

ENGENHARIA: CRIAÇÃO, CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO

VOLUME VIII



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: criação, construção e manutenção

8ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

8ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: criação, construção e manutenção

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2022

76 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl492

ISBN: 978-65-5367-123-2

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. projetos 2. implantação 3. desenvolvimento 4. sistemas I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2022.edcl492>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonatto

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	5
AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA BORRA DE CAFÉ E DA CASCA DE CAFÉ NA REMOÇÃO DE 2,4-D EM AMOSTRAS DE ÁGUA.	
Edumar Ramos Cabral Coelho	
Larissa Lopes Roldi	
Gilberto Maia de Brito	
DOI 10.37423/220505773	
CAPÍTULO 2	16
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS EM SOLO COLAPSÍVEL	
Ana Patrícia Nunes Bandeira	
João Barbosa de Souza Neto	
Diana Rodrigues de Lima Gonçalves	
DOI 10.37423/220505807	
CAPÍTULO 3	28
AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE DO SUBLEITO NA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	
Bruno Guida Gouveia	
Marina Donato	
Felipe Costa Dias	
Alexandre Simas de Medeiros	
Marcelino Aurélio Vieira da Silva	
DOI 10.37423/220505823	
CAPÍTULO 4	47
ANÁLISE QUANTITATIVA E MORFOLÓGICA DA INTERFACE NEURÔNIO-MICROELETRODO	
Amanda Ferreira Neves	
Polyana Ferreira Nunes	
Débora Vasconcelos Melo	
Milena Bueno Pereira Carneiro	
Celina Monteiro da Cruz Lotufo	
João Batista Destro-Filho	
DOI 10.37423/220505828	
CAPÍTULO 5	59
MÉTODO DE FORMAÇÃO ASSOCIATIVO: A MODELAGEM PARAMÉTRICA DO MUSEU MERCEDES-BENZ	
JOCELINE COSTA DE ALMEIDA	
Karina Rossana Menezes Schüssler	
Anderson Felipe Correia Torres	
Oriana Yenahi Andrade Serrano	
Alexandre Márcio Toledo	
DOI 10.37423/220505899	

Capítulo 1



10.37423/220505773

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA BORRA DE CAFÉ E DA CASCA DE CAFÉ NA REMOÇÃO DE 2,4-D EM AMOSTRAS DE ÁGUA.

Edumar Ramos Cabral Coelho

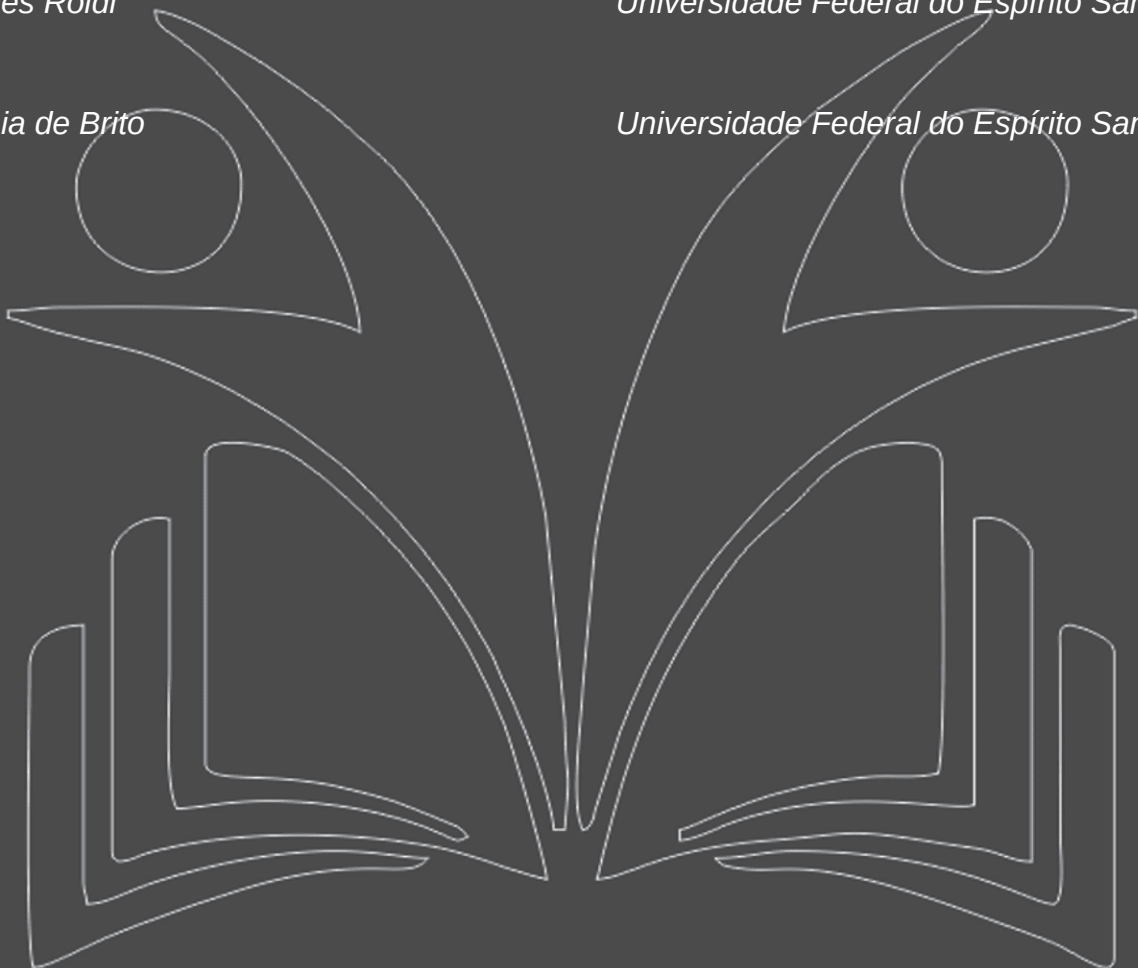
Universidade Federal do Espírito Santo

Larissa Lopes Roldi

Universidade Federal do Espírito Santo

Gilberto Maia de Brito

Universidade Federal do Espírito Santo



Resumo: A contaminação dos mananciais utilizados para abastecimento por compostos micro poluentes é uma dificuldade que os tratamentos de água convencionais não resolvem de maneira eficaz. O ácido 2,4-Diclorofenóxiacético (2,4-D) é um agrotóxico micro contaminante de mananciais, que possui alta toxicidade para o ecossistema aquático e para seres humanos, sendo necessária sua remoção desse ambiente. Na tentativa de se desenvolverem novos materiais para a remoção do 2,4-D por adsorção, a Borra e a Casca de café, in natura e carbonizadas, foram utilizadas em estudos de adsorção, por serem materiais grande disponibilidade em nosso país e que competiriam com o carvão ativado por terem um menor custo de obtenção. Este estudo avaliou as características superficiais desses materiais por análise de Área Superficial Específica (BET), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Termogravimetria (TG) e Ponto de Carga Zero (PCZ). Foram realizados estudos para se determinar o tempo de equilíbrio e a massa de adsorvente a ser utilizada, porém não foi possível determinar qualquer adsorção de 2,4-D utilizando a Borra e a Casca de café in natura. Assim, os estudos de adsorção variando-se a concentração inicial de 2,4-D e o pH da solução, foram conduzidos apenas para o Carvão ativado (CA), para Borra (BC) e Casca (CC) de café carbonizadas. Às isotermas, geradas a partir dos estudo de adsorção, foram aplicados os modelos de Langmuir e Freundlich, para a obtenção de parâmetros de descrição do processo de adsorção. No geral, BC apresentou maior adsorção em relação a CC, apresentando valores de $q_A \text{ MÁX}$ de 23,4 e 4,4 mg/g, respectivamente. Porém ambos tiveram desempenho inferior a CA ($q_A \text{ MÁX} = 94,0 \text{ mg/g}$). Dentre os pH's estudados, pôde-se observar que em pH's ácidos, a remoção de 2,4-D foi maior para todos os adsorventes estudados.

Palavras-chave: 2,4-D, borra de café, casca de café, adsorção.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior consumidor de agrotóxicos do mundo e, dentre os estados brasileiros, o Espírito Santo ocupa o sétimo lugar em consumo desses produtos. (BRASIL, 2017). Dentre os agrotóxicos empregados na agricultura do país, o Ácido 2,4-Diclorofenóxiacético (2,4-D) se destaca por ser o segundo mais consumido, representando mais de 50.000 toneladas de ingrediente ativo vendido em todo o Brasil no ano de 2016.

Segundo a Organização Mundial da Saúde, existem estudos suficientes que associam a exposição ao 2,4-D a, pelo menos, dois tipos de câncer. No cenário nacional, o parâmetro a ser seguido está disposto na Portaria MS nº 2914/11, do Ministério da Saúde, sobre o padrão de potabilidade da água para consumo humano, em que o limite máximo para presença de 2,4-D, somado a 2,4,5-T, é de 30 µg/L (BRASIL, 2011). A adsorção em carvão ativado é a tecnologia mais utilizada, inclusive para a remoção de outros contaminantes químicos que oferecem risco à saúde, e também pela fácil aplicabilidade em estações de tratamento já existentes. O estudo e a aplicação de adsorventes alternativos ao carvão ativado comercial em tratamentos de águas têm se mostrado vantajosos, não só pelo ponto de vista financeiro, mas pela fácil disponibilidade desses recursos. Podem ser aplicados em larga escala para a remoção de diferentes tipos de contaminantes, se tornando de grande importância para a escala industrial de tratamento de águas (ALI, 2012; ASIM, 2012; KHAN, 2012).

Alguns desses estudos trazem a utilização da casca e da borra de café sendo aplicadas na remoção de compostos orgânicos presentes em soluções aquosas por processo de adsorção em substituição ao carvão ativado nos tratamentos de água convencionais (SENS, 2009).

Assim, o objetivo deste estudo é avaliar Borra e Casca de café como adsorventes alternativos, oriundos de resíduos agrícolas, domésticos e industriais, quanto à capacidade de remoção de agrotóxicos de águas destinadas ao consumo humano, comparando-os ao carvão ativado utilizado no tratamento convencional.

METODOLOGIA

As matrizes de adsorção utilizadas neste estudo foram o carvão ativado BCARBON 125 – FM; a Borra de café, e a Casca de café seca (palha de café). O padrão de 2,4-D utilizado foi da marca SIGMA-ALDRICH®. A detecção do 2,4-D foi realizada por leitura de absorbância em aparelho espectrofotômetro da marca Pharmacia Biotech® Ultrospec 1000 UV/Visível, no comprimento de onda de 284 nm (KIM, KIM E CHO, 2005; VEDENYAPINA *et al.* 2017).

Essas amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105°C por 2h. Amostras de 100 g de Borra e Casca *in natura* foram aquecidas em mufla, e para diferentes temperaturas foram aplicados diferentes tempos de carbonização. A partir desse procedimento, os demais ensaios com Borra e Casca de café carbonizadas, foram realizados com esses materiais carbonizados a 500°C por 1 hora.

CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Foi determinada a Área superficial específica (SBET) das amostras estudadas através do método desenvolvido por Brunauer, Emmet e Teller (BET), e essa análise foi realizada no aparelho Quantachrome Autosorb Automed (Quantachrome Instruments).

Para determinação do Ponto de Carga Zero (pHPCZ), foram preparadas três soluções com diferentes valores de pH (3, 6 e 11) e o ajuste para tais valores foi feito com soluções de NaOH 0,1 M e HCl 0,1 M. A cada uma das soluções foram adicionadas diferentes quantidades de matriz adsorvente (0,05%, 0,1%, 0,5%, 1%, 3%, 7% e 10%) em diferentes frascos contendo 20 mL de solução. Os frascos foram submetidos a agitação constante durante 24 h, à temperatura ambiente, para que o sistema chegasse a um valor de pH de equilíbrio. Ao final de 24 h, o pH de cada solução foi medido usando um pHmetro digital Denver Instrument® Ultra Basic e o pHPCZ foi determinado pela convergência do valor do pH das curvas das massas dos adsorventes *versus* o pH (FRANCA, 2009; VALDÉS *et al.*, 2002 adaptado por OLIVEIRA, 2008).

Para reconhecimento da estrutura de superfície foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura SSX-550 Superscan SHIMADZU® SEDX. A análise de Termogravimetria foi realizada em atmosfera de argônio com fluxo de 50 mL.min⁻¹ e razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹ até 800°C para o Carvão ativado, a Borra e a Casca de café *in natura*, e para a Borra e a Casca de café carbonizadas. Foram também realizados testes em atmosfera oxidante com fluxo de 50 mL.min⁻¹ e razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹ até 800°C, apenas para Borra e Casca de café *in natura*. Curvas de TG foram geradas para cada matriz analisada.

ESTUDOS DE ADSORÇÃO

Testes preliminares para determinar o tempo de equilíbrio e a influência da variação da massa de adsorvente foram realizados. A Tabela 1 traz as condições estudadas para o carvão ativado comercial, a borra e a casca de café *in natura* e a borra e a casca de café carbonizadas.

Estudos de adsorção (Isotermas): Todos os ensaios de adsorção foram feitos em batelada, em mesa agitadora tipo *shaker* a 100 rpm de agitação e temperatura constante de 25°C (AL-ZABEN, 2013. FRANCA, 2009). Os experimentos foram realizados em triplicata para Carvão ativado, Borra e Casca de café carbonizadas, separadamente, em solução de 2,4-D. Foi realizado um teste “branco” correspondente em cada etapa das análises. Os valores obtidos a partir dos estudos de adsorção foram utilizados para a construção das isotermas de Langmuir e Freundlich, para análise do comportamento desses sistemas em equilíbrio.

Tabela 1: Testes preliminares realizados para o Carvão ativado comercial, a Borra e a Casca de café in natura e a Borra e a Casca de café carbonizadas.

	Condições	Massa de adsorvente	Concentração 2,4-D	pH	Tempo
Carvão ativado	Variação de tempo	10 mg	100 mg/L	7	4h, 28h, 48h e 72h
Borra e Casca de café <i>in natura</i>	Variação de tempo	10 mg	100 mg/L	7	4h, 28h, 48h e 72h
	Variação de tempo e massa de adsorvente	100 mg	100 mg/L	7	15', 30', 1h, 1h30, 2h, 3h e 4h
Borra e Casca de café carbonizadas	Variáveis fixas	100 mg	100 mg/L	7	4 h
	Maceradas ou não	100 mg	100 mg/L	7	4 h
	Variação da massa	250 e 500 mg	100 mg/L	7	4 h
	Tempo de equilíbrio	100 mg	100 mg/L	7	2 h, 4 h, 6 h e 8 h

Tabela 2: Condições estabelecidas para os estudos de adsorção realizados para o Carvão ativado comercial e para Borra e Casca de café carbonizadas.

	Borra e Casca de café carbonizadas a 500°C/1 h e Carvão ativado comercial
Massa adsorvente	100 mg
Concentração 2,4-D	25, 50, 100, 200 e 400 mg/L
pH	7
Tempo	4 h
Repetições	Trip + Br
λ leitura	284 nm

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 traz os resultados obtidos para as análises de Ponto de Carga Zero e Área Superficial Específica, para todas as matrizes de adsorção estudadas.

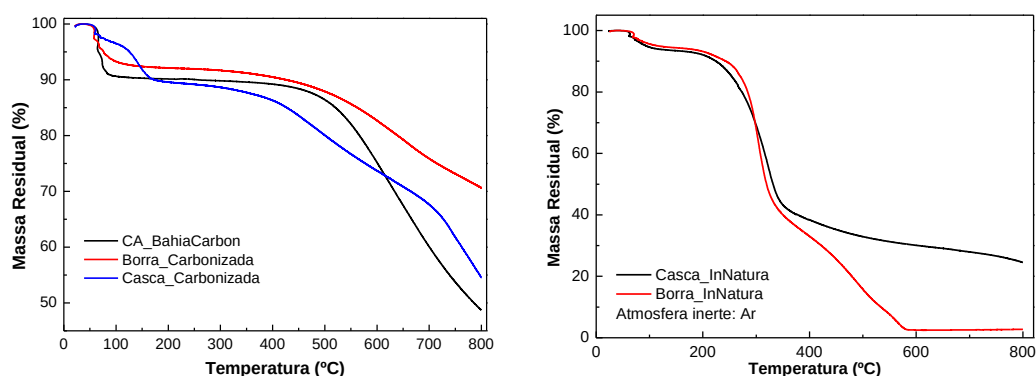
Tabela 3: Resultados de PCZ e Área Superficial Específica das matrizes estudadas.

