o conforto térmico interior tanto no inverno como no verão; reduz a espessura da parede exterior e, conseqüentemente, aumenta a área interna de construção, e reduz o peso das paredes e das cargas permanentes no edifício; melhora a permeabilidade das fachadas; é mais fácil de aplicar em comparação com outras técnicas; e oferece uma maior variedade de cores e texturas para as fachadas [3].

A solução de ETICS com isolamento em Poliestireno Expandido (EPS) é a mais utilizada em Portugal. O EPS é um material produzido a partir de um só material não renovável (partículas expandidas de poliestireno – base de petróleo) importado do estrangeiro. A aplicação de ICB nos ETICS tem vindo a ganhar dimensão em Portugal e em diversos países Europeus apesar da sua recente introdução no processo construtivo desta solução.

Este estudo inclui uma avaliação comparativa do desempenho ambiental, económico e energético (Environmental, Economic and Energy – 3E) do sistema ETICS. A caracterização do desempenho 3E de ambos os sistemas construtivos foi baseada em literatura de referência, trabalhos de pesquisa, dados de empresas e bases de dados de software.

A análise do desempenho ambiental é baseada numa Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do Berço ao Berço (C2C), com incidência nas emissões de carbono e nos consumos de energias primárias renováveis e não renováveis de todos os componentes. A análise do desempenho económico C2C tem em consideração os custos de aquisição e a poupança energética permitida pela implementação destes sistemas de reabilitação da envolvente dos edifícios.

A aplicação da ACV ao estudo de envolventes de edifícios tem vindo a ganhar dimensão na indústria da construção em vários países, de modo a identificar a melhor alternativa para melhorar o desempenho geral da envolvente do edifício. A envolvente é um dos elementos do edifício com mais impacto no desempenho 3E de um edifício, sendo que as paredes exteriores influenciam diretamente a envolvente, devido ao seu elevado valor de energia inicial incorporada, consumo de energia durante a utilização, custo inicial e de manutenção e o conforto interior proporcionado.

Os impactes 3E de cada solução de parede exterior resultam diretamente das propriedades dos materiais utilizados em cada solução. Por isso, aquando da conceção de novas alternativas ou na reabilitação da envolvente exterior, é importante a utilização de um método que permita a comparação entre diferentes alternativas e permita auxiliar na determinação da melhor solução a implementar em cada caso.

Atualmente existem diversos estudos já publicados que permitem a aplicação desses métodos para escolha das melhores soluções para a envolvente, tendo como exemplo os seguintes países:

- Portugal, em que na ACV foram consideradas sete alternativas para paredes exteriores com desempenho térmico semelhante e sete sistemas de aquecimento diferentes; este estudo teve em consideração a fase de produção e as necessidades de aquecimento de energia e de manutenção durante 50 anos [2];
- Nos Estados Unidos da América, um estudo de incluiu o cálculo da energia incorporada e desempenho térmico de doze soluções de paredes exteriores para um edifício em uma região de clima frio [4];
- Na Austrália, foi realizado um estudo para demonstrar a necessidade de considerar não apenas a energia do ciclo de vida do edifício, mas também as atividades realizadas pelos utilizadores do edifício. Este estudo engloba a energia incorporada na produção dos materiais de construção, energia usada durante as fases de operação do edifício e uma manutenção periódica durante um período de estudo de 30 anos [5].

Verificou-se, no entanto, que a maioria dos estudos já publicados apenas inclui parte da avaliação 3E, nomeadamente a avaliação do ciclo de vida energético. De facto, existem muito poucos estudos que incluam a avaliação 3E e todas as fases do ciclo de vida, o que torna inovador este estudo e o método aplicado, correspondendo a uma melhoria face a estudos anteriores de soluções construtivas similares e com iguais objetivos.

2. Caso de estudo – Isolamento com ICB

O objecto de estudo considerado foi um piso intermédio do edifício “Hexa”, constituído por 6 pisos residenciais e que representa as técnicas construtivas e arquitecturais mais utilizadas em Portugal, tendo sido considerada Évora para a localização do edifício.

As paredes exteriores estudadas são localizadas nas fachadas Norte e Sul do apartamento e a unidade estabelecida é um metro quadrado de parede exterior. O período de referência do estudo foi estabelecido para 50 anos [6].

Para considerar a renovação energética das fachadas dos edifícios “Hexa” com ETICS usando ICB, foram consideradas duas soluções de referência sem isolamento: uma com parede simples de tijolos ociosos de argila cozida com 0,22 m (W1); outro com uma parede dupla do mesmo material com duas folhas de 0,15 m e 0,11 m (W8). No total seis soluções melhoradas usando ETICS com ICB foram utilizadas para as paredes simples e também seis soluções foram utilizadas no estudo das paredes duplas (Tabela 1).

A renovação energética das paredes de referência é importante, mas é de salientar que as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento anuais de cada apartamento, no período de estudo, dependem não só da redução do coeficiente de transmissão térmica (U) mas também em que superfície (interior ou exterior) o isolamento é aplicado, sendo esta redução superior quando o isolamento é aplicado na superfície exterior da parede.

As operações de manutenção, reparação e substituição dos revestimentos internos e externos após a renovação da envolvente estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1 - Tipo de material de isolamento, designação, espessura e coeficiente de transmissão térmica (U) das soluções estudadas.

Tipo de Parede	Designação	Espessura (m)		U [W/(m ² .°C)]
		Isolamento	Parede	
Parede Simples	W1	-	0.26	1.36
	W2	0.04	0.30	0.58
	W3	0.05	0.31	0.51
	W4	0.06	0.32	0.45
	W5	0.07	0.33	0.41
	W6	0.08	0.34	0.37
	W7	0.09	0.35	0.34
	W8	-	0.35	0.95
	W9	0.04	0.39	0.49
Parede Dupla	W10	0.05	0.40	0.44
	W11	0.06	0.41	0.39
	W12	0.07	0.42	0.36
	W13	0.08	0.43	0.33
	W14	0.09	0.44	0.30

Tabela 2 - Operações de manutenção, reparação e substituição dos revestimentos interiores e exteriores considerados.

Solução de Revestimento	Operações de manutenção, reparação e substituição
ECS1 – Revestimento (0,02 m argamassa e tinta aquosa) ECS2 – ETICS	Limpeza total e pintura a cada 5 anos e reparação de 35% da área após 25 anos.
ICS1 – Revestimento (0,02 m argamassa e tinta aquosa)	Limpeza total e pintura a cada 5 anos e reparação de 5% da área após 10 anos.

3. Método de análise 3E-C2C

Neste estudo foi realizada uma abordagem integrada para a avaliação do desempenho 3E do berço ao berço (3E-C2C) do ciclo de vida dos materiais de construção e processos construtivos, estritamente relacionada com o desempenho térmico do edifício [7].

O método 3E-C2C, como descrito na Tabela 3, tem em consideração todo o ciclo de vida dos materiais de construção e processos construtivos tendo em conta todos os factores que poderão afectar os mesmos, tal como o desempenho do sistema construtivo na fase de utilização, a vida útil e o seu potencial de reciclagem.

A unidade de comparação utilizada neste estudo foi “um metro quadrado de parede exterior por um período de 50 anos após a renovação energética (aplicação dos ETICS)”, não considerando uma unidade funcional, e tendo em conta as etapas de fim de vida e a vida útil de cada alternativa. É possível efectuar a comparação entre as diversas soluções com diferentes coeficientes de transmissão térmica porque os impactos ambientais considerados pelo desempenho térmico no período de estudo já são considerados na ACV.

Tabela 3 - Fases do ciclo de vida discriminadas de acordo com as normas europeias (CEN, 2012a).

Limites da ACV		Fases do ciclo de vida/ Módulos de informação da ACV	Designação e descrição das fases da ACV	
Cradle to Cradle	Cradle to Cradle	Fase de produção (A1-A3)	A1	Extracção e processamento de matérias-primas, processamento e entrada de material secundário
			A2	Transporte para o fabricante
			A3	Fabricação
		Fase de montagem (A4-A5)	A4	O transporte até o local de construção
			A5	Instalação no edifício
		Fase utilização – módulos de informação referentes à manutenção do edifício (B1-B5)	B1	Utilização ou a aplicação do produto
	B2		Manutenção	
	B3		Reparação	
	B4		Substituição	
	B5		Remodelação	
	Fase utilização – módulos de informação referentes à operação do edifício (B6- B7)	B6	Utilização de energia para operação	
		B7	Utilização de água para operação	
	Crate to Grave	Fase fim de vida (C1-C4)	C1	Desconstrução / Demolição
			C2	Transporte para o tratamento de resíduos
C3			Processamento dos resíduos para reutilização, recuperação e/ou reciclagem	
C4			Descarte dos resíduos	
		Benefícios e pesos para além dos limites do sistema (D)	D	Potencial de reutilização, recuperação e/ou reciclagem (3R)

3.1. Desempenho Ambiental

A quantificação do desempenho ambiental do método 3E-C2C segue o modelo estabelecido nas ACV internacionais e a maioria dos princípios estabelecidos nas normas europeias [8,9,10]. O desempenho ambiental de cada fase do ciclo de vida é definido por:

- Fase de produção (A1-A3): Os dados da ACV de cada um dos materiais de construção utilizados começaram com o correspondente Inventário do Ciclo de Vida (ICV). A composição considerada para cada material do ETICS com isolamento em ICB e EPS é baseada num produtor Português [11].
- Fase de montagem (A4-A5): A instalação dos ETICS no edifício corresponde à operação de renovação da envolvente e inclui: remoção do revestimento anterior e respectivo transporte e descarte; revestimento e isolamento da parede exterior com ETICS com ICB ou EPS de variadas espessuras.
- Fase de utilização – manutenção, reparação e substituição (B2-B4): Os impactos ambientais dos materiais utilizados na manutenção, reparação e substituição durante o período de estudo. Os impactos não incluem outros impactos desta operação devido à sua natureza variável e imprevisível;
- Fase de utilização – desempenho energético (B6): O método 3E-C2C determina o desempenho energético a partir de uma estimativa das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento durante a utilização do edifício. Por este método, estas necessidades são divididas pela área total da parede exterior de

modo a obter um valor relativo à unidade comparativa utilizada, permitindo assim uma estimativa dos seus impactos ambientais.

- Fase de fim de vida (C): O 3E-C2C considera o transporte do produto eliminado como parte do processamento de resíduos, incluindo o transporte de resíduos (C2), o processamento de resíduos (C3) e a alienação de resíduos, e o pré-tratamento físico e gestão do local de eliminação. (C4); os impactos ambientais da demolição (C1) não foram considerados, pois são similares para todas as alternativas.

3.2. Desempenho Económico

O estudo económico das soluções pelo método 3E-C2C é baseado no método “Whole-Life Cost” (WLC) [12] e segue a maioria dos princípios estabelecidos nas normas europeias [13]. O desempenho económico de cada fase do ciclo de vida é definido por:

- Fases de produção e montagem (A1-A5): O custo de instalação dos ETICS no edifício corresponde à renovação descrita no processo construtivo. No entanto, não tem em conta os custos de mão-de-obra para remoção do revestimento antigo e os custos de instalação de qualquer tipo de andaime necessário para a instalação.
- Fase de utilização – manutenção, reparação e substituição (B2-B4): O custo económico no ano “n” por metro quadrado das operações de manutenção, reparação e substituição que ocorreram nesse ano.
- Fase de utilização – desempenho energético (B6): O custo da energia no ano “n” por metro quadrado de parede exterior corresponde à energia necessária para aquecimento e arrefecimento, calculada de acordo com o método descrito nos regulamentos Portugueses [14,15,16];
- Fase de fim de vida (C e D): O custo económico no ano 50 por cada metro quadrado de parede exterior inclui apenas os custos de transporte e alienação dos elementos e as despesas e / ou receitas de reutilização, reciclagem e recuperação de energia [17].

4. Comparação do desempenho ambiental, económico e energético das soluções com ICB

O método 3E-C2C foi utilizado para quantificar e comparar o desempenho 3E das alternativas estudadas de reabilitação energética em comparação com as duas soluções de referência consideradas sem isolamento (W1 e W8). A reabilitação da envolvente é efetuada pela instalação de ETICS com ICB, considerando diferentes espessuras para este material.

A abordagem utilizada neste estudo está em conformidade com as normas e certificações internacionais e europeias. A comparação do desempenho ambiental das diferentes soluções incidu sobre as emissões de carbono (expressa pela categoria de impacto ambiental “Global Warming Potential” - GWP) e no consumo de energia primária não renovável (PE-NRe) dos materiais utilizados na reabilitação energética. A comparação económica C2C resultou da aplicação do método 3E-C2C e teve em consideração os custos de aquisição e a poupança energética, na energia de aquecimento e arrefecimento, possibilitada pela instalação do ETICS na envolvente do edifício.

A comparação do desempenho energético teve em consideração as principais características do ETICS com ICB como material isolante, incluindo a melhoria do desempenho energético da envolvente do edifício após a sua reabilitação e a possível poupança energética. Com as atuais mudanças na forma de ocupação dos edifícios e nas exigências de conforto, que levam a um maior consumo de energia por equipamentos de aquecimento e arrefecimento, foi

considerado neste estudo não só o valor padrão de 10% das necessidades de energia, como também valores mais elevados (de 30% a 50%) de modo a simular cenários futuros de consumo de energia para edifícios residenciais unifamiliares [18] ou edifícios residenciais multifamiliares [19].

4.1. Análise das emissões de carbono e consumo de energia de ETICS com ICB

Os resultados obtidos na comparação ambiental e de consumo de energia relativos às emissões de carbono, expressas pelo GWP (Figura 2), demonstram um impacto ambiental nas fases A1-A3 entre 72 e 74% (não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) do GWP C2C total, e nas fases C2-C4 e D entre 1 e 3%. O GWP nas fases B2-B4 é similar para todas as alternativas, devido a terem o mesmo plano de manutenção, apresentado na Tabela 2, e representa entre 32 e 39% do GWP C2C total nas soluções reabilitadas e cerca de 98% para as paredes de referência.

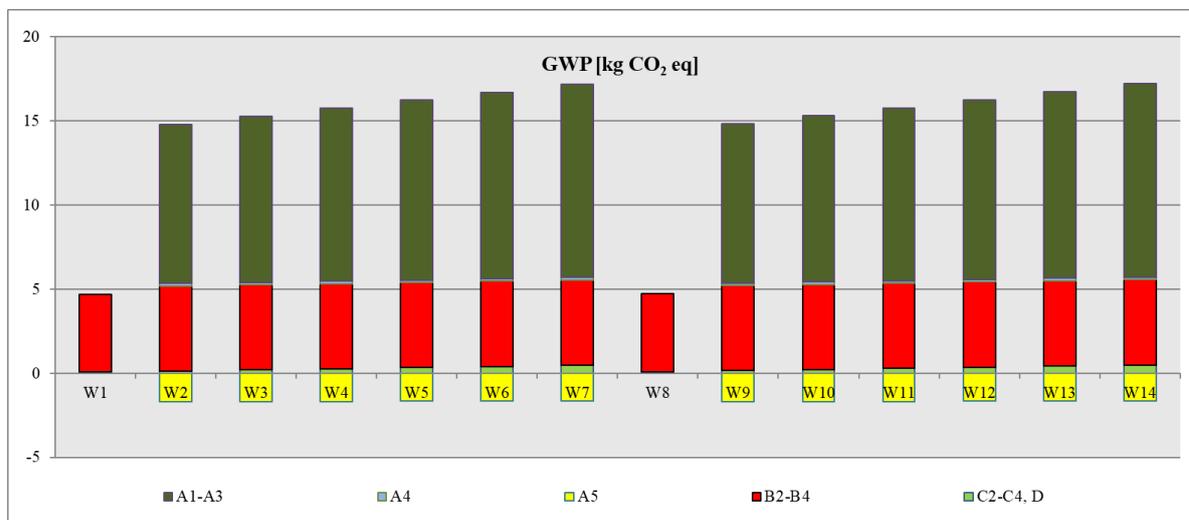


Figura 2 - C2C GWP (em kg CO₂ eq., não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) das soluções com ETICS com ICB

O consumo C2C de PE-NRe (Figura 3) demonstra um desempenho similar ao do GWP. O impacto das fases A1-A3 representa entre 61 e 66% e na fase do fim de vida representa entre -1 e 0%. As fases B2-B4 representam os restantes 98% do consumo de PE-NRe C2C para as soluções de referência e entre 32 e 39% para as restantes soluções, sem considerar a energia necessária para aquecimento e arrefecimento.

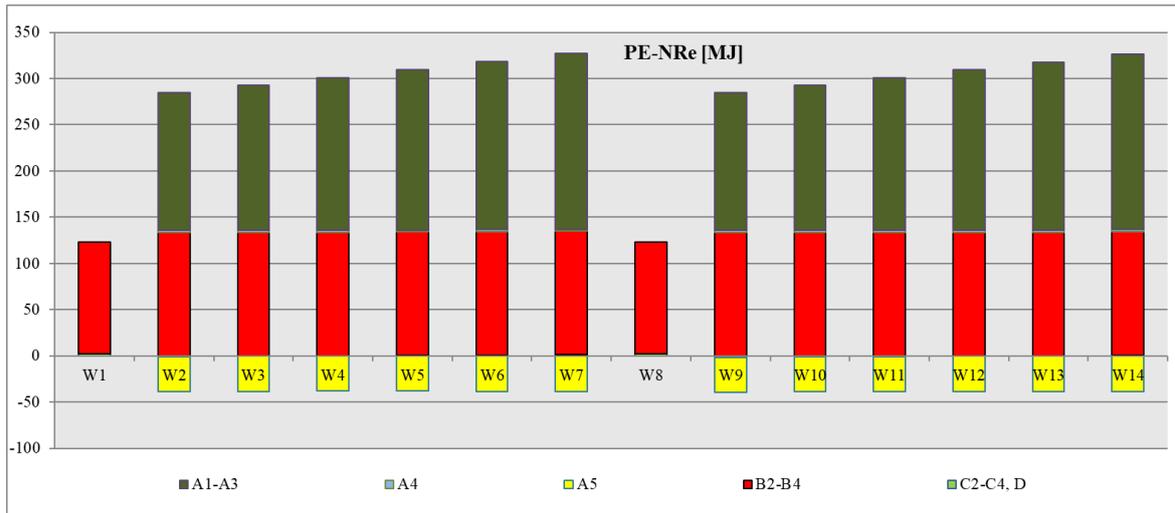


Figura 3 - C2C PE-NRe (em MJ, não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) das soluções com ETICS com ICB

4.2. Análise das emissões de carbono e consumo de energia de ETICS com ICB

Os resultados obtidos na avaliação do desempenho económico demonstram que o Valor Atual Líquido (VAL) do custo C2C (Figura 4) das soluções de ETICS com ICB nas fases A1-A3, A4 e A5 variam entre 31 e 33% e na fase de fim de vida correspondem a aproximadamente 1%. O VAL das fases B2-B4 é similar para todas as alternativas e representa entre 52 e 55% para as soluções reabilitadas e cerca de 41% para as soluções de referência. A restante contribuição do VAL é dada pelo consumo energético de cada alternativa, dependendo das necessidades de aquecimento e arrefecimento, e é de aproximadamente 46% para W1, 43% para W8, e varia entre 24 e 26% para as restantes soluções.