	Borra de café in natura	Casca de café in natura	Borra de café carbonizada	Casca de café carbonizada	Carvão ativado
S_{BET}	-	-	273,6 m ² /g	1,55 m ² /g	573,02 m ² /g
PCZ	5,86	6,02	8,75	9,86	8,73

A Borra e a Casca de café apresentaram valores de área superficial específica inferiores ao carvão ativado comercial, o que era esperado, considerando que foram carbonizadas, mas não passaram por etapa de ativação. Esses valores estão diretamente relacionados à estrutura porosa dos materiais analisados e, portanto, ao seu potencial de adsorção. Tanto para a borra quanto para a casca de café *in natura*, podemos observar um valor de pHPCZ próximo de 6,0. Esse valor é característico de superfícies em que predominam grupos funcionais ácidos. Após o processo de carbonização, pode-se observar uma mudança na característica ácido-básica da borra e da casca de café, pelo aumento dos valores de pHPCZ, para 8,7 e 9,8, respectivamente. Esse aumento de pHPCZ pode ser justificado pela oxidação dos grupamentos de superfície e pela formação e contaminação com cinzas, que possuem caráter básico, no processo de carbonização. (SOARES *et al.*, 2006; ALVES, 2012; RONIX *et al.*, 2017)

Os Gráficos 1 e 2 trazem os termogramas comparados, gerados para cada matriz estudada.

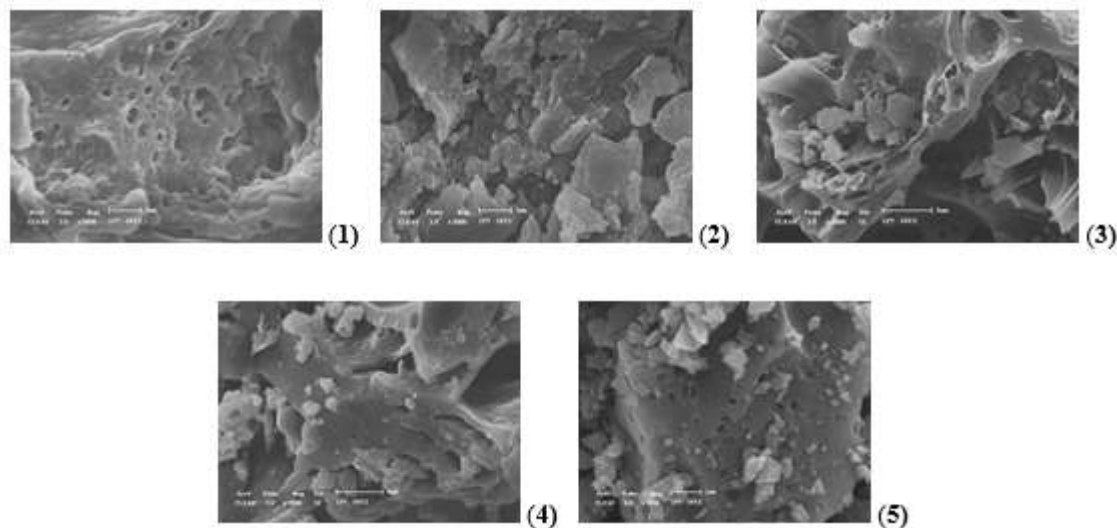
Gráfico 1: Termograma do Carvão ativado comercial, Borra de café e Casca de café carbonizadas, em atmosfera inerte, comparados. **Gráfico 2:** Termograma da Casca de café e da Borra de café *in natura*, em atmosfera inerte, comparadas.



Os termogramas gerados para as matrizes estudadas apontam o perfil de decomposição da matéria orgânica após o processo de carbonização.

Observa-se nos Gráficos 1 e 2 uma pequena perda de massa, até aproximadamente 120°C, referente à umidade presente na amostra. No Gráfico 2, contudo, a maior perda de massa, cerca de 50%, ocorreu entre 150 e 350°C. Nessa faixa de temperatura, tipicamente ocorre a decomposição de celulose e hemicelulose. (PALA et al., 2014; GAO et al., 2013). Por volta de 800°C, ao final da análise, o residual de amostra foi equivalente a cerca de 20% de massa, resultado este, já previsto na literatura. (NABAIS et al., 2008). A Borra de café *in natura* se diferencia da Casca de café *in natura*, principalmente, por um decaimento de massa que vai de 350 até aproximadamente 600°C, referente à decomposição da lignina. Pelo Gráfico 1, pode-se observar uma estabilidade maior das amostras em altas temperaturas pois já passaram por processo de carbonização, em que grande parte da matéria orgânica já foi decomposta.

Figuras 1, 2, 3, 4 e 5: (1) Borra de café *in natura*, aumento de 5000x; (2) Casca de café *in natura*, aumento de 5000x; (3) Borra de café carbonizada, aumento de 3000x; (4) Casca de café carbonizada, aumento de 3000x; (5) Carvão ativado comercial, aumento de 5000x.



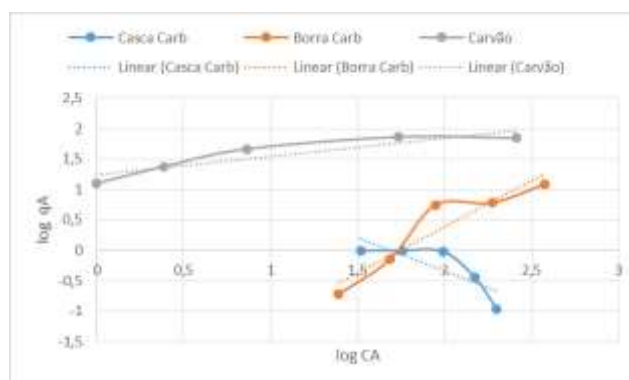
Nos aumentos de 3000x e 5000x é possível observar com clareza as estruturas ricas em irregularidades e cavidades. A decomposição da matéria orgânica, através do processo de carbonização, leva a uma morfologia menos densa e a uma redução no tamanho das partículas. Essas diferenças estruturais na superfície dos adsorventes também podem ser responsáveis por diferentes taxas de adsorção em relação às mesmas substâncias adsorvidas (PLAZA, 2012).

A Tabela 4 traz valores importantes, de porcentagem de remoção, q_A , MÁX e R^2 , obtidos através das isotermas geradas a partir dos ensaios de adsorção para o Carvão ativado comercial, a Borra de café e a Casca de café carbonizadas.

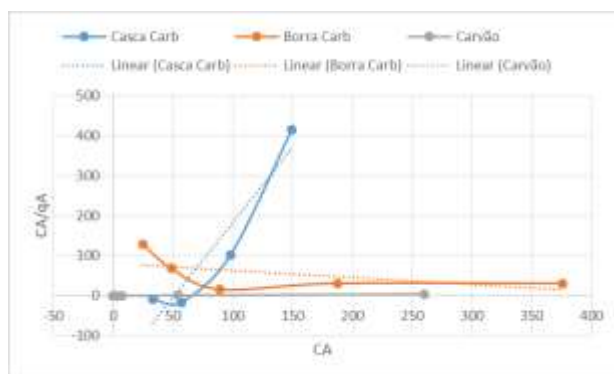
Tabela 4: Porcentagens de remoção de 2,4-D para valores crescentes de concentração estudados (25, 50, 100, 200 e 400 mg/L); q_A , MÁX de Langmuir e Freundlich para 100 mg de Carvão ativado comercial, Borra e Casca de café carbonizadas; e valores de R^2 de Langmuir e Freundlich.

Matriz	pH 7		
	Carvão	Borra de café	Casca de café
Remoção %	100	1,52	0
	95,1	2,85	0
	92,7	11,12	1,92
	72,9	6,05	0,48
	35	6,07	0,11
q_A , MÁX (mg/g)	94	18	1,5
R^2 Langmuir	0,9993	0,3109	0,7711
R^2 Freundlich	0,8324	0,8866	0,6766

Gráficos 3 e 4: Isotermas de Freundlich e Langmuir, respectivamente, para Carvão ativado, Borra e Casca de café carbonizadas.



(3)



(4)

Observando-se os valores de R^2 referentes à Borra de café, nota-se que o modelo de Freundlich foi mais eficaz em descrever o sistema de adsorção Borra/2,4,-D. Já no caso da Casca de café, os valores de R^2 obtidos, indicam que o modelo que melhor descreve o sistema de equilíbrio Casca/2,4-D é o de Langmuir. Os valores de q_A , $MÁX$ e de porcentagem de remoção de 2,4-D seguem a ordem Carvão > Borra > Casca, respectivamente. Observa-se que a discrepância desses valores entre as matrizes se reflete experimentalmente, como esperado, já que a área superficial das matrizes também segue a ordem Carvão > Borra > Casca.

CONCLUSÕES

De modo geral, pode-se concluir que a Borra e a Casca de café *in natura* não são comparáveis ao Carvão ativado na eficácia para remoção do 2,4-D em meios aquosos. Já a Borra e a Casca de café carbonizadas possuem potencial para remoção de 2,4-D, porém com desempenho muito inferior ao do Carvão ativado, que representou o tratamento que é geralmente utilizado para a remoção de micro contaminantes da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, Imran; ASIM, Mohd.; KHAN, Tabrez A.. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 113, p.170-183, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>.
- AL-ZABEN, M.i.; MEKHAMER, W.k.. Removal of 4-chloro-2-methyl phenoxy acetic acid pesticide using coffee wastes from aqueous solution. *Arabian Journal Of Chemistry*, [s.l.], p.1-7, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.003>.
- BRASIL. PORTAL DA SAÚDE - MINISTÉRIO DA SAÚDE. Agrotóxicos. 2017.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria MS nº 2914, de 12/12/2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2011.
- FRANCA, Adriana S.; OLIVEIRA, Leandro S.; FERREIRA, Mauro E. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee grounds. *Desalination*, [s.l.], v. 249, n. 1, p.267-272, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.017>.
- GAO, Ying et al. Effect of residence time on chemical and structural properties of hydrochar obtained by hydrothermal carbonization of water hyacinth. *Energy*, [s.l.], v. 58, p.376-383, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.023>.
- KIM, T. Y.; KIM, S. J.; CHO, S. Y. Adsorption and separation characteristics of herbicides onto activated carbon. *Adsorption*, v. 11, p. 217-221, 2005.
- NABAIS, João M. Valente et al. Production of activated carbons from coffee endocarp by CO2 and steam activation. *Fuel Processing Technology*, [s.l.], v. 89, n. 3, p.262-268, mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.11.030>.
- OLIVEIRA, Leandro S. et al. Evaluation of untreated coffee husks as potential biosorbents for treatment of dye contaminated waters. *Journal Of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 155, n. 3, p.507-512, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.093>.
- PALA, Mehmet et al. Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: A comparative evaluation. *Bioresour Technol*, [s.l.], v. 161, p.255-262, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.052>.

PLAZA, M.g. et al. Valorisation of spent coffee grounds as CO₂ adsorbents for postcombustion capture applications. *Applied Energy*, [s.l.], v.99, p.272279, nov.2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.028>.

SENS, M. L. et al. Remoção e Transformação de Agrotóxicos. In: PÁDUA, Valter Lúcio de et al. PROSAB 5: Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Rio de Janeiro: Abes, 2009. p. 196-209.

VEDENYAPINA, M. D. et al. Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on activated carbon. *Solid Fuel Chemistry*, [s.l.], v.51, n.2, p.115121, mar.2017. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s0361521917020100>.

VALDÉS, H. et al. Effect of Ozone Treatment on Surface Properties of Activated Carbon. *Langmuir*, [s.l.], v.18, n.6, p.21112116, mar.2002. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/la010920a>.

Capítulo 2



10.37423/220505807

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS EM SOLO COLAPSÍVEL

Ana Patrícia Nunes Bandeira

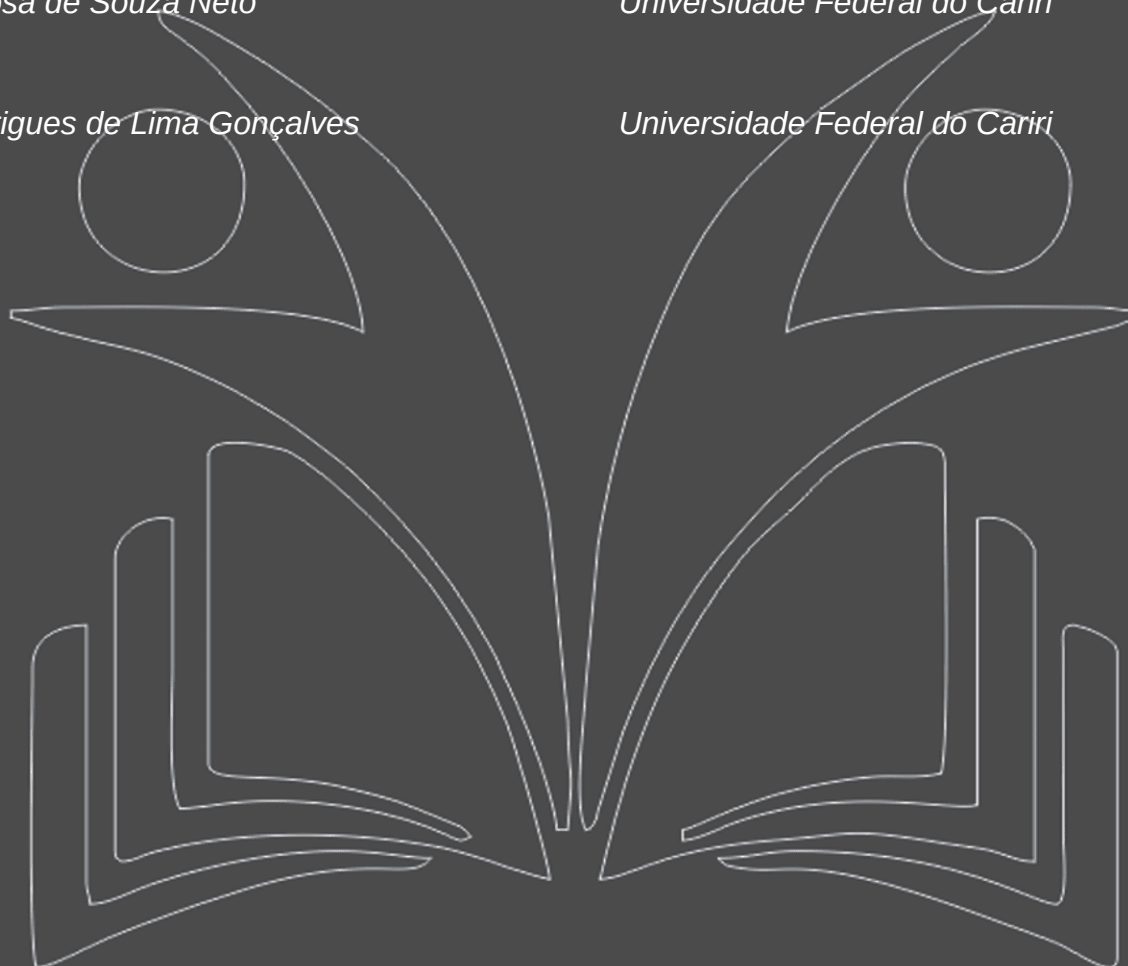
Universidade Federal do Cariri

João Barbosa de Souza Neto

Universidade Federal do Cariri

Diana Rodrigues de Lima Gonçalves

Universidade Federal do Cariri



Resumo: Os projetos de obras de engenharia civil requerem investigações e estudos específicos, de forma que as construções tenham desempenho e segurança adequados. No caso de obras apoiadas em solos não saturados, os estudos do comportamento dos solos são necessários, para avaliar a instabilidade volumétrica frente à variação da umidade. Especificamente para as fundações apoiadas em solos colapsíveis, essas podem apresentar bom desempenho por algum tempo, mas podem sofrer recalques adicionais com o aumento do teor de umidade do solo. Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados de provas de cargas executadas em estacas curtas, ensaiadas no Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri (UFCA), em Juazeiro do Norte-CE.

Palavras-chave: Estaca Broca, Fundações, Prova de Carga.

1. INTRODUÇÃO

O colapso é o termo utilizado para os recalques adicionais de uma fundação devido ao umedecimento de um solo não saturado, normalmente sem aumento das tensões aplicadas (Jennings e Knight, 1975). Os solos que apresentam esse comportamento têm sido referidos de “solos colapsíveis”.

O solo colapsível apresenta estrutura não saturada metaestável e, se exposto ao umedecimento, associado a um carregamento, sofre um reajarranjo de partículas com redução de volume. Solo com este comportamento tem sido encontrado em diversas regiões de clima semiárido do Brasil (CASTRO, 2011; SOUZA NETO, 2004; SOUZA NETO et al, 2012), como na Região do Cariri cearense (Rolim e Bandeira, 2016).

Na elaboração de projetos em solos não saturados uma investigação geotécnica específica se faz necessário para prever comportamentos de colapso dos solos, visando minimizar as incertezas e contribuir com o bom desempenho das obras.

A fim de analisar o comportamento de estacas curtas apoiadas em solos colapsíveis, o Grupo de Pesquisas Geotécnicas no Semiárido (GEOTSA), realizou três ensaios de provas de cargas em estacas executadas no Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri (UFCA), em Juazeiro do Norte-CE. Neste contexto apresenta-se aqui os resultados do estudo do comportamento das estacas escavadas, do tipo broca, executadas no solo colapsível.

2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo trata-se do Campo Experimental, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Cariri (UFCA), situado no município de Juazeiro do Norte, Ceará. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

De acordo com a FUNCEME, o clima do município é tropical quente semi-árido e o período chuvoso está compreendido entre os meses de janeiro a maio, com precipitação média anual de 925,1 mm e temperatura média que varia de 24° a 26° C.



Figura 1. Localização da Área de Estudo – Campo Experimental - UFCA

Em estudos realizados por Xavier (2018) revelou que o solo do Campo Experimental é predominantemente do tipo areno siltoso e areno argiloso (SM/SC), variando pouco ao longo do perfil, podendo-se considerar homogêneo, para fins práticos. Também foi observado por Xavier (2018) que o perfil de umidade apresenta maiores variações até a profundidade de 2,5 m, quando se compara os resultados obtidos no período seco (média de 5% de umidade) e no período chuvoso (entre 7% e 9%). A partir de 3,0 m os teores de umidades ficam praticamente constantes (média de 5%), sugerindo que a camada ativa do solo esteja limitada entre a superfície do terreno e a profundidade de 3,0 m.

Landim (2017) constatou a colapsibilidade do solo por meio de provas de carga em placa, realizadas a 0,5 m de profundidade, inundado o solo sob tensão de 160 kPa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No Campo Experimental da UFCA foram executadas três estacas do tipo broca para a realização dos ensaios de provas de carga nas seguintes formas:

- i) ensaio em estaca broca convencional, na estação seca, para avaliação do comportamento de colapso;
- ii) ensaio na estaca broca convencional, na estação chuvosa, para avaliação da capacidade de carga, por meio da curva carga *versus* recalque;
- iii) ensaio na estaca broca com ponta apoiada, na estação chuvosa, para avaliação da capacidade de carga, por meio da curva carga *versus* recalque.

Segundo a NBR 6122/19 a estaca broca é uma fundação profunda, perfurada com trado manual, preenchida com concreto, com diâmetro e comprimento mínimos de 0,15 m e 3,0 m, respectivamente, sendo utilizada para pequenas construções, com cargas limitadas a 100 kN.

No presente estudo as três estacas foram executadas com diâmetro de 0,15 m e comprimento de 5,0 m. Este comprimento foi adotado para que ultrapassasse o limite da camada ativa do solo (3,0 m) da área de estudo.

Com relação aos processos executivos, duas estacas foram moldadas a partir de um concreto plástico e uma estaca foi moldada a partir do apiloamento da ponta, com concreto seco, e posteriormente preenchida ao longo do fuste com concreto plástico, até a cota de arrasamento. O apiloamento da ponta com concreto seco ocorreu por meio da queda de um soquete com massa de 25 kg, de uma altura de 2 metros. O volume de concreto seco utilizado foi dividido em três partes, sendo cada parte compactada por meio de 11 golpes do soquete, de maneira a transferir à camada uma Energia Normal de compactação ($5,95 \text{ kg/cm}^2$).

Os ensaios de provas de cargas nas estacas foram realizados segundo as recomendações da NBR 12131/2006 "Estacas - Prova de Carga Estática - Método de Ensaio". Foi utilizado um sistema de reação, composto por um caminhão carregado, de maneira a gerar uma carga total de 18,0 T. O sistema de transmissão de carga contou com apoio de um macaco hidráulico de capacidade para 50,0 T e uma célula de carga. Os deslocamentos foram medidos por dois extensômetros acoplados a uma viga de referência (Figura 2).



Figura 2. Prova de Carga em Estaca (Gonçalves et al., 2018).

Os ensaios de prova de carga foram do tipo lento (SML – Slow Maintained Load Test), com carregamentos realizados em estágios sucessivos de 1,0 T, correspondendo ao acréscimo de 20% da carga admissível do solo da estação seca. A mudança de estágio ocorreu após a estabilização dos recalques, considerando a tolerância máxima de 5% do recalque total.

A capacidade de carga da estaca foi primeiramente estimada, para os períodos seco e chuvoso da região, com base nos resultados das sondagens SPT realizadas nos respectivos períodos. Para isso utilizou-se uma planilha de cálculo com base nas formulações dos seguintes métodos: Aoki e Velloso (1995), Velloso (1981), Decourt-Quaresma (1978), Teixeira (1996) e Alonso (1983). O menor valor da previsão de capacidade de carga da estaca obtido pelos métodos citados foi adotado como carga de ruptura e carga admissível após aplicar fator de segurança. Esses valores serviram de base para o ensaio na estação seca, carregando a estaca até a carga admissível estimada e depois submetendo-a à inundação, para avaliação do comportamento de colapso da estaca.

No estudo do comportamento de colapso da estaca-solo, a inundação se deu através de uma cava em torno do topo da estaca e por meio de 03 drenos verticais, constituídos por areia e brita, conforme ilustrados na Figura 3, de comprimentos iguais aos das estacas (5,0 m), onde a frente de umedecimento foi acompanhada por meio de sensores previamente instalados.

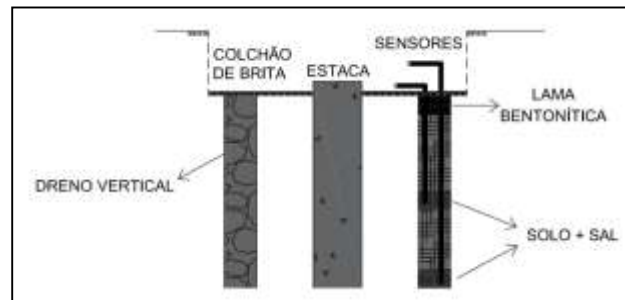


Figura 3. Esquema de Inundação e Monitoramento (Gonçalves et al., 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. SONDAGENS SPT

A Figura 4 apresenta os perfis de sondagem SPT da área de estudo. Apresenta resultados de um ensaio realizado no período chuvoso (janeiro a abril 2017) e de dois ensaios realizados no período seco (de junho a novembro de 2017).

Observa-se da Figura 4 que o solo apresentou índices de resistência superiores no período seco quando comparado com o período chuvoso. A diferença da resistência é muito significativa nos primeiros 2,0 m de profundidade, onde se observa uma variação de 8 a 12 golpes no furo 2 durante a estação seca; e uma variação de 1 a 2 golpes na estação chuvosa, ou seja, a capacidade de carga do solo reduz bruscamente.

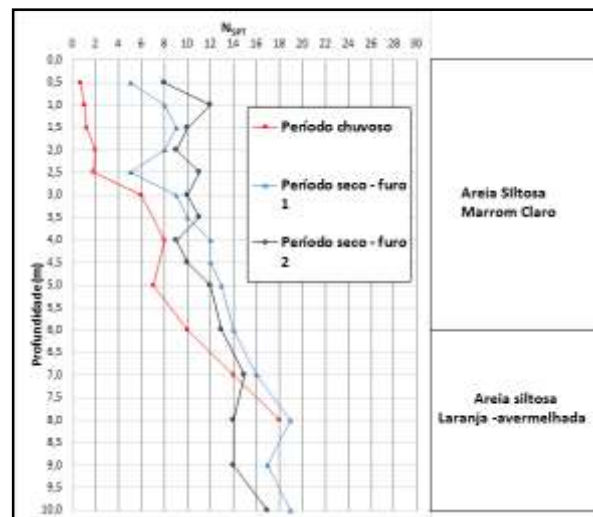


Figura 4. Sondagem SPT (28/03/2017 – Chuvoso / 27/10/2017 – Seco) e Perfil Estratigráfico (Gonçalves et al., 2018).

4.2. PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA

A previsão da capacidade de carga da estaca broca, com diâmetro de 150 mm e comprimento de 5 metros realizada pelos métodos semi-empíricos mostrou que a carga admissível média do período seco foi de 5,2 T. Este valor é próximo da capacidade de carga obtida pelo método de Aoki e Velloso (1975) com dados do Nspt do período chuvoso; já a carga admissível média neste período foi estimada em 2,9 T; correspondendo a uma redução de 44% na capacidade de carga quando se compara o valor do período seco com o obtido no período chuvoso.

4.3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS ESTACAS

A Tabela 1 apresenta os valores dos recalques da estaca convencional ensaiada no período seco da região. Após a aplicação da carga de 5,0 T, o recalque foi mínimo, inferior a 1,0 mm, antes da inundação. Após a estabilização dos recalques nesta carga, seguiu-se com a inundações, que teve duração de 16 h, onde foi registrado um recalque total superior a 36 mm após a inundação (Figura 5), configurando ruptura convencional por colapso.

Tabela 1. Medição de Recalques por Estágio de Carregamento (Gonçalves et al., 2018).

Carga (T)	Recalque Médio (mm)	Tempo (h)
0	0	0
1	0,016	0,5
2	0,0215	0,5
3	0,0295	1
4	0,0635	1
5	0,0845	1
INUNDAÇÃO		
5	36,6075	16

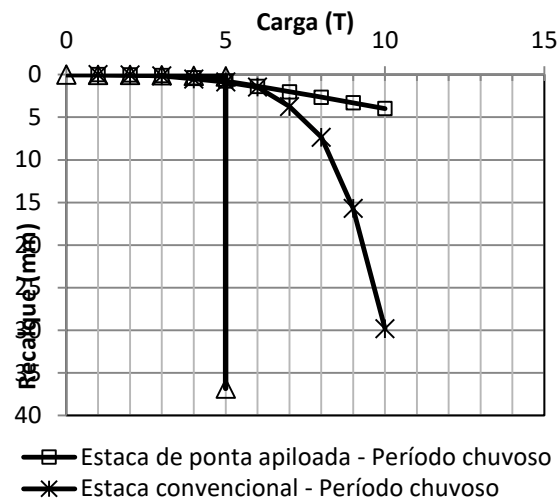


Figura 5. Curvas Carga versus Recalque das Estacas (convencionais e ponta apoiada)

Vale ressaltar que o recalque máximo medido foi limitado pelas condições dos equipamentos utilizados, ou seja, caso o comprimento da haste dos extensômetros fosse maior, seria possível obter valores superiores de recalques, no entanto já tinha configurado a ruptura do solo por colapso.

Após a realização da prova de carga realizada no período seco, foi verificado o perfil de do solo em torno da estaca e constatado que as camadas de solo atingiram teores de umidade superiores àqueles do período chuvoso (8 a 12%), revelando que toda a camada de solo estudada sofreu processo de umedecimento conforme esperado (Figura 6), mostrando que os drenos funcionaram.

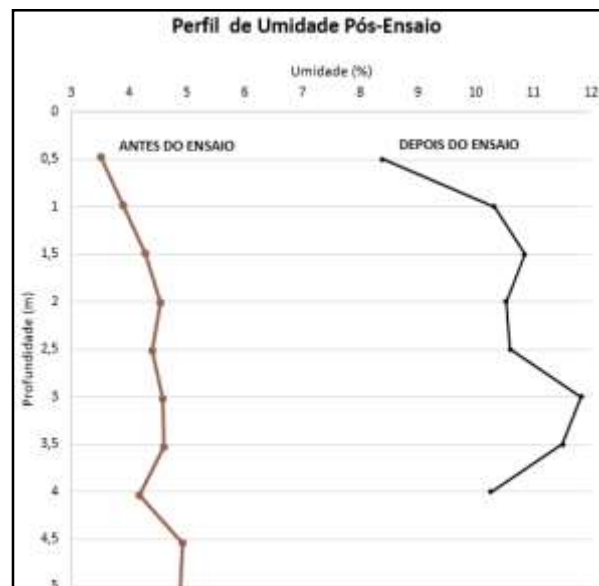


Figura 6. Perfil de Umidade após Prova de Carga do Período Seco (Gonçalves et al., 2018).

As provas de cargas realizadas no período chuvoso, nas outras duas estacas (convencional e com ponta apoiada), foram executadas carregando-as até 10 T, sendo este valor próximo do estimado para a

capacidade de carga, conforme os métodos semiempíricos baseados nos dados da sondagem obtidos durante a estação seca.

A estaca convencional, no período chuvoso, apresentou recalques mais expressivos só após a carga de 8,0 T. Na carga de 10,0 T o recalque foi de 29,822 mm (Figura 5). Devido à limitação do sistema de reação, a curva carga versus recalque do comportamento da estaca não apresentou ruptura nítida, porém os valores registrados sugerem concluir que a carga de ruptura da estaca convencional se encontra em torno de 10,0 T, onde os recalques foram elevados.

A estaca com ponta apiloada apresentou, até a carga de 5 T comportamento semelhante ao da estaca convencional; no entanto, na carga de 10 T, o recalque total acumulado foi de 3,984 mm, representando uma redução de 87% no recalque quando se compara ao valor obtido na estaca convencional ensaiada também no período chuvoso.

Os resultados sugerem um aumento da capacidade de carga da estaca quando a ponta esteve apiloada, como era esperado.

Observando os recalques registrados nas estacas convencionais, durante os ensaios realizados no período seco e no período chuvoso (assemelhando-se ao ensaio edométrico duplo), verifica-se que, sob carga de 5,0 T, houve uma pequena diferença nos recalques lidos, sendo inferior a 1 mm. Isto sugere concluir que as precipitações pluviométricas normais, não seriam suficientes para provocar todo colapso do solo ao longo do fuste da estaca estudada, que teve comprimento de 5,0 m.

5. CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostraram que é possível encontrar solos colapsíveis em profundidades de até 5,0 m; no entanto as chuvas naturais podem não ser suficientes para umidecer todas as camadas de solo que se encontram desde a superfície até esta profundidade.

O ensaio de prova de carga realizado na estaca broca convencional, durante o período chuvoso, mostrou que até a carga de 8,0 T, os recalques estiveram dentro do aceitável. Porém é importante levar em consideração que a saturação do solo não está limitada apenas às ocorrências de chuvas, podendo se dá devido a outros fatores, tais como: ruptura de tubulações enterradas e vazamentos de reservatórios, sendo um risco adotar em projetos a carga admissível em valores iguais ou superiores 5,0 T, como constato no ensaio realizado na estação seca, em que a estaca apresentou recalque por colapso, após inundação do sistema estaca-solo, sob carga de 5,0 T.

A estaca broca com ponta apiloadada apresentou um bom melhoramento na resistência de ponta, contribuindo para o ganho da capacidade de carga, sugerindo que a carga admissível seja bem superior a 5,0 T; no entanto ressalta-se a necessidade de avaliar o comportamento da estaca em caso de uma situação de inundação de todo o fuste e ponta da estaca.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a PRPI/UFCA pelo apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação de Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12131 – Estacas - Prova de Carga Estática - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- Castro, Bruno Pereira Fernandes de. Estudo de um solo colapsível e sua consideração na capacidade de carga de fundações profundas. Dissertação de Mestrado, UFPE. Recife, 2011.
- Gonçalves, D. R. L.; Bandeira, A. P. N.; Souza Neto, J. B.; Oliveira, S. J. C.; Chaves, A. M. M.; Mascena, D. W. A.; Alexandre, C. C.. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2018.
- Landim, I. C. (2017). Análise do potencial de colapso do campo experimental da UFCA através de prova de carga em placa e do ensaio edométrico simples. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Cariri. Juazeiro do Norte, 62 p.
- Rolim, J. I. D.; Bandeira, A. P. N. (2016). Estudo de um solo colapsível no município do Crato-CE In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte-MG.
- Souza Neto, J. B. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2004. 432 p.
- Souza Neto, J.B; Martins, P. A.; Perez, E.N.P. and Santos, M. V. F. (2012). Avaliação da Colapsibilidade do Solo de um Trecho do Projeto de Integração do Rio São Francisco por Meio de Ensaios de Laboratório e Campo. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas - PE. V. 01. p. 221-221.
- Teixeira, C.Z. Comportamento de estacas escavadas em solos colapsíveis. São Carlos, Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, 1993.
- Xavier, J. M (2018). Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Colapsível Voltado para Fundações Superficiais. Dissertação de Mestrado, UFPE. Recife. 175p.