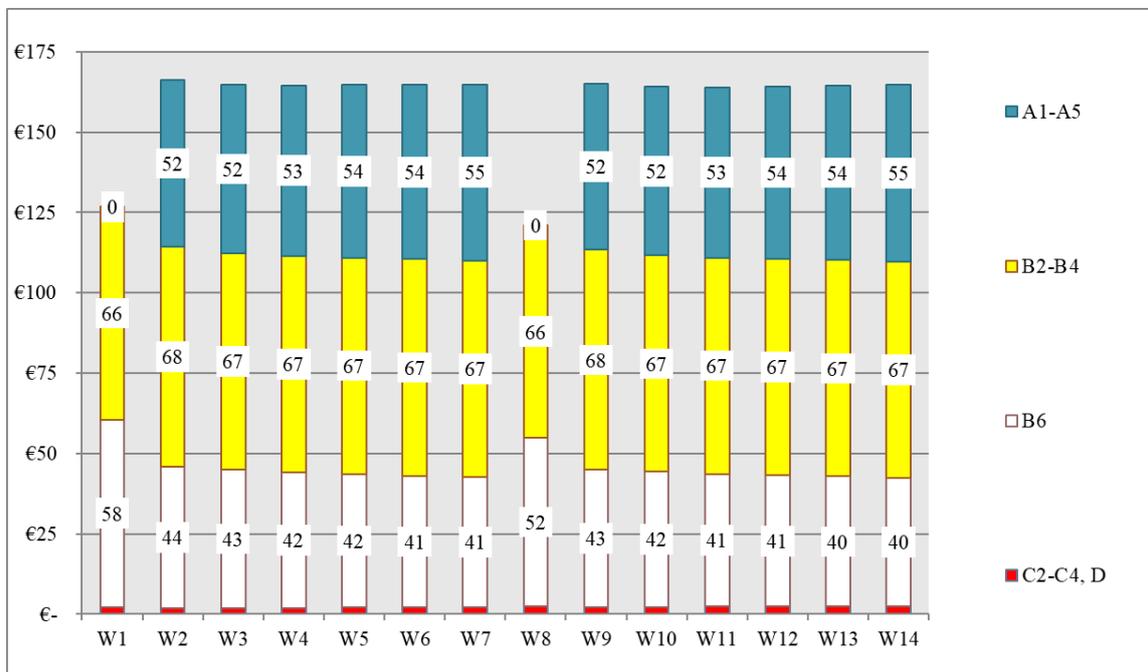


Figura 4 - VAL dos custos económicos (fases A1-A5, B2-B4 e C2-C4 e D) e energéticos (fase B6) de cada alternativa com ETICS com ICB

Com os resultados ilustrados na Figura 4, é também possível concluir que nenhuma das soluções onde ocorreu a aplicação de ETICS permite obter alguma poupança económica quando comparada com as soluções de referência. No entanto, os resultados ilustrados foram obtidos

tendo em consideração um consumo de energia durante a subfase B6 de apenas 10% para as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Se forem considerados valores superiores de consumo para simular futuros cenários para edifícios residenciais unifamiliares e multifamiliares, então essas poupanças económicas tornam-se reais e significativas, como ilustrado na Figura 5.

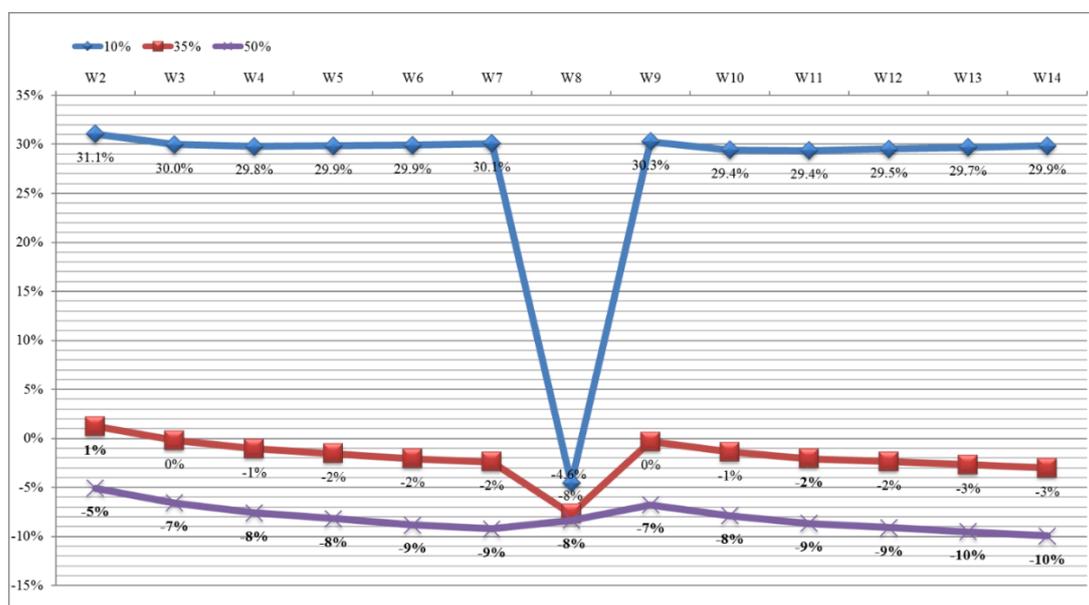


Figura 5 - Diferença entre o VAL dos custos económicos (fases A1-A5, B2-B4 e C2-C4 e D) e energéticos (fase B6) de cada alternativa de parede exterior e o VAL de W1, considerando diferentes padrões de consumo para a fase de utilização (garantindo 10, 35 ou 50% das necessidades energéticas) de ETICS com ICB

4.3. Análise das poupanças energéticas no aquecimento e arrefecimento com a aplicação de ETICS com ICB

Os resultados obtidos na comparação do impacte ambiental relativo às poupanças energéticas no aquecimento e arrefecimento demonstraram que o uso da espessura máxima no ETICS na superfície exterior das paredes exteriores pode resultar numa redução das emissões de carbono entre 22 e 31%. Resultados semelhantes foram obtidos para as poupanças no impacte ambiental do consumo de PE-NRe para as energias de aquecimento e arrefecimento durante o período de estudo.

5. Comparação do desempenho 3E de dois ETICS – Placas de ICB e EPS

Nesta seção, com o objetivo de comparar renovação energética das fachadas do edifício “Hexa” com ETICS utilizando EPS ou ICB, foram consideradas as mesmas duas soluções de referência apresentadas anteriormente (W1 e W8). Em seguida, seis soluções previamente estudadas usando ETICS com ICB (W4, W6, W7, W11, W13, W14) e seis novas usando o ETICS com EPS (WE4, WE6, WE7, WE11, WE13, WE14) foram comparadas (Tabela 4).

Os parâmetros de estudo utilizados para a comparação do desempenho de 3E de todas essas soluções são os mesmos descritos na seção 4 deste artigo.

A comparação apresentada nesta seção é feita entre soluções melhoradas com a mesma espessura de isolamento em sistemas de construção e soluções com o mesmo valor U, embora a diferença entre o valor-U de soluções com a mesma espessura de EPS ou ICB seja menor de 10%.

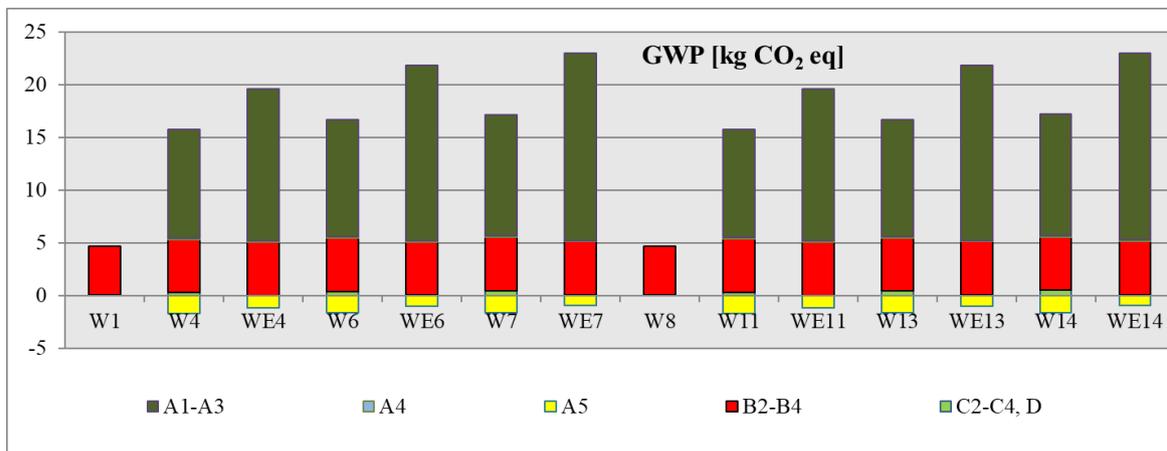
A comparação do desempenho energético teve em consideração as principais características de isolamento térmico do ETICS com EPS ou com ICB como material isolante, incluindo as melhorias no desempenho energético da envolvente do edifício após a sua instalação para renovação e as correspondentes poupanças de energia.

Tabela 4 - Tipo de material de isolamento, designação, espessura e coeficiente de transmissão térmica (U) das soluções estudadas.

Tipo de Parede	Material de Isolamento	Designação	Espessura (m)		U [W/(m ² .°C)]
			Isolamento	Parede	
Parede Simples	Nenhum	W1	-	0.26	1.36
	ICB	W4	0.06	0.32	0.45
	EPS	WE4	0.06	0.32	0.42
	ICB	W6	0.08	0.34	0.37
	EPS	WE6	0.08	0.34	0.34
	ICB	W7	0.09	0.35	0.34
	EPS	WE7	0.09	0.35	0.31
Parede Dupla	Nenhum	W8	-	0.35	0.95
	ICB	W11	0.06	0.41	0.39
	EPS	WE11	0.06	0.41	0.37
	ICB	W13	0.08	0.43	0.33
	EPS	WE13	0.08	0.43	0.31
	ICB	W14	0.09	0.44	0.30
	EPS	WE14	0.09	0.44	0.28

5.1. Comparação das emissões de carbono e consumo de energia

Os resultados obtidos na comparação ambiental e de consumo de energia relativos às emissões de carbono, expressas pelo GWP (Figura 6), demonstraram uma vantagem ambiental nas alternativas de ETICS com ICB nas fases A1-A3 entre 72% e 74% (não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) quando comparadas com as soluções com a mesma espessura em EPS. Esta desvantagem ambiental nas soluções de EPS deriva da utilização de matérias-primas não renováveis deste material. O GWP nas fases B2-B4 é similar para todas as alternativas, devido a terem a mesmo plano de manutenção (Tabela 2), e representa entre 23% e 39% do seu GWP C2C total.

**Figura 6** - C2C GWP (em kg CO₂ eq., não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) das soluções com ETICS com ICB e com EPS

O consumo C2C de PE-NRe (Figura 7) demonstra um desempenho similar ao do GWP. De facto, as vantagens ambientais dos ETICS com ICB nas fases A1-A3 em comparação com as soluções em EPS são directamente proporcionais à espessura do material de isolamento aplicado e pode variar entre os 44% e os 78%.

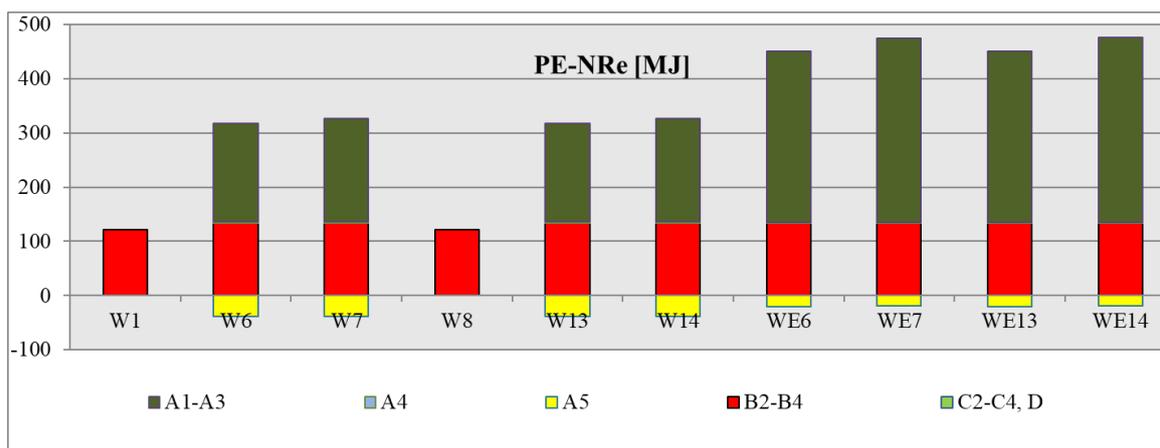


Figura 7 - C2C PE-NRe (em MJ, não considerando as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento) das soluções com ETICS com ICB e com EPS

5.2. Comparação dos custos económicos e benefícios de ETICS com ICB ou EPS

Os resultados obtidos na avaliação do desempenho económico demonstram que os Valor Atual Líquido (VAL) do custo C2C (Figura 8) nas soluções de ETICS com EPS permitem uma poupança no custo de aquisição nas fases A1-A3, A4 e A5 variando entre os 28% e os 30%. Ao analisar o VAL do custo C2C este valor é reduzido devido ao peso dos custos de manutenção e de energia, mas continua a conferir uma vantagem económica na utilização de EPS nos ETICS devido ao seu inferior custo de aquisição quando comparado com a mesma solução em ICB.

Com os resultados ilustrados na Figura 8 é também possível concluir que nenhuma das soluções onde ocorreu a aplicação de ETICS permite obter alguma poupança económica quando comparada com as soluções de referência. No entanto, os resultados ilustrados foram obtidos tendo em consideração um consumo de energia durante a subfase B6 de apenas 10% para as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Se forem considerados valores superiores de consumo (35% e 50%) para simular futuros cenários realísticos para habitações a edifícios residenciais multifamiliares, então essas poupanças económicas tornam-se muito mais significativas.

Na realidade a Figura 9 demonstra que as alternativas com 9 cm de ICB no ETICS têm um desempenho melhor do que as paredes de referência do ponto de vista do consumo de energia quando se considera 35% (W7 no grupo de paredes simples) ou 50% (W14 no grupo de parede duplas) das necessidades de aquecimento e arrefecimento. Para um valor de consumo de 25%, a alternativa do ETICS com 9 cm de EPS (WE7) torna-se a melhor alternativa no grupo de paredes simples. No grupo das paredes duplas, a solução WE14 (também com 9 cm de EPS) torna-se a melhor alternativa apenas para uma taxa de consumo de 35%. No entanto, as alternativas com ICB no ETICS apresentam sempre um maior VAL do custo C2C do que as com EPS independentemente das necessidades de consumo que é considerado para a fase de utilização, devido ao maior custo de aquisição e valor U para a mesma espessura de isolamento.

A Figura 10 é semelhante à Figura 9, mas inclui apenas as alternativas de parede exterior que foram renovadas pela aplicação do ETICS e também indica o valor-U correspondente a cada uma. Este gráfico ajuda o tomador de decisão a escolher a melhor alternativa de renovação energética a partir de um ponto de vista económico C2C, dependendo do valor U, do consumo de energia pretendido e do orçamento disponível.

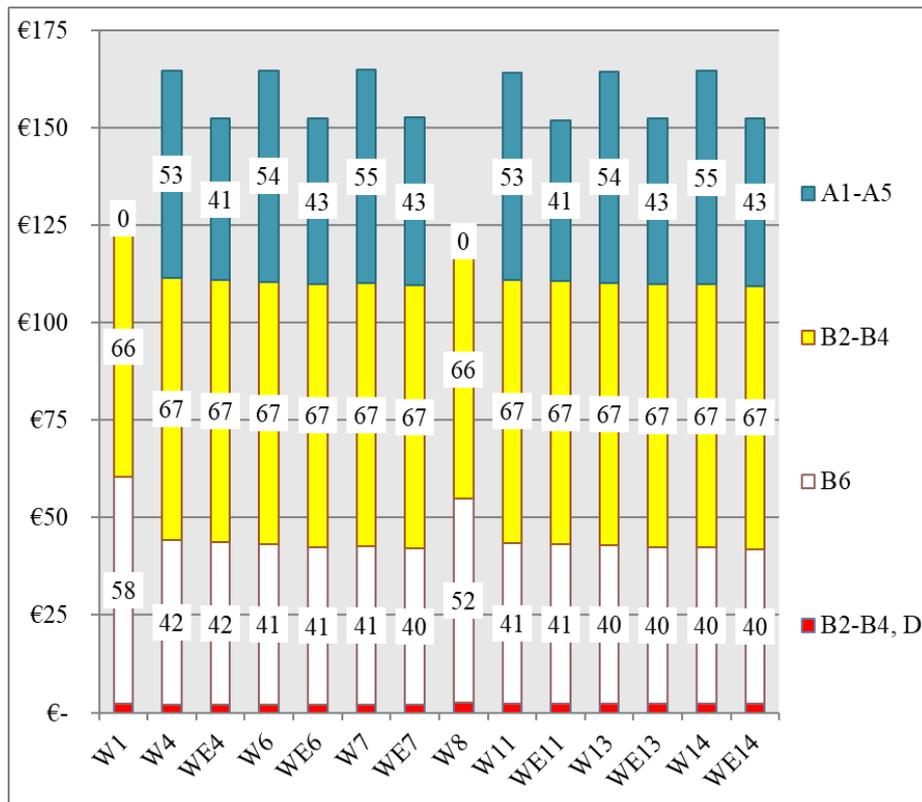


Figura 8 - VAL dos custos económicos (fases A1-A5, B2-B4 e C2-C4 e D) e energéticos (fase B6) de cada alternativa com ETICS com ICB e com EPS

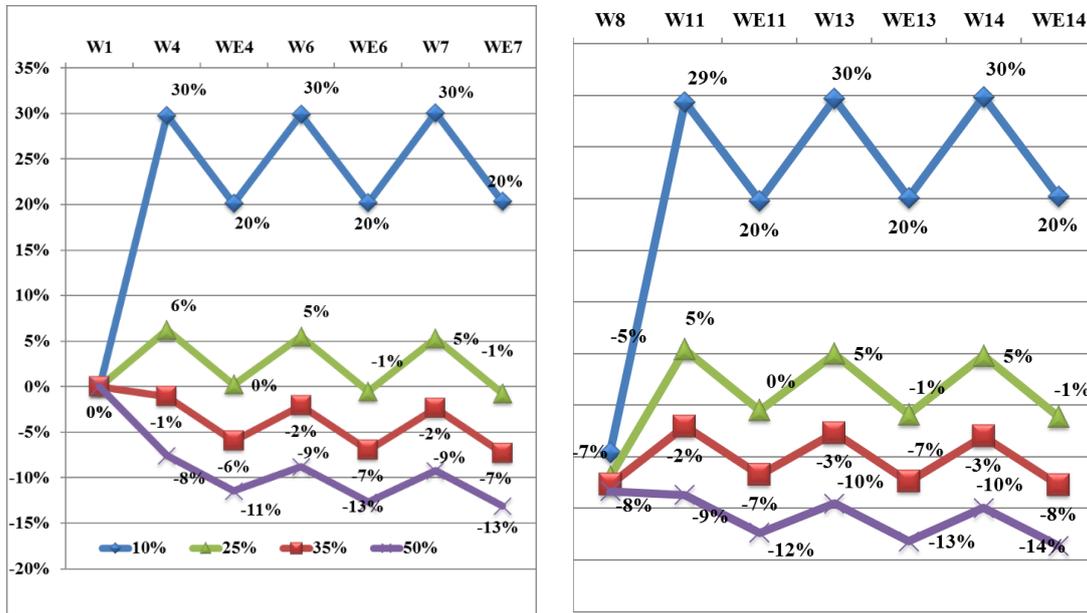


Figura 9 - Diferença entre o VAL dos custos económicos (fases A1-A5, B2-B4 e C2-C4 e D) e energéticos (fase B6) de cada alternativa de parede exterior e o VAL de W1, considerando diferentes padrões de consumo para a fase de utilização (garantindo 10, 35 ou 50% das necessidades energéticas) de ETICS com ICB e com EPS

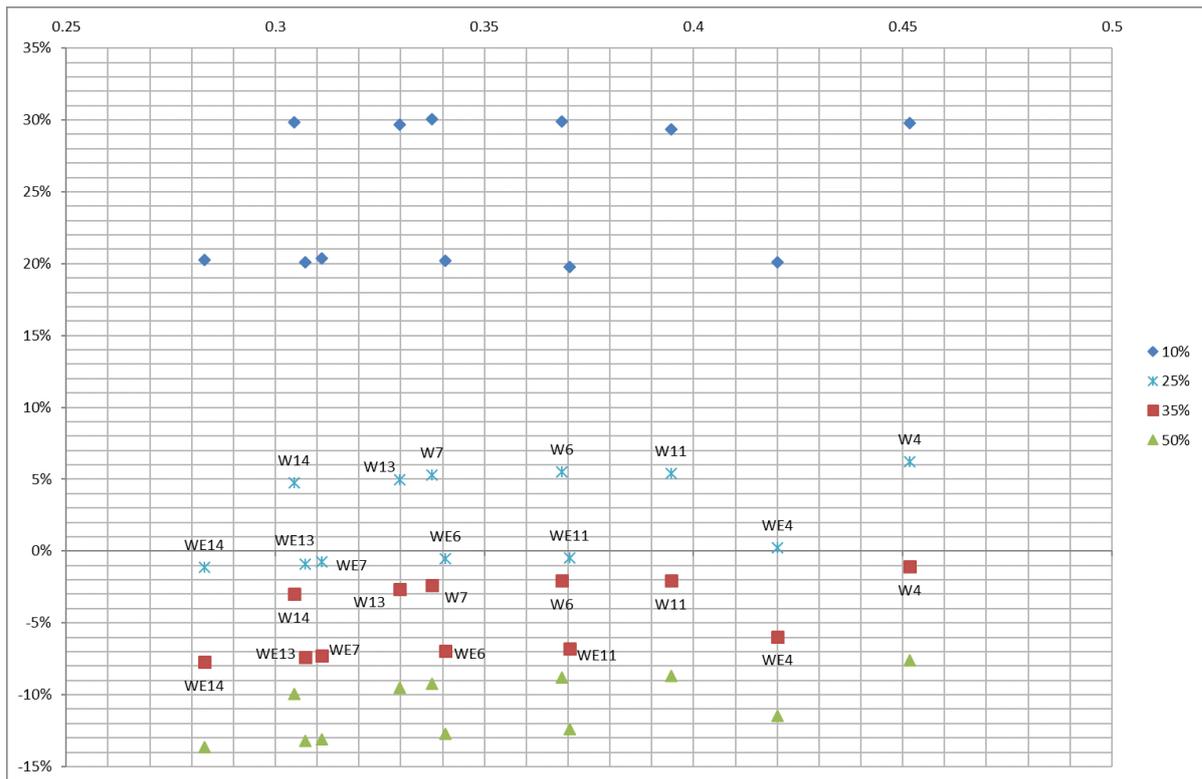


Figura 10 - Diferença entre o VAL dos custos económicos (fases A1-A5, B2-B4 e C2-C4 e D) e energéticos (fase B6) de cada alternativa de parede exterior e o VAL de W1, considerando diferentes padrões de consumo para a fase de utilização (garantindo 10, 35 ou 50% das necessidades energéticas) e o respetivo valor-U

5.3. Comparação das poupanças energéticas no aquecimento e arrefecimento

Os resultados obtidos na comparação do balanço económico, em relação às poupanças no impacto ambiental, demonstraram que o uso da espessura máxima nos ETICS na superfície externa das paredes exteriores pode resultar numa redução das emissões de carbono entre os 22% e os 31%. Resultados semelhantes foram obtidos para as poupanças no impacto ambiental do consumo de PE-NRe para a energias de aquecimento e arrefecimento durante o período de estudo.

6. Conclusões

Ao comparar as soluções do ETICS apenas com o ICB, os resultados deste estudo mostram que estas alternativas de parede exterior de ETICS com ICB têm uma vantagem ambiental devido à produção dos materiais utilizados, em termos das categorias “Potencial de Aquecimento Global” (GWP) e consumo de energia primária não renovável (PE-NRe), em comparação com a mesma solução com EPS.

Avaliando o consumo de energia para atender as necessidades de aquecimento e arrefecimento consideradas para ambas as soluções com a mesma espessura, a solução EPS requer menor consumo de energia, devido ao seu menor Valor-U. O custo de aquisição mais baixo dessa solução leva sempre a um custo "Cradle to Cradle" (C2C) mais reduzido.

Comparando duas soluções com valor-U semelhante, mas espessuras diferentes (as placas ICB com maior espessura devido à maior transmissão térmica), o consumo de energia necessário para cumprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento são muito semelhantes, diferindo no custo de aquisição de ambas as soluções e na energia e recursos necessários para a produção dos materiais. Devido ao alto custo comercial do ICB, a solução de EPS apresenta sempre menor VAL do custo económico e energético.

Ao comparar as soluções de parede simples, verificou-se que W2 apresenta o melhor desempenho ambiental, caso o uso de energia para aquecimento e arrefecimento não seja considerado. Com a consideração das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, W7 mostra o melhor desempenho ambiental. A solução mais econômica é WE7 para necessidades de energia superiores a 10%.

Ao comparar as soluções de parede dupla, verificou-se que a solução W9 apresenta o melhor desempenho ambiental se o uso de energia para aquecimento e arrefecimento não for considerado. Com a consideração das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, o melhor desempenho ambiental é mostrado pelo W14. Para necessidades de energia superiores a 10%, a solução mais econômica é a WE14.

Avaliando o consumo de energia necessária para cumprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento de soluções com ETICS em ICB e EPS com a mesma espessura, a solução em EPS requer um valor inferior de consumo de energia devido ao seu valor U mais reduzido. Assim sendo, associando também ao valor de aquisição mais reduzido, as soluções em EPS têm sempre um custo C2C mais reduzido.

Quando são comparadas duas soluções com valores de U semelhantes, mas espessuras diferentes, o consumo de energia necessária para cumprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento é idêntico, mas devido ao elevado custo de aquisição das placas de ICB, as soluções em EPS apresentam sempre um VAL dos custos económicos e energéticos mais reduzido.

Agradecimentos

Este estudo foi realizado no âmbito do projecto MARIE - Mediterranean Building Rethinking for Energy Efficiency Improvement (2011-2014), co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional e pelo Programa MED. Os autores gostariam de agradecer o apoio da FCT (Fundação da Ciência e tecnologia) e do CERIS-ICIST do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Um agradecimento especial aos produtores portugueses dos materiais de construção pela cedência dos dados necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Referências

- [1] M. R. Veiga. Training on external walls claddings, In: Construção 2004, 13-15 de dezembro, Porto, Portugal, 2004.
- [2] M. R. Veiga, C. P. Santos, Revestimento para isolamento térmico de fachadas: eficiência, durabilidade e garantia de qualidade. Construção Magazine 32 (2009) 12-18.
- [3] V.P. de Freitas, P.F. Gonçalves, Thermic insulation for external walls – Reinforced mortar mesh over EPS (ETICS), FEUP, Porto, Portugal. 2005.
- [4] P. Pierquet, J.L. Bowyer, P. Huelman, Thermal performance and embodied energy of cold climate wall systems. For. Prod. J., 48 (1998) 53-60.
- [5] G. Treloar, R. Fay, P.E.D. Love, U. Iyer-Raniga, Analysing the life-cycle energy of an Australian residential building and its householders. Build. Res. Inf., 28 (2000) 184–195. <https://doi.org/10.1080/096132100368957>.
- [6] S. F. Real. Contribution of life cycle cost analysis to design sustainability in construction (in Portuguese), Dissertação de M.Sc., Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2010.
- [7] J. D, Silvestre, J. Brito, M. D. Pinheiro, From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle (3E-C2C). Energy Build, 64 (2013) 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.001>.
- [8] Comité Européen de Normalisation (CEN). EN 15643-2, Sustainability of construction works- Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance, 2011.
- [9] Comité Européen de Normalisation (CEN). EN 15978, Sustainability of construction works -

- Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, 2011.
- [10] Comité Européen de Normalisation (CEN). EN 15804, Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2012.
- [11] M. Matos, L. Soares, L. Silva, P., Sequeira, J. Carvalho, Life cycle assessment of an ETICS system composed of a natural insulation material: a case study of a system using insulation cork board (ICB), In: Portugal SB13. Contribution of sustainable building to meet EU 20-20-20 Targets, Guimarães, Portugal, 2013.
- [12] International Organization for Standardization (ISO). ISO 15686-5:2008, Buildings and construction assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing, 2008.
- [13] Comité Européen de Normalisation (CEN). EN 15643-4, Sustainability of construction works- Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance, 2012.
- [14] Energias de Portugal, S.A., EDP. <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>, 2021 (acesso em 11 abril 2021).
- [15] R. Mateus, L. Bragança. Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT – H. Build. Environ., 46 (2011) 2166-2175.
- [16] RCCTE, Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios, Decreto de Lei nº 80/2006, 4 de abril, D.R.I-A Series 67– 2468-2513. 2006.
- [17] A. Coelho, J. de Brito. Economic analysis of conventional versus selective demolition – A case study. Resour. Conserv. Recycl., 55 (2011) 382-392.
- [18] H. Monteiro, F. Freire. Life-Cycle assessment of a house with alternative exterior walls: comparison of three assessment methods. Energy Build., (2012) 572-583.
- [19] A. Pinto. Aplicação da avaliação do ciclo de vida na análise energética e ambiental dos edifícios. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.

ORCID

J. Silvestre	0000-0002-3330-2000 (https://orcid.org/0000-0002-3330-2000)
A. Castelo	0000-0001-9889-2091 (https://orcid.org/0000-0001-9889-2091)
J. Silva	0000-0001-7907-2434 (https://orcid.org/0000-0001-7907-2434)
J. Brito	0000-0001-6766-2736 (https://orcid.org/0000-0001-6766-2736)
M. Pinheiro	0000-0001-5963-8947 (https://orcid.org/0000-0001-5963-8947)

Aplicação do segundo teorema de Castigliano na solução de estruturas hiperestáticas

Application of the Castigliano's second theorem in the solution of statically indeterminate plane structures.

A.M. Ilkiu^{a †}

^a UNITAU – Universidade de Taubaté, SP, Brasil

[†] Autor para correspondência: ilkiu@uol.com.br

RESUMO

No presente artigo, apresentam-se estudos de casos de análise de estruturas estaticamente indeterminadas ou hiperestáticas, utiliza-se o segundo teorema de Castigliano e o “Theorem of Last Work” na determinação das constantes hiperestáticas. Consideram-se modelos de estruturas sujeitos a carregamentos diversos onde, as condições de contorno nos apoios externos sugeridos como redundante são identificadas e as incógnitas ou constantes hiperestáticas determinadas. Destacam-se as análises das equações clássicas apresentadas por Timoshenko S.P. e Young D.H. (1965) e das teorias elásticas no desenvolvimento dos modelos matemáticos. Utiliza-se da simulação numérica, através do programa de Elementos Finitos (FEA) Ansys® onde, comparam-se os resultados numéricos e analíticos que foram obtidos pelas equações do presente trabalho.

ABSTRACT

The paper present is to analyze statically indeterminate plane structures, using the Castigliano's second theorem and the “Theorem of Last Work” in the determination of the statically indeterminate constants. For this, we consider models of structures subjected to different loads where the boundary conditions in the external supports are defined, the statically indeterminate constants being determined as unknowns. Noteworthy are the analysis of the classical equations presented for Timoshenko S.P. e Young D.H. (1965) of the elastic theories in the development of the mathematical models. We use numerical simulation using the finite element program (FEA) Ansys®, where we compare the numerical and analytical results obtained by the equations of the present work.

Palavras-chave:

Estruturas; Segundo Teorema de Castigliano; Elementos Finitos.

Keywords:

Structures; Castigliano's second theorem; Finite Elements.

1. Introdução

Em 1879, Alberto Castigliano, um engenheiro ferroviário italiano, publicou um livro no qual ele delineou um método para determinar os deslocamentos vertical, horizontal e angular em um determinado ponto de uma estrutura estática, seja ela uma treliça, viga ou pórtico. Esse método, que é chamado de segundo teorema de Castigliano, ou o método do trabalho mínimo, aplica-se somente a estruturas que têm temperatura constante e material com comportamento elástico linear. Se o deslocamento de um ponto vai ser determinado, o teorema enuncia que ele é igual à primeira derivada parcial da energia de deformação na estrutura em relação a uma força atuando em um ponto e na direção do deslocamento. De maneira similar, o deslocamento angular em um ponto em uma estrutura é igual à primeira derivada parcial da energia de deformação na estrutura em relação a um momento binário atuando no ponto e na direção do deslocamento angular.

Utilizando o método descrito é possível determinar as constantes hiperestáticas e ou os deslocamentos, em pontos específicos, em uma determinada estrutura, sendo possível sua solução analítica utilizando-se as equações clássicas da estática das estruturas. Este método vem sendo utilizado desde sua publicação, ganhando destaque quando da utilização de métodos numéricos na solução de estruturas complexas.

Quando um material elástico sofre deformações, ocorre a transformação do trabalho externo devido as cargas externas em energia de deformação. Esta energia é acumulada no material durante a deformação, que após liberada, faz com que o material volte ao seu estado original de repouso. Para derivar o segundo teorema de Castigliano, considere uma estrutura de qualquer forma arbitrária que é sujeita a uma série de n forças P_1, P_2, \dots, P_n . Tendo em vista que o trabalho externo realizado por essas cargas é igual à energia de deformação interna armazenada na estrutura, podendo escrever,

$$U_i = U_e \quad (1)$$

O trabalho externo é uma função das cargas externas. Desse modo,

$$U_i = U_e = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (2)$$

Se qualquer uma das forças for aumentada por um montante diferencial, o trabalho também é aumentado de tal maneira que a nova energia de deformação torna-se,

$$U_i + dU_i = U_i + \frac{\partial U_i}{\partial P_i} dP_i \quad (3)$$

Este valor, no entanto, não deve depender da sequência na qual as forças são aplicadas à estrutura. Por exemplo, se primeiro aplicarmos dP_i à estrutura, então isso vai fazer com que o corpo seja deslocado um montante diferencial $d\Delta_i$ na direção de dP_i . Sendo $U_e = 1/2 P \Delta$, o incremento de energia de deformação seria $1/2 dP_i d\Delta_i$. Essa quantidade, entretanto, é um diferencial de segunda ordem e pode ser desprezada, conforme adotado no presente trabalho. A aplicação adicional das cargas P_1, P_2, \dots, P_n , que deslocam o corpo $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$, resulta na energia de deformação.

$$U_i + dU_i = U_i + dP_i \Delta_i \quad (4)$$

A Equação (3) representa a energia de deformação no corpo determinada primeiro aplicando as cargas P_1, P_2, \dots, P_n , e a Equação (4) representa a energia de deformação primeiro aplicando dP_i . Tendo em vista que estas duas equações têm que ser iguais, é necessário que,

$$\Delta_i = \frac{\partial U_i}{\partial P_i} \quad (5)$$

Provando-se assim o teorema, isto é, o deslocamento Δ_i na direção de P_i é igual à primeira derivada parcial da energia de deformação em relação a P_i .

A Equação (4) é um enunciado relativo à compatibilidade da estrutura e exige apenas forças conservativas sejam consideradas para a análise. Estas forças realizam trabalho que é independente da trajetória e, portanto, não cria perda de energia. Tendo em vista que forças causando uma resposta elástica linear são conservativas, o teorema é restrito ao comportamento elástico linear do material.

Dentre os trabalhos sobre a aplicação do segundo teorema de Castigliano, destacam-se as teorias clássicas de Timoshenko S.P. e Young D.H. [1] e os trabalhos de Hibbeler R.C. [2], entre outros.

1.1. Objetivos

Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo aplicar o Segundo Teorema de Castigliano na solução de estruturas estáticamente determinada, como ferramenta para a obtenção dos coeficientes de flexibilidade para a determinação da equação de compatibilidade dos deslocamentos.

2. Metodologia

Foram considerados estudos de casos para apresentar a aplicação do método apresentados. Para tanto foram analisados os seguintes casos: Viga, pórtico e treliça estaticamente indeterminados, apoiados em molas elásticas e um arco parabólico simétrico estaticamente indeterminado.

Para estes casos foram realizadas simulações numéricas utilizando o programa de elementos finitos Ansys® [3], verificando-se as constantes hiperestáticas para a solução dos referidos casos.

3. Estudo de casos

3.1. Simbologia

Nos respectivos estudos de casos, para o cálculo dos coeficientes de flexibilidade, será utilizada a equação do segundo Teorema de Castigliano. A simbologia adotada está descrita a seguir:

δ_{i0} – Deslocamento no ponto onde esta aplicada a carga (constante hiperestática) X_i devido a carga real da estrutura, “ i ” varia de 1 até o número total de constantes hiperestáticas;

δ_{ii} – Deslocamento no ponto onde esta aplicada a carga X_i devido a própria carga X_i ;

δ_{ij} – Deslocamento no ponto onde esta aplicada a carga X_i devido a carga X_j ;

$\delta_{ij} = \delta_{ji}$ – Reciprocidade dos deslocamentos;

k_i – Constante elástica do apoio elástico, constante de mola;

X'_i – Carga virtual no ponto de aplicação da carga X_i ;

n – Número cortes para a determinação dos esforços internos;

m – Número de vão ou segmentos da estrutura;

M_n – Esforço interno momento fletor no corte “ n ”;

N_n – Esforço interno normal no corte “ n ”;

T_n – Esforço interno de torção no corte “ n ”;

Q_n – Esforço interno cortante no corte “ n ”;

Da seção transversal e do material por vão ou segmento da estrutura, tem-se:

I_m – Momento de inércia;

A_m – Área;

J_m – Momento polar de inércia;

Av_m – Área efetiva de cisalhamento;

E – Módulo de elasticidade do material;

G – Módulo de elasticidade transversal do material;

EI_m – Rigidez à flexão;

EA_m – Rigidez ao esforço normal;

GJ_m – Rigidez a torção;

GA_v_m – Rigidez ao cisalhamento;

L – Intervalo de integração ou comprimento do segmento da estrutura.