Capítulo 3



10.37423/220505823

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UMIDADE DO SUBLEITO NA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Bruno Guida Gouveia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Marina Donato

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Felipe Costa Dias

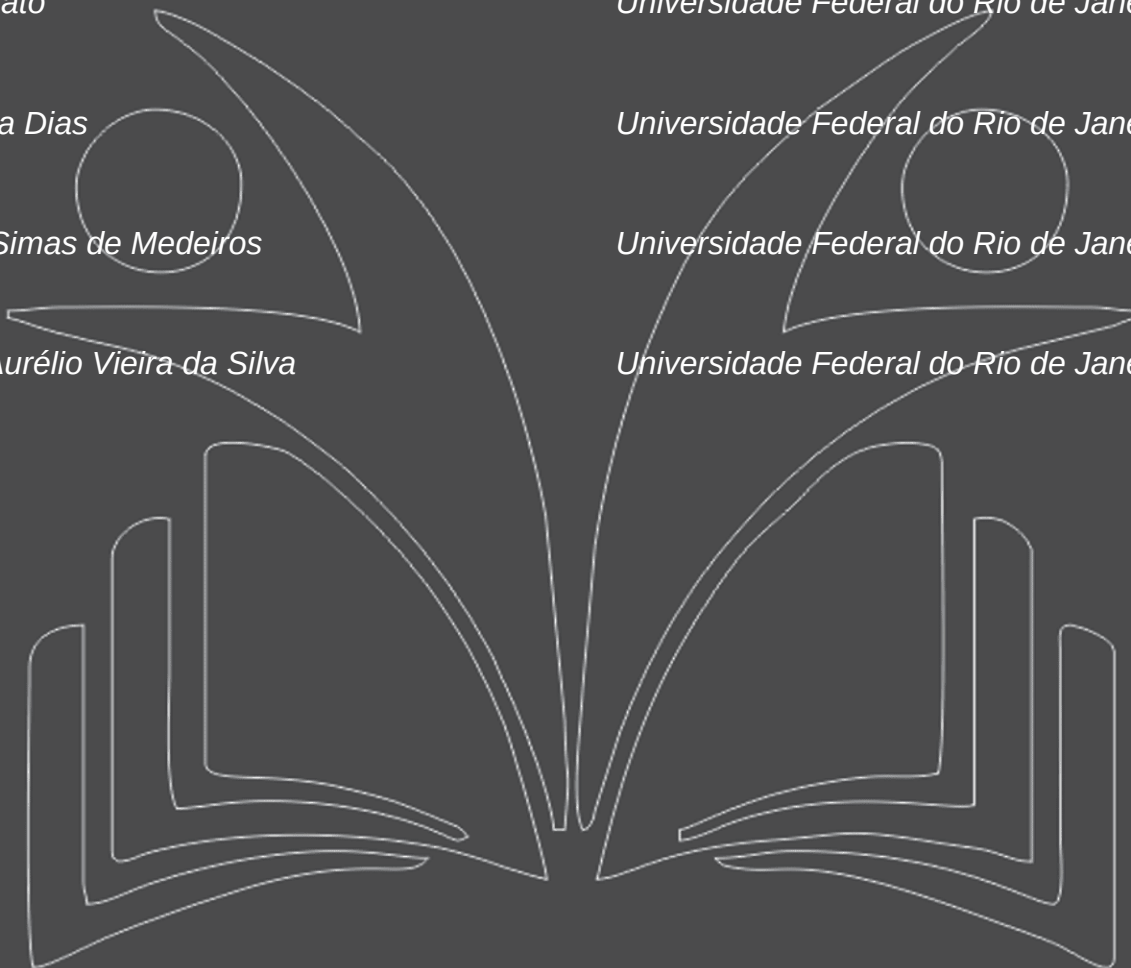
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Alexandre Simas de Medeiros

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Universidade Federal do Rio de Janeiro



Resumo: Ao se avaliar a sustentabilidade de uma obra, é imprescindível fazer a verificação dos impactos ambientais. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto ambiental relativizado pela vida útil esperada de cada pavimento, variando a umidade do subleito a partir de três tipos de solos, por meio da Análise de Ciclo de Vida. Avaliou-se os efeitos da umidade dos subleitos em diferentes critérios de dimensionamento utilizando o software MeDiNa. Considerou-se as fases de extração e produção dos insumos necessários à implantação da rodovia idealizada para cada cenário, bem como a própria etapa de construção considerando a operação dos equipamentos de engenharia. Quanto aos resultados alcançados na Análise de Ciclo de Vida, quantificou-se as contribuições para o aquecimento global e a energia requerida. Conclui-se que a variação de umidade no subleito impactou nos resultados da vida útil, consumos energéticos e emissões de gases de efeito estufa.

1. INTRODUÇÃO

Pautado no fato de que existem limites para as capacidades da biosfera absorver os efeitos das atividades humanas e que, por sua vez, as ações da humanidade são mutáveis, sendo subordinadas ao grau de desenvolvimento tecnológico, organização social, econômica e cultural, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável. Ele consiste na ideia de que é possível, por meio da combinação da gerência de oferta e demanda de recursos produtivos, e o incentivo a aprimoramentos tecnológicos, gerar crescimento econômico para as gerações atuais sem que este inviabilize o atendimento das necessidades das gerações futuras (Brundtland *et al.*, 1987).

A utilização de princípios de sustentabilidade no gerenciamento de atividades e negócios por parte de agências, empresas, organizações e instituições governamentais vêm crescendo, embora não seja algo novo, com a finalidade de sanar ou mitigar as consequências negativas e, ao mesmo tempo, maximizar os benefícios das empreitadas humanas. Esse comportamento tem o objetivo de estabelecer os principais fatores ambientais, sociais e econômicos no processo de tomada de decisão. Uma das principais razões que motivam esse interesse vem do aumento da compreensão de como as atividades humanas locais e regionais afetam as dinâmicas do meio ambiente (exemplos: clima, ecossistemas e esgotamento de recursos), às vezes, de forma global. Outras provocações vêm de repercussões sociais (exemplos: acessibilidade, mobilidade e bem-estar) e custos econômicos (custos e retornos dos investimentos) (Van Dam *et al.*, 2015).

Com o objetivo de facilitar a racionalização e o encadeamento lógico dos impactos que uma infraestrutura rodoviária possa gerar, eles foram organizados em três grupos, quais sejam: econômico; ambiental; e social (Santos *et al.*, 2019). A depender da ótica de avaliação, os mesmos fatores de entrada (exemplo: mão de obra; materiais; equipamentos; e energia consumida) gerarão diferentes saídas em uma mesma fase do ciclo de vida (Valdivia *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2019). Contudo, esse trabalho terá como enfoque o aspecto ambiental da sustentabilidade.

Os solos tropicais possuem distinções quanto aos fatores que formaram os solos de clima temperado e que têm maior abrangência quanto a estudos de caracterização (Camapum *et al.*, 2015). A água os afeta bem como aos demais solos, desta forma, a fim de obter maiores esclarecimentos alguns estudos foram realizados para avaliar condições de umidade de equilíbrio de solos utilizados como materiais constituintes de pavimentos em regiões tropicais do Brasil (Lima *et al.*, 2020). As normas para seleção de solos brasileiros adequados para utilização em obras de pavimentos flexíveis são replicações das normas criadas para escolha de solos de clima temperado e que são altamente excludentes para solos

tropicais (Camapum *et al.*, 2015; DNER, 1981; DNER, 1994; Guimarães *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2021). Além disso, é usual a construção de pavimentos carentes de sistema de drenagem dimensionados e executados de forma satisfatória (Jayakumar e Soon, 2015), por isto, é interessante novos estudos do comportamento da umidade para solos tropicais.

Apesar de ser possível encontrar na literatura estudos que avaliam redução dos impactos no meio ambiente associados à construção de nova infraestrutura rodoviária, principalmente por meio da utilização de diferentes materiais frente aos usuais (Araújo *et al.*, 2014; Chou e Lee, 2013; Huang *et al.*, 2009), bem como seus efeitos em cada fase do ciclo de vida (Santos *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018; Gulotta *et al.*, 2019; Cong *et al.* 2020), o presente estudo conjuga essas alternativas aos impactos oriundos de uma análise de impacto de ciclo de vida.

O objetivo desse estudo é avaliar o efeito que a variação da umidade de subleitos, que compõem pavimentos rodoviários com revestimentos flexíveis, pode gerar na Análise de Ciclo de Vida (ACV) dessas infraestruturas. Desse modo, esse estudo não verifica os efeitos sobre as deformações plásticas. O artigo é estruturado em cinco seções: o tópico 2 traz uma breve Revisão Bibliográfica sobre ACV, dimensionamentos de pavimentos rodoviários e o efeito da umidade nos subleitos. A etapa 3 apresenta os materiais e métodos utilizados. No item 4 expõem-se os resultados e discussões das simulações de dimensionamento dos pavimentos pelo método MeDiNa para diferentes umidades e critérios de área trincada e previsões de seus impactos ambientais. Por fim, na última seção apresenta-se as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Existem vários métodos para se avaliar os impactos ambientais de um determinado produto ou serviço (Crawford *et al.* 2008). Entre os planejadores de transporte, tem crescido o interesse em determinar os impactos ambientais gerados por todas as etapas do ciclo de vida de infraestruturas de transportes, desde a extração até o descarte ou reciclagem dos materiais. Nesse sentido, a ACV tem ganhado destaque como a ferramenta mais apropriada para o cumprimento desse tipo de tarefa, já que é capaz da qualificação, quantificar e comparação das repercussões das estruturas estudadas. Em última instância, esse tipo de capacidade permite que a determinação do projeto a ser implantado seja feita de forma a se considerar ofensividade ao meio ambiente (Azarijafari *et al.*, 2016.)

Os processos e regras para a realização de uma ACV foram originalmente definidas pela Organização Internacional de Padronização (ISO) em sua família de normas 14040 (ISO, 2006b). Os critérios de conduta são genéricos já que visam orientar análises de qualquer tipo de empreendimento. Portanto, para sua aplicação em projetos de pavimentação são necessárias especificações mais precisas. Essa orientação é geralmente desenvolvida pelas indústrias relevantes e outras partes interessadas como academia e órgãos públicos (Harvey *et al.*, 2014). Apresenta-se, a seguir na Tabela , uma breve compilação de estudos que empregaram abordagens similares a que foi proposta para este trabalho.

Tabela 1: Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, softwares e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários.

Objetivo	Etapas do CV	Fonte de dados	Método de AICV	Software	Impactos analisados	Referências
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-site: transporte; extração e usinagem; construção	Dados da região; Ecoinvent v.3 e USLCI (United States life cycle inventory)	TRACI	SimaPro	ODP, GWP, POPC, TAP, Eutrofização (EP), Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	VEGA ARAUJO <i>et al.</i> , 2020
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-gate: extração; britagem (RCA); transporte para armazenamento	Dados da região e Ecoinvent v.3	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, TAP, ODP, Eutrofização (EP), Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	MARTINE Z- ARGUELLES, ACOSTA <i>et al.</i> , 2019
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-site: transporte do local de demolição (RCA); extração e usinagem; bota-fora (RCA); transporte da usina de concreto; transporte para o local de construção	Dados da região; Ecoinvent v.3 e USLCI (United States life cycle inventory)	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade, Consumo de combustível fóssil	ROSADO <i>et al.</i> , 2017

Segundo Hasan *et al.*, (2019), pode-se descrever as etapas de uma ACV assim: (1) identificação dos processos, com o estabelecimento de períodos e abrangências, do ciclo de vida do produto contendo todas as variáveis, em unidades funcionais pertinentes, julgadas como necessárias para sua avaliação; (2) levantamento do inventário com os parâmetros de avaliação estabelecidos como necessários; (3) tabulação, quantificação e ponderações sobre as trocas energéticas com o meio ambiente, as emissões de resíduos e insumos consumidos; (4) interpretação, idealmente permeando todas as demais etapas da ACV com o objetivo principal de fornecer aos decisores informações para a conclusão de que escolhas fazerem.

Para Hauschild *et al.* (2018), a via de impacto ou mecanismo ambiental subjacente tem como seu ponto de partida essencialmente de dois tipos, quais sejam: (1) uma emissão para o meio ambiente; (2) uma extração de recursos do meio ambiente. Quanto aos impactos ambientais do primeiro tipo associados ao ciclo de vida de pavimentos rodoviários temos: Alterações Climáticas (kg CO_2 -eq); Degradação da Camada de Ozônio (kg CFC-11-eq); Formação Fotoquímica de Ozônio (kg NO_x -eq); Acidificação (kg SO_2 -eq); Eutrofização (kg PO_4 -eq); Formação de Material Particulado fino (kg $PM_{2,5}$ -eq) (IPCC, 2014; Hauschild *et al.*, 2018; Van Zelm *et al.* 2016; Roy *et al.* 2014; Helmes *et al.* 2012).

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

O critério de decisão para seleção de determinado tipo de pavimento usualmente se baseia nas solicitações do tráfego em determinado tempo de serviço, na ação climática e nos custos de implantação. O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil do mesmo corresponda ao período de projeto (Souza Júnior, 2018). Dada a evolução dos projetos de dimensionamento de pavimentos, o modelo empírico-mecanicista tem a finalidade de reunir ensaios e técnicas correlacionando os dados dos materiais, condições ambientais e o tráfego dos trechos a serem pavimentados, de modo a definir as espessuras das camadas e verificar se as mesmas satisfazem as condições de tensões e deformações impostas no dimensionamento (Franco *et al.*, 2019).

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigente no Brasil, descrito em DNER (1981) e dependente da norma DNER (1994), é um método empírico que visa, somente, proteger o subleito de uma ruptura por cisalhamento. No entanto, a partir do ano 2021, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2021), iniciou a adoção de procedimentos para transição do método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa). Os procedimentos podem ser verificados a partir da nova instrução de serviço (IS) específica para a elaboração e implantação de projetos com base no novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis – MeDiNa, a IS-247 discorre sobre a elaboração de estudos geológico-pedológicos, estudos geotécnicos, estudo de misturas asfálticas, apresentação de relatório e resultados e demais observações pertinentes.

SUBLEITOS E UMIDADE

Uma série de pesquisas vem sendo desenvolvida no sentido de se avaliar a influência do módulo resiliente nos solos saturados, ou seja, a influência da variação de umidade. Segundo Vargas (2020),

devido as diversas variações das condições meteorológicas durante o ano, podem produzir grandes alterações nos teores de umidade dos solos dependendo do acesso da água à camada e, portanto, o Módulo de Resiliência ao longo da vida útil do pavimento. De acordo com Ceratti *et al.* (1996), um pequeno incremento na umidade de moldagem dos corpos-de-prova provoca uma diminuição no módulo de resiliência independentemente do nível de tensão desvio, e os valores de módulo resiliente decrescem à medida que aumenta o nível de tensão desvio aplicada.

No geral, os subleitos são dimensionados com a umidade ótima obtidos geralmente pelo ensaio de compactação. Em situações em campo, no geral, esses materiais são compactados também próximo à umidade ótima. De acordo com Lima *et al.* (2020), os projetos de pavimentos flexíveis que ainda avaliam as propriedades mecânicas dos solos constituintes da plataforma considerando a umidade ótima são altamente questionáveis, haja vista que a plataforma fica exposta às intempéries. Em detrimento disso, apesar de admitidas as condições originais na avaliação estrutural do pavimento, após a compactação ocorre uma variação transiente da umidade que influencia na capacidade de suporte desse solo que deve ser avaliada.

Vários fatores são conhecidos por afetar a capacidade preditiva do projeto do pavimento e dos métodos de análise. No caso específico do teor de umidade do subleito é influenciado pela infiltração, temperatura, variação sazonal do lençol freático e mudanças climáticas. Em rodovias, para se tratar especificamente dos efeitos da umidade, criou-se o conceito de umidade de equilíbrio que pode ser definido como um valor médio entre as variações de umidade do solo ao longo do ano após a fase de acomodação dos primeiros meses de serviço (Khouri *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2020; Lima, *et al.*, 2021; Medina e Motta, 2015; Nazarian e Yuan, 2008; Silva, 2009; Takeda, 2006).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para averiguar os impactos provocados pela presença de água no subleito do pavimento, a pesquisa foi estruturada em três partes: (1) Dimensionamento mecanístico-empírico dos pavimentos; (2) Análise dos impactos nas fases de exploração, produção de materiais e construção; (3) Avaliação integrada entre desempenhos mecânicos e ambientais.

DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Do ponto de vista da utilização do método mecanístico-empírico para o dimensionamento dos pavimentos avaliados nesse trabalho pode se especificar as seguintes etapas: (1) determinar os materiais das camadas do pavimento; (2) determinar o período de avaliação; (3) determinar o tráfego

de solicitação, comum a todas as soluções; (4) estabelecer espessuras para as camadas; (5) calcular o desempenho de cada pavimento para cada critério de ruptura; (6) verificar se os arranjos de camadas (materiais e espessuras) atendem aos critérios de ruptura para o período de análise, caso não atendam deve-se propor um novo conjunto de espessuras.

ANÁLISE DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

A ACV permite uma avaliação mais ampla na tomada de decisão nas estratégias de construção e manutenção de pavimentos (Huang *et al.*, 2021; Cong *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2019; Santos *et al.*; 2018). Diante disso, neste estudo, foi realizada a AICV por meio da mensuração das emissões de gás de efeito estufa e consumo energético, tanto na fabricação dos insumos quanto na construção das estruturas de pavimentos-tipo. Como a quantidades de materiais necessários para a construção da estrutura são distintas, por isso, foram geradas avaliações individualizadas, tendo como critério principal a estimativa de consumo de óleo diesel dos equipamentos. Adiante, assim como em Chen e Wang (2018) e Islam *et al.* (2016), foram utilizados inventários para obtenção de informações acerca dos valores unitários de emissão de CO₂, N₂O e CH₄, assim como do consumo energético empregado nas alternativas construtivas. Logo, para este fim, foi utilizado o software Simapro®, o banco de dados Ecoinvent® e método de AICV CML. Salienta-se que para o cálculo das quantidades de CO₂ equivalente foram usados os valores de GWP100 presentes na Tabela 2.

Tabela 2: Contribuições relativas dos principais gases de efeito estufa.

Substância	Vida útil	GWP	
		Efeito cumulativo (20 anos)	Efeito cumulativo (100 anos)
CO ₂	indeterminado	1	1
CH ₄	12,4	84	28
N ₂ O	121,0	264	265
CF ₄	50.000,0	4880	6680

Fonte: adaptado de (IPCC, 2014).