As equações principais utilizadas no cálculo dos coeficientes de flexibilidade:

Coefficiente de flexibilidade no ponto onde esta aplicada a carga “ i ” devido ao carregamento real:

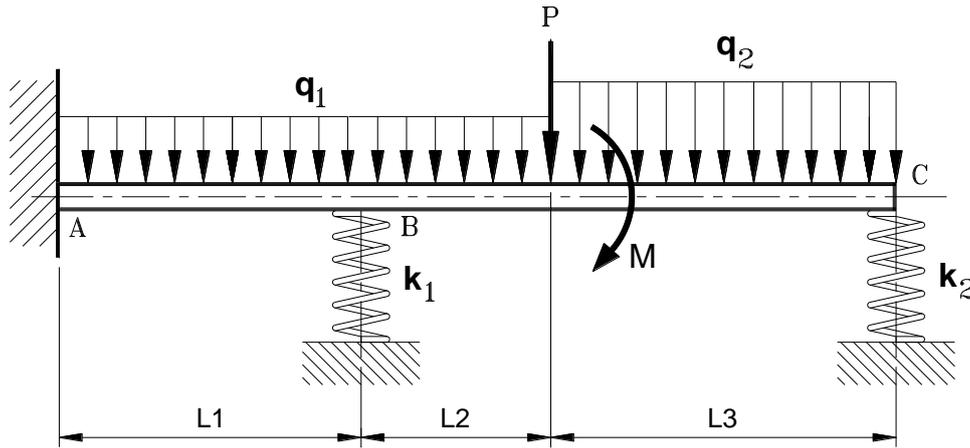


Figura 1 - Viga estaticamente indeterminada.

A representação dos cortes adotados, bem como a definição das constantes hiperestáticas, estão representados na Figura 2 a seguir.

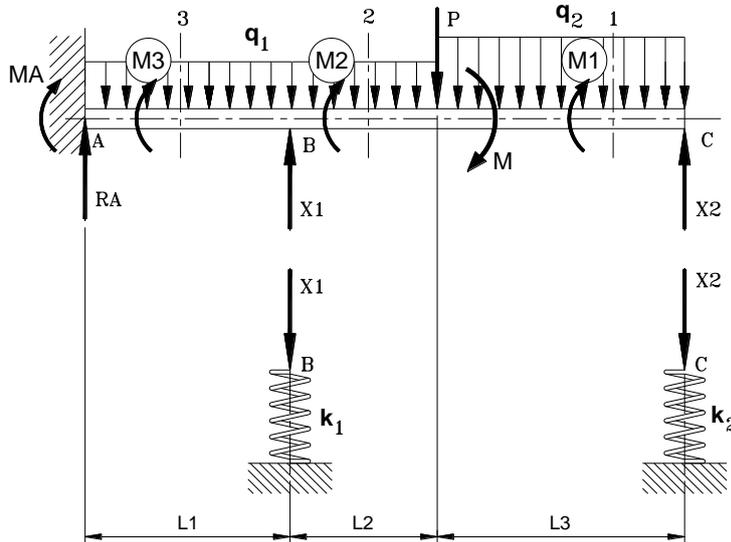


Figura 2 - Cortes e constantes hiperestaticas.

Para a determinação destes esforços, momento fletor e esforços contantes, consideram-se os cortes 1, 2 e 3, definidos conforme a distribuição das cargas e dos apoios. Os apoios “B” e “C” serão definidos como superabundantes, sendo X_1 e X_2 as constantes hiperestaticas. Nesta etapa, considera-se X'_i ($i = 1$ e 2), como cargas virtuais.

Corte 1: $0 \leq x_1 \leq L_3$

$$M_1 = -\frac{q_2}{2} x_1^2 + X'_2 x_1 [kNm] \tag{11.a}$$

$$Q_1 = \frac{\partial M_1}{\partial x_1} = -q_2 x_1 + X'_2 [kN] \tag{11.b}$$

Corte 2: $L_3 \leq x_2 \leq (L_2 + L_3)$

$$M_2 = -\frac{q_1}{2} (x_2 - L_3)^2 - q_2 L_3 \left(x_2 - \frac{L_3}{2} \right) - M - P(x_2 - L_3) + X'_2 x_2 [kNm] \tag{12.a}$$

$$Q_2 = \frac{\partial M_2}{\partial x_2} = -q_1 (x_2 - L_3) - q_2 L_3 - P + X'_2 [kN] \tag{12.b}$$

Corte 3: $(L_2+L_3) \leq x_3 \leq (L_1+L_2+L_3)$

$$M_3 = -\frac{q_1}{2}(x_3-L_3)^2 - q_2L_3\left(x_3 - \frac{L_3}{2}\right) - M - P(x_3-L_3) + X'_1[x_3-(L_2+L_3)] + X'_2x_3 \text{ [kNm]} \quad (13.a)$$

$$Q_3 = \frac{\partial M_3}{\partial x_3} = -q_1(x_3-L_3) - q_2L_3 - P + X'_1 + X'_2 \text{ [kN]} \quad (13.b)$$

Os coeficientes de flexibilidades são obtidos através das Equações (6) à (8), devido ao esforço cortante e ao momento fletor, aplicáveis neste caso. Substituindo-se os dados do problema nas Equações (11) à (13) e conseqüentemente nas Equações (6) à (8), obtêm-se os coeficientes de flexibilidade. Logo, a equação de compatibilidade dos deslocamentos, Equação (9), se escreve sob a forma:

$$\begin{aligned} -0,043106 + 0,000566X_1 + 0,001985X_2 &= 0 \\ -0,247882 + 0,001985X_1 + 0,013338X_2 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Resolvendo-se simultaneamente as Equações (14), resulta nas constantes hiperestáticas: $X_1 = 22,98$ [kN] e $X_2 = 15,16$ [kN]. Sendo as reações nos apoios “B” e “C” respectivamente, que torna a viga estáticamente determinada. Considerando apenas a influência do momento fletor, a equação de compatibilidade dos deslocamentos, Equação (9), se escreve sob a forma:

$$\begin{aligned} -0,042255 + 0,000540X_1 + 0,001960X_2 &= 0 \\ -0,246274 + 0,001960X_1 + 0,0132608X_2 &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Resolvendo-se simultaneamente as Equações (15), tem-se: $X_1 = 23,41$ [kN] e $X_2 = 15,11$ [kN]. Neste caso, o esforço cortante altera em aproximadamente 2% o resultado final.

Analisando-se a viga pelo programa de elementos finitos Ansys®, considerando o elemento BEAM3 para a viga e o elemento COMBIN14 para as molas, obteve-se os seguintes resultados: $X_1 = 23,415$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_1 = 1,17 \cdot 10^{-3}$ [m] e $X_2 = 15,111$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_2 = 5,04 \cdot 10^{-4}$ [m].

3.2.2. Viga estáticamente indeterminada apoiada em três molas

Considere a viga estáticamente indeterminada engastada no apoio “A” e apoiada sobre três molas de constantes elásticas $k_1 = 20000$ [kN/m], $k_2 = 25000$ [kN/m] e $k_3 = 30000$ [kN/m], nos apoios “B”, “C” e “D” respectivamente. A viga tem rigidez à flexão constante $EI = 18370,8$ [kNm²] e esta sujeita as cargas uniformemente distribuídas $q_1 = 2,0$ [kN/m] e $q_2 = 4,0$ [kN/m], uma carga concentrada $P = 10,0$ [kN] e a um momento concentrado $M = 20,0$ [kNm] e, tem dimensões $L_1 = 3,0$ [m], $L_2 = 2,0$ [m] e $L_3 = 4,0$ [m], conforme representada na Figura 3 a seguir.

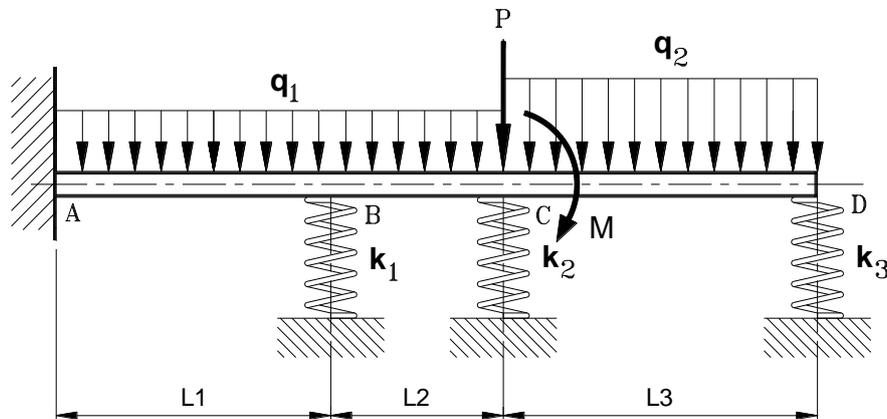


Figura 3 - Viga estáticamente indeterminada.

A representação dos cortes adotados, bem como a definição das constantes hiperestáticas, estão representados na Figura 4 à seguir.

Com base na verificação feita no item 3.1, será considerada apenas a influência dos momentos fletores, para tanto, consideram-se os cortes 1, 2 e 3, definidos conforme a distribuição das cargas e dos apoios. Definem-se os apoios “B”, “C” e “D” como superabundantes, sendo X_1 , X_2 e X_3 as constantes hiperestáticas. Nesta etapa, considera-se \bar{X}_i ($i = 1, 2$ e 3), como cargas virtuais.

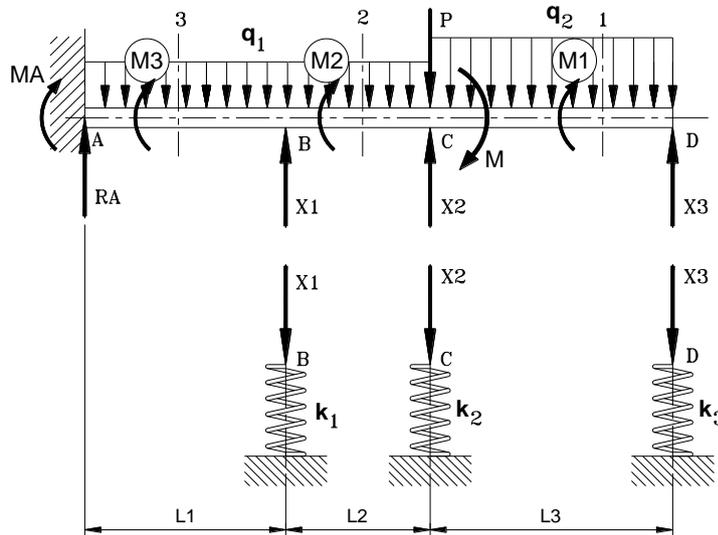


Figura 4 - Cortes e constantes hiperestáticas.

Corte 1: $0 \leq x_1 \leq L_3$

$$M_1 = -\frac{q_2}{2} x_1^2 + X_3 x_1 [\text{kNm}] \quad (16)$$

Corte 2: $L_3 \leq x_2 \leq (L_2 + L_3)$

$$M_2 = -\frac{q_1}{2} (x_2 - L_3)^2 - q_2 L_3 \left(x_2 - \frac{L_3}{2} \right) - M - P(x_2 - L_3) + X_2 (x_2 - L_3) + X_3 x_2 [\text{kNm}] \quad (17)$$

Corte 3: $(L_2 + L_3) \leq x_3 \leq (L_1 + L_2 + L_3)$

$$M_3 = -\frac{q_1}{2} (x_3 - L_3)^2 - q_2 L_3 \left(x_3 - \frac{L_3}{2} \right) - M - P(x_3 - L_3) + X_1 [x_3 - (L_2 + L_3)] + X_2 (x_3 - L_3) + X_3 x_3 [\text{kNm}] \quad (18)$$

Substituindo-se os dados do problema nas Equações (16) à (18) e conseqüentemente nas Equações (6) à (8), obtêm-se os coeficientes de flexibilidade devido apenas ao momento fletor. Logo, a equação de compatibilidade dos deslocamentos, Equação (9), se escreve sob a forma:

$$\begin{aligned} -0,042255 + 0,000540 X_1 + 0,000979 X_2 + 0,001960 X_3 &= 0 \\ -0,102858 + 0,000979 X_1 + 0,002308 X_2 + 0,004990 X_3 &= 0 \\ -0,246274 + 0,001960 X_1 + 0,004990 X_2 + 0,013261 X_3 &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Resolvendo-se simultaneamente as Equações (19), tem-se: $X_1 = 1,08$ [kN], $X_2 = 23,06$ [kN] e $X_3 = 9,74$ [kN]. Sendo que X_1 , X_2 e X_3 , constantes hiperestáticas, são as reações nos apoios “B”, “C” e “D” respetivamente, que torna a viga estaticamente determinada.

Analisando-se a viga pelo programa de elementos finitos Ansys®, considerando o elemento BEAM3 para a viga e o elemento COMBIN14 para as molas, obteve-se os seguintes resultados: $X_1 = 1,081$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_1 = 5,40 \cdot 10^{-5}$ [m], $X_2 = 23,06$ [kN], para

o deslocamento vertical $\delta_2 = 9,22 \cdot 10^{-4}$ [m] e $X_3 = 9,735$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_3 = 3,24 \cdot 10^{-4}$ [m].

3.2.3. *Pórtico estaticamente indeterminado apoiada em duas molas*

Considere o pórtico estaticamente indeterminado engastado no apoio “A” e apoiado sobre duas molas no apoio “C”. As molas têm constantes elásticas $k_1 = 25000$ [kN/m] e $k_2 = 40000$ [kN/m] respectivamente. O pórtico tem rigidez à flexão constante $EI = 246400$ [kNm²] e, esta sujeito as cargas uniformemente distribuídas $q_1 = 4,0$ [kN/m] e $q_2 = 6,0$ [kN/m] e a uma carga concentrada $P = 10,0$ [kN]. Tem dimensões $L = 4,0$ [m], $H_1 = 2,0$ [m] e $H_2 = 4,0$ [m], conforme representada na Figura 5 a seguir.

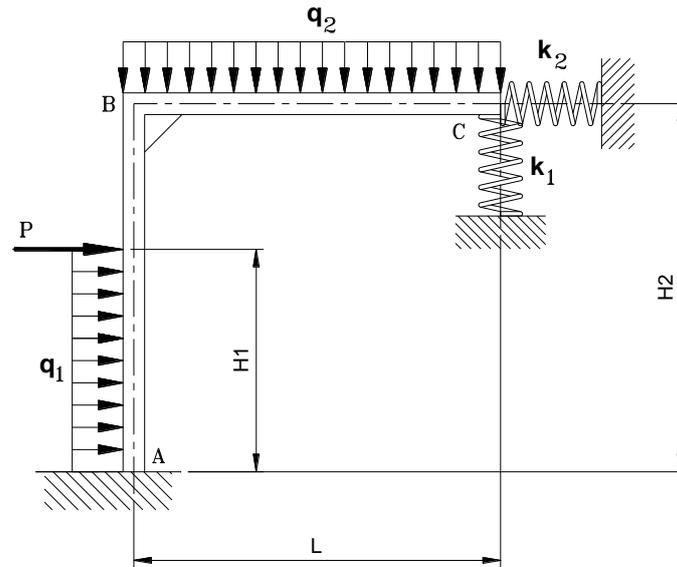


Figura 5 - Pórtico estaticamente indeterminado.

A representação dos cortes adotados, bem como a definição das constantes hiperestáticas, estão representados na Figura 6 à seguir.

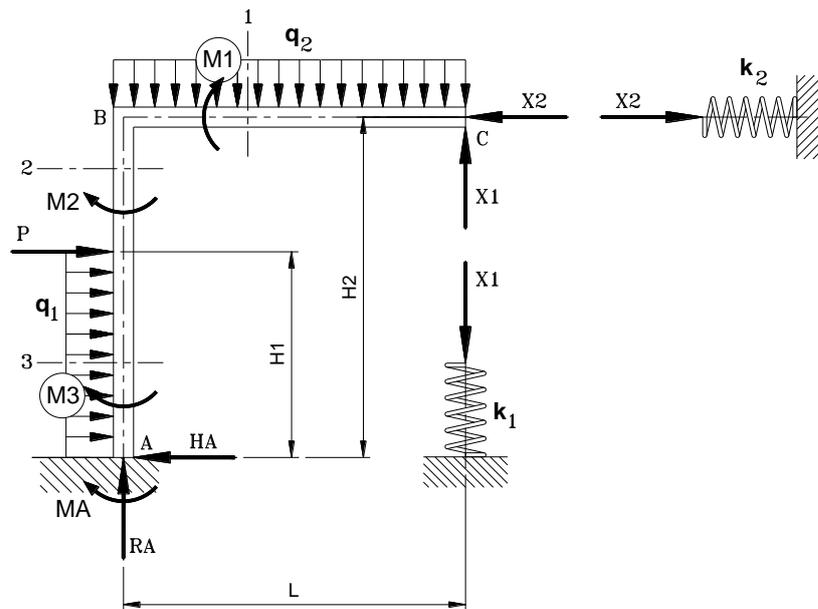


Figura 6 - Cortes e constantes hiperestáticas.

Para a determinação dos momentos fletores, considera-se os cortes 1, 2 e 3. Define-se o apoio “C” como superabundante, sendo X_1 e X_2 as constantes hiperestáticas. Nesta etapa, considera-se \bar{X}_i ($i = 1$ e 2), como cargas virtuais.

Corte 1: $0 \leq x_1 \leq L$

$$M_1 = -\frac{q_2}{2} x_1^2 + X'_1 x_1 [kNm] \quad (20)$$

Corte 2: $0 \leq x_2 \leq (H_2 + H_1)$

$$M_2 = -\frac{q_2}{2} L^2 + X'_2 x_2 + X'_1 L [kNm] \quad (21)$$

Corte 3: $(H_2 - H_1) \leq x_3 \leq H_2$

$$M_3 = -\frac{q_1}{2} [x_3 - (H_2 - H_1)]^2 - \frac{q_2}{2} L^2 - P[x_3 - (H_2 - H_1)] + X'_1 L + X'_2 x_3 [kNm] \quad (22)$$

Substituindo-se os dados do problema nas Equações (20) à (22) e consequentemente nas Equações (6) à (8), obtêm-se os coeficientes de flexibilidade. Logo, a equação de compatibilidade dos deslocamentos, Equação (9), se escreve sob a forma:

$$\begin{aligned} -0,004307 + 0,000386X_1 + 0,000130X_2 &= 0 \\ -0,001905 + 0,000130X_1 + 0,000112X_2 &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Resolvendo-se simultaneamente as Equações (23), resulta que: $X_1 = 8,89$ [kN] e $X_2 = 6,72$ [kN]. Sendo que X_1 e X_2 são as constantes hiperestáticas, que torna o pórtico estaticamente determinado.

Analisando-se o pórtico pelo programa de elementos finitos Ansys®, considerando o elemento BEAM3 para a viga e o elemento COMBIN14 para as molas, obteve-se os seguintes resultados: $X_1 = 8,91$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_1 = 3,56 \cdot 10^{-3}$ [m] e $X_2 = 6,68$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ [m].

3.2.4. Treliça estaticamente indeterminada apoiada em duas molas

Considere a treliça estaticamente indeterminada articulada no nó “A”, apoiada no nó “B” e apoiada sobre duas molas, uma vertical e outra horizontal, no nó “C”. As molas têm constantes elásticas $k_1 = 10000$ [kN/m] e $k_2 = 20000$ [kN/m] respectivamente. As barras da treliça têm rigidez axial constante $EA = 412334$ [kN] e, esta sujeita a uma carga concentrada $P = 10$ [kN] inclinada de 30° com a vertical, aplicada no nó “C”. A treliça tem dimensões $L = 3,0$ [m] e $H = 2,0$ [m], conforme representada na Figura 7 a seguir.

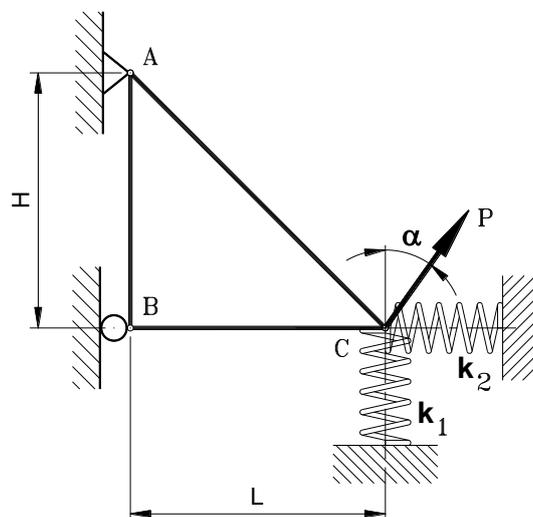


Figura 7 - Treliça estaticamente indeterminada.

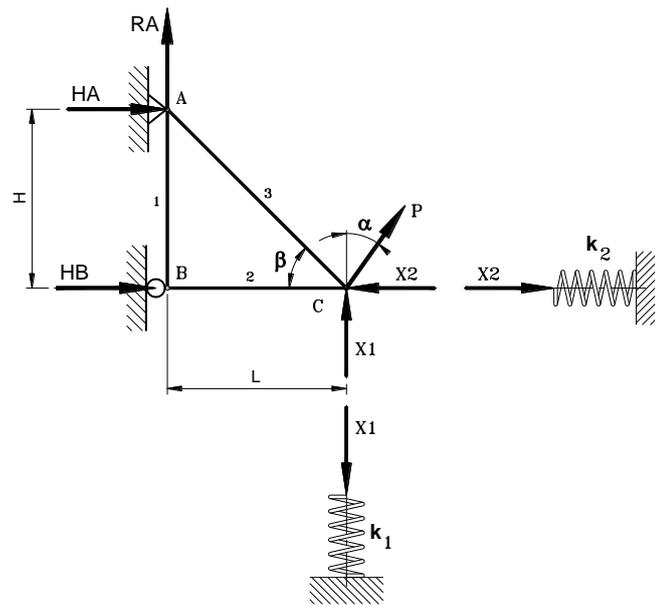


Figura 8 - Barras da treliça e constantes hiperestáticas.

Para a determinação das forças que atuam nas barras, define-se o apoio “C” como superabundante, sendo X_1 e X_2 as constantes hiperestáticas. Nesta etapa, considera-se \bar{X}_i ($i = 1$ e 2), como cargas virtuais. Os coeficientes de flexibilidades são obtidos através das Equações (6) à (8), devido apenas o esforço interno normal. Sendo que N_n e L_n são constantes em cada barra, as equações podem ser apresentadas na seguinte forma:

$$\delta_{i0} = \frac{1}{EA} \sum_1^n \left(N_n L_n \frac{\partial N_n}{\partial X'_i} \right) \tag{24}$$

$$\delta_{ii} = \frac{1}{k_i} + \frac{1}{EA} \sum_1^n \left[\left(\frac{\partial N_n}{\partial X'_i} \right)^2 L_n \right] \tag{25}$$

$$\delta_{ij} = \frac{1}{EA} \sum_1^n \left(\frac{\partial N_n}{\partial X'_i} \frac{\partial N_n}{\partial X'_j} L_n \right) \tag{26}$$

A equação de compatibilidade dos deslocamentos, Equação (9), se escrevem sob a forma:

$$\begin{aligned} 4,425 \cdot 10^{-4} + 1,448 \cdot 10^{-4} X_1 - 1,091 \cdot 10^{-5} X_2 &= 0 \\ -1,309 \cdot 10^{-4} - 1,091 \cdot 10^{-5} X_1 + 5,723 \cdot 10^{-5} X_2 &= 0 \end{aligned} \tag{27}$$

Resolvendo-se simultaneamente as Equações (27), resulta que: $X_1 = -2,926$ [kN] e $X_2 = 1,730$ [kN].

Analisando-se a treliça pelo programa de elementos finitos Ansys®, considerando o elemento LINK1 para as barras e o elemento COMBIN14 para as molas, obteve-se os seguintes resultados: $X_1 = -2,926$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_1 = 2,93 \cdot 10^{-4}$ [m] e $X_2 = 1,726$ [kN], para o deslocamento vertical $\delta_2 = 8,64 \cdot 10^{-5}$ [m].

3.2.5. Arco parabólico simétrico bi-engastado

Considere o arco parabólico simétrico engastado nos apoios “A” e “B”, o vão entre os apoios é $L = 10$ [m], altura máxima $f = 3$ [m] e sujeito a uma carga uniformemente distribuída $q = 6,0$ [kN/m]. Considera-se que o eixo do arco é uma parábola definida pela equação $y = 4fx^2/L^2$. A seção transversal é retangular e constante de largura $b = 120$ [mm] e altura $h = 300$ [mm], sendo $E = 21$ [GPa].

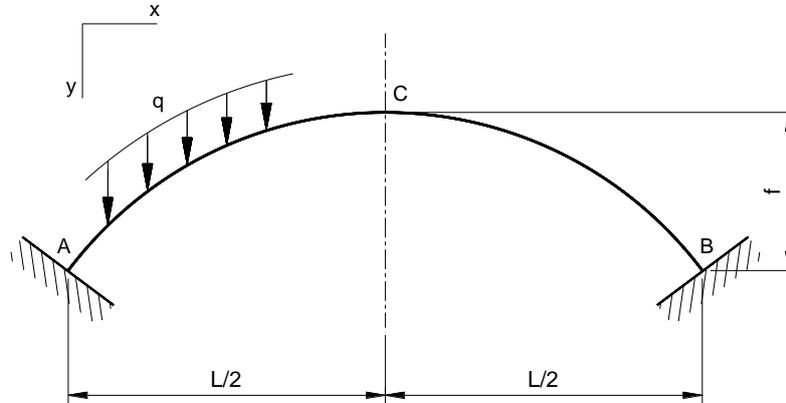


Figura 9 - Arco parabólico simétrico bi-engastado.

Neste caso será aplicado o “Theorem of Last Work” para a determinação das constantes hiperestáticas. O modelo para a análise do arco com as reações nos apoios, esforços internos e constantes hiperestáticas, estão representados na Figura 10 à seguir.

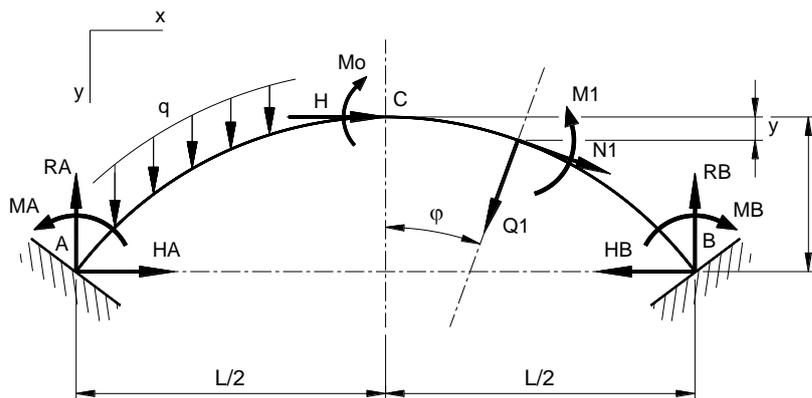


Figura 10 - Modelo para a análise do arco parabólico.

Da condição de simetria, à partir do ponto “C”, tem-se:

$$\text{Tan}(\varphi) = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{8fx}{L^2} \tag{28}$$

Portanto:

$$\text{Cos}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8fx}{L^2}\right)^2}} \quad \text{e} \quad \text{Sen}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8fx}{L^2}\right)^2}} \tag{29}$$

Transferindo-se as cargas da metade esquerda do arco, para o ponto “C”, tem-se:

$$M_o = \frac{qL^2}{8} - MA - Hf \quad \text{sendo que} \quad RA = \frac{qL}{2} \tag{30.a,b}$$

Analisando o corte 1 à partir do ponto “C”, desprezando o efeito dos esforços cortantes, tem-se:

$$M_1 = -\frac{qx^2}{2} + \frac{qL^2}{8} - MA - H(f - y) \quad (31)$$

$$N_1 = -qx \text{Sen}(\varphi) - H \text{Cos}(\varphi) \quad (32)$$

Da equação (10), tem-se:

$$\delta_{HC} = 0 = \int_0^L \frac{M_1}{EI} \frac{\partial M_1}{\partial H} dx + \int_0^L \frac{N_1}{EA} \frac{\partial N_1}{\partial H} dx \quad (33)$$

$$\theta_C = 0 = \int_0^L \frac{M_1}{EI} \frac{\partial M_1}{\partial MA} dx \quad (34)$$

Resolvendo-se as equações (33) e (34), resulta que: $H = 24,7672$ [kN] e $MA = 0,4656$ [kNm].

Analisando-se o arco parabólico pelo programa de elementos finitos Ansys®, considerando o elemento BEAM3 para o arco, obteve-se os seguintes resultados: $H = 24,664$ [kN] e $MA = 0,4158$ [kNm].

3. Comentários e conclusões

O modelo proposto baseado nas equações clássicas de Timoshenko e Young [1] e nos trabalhos de Hibbeler [2] (2013), apresentam bons resultados comparados aos resultados numéricos obtidos pelo programa de elementos finitos Ansys®. As considerações adotadas quanto a desconsiderar os efeitos dos esforços cortantes, não afetaram significativamente os resultados finais apresentados. Os resultados apresentados, com base nas teorias clássicas, podem auxiliar na análise de elementos estruturais, sendo mais uma fonte de consulta auxiliando na definição dos parâmetros estruturais e nas condições de contorno.

Referências

- [1] S. P. Timoshenko, D. H. Young. Theory of Structures. McGraw-Hill, New York, 1965.
- [2] R. C. Hibbeler. Análise das Estruturas, Pearson, Engenharia edition, 2013.
- [3] Swanson Analysis Systems (ANSYS). Engineering Analysis System. Theoretical Manual. Swanson Analysis Systems, 1989.
- [4] H. L. Soriano, S. S. Lima. Análise de Estruturas - Método das Forças e Método dos Deslocamentos, Editora Moderna Ltda, São Paulo, 2006.

ORCID

A. M. Ilkiu 0000-0001-8186-3075 (<https://orcid.org/0000-0001-8186-3075>)

Análise das teorias de viga de Bernoulli e Timoshenko para vigas em diferentes condições de contorno

Analysis of Bernoulli and Timoshenko beam theories for beams in different boundary conditions

T.C. Silva^{a†}

^a *Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Civil Rio de Janeiro, Brasil*[†]
Autor para correspondência: thiagocunha0307@gmail.com

RESUMO

Neste artigo é analisado o comportamento estrutural de vigas utilizando as teorias de viga de Bernoulli e Timoshenko alterando-se a relação entre o vão e a altura da seção transversal e variando a condição de contorno do elemento estrutural. A geometria dos elementos estruturais analisados foram vigas de seção retangular, pôde-se constatar que para vigas isostáticas o efeito da distorção devido ao cisalhamento (teoria de Timoshenko) tem pouca influência no aumento dos deslocamentos, em vigas contínuas esse efeito passa a ter uma maior contribuição, enquanto que para viga bi-encastrada esse efeito contribui de maneira significativa para o aumento dos deslocamentos na estrutura. Foram propostas relações limites de tamanho de vão e altura da seção transversal em função da condição de contorno para a consideração da distorção por cisalhamento.

ABSTRACT

In this article, the structural behavior of beams is analyzed using the beam theories of Bernoulli and Timoshenko, changing the relationship between the span and the height of the cross section and varying the boundary condition of the structural element. The geometry of the structural elements analyzed were beams of rectangular section, it could be seen that for isostatic beams the effect of distortion due to shear (Timoshenko's theory) has little influence on the increase of displacements, in continuous beams this effect has a greater contribution, while for fixed ends beams this effect contributes significantly to the increase of displacements in the structure. Limit relationships of span size and cross-section height as a function of the boundary condition were proposed for the consideration of shear distortion.

Palavras-chave:

Viga de
Timoshenko;
Coeficiente de
cisalhamento;
Análise estrutural.

Keywords:

Timoshenko's beam;
Shear coefficient;
Structural analysis.

1. Introdução

No dimensionamento estrutural algumas hipóteses devem ser estabelecidas afim de criar um modelo matemático para caracterizar determinado fenômeno físico. Na engenharia estrutural pode-se citar como as teorias mais importantes as de viga de Bernoulli e de Timoshenko.

A teoria de viga de Bernoulli consiste em admitir, que para pequenas deformações, as seções transversais permanecem planas e perpendiculares à linha neutra. Tal hipótese é válida somente quando a viga está submetida a pequenas deformações e pequenos deslocamentos, para grandes deformações e deslocamentos tal hipótese não é mais válida.

A teoria de viga de Timoshenko considera a distorção por cisalhamento que ocorre na seção transversal, ou seja, as seções não necessariamente ficam planas em relação à seção

transversal, isto é, ocorre o empenamento da seção. Tal efeito torna-se considerável para vigas de baixa relação entre o vão e a altura da seção. De forma análoga à teoria de viga de Bernoulli tais hipóteses são válidas somente para vigas de pequenas deformações e deslocamentos.

A teoria de viga de Timoshenko pode ser vista como a teoria mais precisa do ponto de vista físico do problema, haja vista que ela se aproxima mais do comportamento real da estrutura por considerar em sua formulação o efeito do cisalhamento, que é desconsiderado na teoria de viga de Bernoulli. Entretanto, o coeficiente de cisalhamento, oriundo da teoria de viga de Timoshenko, ainda é objeto de muitos estudos, como pode ser visto em [1,2].

Existem inúmeros trabalhos que visam quantificar de forma mais precisa o coeficiente de cisalhamento da teoria de viga de Timoshenko. [1] apresenta uma compilação de diversas expressões para o valor do coeficiente de cisalhamento para diversos tipos de seções, [3] apresenta correções do fator de cisalhamento com base nos eixos principais de inércia para seções não simétricas e [2] apresenta uma nova abordagem para determinação do efeito do coeficiente de cisalhamento considerando os métodos energéticos.

2. Teoria de viga de Timoshenko

Os deslocamentos da teoria de viga de Timoshenko são dados por

$$u_x = -z\varphi \quad (1)$$

$$u_y = 0 \quad (2)$$

$$u_z = w(x) \quad (3)$$

Onde φ é a rotação total da seção, que considera a rotação devido à distorção por cisalhamento e devido à flexão da viga e w é o deslocamento ao longo do eixo z .

As equações de equilíbrio são dadas pelas seguintes equações diferenciais

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d\varphi}{dx} \right) = q(x) \quad (4)$$

$$\frac{dw}{dx} = \varphi - \frac{1}{kGA} \frac{d}{dx} \left(EI \frac{d\varphi}{dx} \right) \quad (5)$$

A teoria de viga de Timoshenko se reduz à teoria de viga de Bernoulli quando a expressão 6 for próxima de zero, ou seja

$$\frac{EI}{kL^2GA} \ll 1 \quad (6)$$

Onde EI é a rigidez à flexão, GA é a rigidez transversal, L é o comprimento do elemento, e k é o coeficiente de cisalhamento.

Combinando as equações 4 e 5 para uma viga homogênea de seção transversal constante tem-se

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) - \frac{EI}{kGA} \frac{d^2 q}{dx^2} \quad (7)$$

O momento fletor e a força cortante são dadas por

$$M = -EI \frac{d\varphi}{dx} \quad (8)$$

$$V = kGA \left(-\varphi + \frac{dw}{dx} \right) \quad (9)$$

A dedução da formulação da teoria de viga de Timoshenko pode ser vista de forma mais detalhada em [4,5]. A Figura 1 mostra a diferença na consideração entre os dois modelos de viga em uma viga encastrada e livre de seção transversal retangular constante.

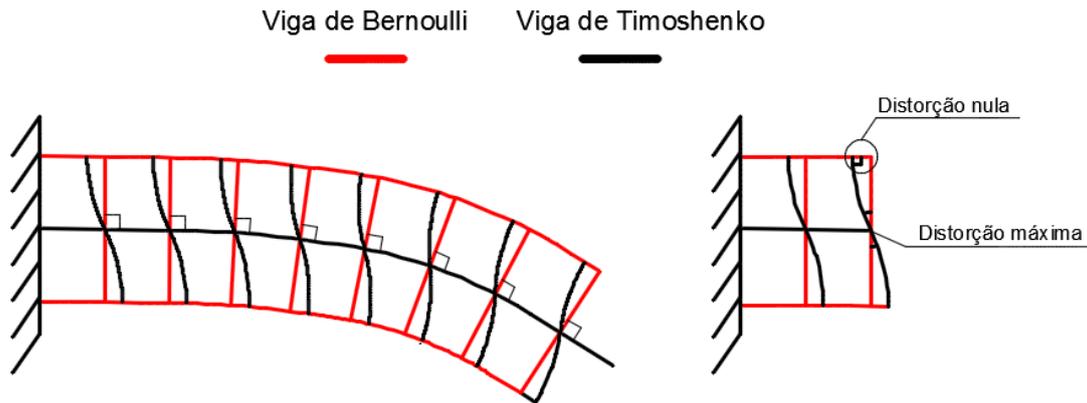


Figura 1 - Modelo de viga de Bernoulli e Timoshenko.

Embora o emprego da teoria de viga de Bernoulli seja o mais abordado nas universidades, a teoria de viga de Timoshenko representa o comportamento mais próximo da realidade, conforme apresentado em [6], sendo recomendável que mesmo com pouca diferença entre os métodos seja utilizada a teoria de viga de Timoshenko.

3. Coeficiente de cisalhamento

Diversos autores propuseram uma grande variedade de fórmulas para o parâmetro do coeficiente de cisalhamento, conforme abordado em [1], algumas formulações são apresentadas em sequência.

Cowper cit. por [1] apresenta a seguinte fórmula para o cálculo do coeficiente de cisalhamento em seções retangulares.

$$k = \frac{10(1 + \nu)}{12 + 11\nu} \quad (10)$$

O valor considerado de $k=5/6$ é obtido somente quando o coeficiente de Poisson é nulo, o que constitui uma aproximação que não corresponde à realidade. Existem outras formulações semelhantes à equação 10 que levam em consideração a relação entre a base e a altura da seção, pode-se citar as formulações de Stephen cit. por [1] e Hutchinson cit. por [1], contudo há pouca discrepância de valores para tais formulações, principalmente para uma elevada razão entre a base e a altura da seção.

Em seções circulares, Hutchinson cit. por [1] apresenta a seguinte expressão para o coeficiente de cisalhamento.

$$k = \frac{6(1 + \nu)^2}{7 + 12\nu + 4\nu^2} \quad (11)$$

Outras formulações são apresentadas em [1] para seções circulares. Verifica-se a partir dos estudos de [1,2] que o coeficiente de cisalhamento é função do coeficiente de Poisson e da relação entre as dimensões da seção transversal.