4. ESTUDO DE CASO

Foram elaborados 26 cenários que tinham em comum os materiais da mistura asfáltica, da base e da sub-base, como descritas na Tabela 4, bem como as espessuras das duas últimas camadas 15 e 30 centímetros respectivamente. Em 13 cenários os solos utilizados como subleito tiveram suas propriedades aferidas em suas respectivas umidades ótimas. Nos outros 13 casos, os mesmos solos, tiveram sua caracterização e compactação feita em uma umidade 2% acima da umidade ótima. Além da diversificação dos materiais de subleito e dos graus de umidade, conforme apresentado na Tabela

3, também se inspecionou o critério de dimensionamento por área trincada ao fim da vida útil; esse critério foi aplicado com o auxílio do *software* brasileiro de dimensionamento (MeDiNa).

Tabela 3: Materiais do subleito.

Pavimento	Umidade ótima			Umidade ótima +2%		
	PAV 1	PAV 2	PAV 3	PAV 4	PAV 5	PAV 6
Subleito	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Classificação MCT	LA	LG'	NA'	LA	LG'	NA'

O tipo de via adotado foi o de sistema arterial primário com um tráfego diário por pista de 1500 veículos e os critérios adotados de área trincada de pavimento, para serem atingidos em 10 anos (totalizando um N de 5,48 x 10⁶ eixos-padrão), foram: 20%, 25%, 30%, 35% e 40%. Cabe ressaltar que, exceto para a camada de revestimento, considerou-se o modelo composto, não linear, para simulações do comportamento resiliente.

Quanto a análise do desempenho mecânico, e em última análise, determinação da vida útil de cada cenário, foram realizados dimensionamentos (estabelecimento da espessura do revestimento) por meio do *software* MeDiNA.

Para definir, então, a vida útil dos pavimentos-tipo, padronizou-se que ela seria aquela necessária para que se atingisse o critério de 30% de área trincada na superfície do pavimento (critério mínimo de desempenho adotado pelo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos rodoviários). Com o auxílio do *software* e de seus modelos de previsão de desempenho, foi possível a obtenção da vida útil do pavimento conforme esse critério mínimo.

De posse das espessuras das camadas, calculou-se os volumes de cada material necessário a construção e, com uso do SICRO (DNIT, 2018) levantou-se os demais insumos necessários para a utilização dos materiais escolhidos (Tabela 4). A partir do dimensionamento e da definição dos materiais de cada camada, foi possível calcular os impactos ambientais com o auxílio do *software* Simapro® e do banco de dados Ecoinvent®, além do trabalho de Stripple (2001) e Nascimento *et al.* (2020). Cabe ressaltar que os consumos de materiais e energético são considerados em três etapas do ciclo de vida dos pavimentos: (1) exploração dos insumos naturais; (2) usinagem; e (3) construção.

Tabela 4: Materiais de cada camada.

CAMADA	DESCRIÇÃO
Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.
Base	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.
Sub-base	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.

Fonte: Adaptado de SICRO (DNIT, 2018).

Para aferir o potencial de impactos atmosféricos que um inadequado controle tecnológico na execução de revestimentos asfálticos pode ter, foram selecionados quatro indicadores que estabelecem um panorama de emissões mais completo: Energia bruta consumida (MJ), emissões de gás carbônico (kg), dióxido de nitrogênio (kg) e metano (kg). Em seguida, a emissão de gases foi convertida em CO₂ equivalente. Assim, foi possível calcular razões entre suas previsões de emissões, consumos energéticos e vidas úteis.

Quanto à etapa de AICV, os dados de energia primária e de emissões de gases do efeito estufa foram computados com o auxílio do *software Simapro*[®] e do banco de dados *Ecoinvent*[®], além do trabalho de Stripple (2001). A Tabela 5 resume todos esses dados de fabricação dos insumos utilizados nos serviços de pavimentação do presente estudo de caso. A única exceção deve-se ao insumo óleo Diesel, que está relacionado ao consumo dos equipamentos de engenharia na fase de construção, cujas características de quantidade de energia e emissões de GEE estão publicadas em Edwards *et al.* (2019).

Tabela 5: Quantidade de energia (QE) e gases do efeito estufa (CO₂, N₂O e CH₄) necessários para a fabricação dos insumos.

INSUMO	QE (MJ/t)	CO ₂ (kg/t)	N ₂ O (kg/t)	CH ₄ (kg/t)
Óleo combustível 1A	0,1	4,31E+02	9,35E-03	1,57E+00
Cimento asfáltico CAP 30/45	682	3,99E+02	2,73E-03	1,71E-01
Areia média	96	1,13E+01	3,31E-04	1,46E-02
Cal hidratada	5161	9,53E+02	7,01E-03	2,73E-01
Brita	96	1,69E+01	5,25E-04	3,05E-02
Consumo de Óleo Diesel	42087	4,95E+02	9,34E-03	1,59E+00

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Após a montagem dos cenários, conforme a seção 3, as espessuras (e) do revestimento asfáltico e a vida útil (VU) para atingir 30% de área trincada de cada pavimento-tipo foram calculadas e estão demonstradas na Tabela 6. Observa-se que a necessidade de espessuras maiores de revestimento a medida que o critério de dimensionamento se torna mais rigoroso (menor área trincada ao fim da vida útil).

Tabela 6: Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de subleito.

% Área Trincada	PAV 1 e PAV 4	PAV 1	PAV 4	PAV 2 e PAV 5	PAV 2	PAV 5	PAV 3 e PAV 6	PAV 3	PAV 6
	e (cm)	VU WO (meses)	VU WO+2% (meses)	e (cm)	VU WO (meses)	VU WO+2% (meses)	e (cm)	VU WO (meses)	VU WO+2% (meses)
20%	12,5	166	118	12,5	167	150	13,5	164	151
25%	11,5	143	103	11	138	122	12,5	141	130
30%	10,5	123	90	10	123	110	11,5	126	115
35%	10	111	82	9,5	112	100	10,5	110	100
40%	9,5	102	76	8,5	104	93	9,5	100	91

5.2. ANÁLISE DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Seguindo o que foi exposto na seção 3 obteve-se os dados apresentados na Tabela 7, referentes as espessuras (Tabela 6) e materiais do dimensionamento realizado com a umidade ótima. Logo, pode-se observar que o solo 3 necessita de maiores quantidades de energia para uma mesma extensão de via construída em todos os critérios de dimensionamento. Além disso, nota-se que o solo 2 é o que menos demanda energia nas mesmas condições. Da mesma forma, percebe-se que, percorrendo-se a Tabela 7, que apresenta a pegada ambiental que geraria de CO₂, N₂O e CH₄ cada pavimento, do menor percentual de área trincada para o maior, o consumo do solo 2 com relação ao do solo 3 tende a diminuir. Contudo, observa-se que o desempenho do solo 1 se aproxima ao do solo 3. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a diferença entre as espessuras ir diminuindo ao passo que se flexibiliza o rigor quanto ao limite de área trincada.

Tabela 7: Quantidade energia consumida e de gases de efeito estufa emitida na fabricação dos insumos e no funcionamento dos equipamentos de engenharia na construção por quilômetro de pista construída.

% Área Trincada	Parâmetros	Tipo de subleito		
		PAV 1 e PAV 4	PAV 2 e PAV 5	PAV 3 e PAV 6
20	QE (MJ)	1,074	1,069	1,141
	CO ₂ (kg)	196,645	195,654	210,023
	CH ₄ (kg)	0,000149	0,000148	0,000158
	N ₂ O (kg)	0,0000025	0,0000025	0,0000026
25	QE (MJ)	0,992	0,957	1,052
	CO ₂ (kg)	180,295	173,358	192,186
	CH ₄ (kg)	0,000138	0,000133	0,000146
	N ₂ O (kg)	0,0000023	0,0000022	0,0000024
30	QE (MJ)	0,918	0,883	0,985
	CO ₂ (kg)	165,431	158,494	178,809
	CH ₄ (kg)	0,000128	0,000123	0,000137
	N ₂ O (kg)	0,0000021	0,0000020	0,0000023
35	QE (MJ)	0,866	0,846	0,910
	CO ₂ (kg)	155,026	151,062	163,945
	CH ₄ (kg)	0,000121	0,000118	0,000127
	N ₂ O (kg)	0,0000020	0,0000020	0,0000021
40	QE (MJ)	0,829	0,772	0,858
	CO ₂ (kg)	147,594	136,198	153,540
	CH ₄ (kg)	0,000116	0,000108	0,000120
	N ₂ O (kg)	0,0000019	0,0000018	0,0000020

Na Figura 1, ao comparar-se o grupo de pavimentos que continham subleitos compactados na umidade ótima com os que tiveram seus subleitos compactados com uma umidade 2% acima da umidade ótima, observa-se que o segundo conjunto apresenta um maior consumo de energia por tempo de vida útil por quilômetro construído. Esse fenômeno poderia ser explicado pelo declínio nas expectativas de vida útil (Tabela 6) que o aumento de umidade causaria. Analisando-se ainda a mesma figura, nota-se que o pavimento 3 é o que mais consome entre os pavimentos com subleitos compactados na umidade ótima. Todavia, o pavimento 4 passa a ser o que mais consome dentre aqueles pavimentos com subleito compactado com umidade 2% acima da umidade ótima. Isso se deve ao fato do subleito do pavimento 4 ter suas propriedades resilientes mais sensível aos efeitos da presença de água, o que por consequência diminuiu a vida útil.

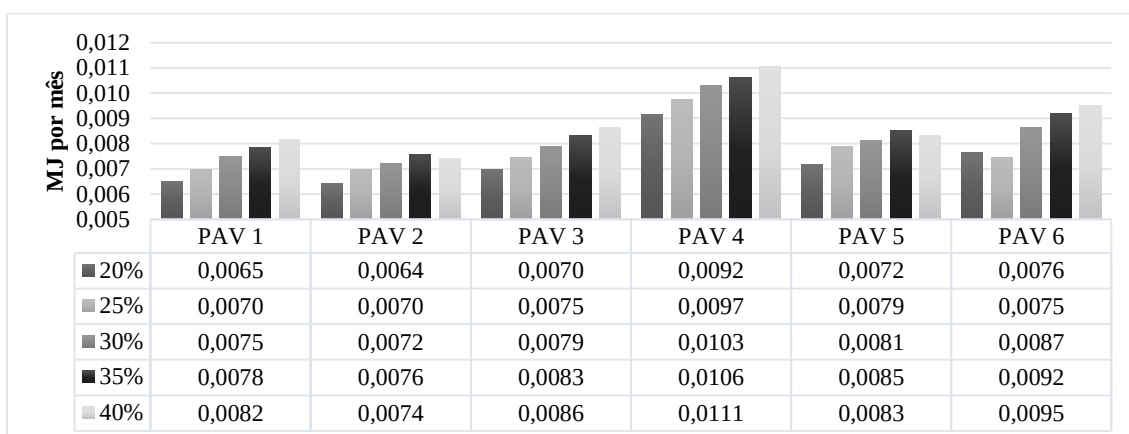


Figura 1: Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.

Na Figura 2, de forma similar ao que é exposto na Tabela 7, observa-se a contribuição que cada pavimento exerceria com relação ao aquecimento global propriamente dito. Pode-se observar que todos os pavimentos intensificam seus impactos ambientais ao passo que a umidade aumenta. Contudo, para esse grau de variação de umidade, os incrementos foram em torno de 37%, 13% e 8% para cada tipo de pavimento respectivamente. Em termos absolutos o pavimento 2 e o 5 são os que possuem o melhor desempenho em suas umidades. Todavia, o pior pavimento na situação de umidade ótima é o PAV 3, enquanto que na situação mais úmida é o PAV 4.

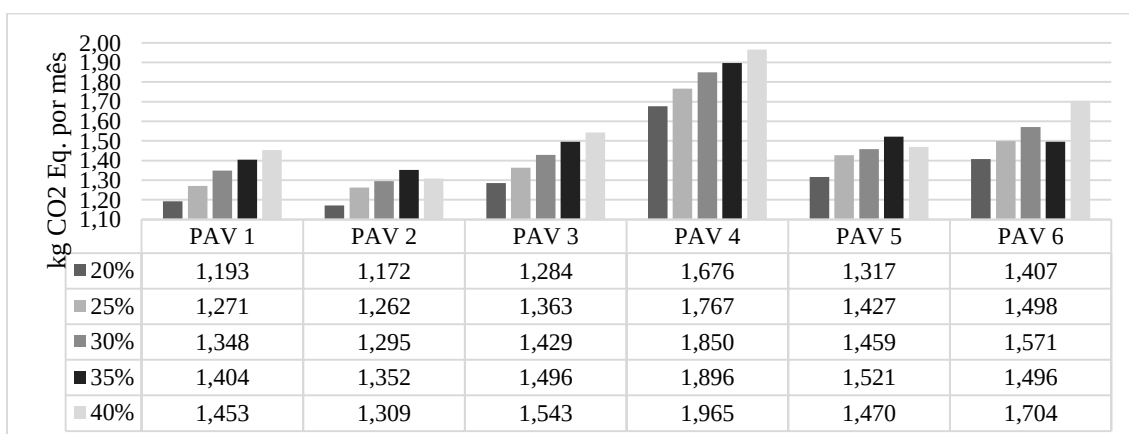


Figura 2: Razão entre kg de CO2 Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.

6. CONCLUSÕES

Utilizou-se parte do método proposto por Nascimento *et al.* (2020) a fim de avaliar o efeito que a variação da umidade de subleitos, que compõem pavimentos rodoviários com revestimentos flexíveis, pode gerar nas A de Ciclo de Vida (ACV) dessas infraestruturas. Para tanto, foram propostos

pavimentos que tinham os mesmo materiais e espessuras para a execução da base (Solo Brita - NG') e da sub-base (Solo Argiloso LG'), mas com subleitos compostos de diferentes tipos de solos tropicais, classificados como lateríticos e não lateríticos. Além disso, foram adotados cinco critérios de dimensionamento mecanístico-empírico que determinou as espessuras necessárias de revestimento. A combinação desses elementos possibilitou a elaboração pavimentos com distintos períodos de vida útil e emissões atmosféricas. As alternâncias nos graus de umidade dos subleitos e dos critérios de dimensionamento formam o estudo de caso para aplicação do método proposto. O escopo do estudo englobou as fases de extração e produção dos insumos necessários à implantação da rodovia idealizada por cada cenário, bem como a própria etapa de construção considerando a operação dos equipamentos de engenharia. A ACV estreita seu foco na emissão de gases do efeito estufa (GEE) e na quantidade de energia primária abrangidas pelas fases mencionadas.

Com relação ao consumo energético por tempo de vida útil por quilômetro para a implantação dos pavimentos, pode-se constatar que a variação da umidade, umidade ótima para umidade ótima mais 2%, dos solos dos subleitos necessita de maiores quantidades de energia para uma mesma extensão de via construída em todos os critérios de dimensionamento. Constatou-se que esse fenômeno pode ser explicado pelo declínio nas expectativas de vida útil que o aumento de umidade causaria. A respeito da contribuição que cada pavimento pode gerar para o aquecimento global averiguou-se que todos os pavimentos intensificam seus impactos ambientais ao passo que a umidade aumenta. Conclui-se que cada solo tem seus parâmetros mecânicos alterados com intensidades diferentes sob a presença de água e que conseqüentemente geram distintos consumos energéticos e emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, uma proposta para trabalhos futuros seria sobre os efeitos que a ACV de um pavimento sofreria sob variações de: graus de umidade bem como em Lima *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2020); materiais das camadas do pavimento como em Nascimento *et al.* (2020); tipos de tráfego; e tipos de via.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., e Silva, H. M. R. D. (2014) The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110.

Azarijafari, H.; Yahia, A.; Amor, M. B. (2016) Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2187-2197.

Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future: Report of the 1987. World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press, Oxford.

Camapum, J. C.; Rezende, L. R.; Cardoso F. B. F.; Lucena, L. C., Guimarães, R. C.; Valencia, Y. G. (2015) Tropical soils highway construction: Peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics Journal*, 5, pp. 3–19.

Ceratti, J. A.; Gehling, W. Y. Y.; Bica, A. V. D.; Rodrigues, M. R. Influência da sucção no módulo de resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul. *Anais da 30a Reunião Anual de Pavimentação*, Salvador-BA, Associação Brasileira de Pavimentação, p. 540 - 555, 1996.

Chen, X.; Wang, H. (2018) Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. *Journal of Cleaner Production*. v. 187. p. 148-157.

Chou, C.P.; Lee, N. (2013) A sensitivity study of RAP cost and performance on its life cycle benefits. *Advanced Materials Research*. Dept. of Civil Engineering, 1, Roosevelt Rd, Sec. 4, Taipei, Taiwan.

Cong, L.; Guo, G.; Yu, M.; Yang, F.; Tan, L. (2020) The energy consumption and emission of polyurethane pavement construction based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*.

Crawford, R. H. (2008) Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. *Journal of Environment Management*, 88, 496-506.

DNER (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER (1994) ME 049 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNIT (2021) IS 247/2021. Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o método de dimensionamento nacional – MeDiNa. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT. Custos e Pagamentos. Disponível em: <<http://dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-1>>. Acesso em: 20 junho de 2021.

Edwards, R.; O`Connell, A.; Padella, M.; Giuntoli, J.; Koeble, R.; Bulgheroni, C.; Marelli, L.; Lonza, L. (2019) Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation. EUR 28349 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Franco, F. A. C. P.; Ubaldo, M. O.; Fritzen, M. A.; Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G. (2019) Análise de projeto de reforço utilizando o método M-E de dimensionamento nacional - MeDiNa. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET; 33., Balneário do Camboriú.

Guimarães, A. C. R.; Motta, L. M. G.; Castro, C. D. (2018) Permanent Deformation Parameters of Fine-Grained Tropical Soils. Road Materials and Pavement Design, pp. 1–18.

Gulotta, T. M.; Mistretta, M.; e Praticò, F. G. (2019) A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. Science of the Total Environment, 673, 585–593.

Harvey, J. T.; Meijer, J.; Kendall, A. (2014). Tech Brief: life cycle assessment of pavement. FHWA-HIF-15-001. Federal Highway Administration, Washington, DC.

Hasan, U.; Whyte, A.; Jassmi, H. AL. (2019). Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks. Journal of Cleaner Production v. 206 541 e 558.

Hauschild, Z. M., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer International Publishing.

Helmes, R. J. K; Huijbregts, M. A. J.; Henderson, A. D.; Jolliet, O. (2012) Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. Int J Life Cycle Assess 17:646–654.

Huang, M.; Dong, Q.; Ni, F.; Wang, L. (2021) LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance. Journal of Cleaner Production, 283.

Huang, Y.; Bird, R.; Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. Journal of Cleaner Production. v. 17. p. 283-296.

IPCC. (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Islam, S; Ponnambalam, S. G.; Lam, H. L. (2016) Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. Journal of Cleaner Production. v. 136. P. 266-278.

Jayakumar, M.; Soon, L. C. (2015) Study on flexible pavement failures in soft soil tropical regions. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Khoury, N.; Brooks, R.; Zaman, M. M.; Khoury, C. N. (2009). Variations of Resilient Modulus of Subgrade Soils with Postcompaction Moisture Contents. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2101, no. 1, 72–81.

Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Aragão, F. T. S. (2019) Effects of Compaction Moisture Content on Permanent Deformation of Soils Subjected to Repeated Triaxial Load Tests. Transportation Research Record 2673, n. 2, pp. 466–476.

Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Aragão, F. T. S. (2021) A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection. Transportation Geotechnics Journal, 28.

Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Aragão, F. T. S.; Guimarães, A. C. R. (2020). Mechanical characterization of fine-grained lateritic soils for mechanistic-empirical flexible pavement design. Journal of Testing and Evaluation, 48(1), pp. 1-17.

Liu, X.; Cui, Q.; e Schwartz, C. W. (2018). Introduction of mechanistic-empirical pavement design into pavement carbon footprint analysis. International Journal of Pavement Engineering.

Liu, Y.; Wang Y.; AN, D. (2018) Life-cycle CO2 emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China. International Journal of Sustainable Transportation, 12:7, 497-509.

Martinez-Arguelles, G., Acosta, M.P., et al., (2019). Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the Northern region of Colombia: case study. Transportation Research Record, 2673 (5).

Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. 3º edição, Editora. Interciência, Rio de Janeiro.

Nascimento, F.; Gouveia, B. G.; Dias, F.; Ribeiro, F.; Silva, M. A. (2020). A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. Journal of Cleaner Production.

Nazarian, S.; Yuan, D. (2008). Variation in Moduli of Base and Subgrade with Moisture. GeoCongress: Geosustainability and Geohazard Mitigation, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 570–577.

Rosado, L.P., et al., 2017. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 151, 634–642.

Roy, P-O.; Azevedo, L. B.; Margni, M.; Van Zelm, R.; Deschênes, L.; Huijbregts, M. A. J. (2014) Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of the Total Environment*. v. 500, p270–276.

Santos, J.; Bressi, S.; Cerezo, V.; Lopresti, D. (2019) SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, 424-540.

Santos, J.; Flintsch, G.; e Ferreira, A. (2017) Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 15–31.

Silva, B. A. (2009) Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à Oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de Verdadeira grandeza. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, RJ.

Souza Júnior, J. G. (2018) Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Stripple, H. (2001) Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis. Gothenburg: IVL.

Takeda, M. C. (2006) A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade São Paulo (USP). São Carlos, SP.

Valdivia, S.; Ugaya, C. M.; Hildenbrand, J.; Traverso, M.; Mazijn, B.; Sonnemann, G. (2013). A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment our contribution to Rio+20. *Int. J. Life Cycle Assess* 18, 1673e1685.

Van Dam, T. J.; Harvey, J. T.; Muench, S. T.; Smith, K. D.; Snyder, M. B.; Al-Qadi, I. L.; Ozer, H.; Meijer, J.; Ram, P. V.; Roesler, J. R.; Kendall, A. (2015) Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document. FHWA-HIF-15-002. Federal Highway Administration, Washington, DC.

Van Zelm, R.; Preiss, P.; Van Goethem, T.; Van Dingenen, R.; Huijbregts, M. (2016) Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation. *Atmospheric Environment* 134. p. 129-137.

Vargas, G. A. B. Simulação numérica do comportamento mecânico de um Pavimento asfáltico instrumentado submetido a diferentes condições de saturação. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2020.

Vega, A. D., L., Santos, J.; Martinez-Arguelles, G. (2020). Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction, *International Journal of Pavement Engineering*.

Wang, H.; Al-Saadi, I.; Lu, P.; Jasim, A. (2020) Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14:1, 25-34.

Zheng, X.; Easa, S. M.; Yang, Z.; Ji, T. (2019) Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Journal of Cleaner Production*, 18, 659-672.

Capítulo 4



10.37423/220505828

ANÁLISE QUANTITATIVA E MORFOLÓGICA DA INTERFACE NEURÔNIO-MICROELETRODO

Amanda Ferreira Neves

Polyana Ferreira Nunes

Débora Vasconcelos Melo

Milena Bueno Pereira Carneiro

Celina Monteiro da Cruz Lotufo

João Batista Destro-Filho

*Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia, MG.*

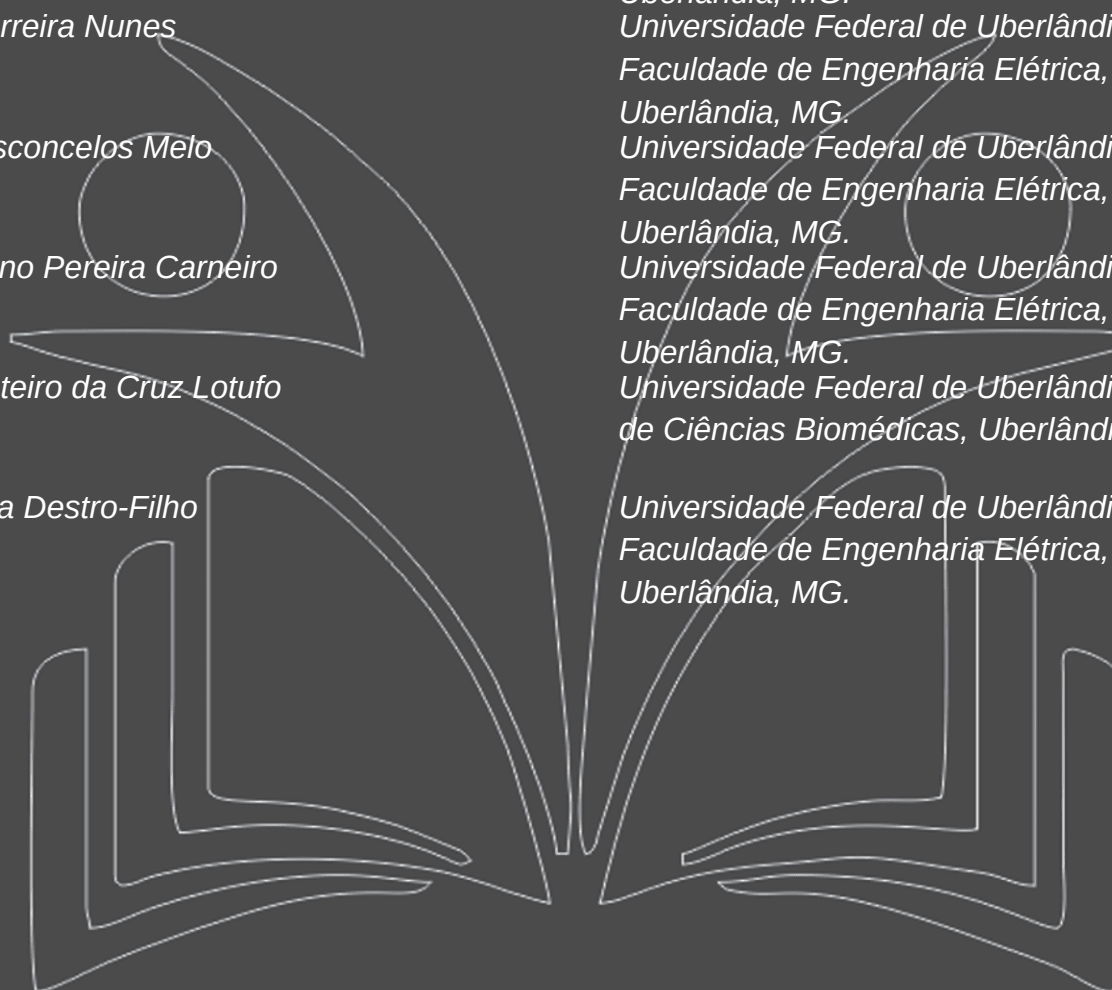
*Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia, MG.*

*Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia, MG.*

*Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia, MG.*

*Universidade Federal de Uberlândia, Instituto
de Ciências Biomédicas, Uberlândia, MG*

*Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia, MG.*



Resumo: As matrizes microeletrodos podem estimular e registrar a atividade elétrica extracelular de uma cultura de neurônios durante longos períodos e sua tecnologia tem sido aplicada a estudos de processamento e compreensão das informações no cérebro. Estas matrizes micrométricas também permitem monitorar o desenvolvimento morfológico das redes neurais, por meio de diversos tipos de microscopia. O monitoramento morfológico ainda permite investigar a relação entre célula e microeletrodo, fundamental para a gravação de um sinal de boa qualidade. Usando imagens obtidas por microscopia confocal de fluorescência, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo quantitativo da evolução morfológica da rede neural crescida sobre esses dispositivos. Foi realizada uma análise quantitativa da distribuição celular a partir de imagens adquiridas em diferentes dias *in vitro*, a qual foi aplicada a culturas de gânglios da raiz dorsal, para estabelecer um mapa das distâncias entre neurônios e microeletrodos. Os resultados indicam que um sinal registrado dessas culturas poderia permanecer sem perdas importantes na sua amplitude durante dias, uma vez que não houve redução significativa na quantidade de neurônios conectados e próximos aos microeletrodos. Essa análise quantitativa fornece uma descrição simples da cultura ligada à MEA. Assim, é possível caracterizar a interface neurônio-microeletrodo, permitindo ainda estabelecer estratégias para o registro da atividade elétrica.

Palavras-chave: Análises quantitativas, cultura neural dissociada, interface neurônio-microeletrodo, matrizes multieletrodo, microscopia confocal de fluorescência.

I. INTRODUÇÃO

Os estudos em neurociência cada vez mais têm aproximado áreas biomédicas das áreas da engenharia e computação, o que tem gerado uma variedade de ferramentas que tornam possível compreender e caracterizar o sistema biológico em estudo. Hoje em dia já existem mecanismos nanotecnológicos capazes de traduzir um único impulso nervoso (atividade elétrica neuronal) em informação para circuitos eletrônicos, biossensores, como é o caso da matriz multieletrodo ou MEA.

Em estudos de eletrofisiologia, é comum encontrar trabalhos que utilizem as técnicas de *patch-clamp*, mas sua finalidade é bastante específica e está ligada a estudos de canais iônicos da membrana celular e correntes iônicas em um único neurônio [1].

Desde o seu desenvolvimento na década de 70 [2], a MEA é utilizada para o processamento de informações em redes neurais ou grupos de neurônios, seja sob condições normais de desenvolvimento [3-5], ou sob condições patológicas induzidas, para estudos farmacológicos [6-8]. A MEA também permite monitorar o desenvolvimento morfológico da rede neuronal e até mesmo a morfologia das células em cultura, por meio de microscopia de fluorescência, confocal ou eletrônica. O monitoramento morfológico ainda permite investigar a relação célula-eletrodo, essencial para a captação de um sinal de qualidade [3]. Dessa maneira, imagens periódicas tomadas sobre a cultura possibilitam caracterizar a interface neurônio-microeletrodo, sendo essas investigações essenciais também para a concretização do neuroimplante [9].

Do outro lado, os grupos de pesquisa que estudam as respostas neuronais em MEA, para implementação do neuroimplante, utilizam praticamente apenas a cultura de neurônios corticais [10-12]. São poucos os trabalhos que utilizam a MEA em culturas de neurônios periféricos [7] e, quando se investiga o uso de MEAs para culturas de neurônios sensoriais do DRG (gânglio da raiz dorsal), existem poucos artigos [13,14].

Os neurônios sensoriais do gânglio da raiz dorsal (DRG) são responsáveis pela transmissão de informação (sensações táteis, térmicas e de dor) da periferia (pele, músculo e outros órgãos) para o sistema nervoso central. Assim como os microeletrodos da MEA, esses neurônios possuem diâmetros variando entre 10 a 40 μm , em ratos [14], relativamente maiores que neurônios corticais. Dessa maneira, cada microeletrodo pode fazer contato com um único neurônio e os neurônios do DRG têm maior probabilidade de cobrir os microeletrodos da MEA [13], conforme ilustra a Figura 1.

Como parte substancial do corpo celular do neurônio precisa estar em contato com a superfície do microeletrodo para se obter um bom registro do sinal neural [3], a cultura de neurônios do DRG sobre a MEA representa então um sistema ideal para o monitoramento da interface neurônio-eletrodo.

Dessa maneira, o trabalho em questão teve por objetivo realizar um estudo quantitativo da evolução topológica da rede neural crescida sobre os microeletrodos da MEA. Foram utilizadas imagens obtidas por microscopia confocal de fluorescência, adquiridas de uma mesma cultura em diferentes dias *in vitro* (DIVs), ou seja, com diferentes tempos de cultivo. Em cada imagem, foram analisados os parâmetros relacionados com a distribuição espacial das células, com o intuito de calcular um mapa das distâncias entre os neurônios e os microeletrodos.

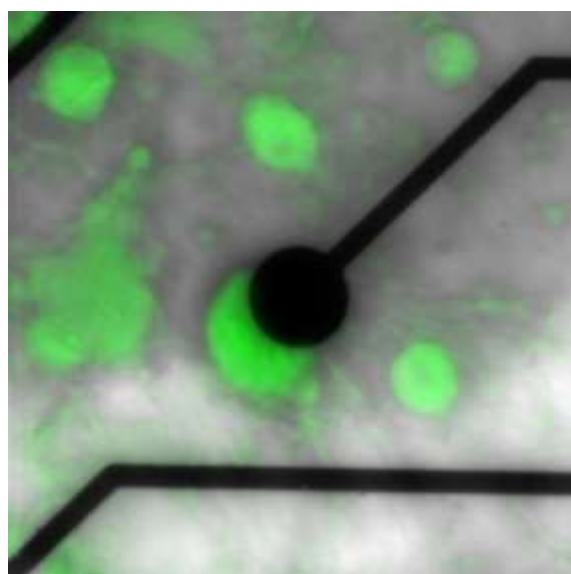


Fig. 1. Fotografia da interface entre um neurônio do DRG (verde) e um microeletrodo (preto) da MEA, capturada por microscopia confocal de fluorescência.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção II descreve a metodologia dos procedimentos biológicos e da avaliação quantitativa. A seção III apresenta os resultados e a discussão dos mesmos. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção IV.

II. METODOLOGIA

A. PROCEDIMENTOS BIOLÓGICOS

1) *Preparação das culturas* – Foram realizadas duas culturas de neurônios do DRG utilizando ratos *Wistar* de 100 g, conforme protocolo descrito por [15], e os procedimentos experimentais obtiveram parecer aprovado pelo Comitê de Ética em Experimentação Animal da Universidade Federal de

Uberlândia (CEUA/UFU). As matrizes multieletrodos utilizadas são do modelo Standard MEA 200/30 da *Multichannel Systems*, Reutlingen, Alemanha.

2) *Aquisição de imagens das culturas* – As fotografias foram realizadas, para as mesmas culturas, diariamente durante o 1º, 2º e 3º dias de cultivo, conforme mostra a Figura 2. O marcador fluorescente utilizado para a aquisição das imagens de células vivas foi o DiBAC4(3) a 5µM. A aquisição das imagens foi realizada através de microscopia confocal (*Zeiss, LSM510 Meta*), utilizando a lente objetiva de 10x.

B. AVALIAÇÃO QUANTITATIVA

O *software utilizado* – Para avaliar o desenvolvimento neuronal em torno dos microeletrodos, foi realizada uma quantificação manual das imagens da cultura, utilizando funções prontas do software de domínio público IMAGEJ (*versão 1.37c, National Institute of Health, USA*). Neste caso, não foi realizado nenhum tratamento prévio nas imagens.