É interessante notar que os valores do coeficiente de cisalhamento para seção circular e retangular, quando admitido coeficiente de Poisson nulo, chegam ao mesmo valor obtido pelas expressões de Cowper cit. por [1].

Os coeficientes apresentados são válidos para seções cujo centro de cisalhamento seja coincidente com o centro de gravidade da seção, [7,8] demonstram que para seções cujo centro de cisalhamento difira do centro de gravidade ocorrem mudanças em sua formulação.

Uma das dificuldades da implementação da teoria de Timoshenko na análise estrutural está na determinação do coeficiente para determinadas seções. Segundo [7], embora os coeficientes de cisalhamento propostos em literatura tenham bases sólidas, ainda há relutância em sua aceitação pois as explicações não são totalmente convincentes e sua eficácia não tem sido avaliada para uma variedade de aplicações.

Demais coeficientes de cisalhamento foram omitidos desse estudo por não serem usuais na prática, contudo, recomenda-se os trabalhos de [1,2,3,7] para maior conhecimento sobre o assunto.

4. Formulação matricial

Soriano [9] apresenta a formulação matricial pelo método dos deslocamentos considerando o efeito de deformação devido à força cortante, O efeito da deformação devido à força cortante é dado pela expressão 12.

$$\varphi = \frac{12EI}{GA \cdot L^2 k} \quad (12)$$

A matriz de rigidez de um elemento de barra, considerando o efeito da distorção devido ao cisalhamento, é dada por

$$K := \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3 \cdot (1 + \phi)} & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & 0 & \frac{12EI}{L^3 \cdot (1 + \phi)} & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} \\ 0 & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & \frac{(4 + \phi) \cdot EI}{L \cdot (1 + \phi)} & 0 & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & \frac{(2 - \phi) \cdot EI}{L \cdot (1 + \phi)} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3 \cdot (1 + \phi)} & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & 0 & \frac{12EI}{L^3 \cdot (1 + \phi)} & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} \\ 0 & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & \frac{(2 - \phi) \cdot EI}{L \cdot (1 + \phi)} & 0 & \frac{6 \cdot EI}{L^2 \cdot (1 + \phi)} & \frac{(4 + \phi) \cdot EI}{L \cdot (1 + \phi)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

5. Análise numérica

As análises efetuadas nos itens 5.1, 5.2 e 5.3 foram realizadas com auxílio do software Mathcad tendo como base as rotinas implementadas em [9]. O carregamento adotado em todos os exemplos foi distribuído com intensidade de 20 kN/m, variou-se a altura da seção para cada situação mantendo a base constante com valor de 20 cm.

Admitiu-se a resistência característica de compressão do concreto é $f_{ck}=30$ MPa e foi considerado o módulo de elasticidade secante proposto pela NBR 6118 [10] dado pela expressão 14

$$E = 4760 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 26,07 \text{ GPa} \quad (14)$$

O coeficiente de cisalhamento foi obtido por meio da equação 10 admitindo-se coeficiente de Poisson $\nu=0,2$ obtendo-se

$$k = \frac{10(1 + 0,2)}{12 + 2,2} = 0,845 \quad (15)$$

É interessante ressaltar que o valor obtido na expressão 15 é muito próximo do valor normalmente utilizado para seções retangulares de 5/6 tendo uma diferença inferior a 2%.

5.1. Viga biapoçada

Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam os resultados obtidos para o deslocamento máximo em uma viga biapoçada dado pela Figura 2.

Os resultados obtidos na Tabela 1 e Tabela 2 são consistentes com os dados apresentados em [9,11], haja vista que o efeito da distorção por cisalhamento não influencia de forma significativa os deslocamentos, apenas para uma baixa relação entre o vão e a altura da seção. Oñate cit. por [12] relata que para uma relação vão/altura inferior a 10 deve-se aplicar a teoria de viga de Timoshenko, ou seja, considerando uma diferença de 2% nos deslocamentos em relação à teoria de Bernoulli, que consiste em um critério aceitável para se utilizar o coeficiente de cisalhamento.

O dimensionamento de vigas de elevada esbeltez pela Teoria de Timoshenko ou Bernoulli não é usual, contudo, o parâmetro objeto de estudo foi a influência do efeito da distorção devido ao cisalhamento na seção em função da razão entre a altura da viga e o comprimento do vão. Assim, a esbeltez da seção não influenciou os resultados obtidos.

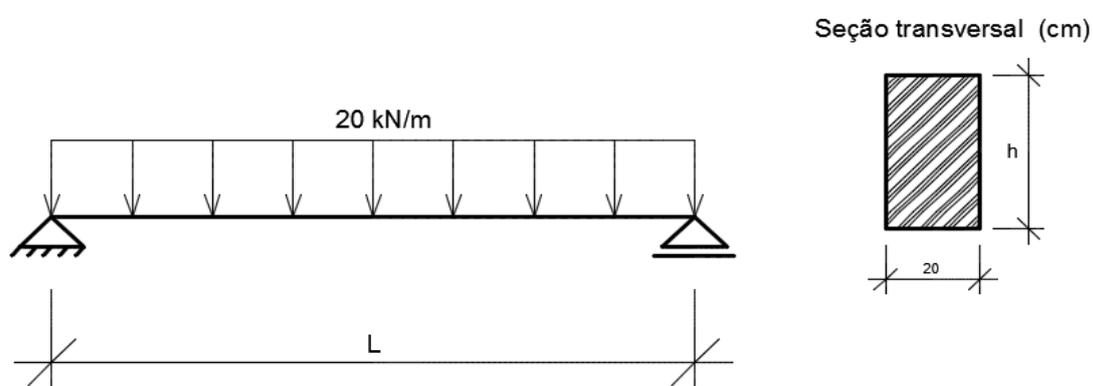


Figura 2 - Modelo estrutural viga biapoçada.

Tabela 1 - Viga biapoiada com vão de 10 metros.

Deslocamento máximo (mm)		Altura da seção (mm)	Diferença absoluta (mm)	Razão (1)/(2)	vão (m)	Razão vão/altura
Tmoshenko (1)	Bernoulli (2)					
222.421	221.967	300	0.454	1.00	10	33.3
93.983	93.642	400	0.341	1.00	10	25.0
48.217	47.945	500	0.272	1.01	10	20.0
27.973	27.746	600	0.227	1.01	10	16.7
17.667	17.473	700	0.194	1.01	10	14.3
11.876	11.705	800	0.171	1.01	10	12.5
8.372	8.221	900	0.151	1.02	10	11.1
6.129	5.993	1000	0.136	1.02	10	10.0
4.627	4.503	1100	0.124	1.03	10	9.1
3.582	3.468	1200	0.114	1.03	10	8.3
2.833	2.728	1300	0.105	1.04	10	7.7
2.281	2.184	1400	0.097	1.04	10	7.1
1.867	1.776	1500	0.091	1.05	10	6.7
1.548	1.463	1600	0.085	1.06	10	6.3
1.3	1.22	1700	0.08	1.07	10	5.9
1.103	1.028	1800	0.075	1.07	10	5.6
0.945	0.874	1900	0.071	1.08	10	5.3
0.817	0.749	2000	0.068	1.09	10	5.0

Tabela 2 - Viga biapoiada com vão de 5 metros.

Deslocamento máximo (mm)		Altura da seção (mm)	Diferença absoluta (mm)	Razão (1)/(2)	vão (m)	Razão vão/altura
Tmoshenko (1)	Bernoulli (2)					
13.986	13.873	300	0.113	1.01	5	16.7
5.938	5.853	400	0.085	1.01	5	12.5
3.065	2.997	500	0.068	1.02	5	10.0
1.791	1.734	600	0.057	1.03	5	8.3
1.141	1.092	700	0.049	1.04	5	7.1
0.774	0.732	800	0.042	1.06	5	6.3
0.552	0.514	900	0.038	1.07	5	5.6
0.409	0.375	1000	0.034	1.09	5	5.0
0.312	0.281	1100	0.031	1.11	5	4.5
0.245	0.217	1200	0.028	1.13	5	4.2
0.197	0.17	1300	0.027	1.16	5	3.8
0.161	0.137	1400	0.024	1.18	5	3.6
0.134	0.111	1500	0.023	1.21	5	3.3
0.113	0.091	1600	0.022	1.24	5	3.1
0.096	0.076	1700	0.02	1.26	5	2.9

0.083	0.064	1800	0.019	1.30	5	2.8
0.073	0.055	1900	0.018	1.33	5	2.6
0.064	0.047	2000	0.017	1.36	5	2.5

5.2. Viga bi-encastada

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os resultados obtidos para o deslocamento máximo em uma viga bi-encastada dado pela Figura 3.

A razão entre os deslocamentos na teoria de viga de Timoshenko e Bernoulli obtidos na viga encastada foram significativamente superiores em comparação à razão obtida na condição de contorno de viga biapoiada. Esse resultado está de acordo com [4] onde foi realizado um estudo da carga crítica de flambagem considerando as teorias de Bernoulli e Timoshenko para uma viga encastada e foi constatado que os deslocamentos oriundos da teoria de viga de Timoshenko foram significativamente superiores aos de Bernoulli.

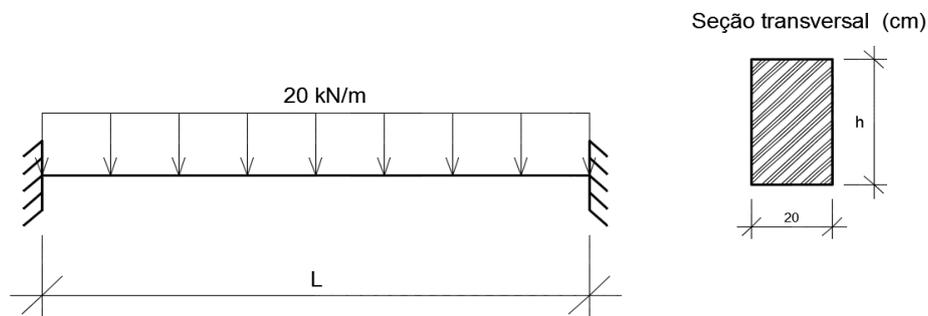


Figura 3 - Modelo estrutural viga bi-encastada.

Tabela 3 - Viga bi-encastada com vão de 10 metros.

Deslocamento máximo (mm)		Altura da seção (mm)	Diferença absoluta (mm)	Razão (1)/(2)	vão (m)	Razão vão/altura
Tmoshenko (1)	Bernoulli (2)					
44.847	44.393	300	0.454	1.01	10	33.3
19.069	18.728	400	0.341	1.02	10	25.0
9.861	9.589	500	0.272	1.03	10	20.0
5.776	5.549	600	0.227	1.04	10	16.7
3.689	3.495	700	0.194	1.06	10	14.3
2.511	2.341	800	0.17	1.07	10	12.5
1.796	1.644	900	0.152	1.09	10	11.1
1.335	1.199	1000	0.136	1.11	10	10.0
1.024	0.901	1100	0.123	1.14	10	9.1
0.807	0.694	1200	0.113	1.16	10	8.3
0.65	0.546	1300	0.104	1.19	10	7.7
0.534	0.437	1400	0.097	1.22	10	7.1
0.446	0.355	1500	0.091	1.26	10	6.7
0.378	0.293	1600	0.085	1.29	10	6.3
0.324	0.244	1700	0.08	1.33	10	5.9

0.281	0.206	1800	0.075	1.36	10	5.6
0.246	0.175	1900	0.071	1.41	10	5.3
0.218	0.15	2000	0.068	1.45	10	5.0

Tabela 4 - Viga bi-encastada com vão de 5 metros.

Deslocamento máximo (mm)		Altura da seção (mm)	Diferença absoluta (mm)	Razão (1)/(2)	vão (m)	Razão vão/altura
Tmoshenko (1)	Bernoulli (2)					
2.888	2.775	300	0.113	1.04	5	16.7
1.256	1.171	400	0.085	1.07	5	12.5
0.667	0.599	500	0.068	1.11	5	10.0
0.404	0.347	600	0.057	1.16	5	8.3
0.267	0.218	700	0.049	1.22	5	7.1
0.189	0.146	800	0.043	1.29	5	6.3
0.141	0.103	900	0.038	1.37	5	5.6
0.109	0.075	1000	0.034	1.45	5	5.0
0.087	0.056	1100	0.031	1.55	5	4.5
0.072	0.043	1200	0.029	1.67	5	4.2
0.06	0.034	1300	0.026	1.76	5	3.8
0.052	0.027	1400	0.025	1.93	5	3.6
0.045	0.022	1500	0.023	2.05	5	3.3
0.04	0.018	1600	0.022	2.22	5	3.1
0.035	0.015	1700	0.02	2.33	5	2.9
0.032	0.013	1800	0.019	2.46	5	2.8
0.029	0.011	1900	0.018	2.64	5	2.6
0.026	0.0094	2000	0.0166	2.77	5	2.5

5.3. Viga contínua

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para o deslocamento máximo em uma viga contínua dado pela Figura 4.

Os deslocamentos obtidos na viga contínua foram superiores ao de viga isostática e inferiores ao de viga bi-encastada, pode-se verificar que com o aumento do grau de hiperestaticidade da estrutura maior foi a influência da teoria de viga de Timoshenko no deslocamento.

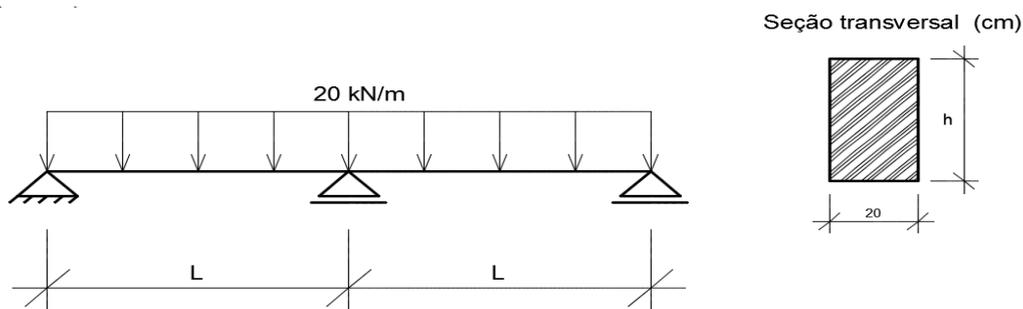


Figura 4 - Modelo estrutural viga contínua.

Tabela 5 - Viga contínua de dois vãos.

Deslocamento máximo (mm)		Altura da seção (mm)	Diferença absoluta (mm)	Razão (1)/(2)	vão (m)	Razão vão/altura
Tmoshenko (1)	Bernoulli (2)					
5.881	5.753	300	0.128	1.02	5	16.7
2.523	2.427	400	0.096	1.04	5	12.5
1.319	1.243	500	0.076	1.06	5	10.0
0.783	0.719	600	0.064	1.09	5	8.3
0.508	0.453	700	0.055	1.12	5	7.1
0.351	0.303	800	0.048	1.16	5	6.3
0.256	0.213	900	0.043	1.20	5	5.6
0.194	0.155	1000	0.039	1.25	5	5.0
0.151	0.117	1100	0.034	1.29	5	4.5
0.122	0.09	1200	0.032	1.36	5	4.2
0.1	0.071	1300	0.029	1.41	5	3.8
0.084	0.057	1400	0.027	1.47	5	3.6
0.071	0.046	1500	0.025	1.54	5	3.3
0.062	0.038	1600	0.024	1.63	5	3.1
0.054	0.032	1700	0.022	1.69	5	2.9
0.048	0.027	1800	0.021	1.78	5	2.8
0.043	0.023	1900	0.02	1.87	5	2.6
0.039	0.019	2000	0.02	2.05	5	2.5

6. Análise dos resultados

Constata-se dos resultados apresentados que a teoria de viga de Timoshenko, em comparação com a teoria de viga de Bernoulli, gerou maiores deslocamentos em todos os casos apresentados, como de fato é relatado em literatura técnica.

Observa-se que o aumento dos deslocamentos na teoria de viga de Timoshenko não é função apenas de características da seção ou da relação entre o vão e a altura da seção transversal, mas também é dada em função da condição de contorno da estrutura.

As estruturas apresentadas nos itens 5.1, 5.2 e 5.3 apresentaram maiores deslocamentos pela teoria de viga de Timoshenko do que pela teoria de Bernoulli. Verifica-se que em estruturas cuja restrição de apoio esteja na rotação (engastado) a teoria de viga de Timoshenko apresenta deslocamentos mais acentuados. O grau de hiperestaticidade também influencia na diferença entre os deslocamentos, quanto maior o grau de hiperestaticidade da estrutura, maior a influência dos deslocamentos pela teoria de viga de Timoshenko.

7. Conclusões

Observou-se neste artigo que o efeito da distorção por cisalhamento não deve ser negligenciado no dimensionamento estrutural, podendo chegar a uma diferença de até mais que o dobro em comparação com a teoria de Bernoulli.

Diante dos resultados apresentados recomenda-se que seja levado em consideração o efeito da distorção por cisalhamento, não apenas em vigas de grande altura ou de baixa relação entre o vão e a altura da seção, mas também deve-se utilizar como parâmetro a condição de contorno adotada no elemento estrutural.

Em vigas garantidamente isostáticas deve-se utilizar o efeito da distorção devido ao cisalhamento quando a razão entre o vão e a altura for menor que 10, pois abaixo desse valor ocorre uma diferença entre os deslocamentos superior a 2%

Em vigas engastadas a distorção devido ao cisalhamento deve ser considerada quando a razão entre o vão e a altura for inferior a 25, haja vista que para valores abaixo desses ocorre um aumento dos deslocamentos superior a 2%.

Em vigas contínuas deve-se verificar a relação entre a altura da seção e o vão de cada tramo da viga, recomenda-se que quando esta relação for inferior a 20 seja utilizada a teoria de Timoshenko para o cálculo das deformações, pois para valores inferiores a esse os deslocamentos ficam 2% maiores.

Os valores mencionados estipulam que não pode haver uma discrepância maior que 2% nos deslocamentos em comparação com a teoria de Bernoulli, entretanto, tais relações que foram recomendadas podem ser substituídas, desde que não sejam superiores a 5%, pois deve-se levar em consideração ainda os efeitos de fluência do concreto. Cabendo ao engenheiro decidir qual teoria mais apropriada deve ser utilizada.

Vale ressaltar que a teoria de viga de Timoshenko é a que, teoricamente, representa com maior precisão o comportamento estrutural, devendo, sempre que possível, utilizá-la na análise estrutural.