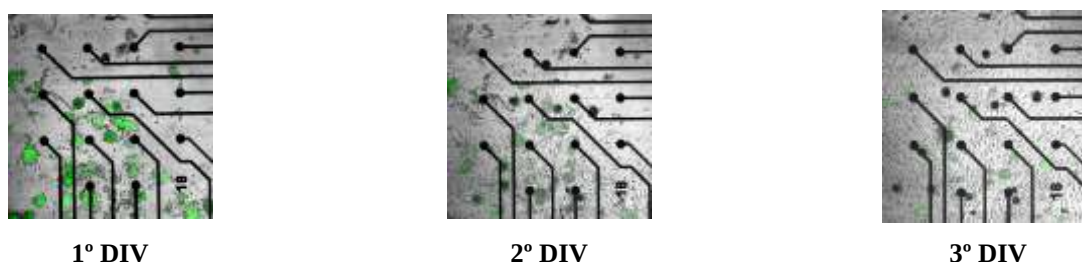


Fig. 2. Imagens diárias de uma mesma cultura ligada à MEA.

1) *Selecionando os neurônios* – Para cada cultura, foi contado o número de microeletrodos e de neurônios presentes nas imagens, possibilitando estimar a taxa de neurônios por microeletrodo.

A tarefa de separar visualmente os neurônios de artefatos de cultura (restos de células que permanecem em cultura após os procedimentos de dissociação) é subjetiva e requer uma visão de especialistas. Por isso, para identificar os neurônios do DRG, foram estabelecidos alguns parâmetros: estes neurônios são grandes e esféricos e possuem aproximadamente a mesma dimensão dos microeletrodos, como visto na Figura 1. Além disso, mesmo os neurônios exibindo intensidades diferentes de fluorescência, esta não foi considerada um parâmetro de diferenciação, uma vez que os artefatos também podem apresentar fluorescência.

A distância entre microeletrodos é de 200 µm e para saber se um neurônio pertencia ao campo de um microeletrodo foi delimitada uma área quadrada (200 µm de arestas) cujo centro estava um microeletrodo, assim como ilustra a Figura 3. Dessa maneira, toda a superfície da matriz, dividida em pequenos campos dos microeletrodos, pode ser considerada para a contagem.

Na seleção, foram considerados apenas neurônios localizados até aproximadamente 140 μm de distância de um microeletrodo, sendo que neurônios mais distantes que isso estaria mais próximo do microeletrodo seguinte. Para melhor compreensão, veja o exemplo apresentado na Figura 3.

2) *Classificando os neurônios* – Como o diâmetro dos microeletrodos (30 μm) é mais ou menos o mesmo diâmetro dos maiores neurônios do DRG (30-40 μm), os neurônios foram classificados de acordo com a sua distância aos microeletrodos (D): conectado ($D < 35 \mu\text{m}$), exemplificado pelo neurônio 1 na Figura 3; próximo ($36 < D < 70 \mu\text{m}$), assim como o neurônio 2 na Figura 3; afastado ($71 < D < 105 \mu\text{m}$) como mostra o neurônio 3 na Figura 3; e distante dos microeletrodos ($106 < D < 140 \mu\text{m}$), assim como o neurônio 4 da Figura 3.

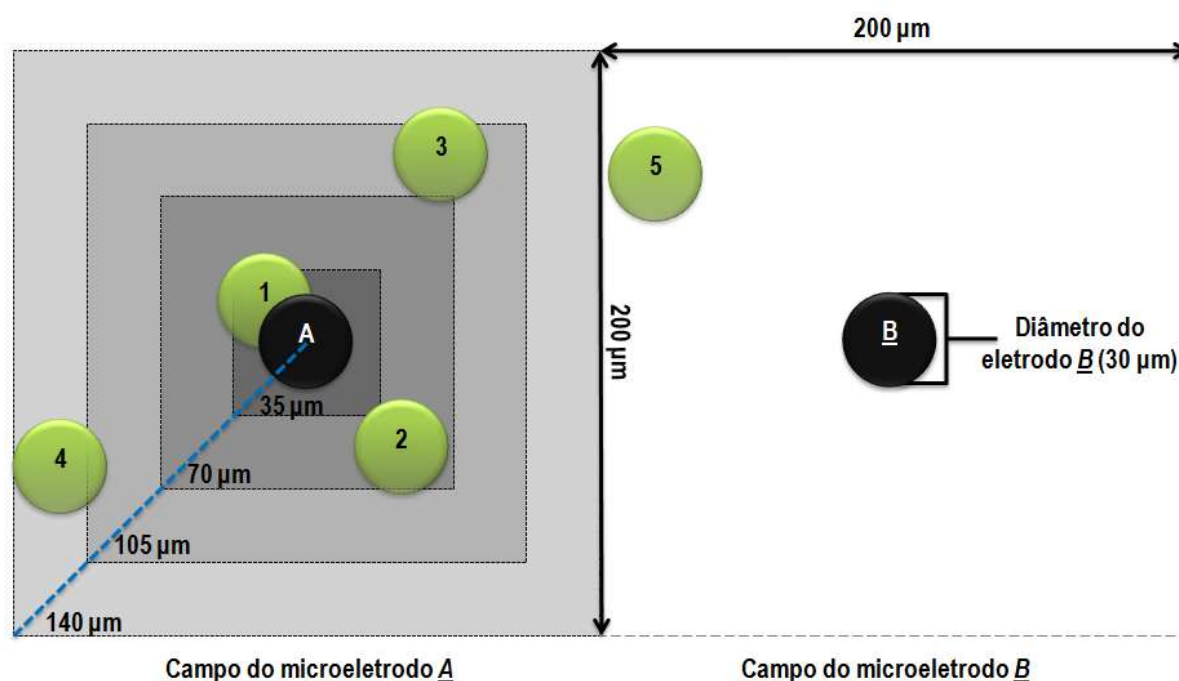


Fig. 3. Diagrama descrevendo a classificação proposta, apresentando cinco exemplos de neurônios (em verde), que foram classificados de acordo com a sua distância (D) aos microeletrodos (em preto): 1-conectado, 2-próximo, 3-afastado, 4-distante, 5-fora do campo do microeletrodo A e dentro do campo do microeletrodo B.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A contagem de neurônios e a medida das distâncias entre neurônio e microeletrodo (D) foram realizadas a partir de imagens de duas culturas, a primeira (MEA-1) representada pela Figura 4.a. e a segunda (MEA-2) ilustrada pela Figura 4.b. Ambas as culturas foram feitas seguindo o mesmo protocolo, porém utilizando animais diferentes, a fim de comparação. As duas culturas foram, então, comparadas uma com a outra e os resultados dessas quantificações podem ser vistos na Tabela I.

É importante classificar as distâncias dos neurônios porque a proximidade com os microeletrodos afeta a qualidade da gravação do sinal, realizado pela matriz. De acordo com a literatura [3], uma parte substancial do neurônio precisa estar em contato com a superfície microeletrodo para se alcançar um bom sinal registrado.

TABELA I - Resultado da Classificação dos Neurônios

DIV	Conectados	Próximos	Afastados	Distantes	D (μm)*
CULTURA DA MEA-1					
1º	12	38	71	26	79,96 ± 28,37
2º	3	33	30	22	81,75 ± 28,21
3º	5	28	24	4	71,30 ± 24,93
CULTURA DA MEA-2					
1º	4	35	59	14	81,28 ± 26,54
2º	4	33	29	14	76,93 ± 28,71
3º	10	22	26	8	61,42 ± 29,86

* Os resultados são mostrados como média ± desvio padrão.

Nos três dias *in vitro* (DIV) foi observado um padrão de distribuição dos neurônios amostrados, o qual pode ser ilustrado pelo gráfico da Figura 5, que faz uma média dos resultados apresentados na Tabela I. Um razoável número de neurônios foi encontrado próximo aos microeletrodos ($36 < D < 70 \mu\text{m}$), mas muito pouco foi visto em contato direto com eles ($D < 35 \mu\text{m}$). Também se observou poucos neurônios às maiores distâncias ($106 < D < 140 \mu\text{m}$) e a maioria dos neurônios estava localizada afastada dos microeletrodos ($71 < D < 105 \mu\text{m}$). Segundo os autores de [13], esse resultado era o esperado, uma vez que não foi utilizada nenhuma técnica para orientar ou direcionar o crescimento neuronal ao redor dos microeletrodos. Portanto, essa localização distante da maioria dos neurônios para a superfície dos microeletrodos pode ser explicada pela adesão difusa destas células na matriz.

Considerando-se o tempo de cultura, foi observada uma redução na quantidade de neurônios amostrados entre os três DIVs, restando no 3º DIV, em média, 50% dos neurônios inicialmente contados no 1º DIV. O decréscimo mais significativo ocorreu no 2º DIV, no qual houve uma perda neuronal de 40% na MEA-1 e 30% na MEA-2, comparado com o número de neurônios contados no 1º DIV. No 3º DIV, a perda neuronal foi menor, em relação à quantidade de neurônios observados no 2º DIV, sendo que na MEA-1 houve

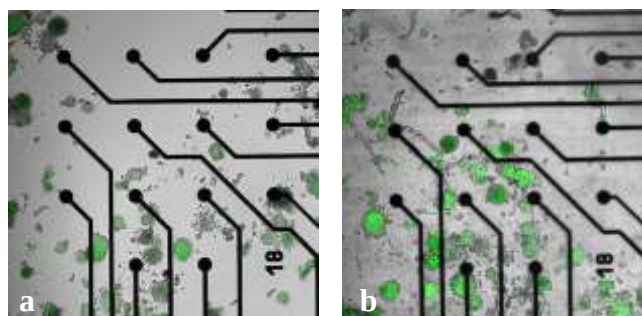


Fig. 4. Imagens de microscopia confocal de fluorescência: (a) representa a cultura da MEA-1 e (b) representa a cultura da MEA-2, ambas no 1º DIV. Em preto, destacam-se os microeletrodos (30 µm de diâmetro) e suas respectivas trilhas e, em verde, os neurônios.

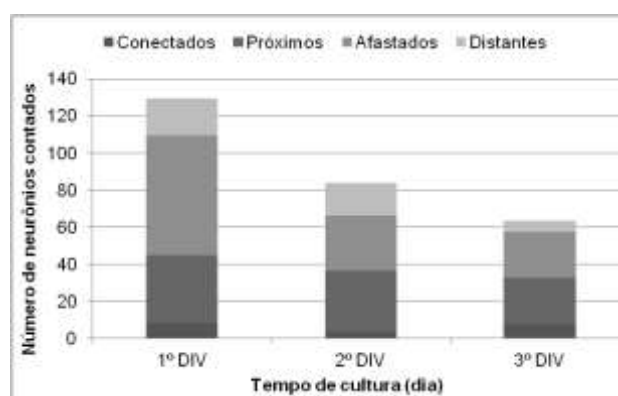


Fig. 5. Média (culturas da MEA-1 e MEA-2) da quantidade de neurônios estimados nas quatro classes de distâncias ao microeletrodo e em relação ao tempo de cultivo (dia in vitro).

uma redução de 19% dos neurônios e na MEA-2 somente 12% destes desapareceram. No contexto de culturas primárias, como é o caso, é esperado que no mínimo um terço das células plaqueadas morram sob as condições de cultura [10]. Isso ocorre porque essas células sofrem estresses desde seu isolamento dos tecidos vivos e, também, por causa do ambiente adverso onde são mantidas (ao invés de um organismo, elas permanecem numa placa).

Por outro lado, a morte de neurônios ocorreu principalmente para aqueles localizados a distâncias maiores dos microeletrodos, sendo que ao final do 3º DIV somente 38% dos neurônios afastados ($71 < D < 105 \mu\text{m}$) e 30% dos neurônios distantes ($106 < D < 140 \mu\text{m}$) permaneceram. Em contrapartida, manteve-se a proporção de 94% dos neurônios conectados ($D < 35 \mu\text{m}$) e 68% daqueles observados próximos ($36 < D < 70 \mu\text{m}$) aos microeletrodos. Dessa maneira, os resultados sugerem que o sinal registrado a partir da MEA poderia permanecer, durante três dias, sem perdas importantes na sua amplitude, porque não houve redução significativa na quantidade de neurônios próximos e conectados aos microeletrodos.

Nos resultados, é interessante observar também que os valores médios das distâncias entre neurônio e microeletrodo, representado pela variável D na Tabela I, assim como o desvio-padrão desses, praticamente não variaram muito de uma cultura para outra. Isso indica que ambas as culturas mantiveram o mesmo padrão de adesão e perda neuronal, com uniformidade entre os dados, o que valida os resultados obtidos. Inclusive, quando se compara esses parâmetros entre os DIVs, nota-se uma redução das distâncias no 3º DIV, indicando, mais uma vez, que os neurônios mais próximos aos microeletrodos prevaleceram, apesar da perda neuronal.

Neste contexto, buscou-se aperfeiçoar a aquisição da atividade neuronal de uma cultura, considerando estudos da interface neurônio-microeletrodo de dispositivos MEA. Assim, direcionar os neurônios para mais próximos dos microeletrodos, ou aumentar a quantidade dessas células dentro da área de registro, representam técnicas alternativas para melhorar o desempenho do microeletrodo. Portanto, esta nova quantificação revela que é possível caracterizar a interface neurônio-microeletrodo, a partir de imagens da rede neural, afim de que se possa melhorar a qualidade do sinal da MEA.

IV. CONCLUSÕES

Em se tratando de análise quantitativa da distribuição celular em uma interface neurônio-microeletrodo, este trabalho pretende mostrar à comunidade científica em estudos eletrofisiológicos um instrumento metodológico que, utilizando imagens de microscopia confocal, propõe caracterizar uma rede neural cultivada em recipientes com matrizes de microeletrodos (MEA) incorporados. Assim sendo, foi investigado o número de neurônios localizados na matriz microeletrodo e a distância média de todos os neurônios individualmente amostrados nas imagens, considerando os três primeiros dias *in vitro* (DIVs).

Neste trabalho, observou-se um decréscimo na quantidade de células após os três dias em cultura, fato comum em se tratando de uma cultura primária. Porém, a perda mais significativa ocorreu nos neurônios instalados entre 71 a 140 μm de distância dos microeletrodos, ou seja, aqueles mais distantes cuja atividade elétrica participa sutilmente no sinal da MEA. Dessa maneira, mantendo-se a maior parte dos neurônios próximos aos microeletrodos, ao longo dos dias, espera-se que o sinal registrado praticamente seria o mesmo.

Analisar a distância entre microeletrodo e neurônios é muito importante, uma vez que pode descrever a topologia de distribuição dessas células na superfície da cultura e ainda inferir sobre a relação da

atividade elétrica das células neurais e o sinal gravado pela MEA. A adesão difusa dos neurônios na matriz pode dificultar o registro da atividade neural. Para resolver isso, é necessário diminuir a distância entre neurônios e microeletrodos, seja adicionando uma elevada concentração de neurônios nas MEAs, ou então, concentrando a adição dos neurônios apenas na região onde os microeletrodos são encontrados. Dessa maneira, aumenta-se a probabilidade de encontrar vários neurônios por microeletrodo e torna possível aperfeiçoar a aquisição dos sinais eletrofisiológicos.

As perspectivas deste trabalho, em curto prazo, envolvem testar novos procedimentos biológicos para aumentar o tempo de vida das culturas e a quantidade de neurônios em contato com os microeletrodos, gerando quantificações a serem comparadas com a Tabela I. Além disso, espera-se aprimorar o processamento das imagens, ao passo que outros parâmetros poderão ser utilizados para melhor caracterizar a interface entre a cultura de neurônios sensoriais do DRG e os microeletrodos das MEAs.

Por fim, toda essa análise quantitativa fornece uma descrição simples da cultura ligada à MEA. Assim, é possível caracterizar a interface neurônio-microeletrodo, de modo a permitir gravações eficientes da atividade elétrica que permitem novas investigações da excitabilidade nociceptora destas células. Por isso, em longo prazo, o registro da atividade elétrica dos neurônios sensoriais primários pelas MEAs representa, também, uma possível ferramenta para o desenvolvimento de, por exemplo, novas drogas analgésicas.