Referências

- [1] A. Faghidian. Unified Formulations of the Shear coefficients in Timoshenko Beam Theory. *J. Eng. Mech.*, 143 (2017). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001297](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001297).
- [2] K. T. Chan, K. F. Lai, N. G. Stephen, K. Young. A new method to determine the shear coefficient of Timoshenko beam theory. *J. Sound and Vib.*, 14 (2011) 3488-3497.
- [3] S. B. Dong, C. Alpdogan, E. Taciroglu. Much ado about shear correction factors in Timoshenko beam theory. *Int. J. Solids Struct.*, 13 (2010) 1651-1665. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.02.018>.
- [4] L. F. Martha, R. Burgos. Diferenças na consideração da distorção no modelo de Timoshenko de uma viga submetida a carregamento axial, In: XXXVI Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, 12-14 de Novembro, Montevidéu, Uruguai, 2014.
- [5] S. Timoshenko, J. Gere. *Mecânica dos Sólidos*, Livros Técnicos e Científicos, 1994.
- [6] S. Timoshenko, J. N. Goodier. *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [7] S. B. Dong, S. Çarbas, E. Taciroglu. On principal shear axes for correction factors in Timoshenko beam theory. *Int. J. Solids Struct.*, 50 (2013) 1681-1688. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.034>.
- [8] R. Barretta, A. Barretta. Shear stresses in elastic beams: an intrinsic approach. *Eur. J. Mech. A Solids*, 29 (2010) 400-409. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2009.10.008>.
- [9] H. L. Soriano. *Análise de Estruturas - Formulação Matricial e Implementação Computacional*, Editora Ciência Moderna Ltda, Rio de Janeiro, 2005.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, 2014.
- [11] L. F. Martha. *Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos*, Elsevier, Rio de Janeiro, 2010.
- [12] J. Silva, I. Lemes, R. Silveira, A. Silva. Influência da teoria de viga na análise geometricamente não linear de estruturas reticuladas, In: Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 6-9 de Novembro, Brasília, DF, 2016.

ORCID

T. C. Silva 0000-0002-3942-9723 (<https://orcid.org/0000-0002-3942-9723>)

Avaliação da variabilidade das propriedades dos agregados reciclados de RCD

Assessment of properties variability of recycled construction and demolition aggregates

V. Martins Junior^{a†}, N.C.S. Forti^b, A.E.P.G. Ávila^b, L.L. Pimental^b

^a *Universidade Federal de Afenas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental, Poço de Caldas, Brasil*

^b *Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Programa Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Campinas, Brasil*

[†] *Autor para correspondência: valtermartinsjr94@gmail.com*

RESUMO

A necessidade de se buscar destinação ambientalmente adequada para os resíduos de construção e demolição (RCD) torna essencial a reciclagem deste material. As características dos agregados produzidos pelo processo de reciclagem afetam o desempenho dos materiais feitos à base de cimento Portland, somado a isso, a qualidade do agregado reciclado é fortemente influenciada pelo processo produtivo. O objetivo deste trabalho é analisar e avaliar através de ferramentas estatísticas, como análise de variância (ANOVA) e teste Scott-Knott a variabilidade das propriedades dos agregados reciclados (AR) miúdos e graúdos produzidos em quatro usinas recicladoras do estado de São Paulo ao longo de um ano. Coletou-se amostras de AR miúdos ($\Phi_{\max} < 4,8\text{mm}$) e graúdos ($\Phi_{\max} 9,5/25\text{mm}$) em quatro usinas recicladoras do estado de São Paulo, sendo elas: Hortolândia, Limeira, Jundiaí e Várzea Paulista. Efetuou-se três coletas para cada usina, com tempo de espaçamento entre coletas de quatro meses. As propriedades físicas ensaiadas para a caracterização e análise da variabilidade dos agregados foram: módulo de finura, absorção de água, teor de finos e massa específica. Os resultados obtidos dos ensaios realizados indicam que a variabilidade de características de agregados procedentes de diferentes usinas de reciclagem existe. Pode-se dizer que esta variabilidade se dá não apenas pelas diferenças no processo de produção de cada usina como também pela qualidade do entulho recebido em cada planta e a eficácia de sua triagem.

ABSTRACT

The need to seek an environmentally appropriate destination for construction and demolition waste (WCD) makes recycling this material essential. The characteristics of the aggregates produced by the recycling process affect the performance of composites made with Portland cement, in addition to this, the quality of the recycled aggregate is strongly influenced by the production process. This work aim is to analyze and evaluate, through statistical tools, such as analysis of variance (ANOVA) and Scott-Knott test, the variability of the properties of fine and coarse recycled aggregates (RA) produced in four recycling plants in the state of São Paulo over a period of time one year. Fine ($\Phi_{\max} < 4.8\text{mm}$) and coarse ($\Phi_{\max} 9.5/25\text{mm}$) recycled aggregate (RA) samples were collected in four recycling plants in the state of São Paulo, namely: Hortolândia, Limeira, Jundiaí and Várzea Paulista. Three collections were carried out for each plant, with a space of four months between collections. The physical properties tested for the

Palavras-chave:

Resíduo de construção;
Agregados reciclados;
Qualidade.

Keywords:

Construction waste;
Recycled aggregates;
Quality.

characterization and analysis of the variability of the aggregates were: fineness modulus, water absorption, fines content and specific mass. The results obtained from the tests carried out indicate that characteristics variability of aggregates from different recycling plants exists. It can be said that this variability is due not only to the differences in the production process of each plant, but also to the quality of the debris received at each plant and the effectiveness of its sorting.

1. Introdução

Somente no ano de 2020 os municípios brasileiros coletaram, aproximadamente 47 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD), um aumento de 5,5% em relação ao ano anterior. Isto representa uma taxa de geração média por habitante de 221,2 kg por habitante/ano [1].

Segundo a ABRECON [2], mais da metade dos resíduos da construção e demolição (RCD) são descartados de forma clandestina e irregular no Brasil e o país recicla apenas 16% do total de resíduos da construção gerados. A maior parte das usinas de reciclagem estão em cidades com população superior a 100 mil habitantes e 82% delas são microempresas, em sua grande maioria, carentes de equipamentos de limpeza e triagem dos resíduos, o que resulta em um agregado reciclado com quantidade de impureza acima do estabelecido pela norma técnica.

Uma alternativa mitigadora para o acúmulo de RCD em áreas de transbordo e triagem é a sua transformação em agregados reciclados, como areia, pedrisco, brita e rachão e sua inserção na produção de concreto. No Brasil, a norma NBR 15116:2021 [3] estabelece requisitos para os agregados reciclados (AR) e limites para sua utilização na produção de concreto.

A produção do agregado reciclado é feita em usinas recicladoras de RCD que, basicamente, fazem a triagem do material e na sequência, algumas usinas fazem o peneiramento para remover o solo antes do processo de britagem, então é os agregados são separados em faixas granulométricas por meio de peneiramento.

Apesar dos estudos comprovarem a viabilidade do uso do RCD como agregados reciclados, a grande variabilidade de suas características dificulta seu uso. Essa variabilidade decorre principalmente do processo de produção da planta da usina recicladora [4].

Essa baixa qualidade do agregado reciclado gera uma dificuldade para sua aplicação, principalmente, como agregado para produção de artefatos de argamassa e concreto. Diversos estudos voltados para a caracterização do agregado reciclado têm sido realizados de modo a identificar características constantes deste tipo de agregado e, também, indicar os fatores que causam tamanha variabilidade dessas características [5,6,7].

Segundo Melo et al, 2013 [8], a qualidade do agregado reciclado depende de fatores externos, como o tipo de britador e a forma de armazenamento do material, assim como de fatores internos, como implantação da usina, tipo de beneficiamento e comercialização do produto. Para [9], um grande problema que envolve a produção de agregado reciclado é a heterogeneidade da sua matéria prima, ou seja, os RCD.

A heterogeneidade da matéria que compõe o RCD impacta na qualidade do agregado reciclado, pois a variabilidade de sua composição, que apresenta diferentes porcentagens de concreto, rochas, argamassa, materiais cerâmicos e contaminantes (gesso, asfalto, entre outros), afetam significativamente as propriedades físicas do agregado reciclado, tais como a granulometria, massa específica e a capacidade de absorção de água e isto pode acarretar em baixo desempenho dos produtos gerados com este material [9,10,11].

Portanto, neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar e avaliar através de ferramentas estatísticas, a variabilidade das propriedades dos agregados reciclados, miúdos e graúdos, produzidos em quatro usinas recicladoras do estado de São Paulo ao longo de um ano.

2. Metodologia

Coletou-se amostras de agregados reciclados miúdos ($\Phi_{\max} < 4,8\text{mm}$) e graúdos (Φ_{\max}

9,5/25mm) em quatro usinas recicladoras do estado de São Paulo, sendo elas: Hortolândia, Limeira, Jundiaí e Várzea Paulista. Os processos de produção das quatro unidades recicladoras são similares, no entanto a Usina de Jundiaí apresenta um processo de triagem melhor do que as demais usinas, pois inclui a etapa para retirada da fração solo e as condições para os trabalhadores na área de triagem também são melhores por ser coberta e com esteira rolante.

Efetou-se três coletas para cada usina, com tempo de espaçamento entre coletas de quatro meses. De modo a facilitar a identificação das amostras no decorrer do trabalho, as mesmas receberam o nome de origem abreviado seguido de um número que indica qual das três etapas de coleta, como exemplo, L2, coleta 2 da amostra de Limeira. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura utilizada para cada usina e coleta.

Tabela 1 - Nomenclatura para amostras de AR coletadas.

Usinas	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3
Hortolândia	H1	H2	H3
Limeira	L1	L2	L3
Jundiaí	J1	J2	J3
Várzea Paulista	VP1	VP2	VP3

A NBR 15116:2021 [3] estabelece três tipos de agregados reciclados, o ARCO – agregado reciclado de concreto que não pode conter material cerâmico, o ARCI, agregado reciclado cimentício que pode conter até 10% de material cerâmico e o ARM – agregado reciclado misto, que pode conter até 40% de material cerâmico. Os agregados reciclados graúdos de todas as coletas enquadram-se como ARCI, conforme ensaio proposto pelo Anexo A da NBR 15116:2021 [3], já os agregados reciclados miúdos não foram ensaiados por não haver uma norma que especifique tal ensaio.

As propriedades físicas ensaiadas para a caracterização e análise da variabilidade dos agregados estão apresentadas na Tabela 2, seguidas das respectivas normas de ensaio.

Tabela 2 - Propriedades ensaiadas e normas técnicas.

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	NBR NM 248	NBR NM 248
Absorção de água	NBR NM 30	NBR NM 53
Teor de finos	NBR NM 46	NBR NM 46
Massa específica	NBR NM 52	NBR NM 53

A determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos foi feita segundo a NBR NM 248: 2003 [12], a partir da elaboração da composição granulométrica obteve-se o módulo de finura dos agregados.

O cálculo da massa específica e capacidade de absorção de água referente aos agregados miúdos foram feitos conforme a NBR NM 52:2009 [13] e NBR NM 30:2001 [14], respectivamente. Determinou-se a massa específica (γ) através da equação 1 e a absorção de água dos agregados (A) através da equação 2.

$$\gamma = \frac{M1}{M1 - \left(\frac{M2 - M3}{\gamma_{\text{água}}}\right)} \quad (1)$$

$$A = \frac{M1 - M4}{M4} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

γ = massa específica do agregado, em gramas/cm³;

A = Absorção de água, em %;

M1 = massa saturada de superfície seca;

M2 = somatória da massa do picnômetro com a da amostra, da placa de vidro e da solução, em gramas;

M3 = somatória da massa do picnômetro com a da água e da placa, em gramas;

M4 = massa seca, em gramas.

Para o agregado graúdo, a massa específica e a capacidade de absorção de água foram determinadas conforme a [15] NBR NM 53 : 2009 utilizando-se uma balança hidrostática de capacidade de 8 kg.

A determinação do teor de finos que passa pela peneira a 0,075 mm referente aos agregados miúdos e graúdos, foi feita segundo a NBR NM 46: 2003 [16], pelo método de lavagem. O teor de finos foi calculado conforme a equação 3.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

m= teor de finos, em %;

m_i= massa inicial da amostra seca na estufa até a constância do peso, em gramas;

m_f= massa final da amostra que ficou retida na peneira 0,075 mm seca na estufa, em gramas.

Ressalta-se que para cada amostra ensaiada referente às propriedades citadas acima, procedeu-se três repetições, deste modo, cada coleta conta com 24 observações para cada propriedade (AR miúdo e graúdo).

Quanto à análise estatística dos resultados, esta foi feita através da análise de variância (ANOVA) e, todas as vezes que a hipótese nula foi rejeitada, realizou-se o teste de Scott-Knott e quando pertinente a regressão linear foi realizada, para buscar comprovar correlações entre parâmetros. Todos os tratamentos estatísticos realizados foram realizados com precisão de 95%, ou seja, 5% de significância.

Os gráficos foram desenvolvidos utilizando um software estatístico chamado R Studio que gradua dos menores para os maiores valores, seguindo o padrão do espectro visível da luz branca, do violeta (menor valor) até o vermelho (maior valor).

3. Resultados e Discussão

3.1. Massa específica e absorção

Um dos parâmetros mais utilizados para descrever a qualidade dos agregados reciclados (AR) é a massa específica, AR com massas específicas elevadas tendem a proporcionar concretos mais resistentes. Angulo [6] disserta que AR com massa específica na faixa de 2,2 a 2,3 g/cm³ ou maiores, apresentam características que resultam em um concreto com comportamento mecânico semelhante ao dos agregados naturais. Na figura 1 e 2 apresentam-se os valores de massa específica para os AR miúdos e graúdos, respectivamente.

Os pontos apresentados na Figura 1 e nas figuras seguintes são as médias acompanhadas do desvio padrão (+/-) dos valores obtidos para cada usina e coleta. Sendo que pontos da mesma cor são estatisticamente iguais ao nível de 95% de confiança, conforme testados pela ANOVA e teste Scott-Knott.

Nenhum dos AR miúdos alcançaram a recomendação de [6], todas as amostras apresentam massa específica abaixo de 2,2 g/cm³. Quanto à variabilidade, nenhuma usina manteve para as três coletas o mesmo nível de significância, sendo que apenas Jundiáí apresentou duas coletas estaticamente iguais (J1 e J2).

Todos os valores de massa específica para os AR graúdos atenderam a recomendação de [6], com valores compreendidos entre 2,35 a 2,94 g/cm³. Apesar de atender a recomendação,

nota-se alta variabilidade nos resultados, conferindo uma diferença de 0,59 g/cm³ do menor valor para o maior.

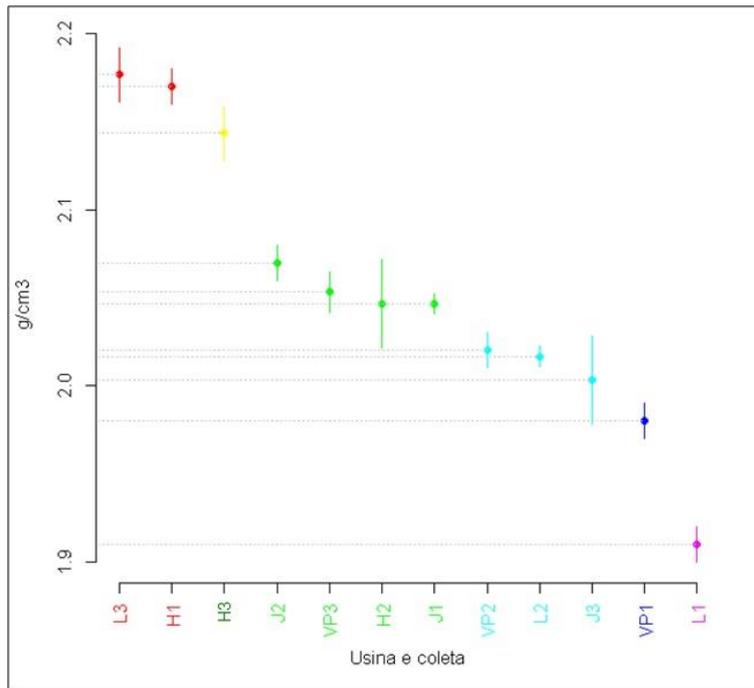


Figura 1 - Massa específica AR miúdos.

Analisando a variabilidade das amostras ao longo da mesma usina para os AR graúdos, os resultados foram melhores, três usinas apresentaram duas coletas estaticamente iguais, portanto, através desta análise revela-se que quanto ao parâmetro massa específica, este possui maior padronização para os agregados graúdos. Isso pode ser decorrente, principalmente, do fato de a separação dos contaminantes no processo produtivo ser mais fácil para os agregados reciclados graúdos em comparação aos miúdos, que acabam contendo altas taxas de solo em sua composição.

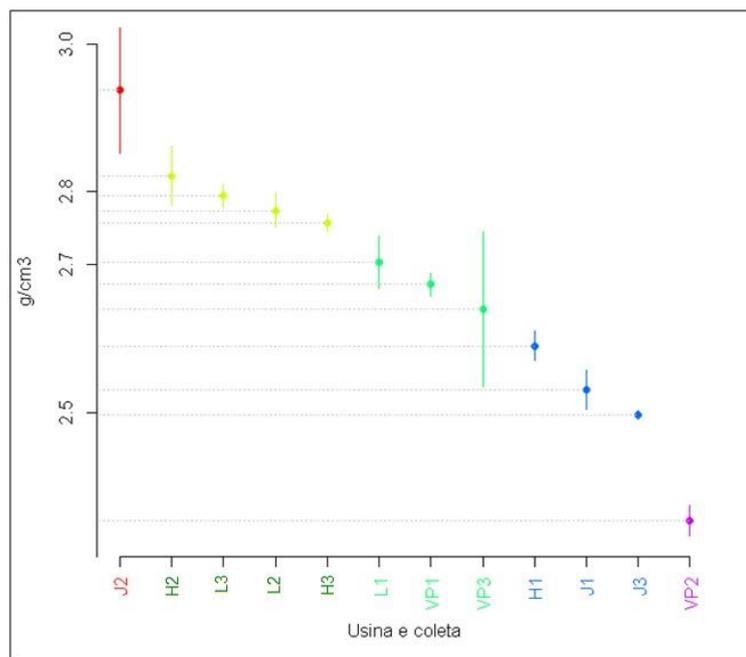


Figura 2 - Massa específica AR graúdos.

Os resultados da capacidade de absorção para todas as coletas de AR miúdos e graúdos estão expostos nas Figuras 3 e 4.

Para capacidade de absorção de água, diferentemente da massa específica, a NBR 15116:2021 [3] estabelece valor máximo da capacidade de absorção de água em função do tipo de agregado reciclado. Para o ARCI o limite máximo de capacidade de absorção de água é de 12%.

Apenas a amostra L1, não cumpriu o requisito de absorção para o agregado tipo ARCI, de no máximo 12%.

Analisando-se a variabilidade da qualidade do AR dentro de uma mesma usina, apenas uma usina obteve duas coletas com valores com a mesma significância (J1 e J2).

Nota-se que a maior parte das amostras está apresentando resultados dentro da faixa de 8,5 a 11%.

Considerando as médias das amostras mais o desvio padrão, todas as amostras de AR graúdo atenderam ao limite de capacidade de absorção de água para ARCI (< 12%). Verifica-se na Figura 4 uma menor variabilidade dos AR graúdos quando comparados com os miúdos quanto a capacidade de absorção de água, neste caso, formou-se 4 grupos com valores estaticamente iguais, enquanto para o miúdo foram 7 grupos. As usinas de Jundiá e de Hortolândia apresentaram duas amostras no mesmo grupo (J1 e J3; H1 e H2).

Capacidade de absorção de água e massa específica são parâmetros teoricamente inversamente correlatos, já que ambos são função da porosidade do agregado, ou seja, quanto maior a massa específica, menor a capacidade de absorção de água esperada. Para confirmar esta hipótese, efetuou-se com todos os dados das três coletas a ANOVA seguida do teste de regressão linear para Absorção vs Massa específica, com confiança adotada de 95%.

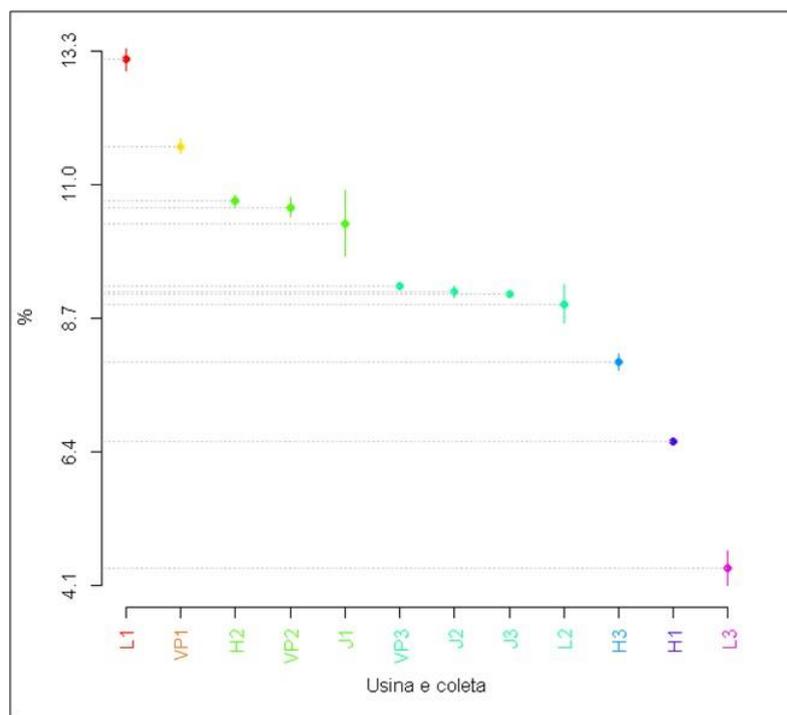


Figura 3 - Capacidade de absorção de água AR miúdos.

Fugindo do esperado, o teste de regressão para os AR graúdos não apresentou regressão linear, deste modo não há como afirmar que quanto maior a massa específica menor a capacidade de absorção, como era de se esperar. Para as amostras de AR miúdos a hipótese teórica se confirmou, o teste de regressão linear foi aceito e apresentou um valor de R2 igual a 88,29%, a reta de regressão encontra-se na Figura 5.

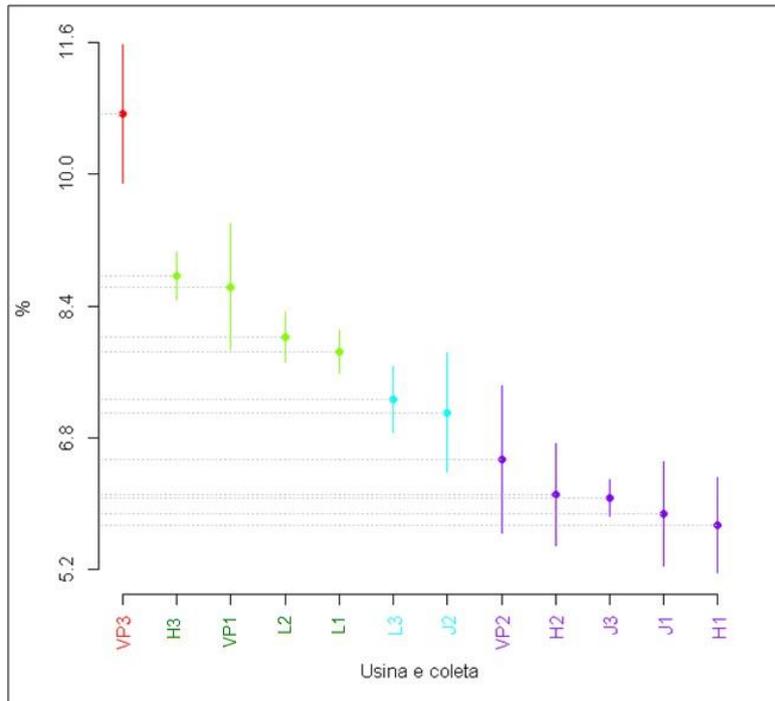


Figura 4 - Capacidade de absorção de água AR graúdos.

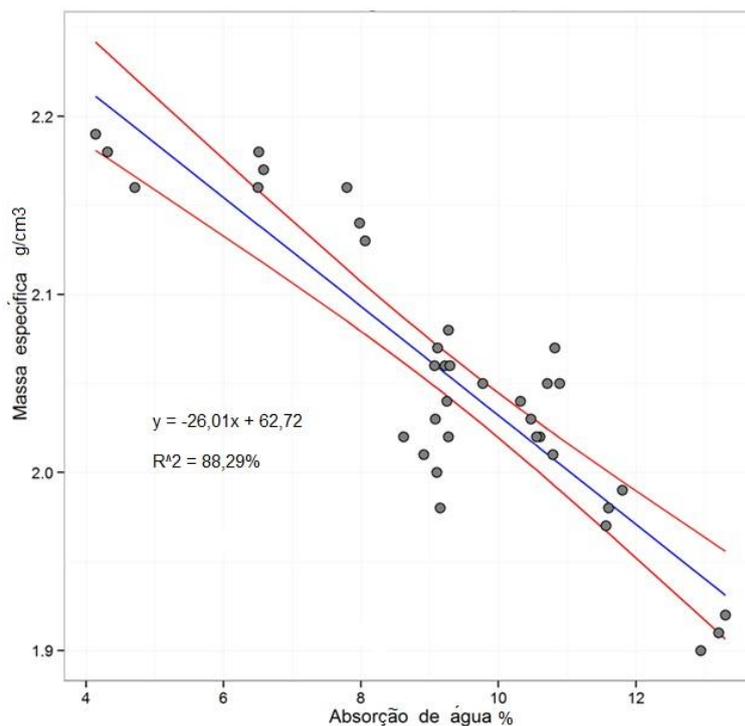


Figura 5 - Massa específica vs Capacidade de absorção

3.2. Módulo de finura

Para os agregados reciclados, a NBR 15116:2021 [3] recomenda que os mesmos devem atender as classes de composição granulométrica especificados pela NBR 7211:2009 [17].

Para agregados miúdos são definidas três faixas de módulo de finura: areia média - zona

ótima (Modulo de finura entre 2,20 e 2,90), Areia fina - zona utilizável inferior (Modulo de finura entre 1,55 e 2,20) e Areia grossa - zona utilizável superior (Modulo de finura entre 2,90 e 3,50). Os AR miúdos para estarem aptos para utilização em concretos e argamassas devem possuir módulo de finura dentro de alguma das faixas especificadas.

Para agregados graúdos a NBR 7211:2009 [17] não estabelece zonas de utilização para o módulo de finura, a norma apenas exige que os agregados graúdos estejam compreendidos dentro de alguma granulometria de brita, que se inicia em brita 0 (4,75/12,5 mm) e vai até brita 4 (37,5/75 mm). Como citado anteriormente na metodologia, as amostras de AR graúdos possuem composição de 9,5/25mm, assim sendo, todas as amostras enquadram-se como brita 1 e atendem a NBR 7211:2009 [17] e conseqüentemente a NBR 15116:2004 [3], entretanto, para a análise de variabilidade determinou-se também os módulos de finura para os AR graúdos.

Os valores de módulo de finura para os AR miúdos e graúdos são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

A amostra VP2 apresentou modulo de finura acima de 3,5, portanto não se enquadrando em nenhuma das faixas de classificação de agregados miúdos.

Observa-se também, que da amostra H1 até a L2, todas são classificadas como areia média, pois apresentam módulo de finura entre 2,20 e 2,90. As demais amostras são classificadas como areia grossa, com módulo de finura entre 2,90 e 3,50.

A análise estatística dos AR miúdos apresentou 7 grupos de valores estaticamente iguais. As amostras de Limeira possuem duas coletas com valores de mesma significância e o valor da terceira coleta está próximo das duas anteriores, tal informação infere que a separação granulométrica da usina de Limeira está sendo bem realizada, diferentemente das outras, que possuem valores bem espaçados ao longo do tempo, mostrando assim alta variabilidade da composição granulométrica.

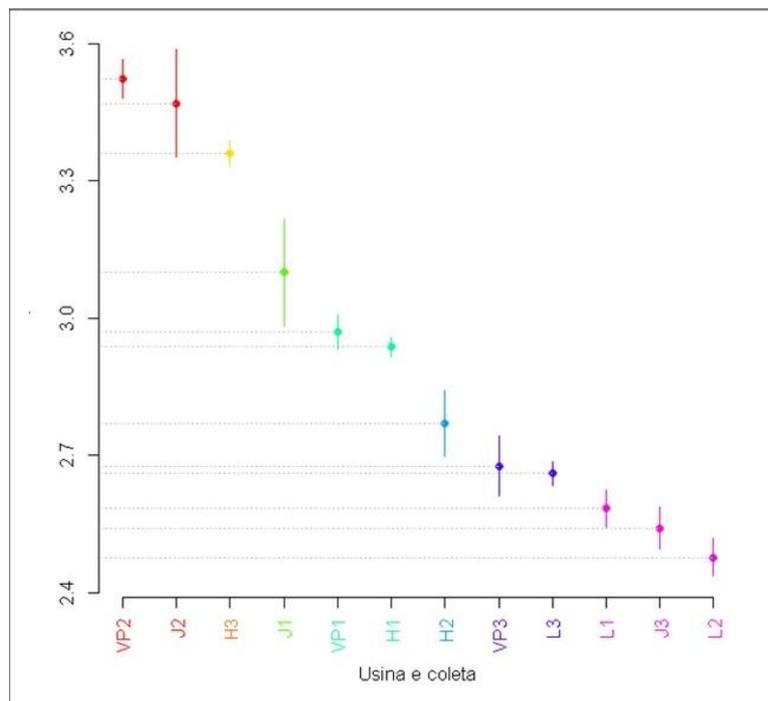


Figura 6 - Módulo de finura AR miúdos.

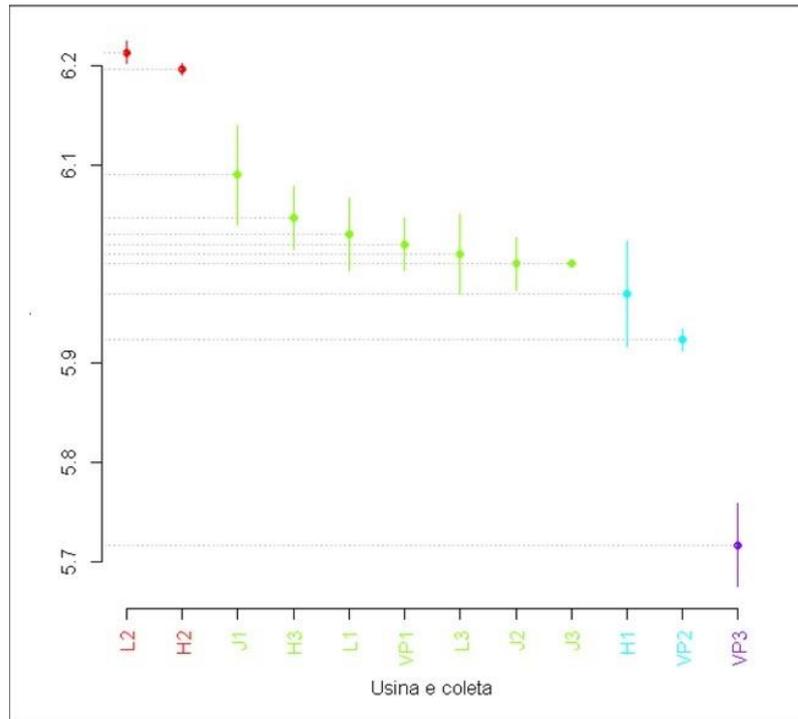


Figura 7 - Módulo de finura AR graúdos.

3.3. Teor de finos

A NBR 15116:2021 [3] determina que o teor de finos para AR miúdos e graúdos, seja de no máximo 12% para os agregados tipo ARCI.

Os resultados para o teor de finos para AR miúdos e graúdos está apresentado nas Figuras 8 e 9.

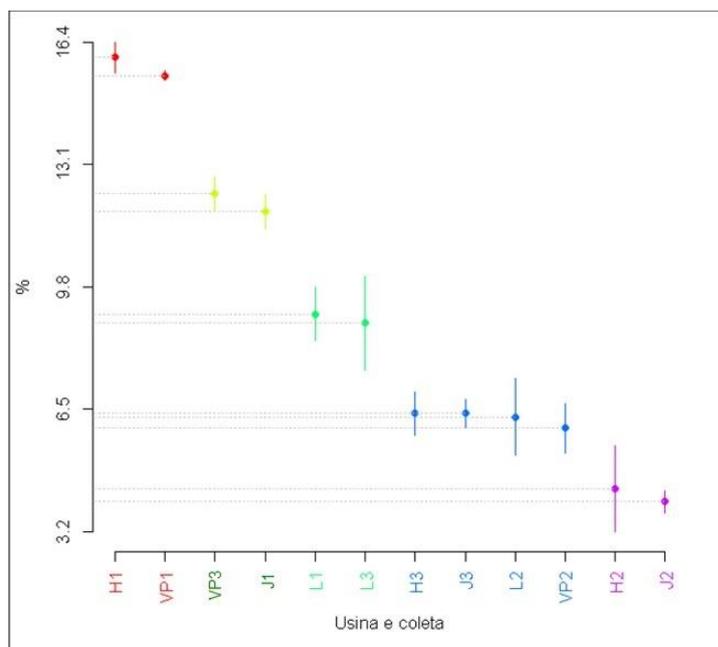


Figura 8 – Teor de finos AR miúdos.

As quatro primeiras amostras (H1 a J1) extrapolam o limite de 12% para teor de finos estipulados para ARCI.

Para os agregados reciclados miúdos a variabilidade dos resultados é alta, visto que a análise estatística apresentou cinco grupos de significância.

Apenas a usina de Limeira obteve dois valores de coleta com a mesma significância, o restante das usinas não mostrou um padrão de uniformidade ao longo do tempo.

Os resultados expostos na Figura 9 cumprem com a exigência normativa para teor de finos, todos estão abaixo de 12%. Para AR graúdos duas usinas, Hortolândia e Jundiáí, obtiveram duas coletas estaticamente iguais, entretanto a variabilidade dos AR graúdos em função do teor de finos faz-se presente nas outras amostras.

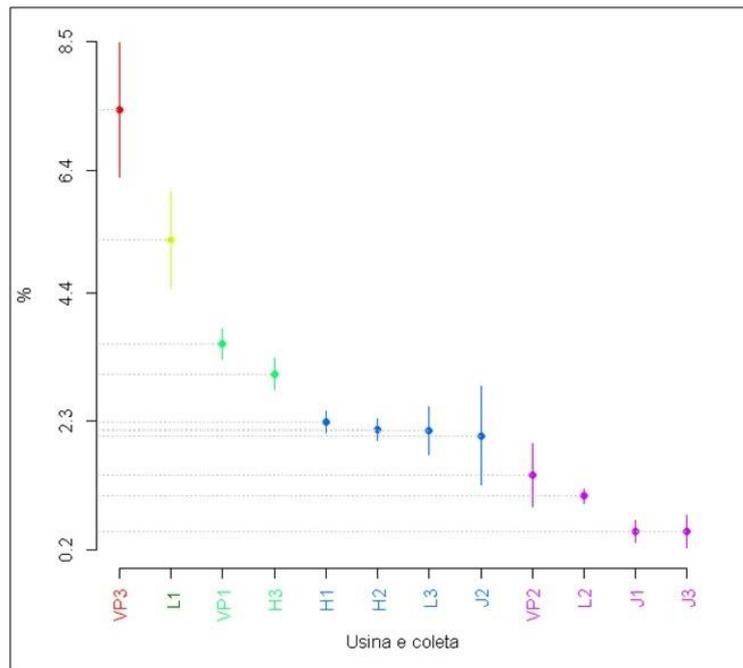


Figura 9 – Teor de finos AR graúdos.

4. Conclusão

Baseando-se nos resultados obtidos para os ensaios realizados, pode-se concluir que a variabilidade de características de agregados reciclados procedentes das quatro usinas avaliadas é alta, pode-se dizer que esta variabilidade se dá não apenas pelas diferenças no processo de produção de cada usina como também pela qualidade do entulho recebido em cada planta e a eficácia de sua triagem. Além disso, notou-se também variabilidade de características quando analisada uma mesma usina durante as coletas realizadas, nenhuma das usinas apresentou para um mesmo parâmetro, os resultados das três coletas dentro do mesmo nível de significância.

Apesar de apresentar uma grande variabilidade nas características avaliadas, as quatro usinas mostraram-se capazes de produzir agregados reciclados de forma a atender aos limites impostos pela NBR 15116:2021 [3].

Para a utilização do AR na produção de concreto e de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, recomenda-se que a procedência do material seja a mesma e de preferência de uma mesma partida de produção. Deste modo, a variabilidade de características será diminuída, mas ainda existirá. Além disso, é de extrema importância que ensaios de caracterização sejam realizados antes do uso deste material na produção de concreto e argamassa.

Agradecimentos

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro através dos projetos 2014/20486-8 e 2016/12360-0.

Referências

- [1] Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. <http://www.abrelpe.org.br/panorama>, 2021 (acesso em 22 junho 2022).
- [2] Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (Abrecon). Encontro Nacional das Usinas de Reciclagem de RCD apresenta dados inéditos sobre a reciclagem de entulho no Brasil. <https://abrecon.org.br/encontro-nacional-das-usinas-de-reciclagem-de-rcd-apresenta-dados-ineditos-sobre-a-reciclagem-de-entulho-no-brasil/>, 2020 (acesso em 22 junho 2022).
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios– Requisitos, 2021.
- [4] M. Martín-Morales, M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano, I. Valverde-Espinosa. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, *Constr. Build. Mater.*, 5 (2011) 742–748.
- [5] C. Ulsen, Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição, Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- [6] S. C. Angulo, Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influências de suas características no comportamento de concretos. Tese de Ph.D., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- [7] L. Delongui. Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação. Dissertação de M.Sc., UFSM, Rio Grande do Sul, Brasil, 2012.
- [8] A. V. S. Melo, E. A. M Ferreira, D. B. Costa. Fatores críticos para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de RCC da região nordeste do Brasil. *Ambiente Construído*, 13 (2013) 99-115.
- [9] J. Brito, M. Bravo, M. Mália. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construção residenciais novas: *Ambiente Construído* 11 (2011) 117-130.
- [10] S. C. Angulo. Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. Dissertação de M. Sc. USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.
- [11] M. J. Mcguinnis, M. Davis, A. Rosa, B. D. Weldon, Y. C. Kurama. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 154 (2017) 258-269.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica, 2003.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água, 2001.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 46: Agregados – Determinação do material que passa através da peneira 75µm, por lavagem, 2001.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Associação brasileira de normas técnicas, 2009.

ORCID

V. Martins Junior 0000-0002-4543-1010 (<https://orcid.org/0000-0002-4543-1010>)
N.C.S. Forti 0000-0001-9994-5546 (<https://orcid.org/0000-0001-9994-5546>)
A.E.P.G. Ávila 0000-0001-5401-2160 (<https://orcid.org/0000-0001-5401-2160>)
L.L. Pimental 0000-0001-5146-0451 (<https://orcid.org/0000-0001-5146-0451>)