AGRADECIMENTOS

À UFU, que possibilitou a realização do projeto. À Mariane, técnica do Laboratório de Microscopia Confocal (ICBIM/UFU), que ajudou com as imagens. Ao Prof. Sérgio Martinoia (UniGe, Itália), e à empresa *Multichannel Systems Inc.* (Alemanha) pela disponibilização das MEAs usadas nos procedimentos biológicos. À FAPEMIG, CNPq e UFU, pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.M. Ward, "Patch-Clamping and Other Molecular Approaches for the Study of Plasma Membrane Transporters Demystified", *Plant Physiology*, vol. 114, pp. 1151-1159, 1997.
- [2] G.W. Gross, E. Rieke, G.W. Kreutzberg and A. Meyer, "A new fixed-array multi-microelectrode system designed for long-term monitoring of extracellular single unit neuronal activity in vitro", *Neuroscience Letters*, vol. 6, pp. 101-106, 1977.
- [3] J. Van Pelt, P.S. Wolters, M.A. Corner, W.L. Rutten, and G.J. Ramakers, "Long-term characterization of firing dynamics of spontaneous bursts in cultured neural networks", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 11, pp. 2051-2062, 2004.
- [4] M. Chiappalone, M. Bove, A. Vato, M. Tedesco, and S. Martinoia, "Dissociated cortical networks show spontaneously correlated activity patterns during in vitro development", *Brain Research*, vol. 1093, pp. 41-53, 2006.
- [5] A.G. Blankenship and M.B. Feller, "Mechanisms underlying spontaneous patterned activity in developing neural circuits", *Nature Reviews of Neuroscience*, vol. 11, pp. 18-29, January 2010.
- [6] A. Stett, U. Egert, and E. Guenther, "Biological application of microelectrode arrays in drug discovery and basic research", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 377, pp. 486-495, 2003.
- [7] S. Martinoia, L. Bonzano, M. Chiappalone, and M. Tedesco, "Electrophysiological activity modulation by chemical stimulation in networks of cortical neurons coupled to microelectrode arrays: A biosensor for neuropharmacological applications", *Sensors and Actuators B*, vol. 108, pp. 589-596, 2005.
- [8] M.A. Corner, R.E. Baker, J. Van Pelt, "Physiological consequences of selective suppression of synaptic transmission in developing cerebral cortical networks in vitro: Differential effects on intrinsically generated bioelectric discharges in a living 'model' system for slow-wave sleep activity", *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 32, pp. 1569-1600, 2008.
- [9] P. Fromherz, "Neuroelectronic interfacing: semiconductor chips with ion channels, nerve, cells, and brain", in *Nanoelectronics and Information Technology*, Ed: R.Waser, Berlin: Wiley-VCH, pp. 781-810, 2003.
- [10] S.M. Potter, T.B. De-Marse, "A new approach to neural cell culture for long-term studies", *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 110, pp. 17-24, 2001.

- [11] M. Taketani, and M. Baudry, *Advances in Network Electrophysiology - Using Multi Electrode Arrays*, New York: Springer Press, 2006.
- [12] F. Greve, S. Frerker, A.G. Bittermann, "Molecular design and characterization of the neuron-microelectrode array interface", *Biomaterials*, vol. 28, pp. 5246-5258, 2007.
- [13] W.L.C. Rutten, J.M., Mouveroux, and J. Buitenweg, "Neuroelectronic interfacing with cultured multielectrode arrays toward a culture probe", in *Proceeding of the IEEE*, vol. 89, no. 7, pp. 1013-1029, 2001.
- [14] A.A. Harper, S.N. Lawson, "Conduction velocity is related to morphological cell type in rat dorsal root ganglion neurons". *The Journal of Physiology*, vol. 359, pp. 31-46, 1985.
- [15] O. Linhart, O. Obreja, M. Kress, "The inflammatory mediators serotonin, prostaglandin E2 and bradykinin evoke calcium influx in rat sensory neurons", *Neuroscience*, vol. 118, pp. 69-74, 2003.

Capítulo 5



10.37423/220505899

MÉTODO DE FORMAÇÃO ASSOCIATIVO: A MODELAGEM PARAMÉTRICA DO MUSEU MERCEDES-BENZ

JOCELINE COSTA DE ALMEIDA

*UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CIÊNCIAS
DA SAÚDE DE ALAGOAS*

Karina Rossana Menezes Schüssler

*UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CIÊNCIAS
DA SAÚDE DE ALAGOAS*

Anderson Felipe Correia Torres

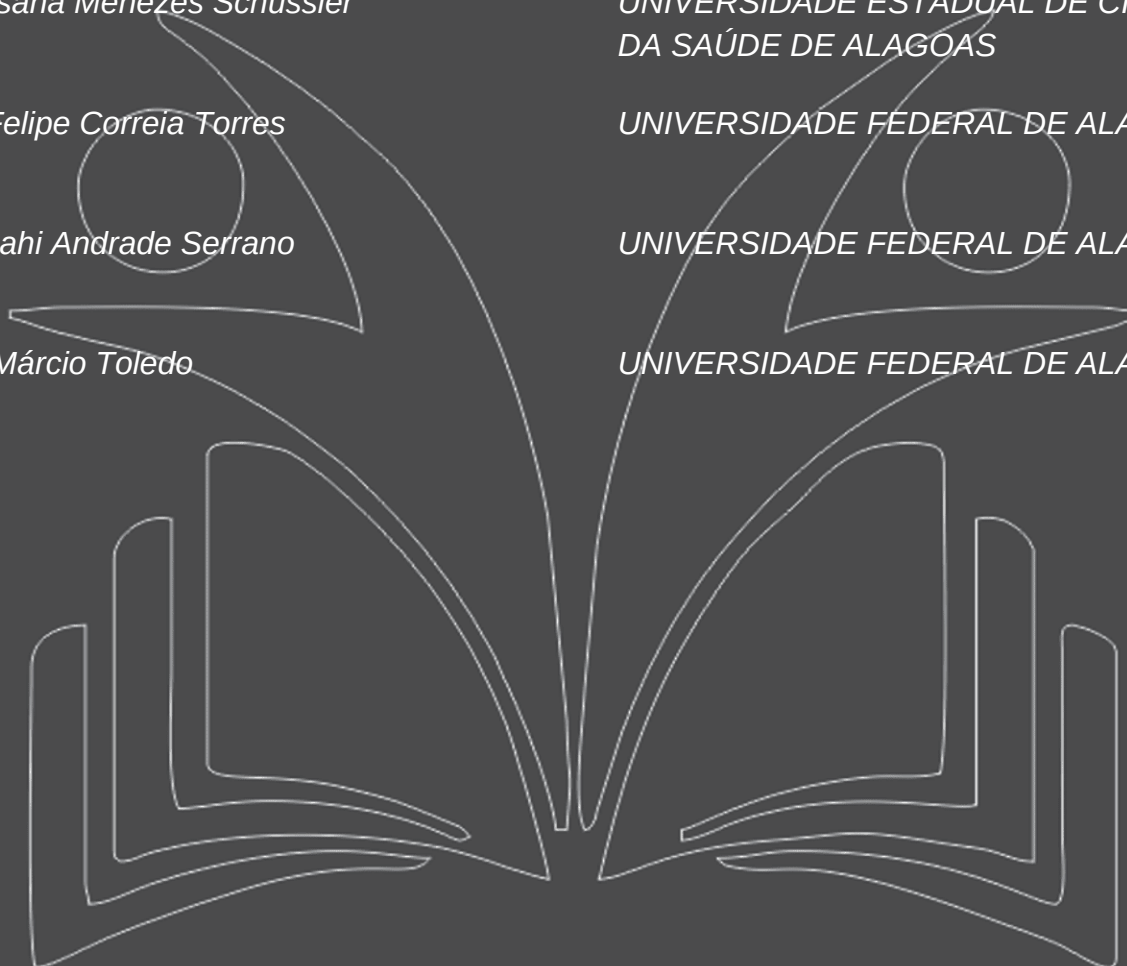
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Oriana Yenahi Andrade Serrano

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Alexandre Márcio Toledo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS



Resumo: O Museu da Mercedes-Benz em Stuttgart, Alemanha, resultado do concurso da Daimler-Chrysler para a expansão do edifício existente, concebido pelo UNStudio em 2001 e concluído em 2005. O edifício compõe-se de diferentes configurações geométricas criadas por meio do modelo paramétrico, tornando-o um exemplo singular da tecnologia digital associada à arquitetura. Analisa-se o projeto do museu com foco na aplicação do modelo de formação associativo, por meio da técnica da narrativa digital, com base documental. A forma complexa do museu evidencia o pioneirismo na utilização de métodos paramétricos, desde os estágios iniciais do projeto de concepção e execução, e ao longo de toda obra, com eficiência e rapidez, permitindo modificar dimensões, formas e técnicas construtivas até chegar à forma final.

Palavras-chave: Parametrismo. Modelo de formação associativo. Teoria de projeto.

INTRODUÇÃO

A evolução do CAD em arquitetura pode ser vista como um desejo de substituir algumas tarefas predefinidas pelo uso da tecnologia digital. Nesse caso, as tarefas que os meios tecnológicos começam a realizar mudam o modo como o ambiente e os edifícios são concebidos, construídos e usados, pois os computadores, muito mais que simples máquinas, têm o poder de criar tarefas e ferramentas no decurso do tempo [1]. Isso tem acontecido na atualidade e pode ser classificado como a quarta geração do projeto auxiliado pelo computador.

O advento da computação no campo da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) modificou muito a forma como os edifícios eram pensados, analisados e representados [2]. Não obstante, a computação também produziu mudanças na própria arquitetura, possibilitando a exploração de formas mais complexas, antes impossíveis de se concretizar.

Numa análise dos diversos modelos de projeção no meio computacional, observou-se, após outros estudos, que dentre os modelos investigados, o uso do parametrismo [3] [4] desponta como uma das soluções na geração da forma que apresentaria as respostas mais eficazes para os problemas de concepção projetual, na medida em que, por meio dessa técnica - a modelagem paramétrica - os limites da criatividade e possibilidades formais não são somente ampliados, como também passíveis de serem concretizados [5].

O parametrismo como estilo se expande para além de um processo de projeto, como resposta à sociedade atual, complexa, articulada em redes e fortemente influenciada pela experimentação tecnológica, uma vez que seu *modus operandi* se baseia na simulação digital com ferramentas de *form-finding*, que permitem a associação de parâmetros definidos por regras e lógicas, encontradas no campo natural ou criadas artificialmente no campo virtual. Ademais, permite alcançar variações adaptativas para diferentes condicionantes de projeto, o que leva à expansão de conceitos como formalismo, para investigação formal, na conceitualização de solução de espaços [6].

Um dos principais exemplos deste tipo de modelagem é o museu da Mercedes-Benz, em Stuttgart - Alemanha, concebido pelo UNStudio em 2001 e construído em 2005. A obra, exemplificada como modelo de formação associativo, foi projetada por meio de diferentes configurações geométricas criadas por parâmetros que poderiam ser alterados quando necessário.

METODOLOGIA

A produção do artigo originou-se no segundo semestre letivo de 2020 em uma atividade desenvolvida, na disciplina CID 203 - Tecnologias de Concepção e Representação de Projeto em Arquitetura, do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, na qual objetivava utilizar a narrativa digital para descrever uma obra paradigmática da arquitetura digital, citada no artigo de referência como fonte inicial [7], para a qual foi escolhido o Museu de Stuttgart. A metodologia empregada, compreendeu uma pesquisa documental descritiva e analítica da obra a ser estudada, complementada por uma revisão bibliográfica, com ênfase no modelo de projeto paramétrico de formação associativo, ambas aplicadas à prática do projeto de arquitetura. Para a análise e descrição do projeto (e materialização) do Museu, consideraram-se as fases de concepção, estudos dos mecanismos de projeção associativa paramétrica e execução do edifício. Nesse sentido, a pesquisa documental abrangeu: a) coleta de vídeos e entrevistas, com a equipe responsável pelo projeto e construção do museu em meio eletrônico; b) sistematização dos principais comentários e impressões a respeito do processo de projeto e da execução do edifício; c) coleta das plantas baixas e perspectivadas, cortes, fachadas e perspectivas, além de vídeos e imagens produzidos para a composição da forma e execução das peças estruturais, disponíveis em meio digital.

O MODELO DE FORMAÇÃO ASSOCIATIVO PARAMÉTRICO

O Modelo de formação explora a interação entre o projetista e o meio digital de forma a romper a representação tradicional, substituindo a experimentação visual do processo convencional por uma relação na qual, o projetista controla diretamente os elementos digitais que determinam o processo de formação do projeto [8].

Em contraposição aos primeiros *Computer Aided Designs* (CADs), os modelos de formação são muito mais do que abstrações estáticas de representações formais, uma vez que relacionam a forma ao conceito de formação [8]. No modelo de formação, técnicas digitais são utilizadas na geração da forma e do conteúdo, contrastando com o modelo CAD, que usava somente a representação e o fluxo de dados [5].

Esse modelo pode ser dividido, em três categorias: a) baseada em movimento, na qual se utiliza a animação digital; b) o topológico, baseado em transformações homeomórficas, resultando em formas geométricas complexas; c) o associativo, na qual são utilizadas técnicas paramétricas que exploram a geometria, associando e descrevendo as relações entre objetos, além de criar relações de

interdependência e definir o comportamento dos elementos [7] [8]. Nessa lógica, um projeto formativo associativo paramétrico:

[...] utiliza características variáveis para controlar os chamados parâmetros, sistemas complexos. Eles são usados na arquitetura para o design de objetos geométricos, que são de outra forma difíceis de manusear. [...] A aplicação de modelos paramétricos vai além de simplesmente exibir um design existente usando um programa CAD [10].

Com base nas técnicas paramétricas associativas, os contornos e as formas do projeto são indiretamente definidos. Os aspectos da geometria estrutural são determinados, mas suas qualidades formais não. Para estabelecerem essas relações, os softwares substituem a lógica da geometria Euclidiana por relações topológicas. A topologia, estudo da estrutura de relações existente entre os objetos (e não da sua geometria), ajuda na formação livre, pois as propriedades dos objetos não mudam quando transformações estéticas e morfológicas são aplicadas. Uma consequência desse processo é que o projetista também pode se tornar o produtor de ferramentas para a geração da forma [11].

Um exemplo paradigmático desse tipo de modelo de formação associativo é o Museu da Mercedes-Benz. As diferentes configurações geométricas obtidas pela criação e alterações de um modelo paramétrico, o "*Mastermodell*", como base geométrica da estrutura e de todas as partes desse edifício (incluindo projetos de execução e detalhamento das peças de acabamento), tornam esta obra um exemplo singular da tecnologia paramétrica associada à arquitetura.

O PROJETO DO MUSEU DA MERCEDES-BENZ



Fonte: [12]

O atual Museu da Mercedes-Benz em Stuttgart é o resultado de um concurso realizado pela *DaimlerChrysler Immobilien* que na época procurava uma proposta de um novo edifício, obra que seria a segunda ampliação do museu. O primeiro edifício deste Museu foi aberto em 1923, mas foi reformado algumas décadas após sua inauguração, sendo sua primeira ampliação celebrada em 1961 [13].

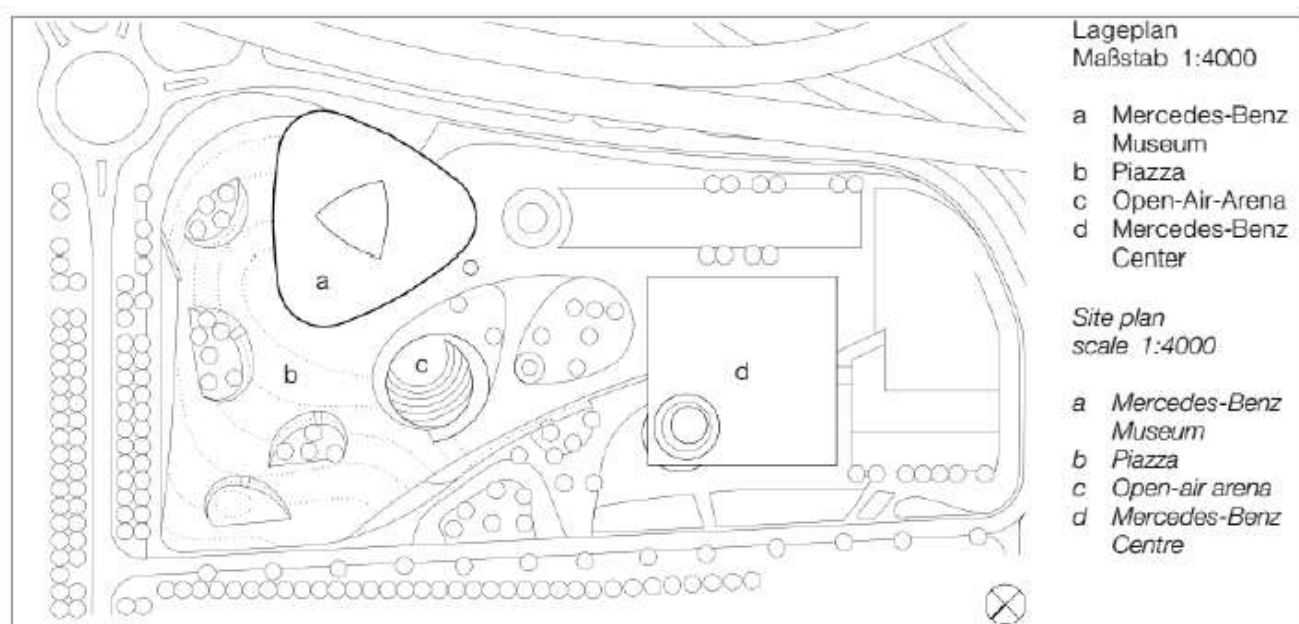
O planejamento para a reforma do museu iniciou-se em 1999, mas somente em 2000 foram elaborados os cronogramas e realizada a análise do local (Figuras 1 e 2). Contudo, a competição internacional para a concepção do projeto arquitetônico ocorreu entre junho de 2001 a janeiro de 2002. E o novo prédio só seria aberto ao público em maio de 2006.

Figura 1: Localização do Museu da Mercedes Benz na cidade de Stuttgart



Fonte: [12].

Figura 2: Planta de situação do Museu.

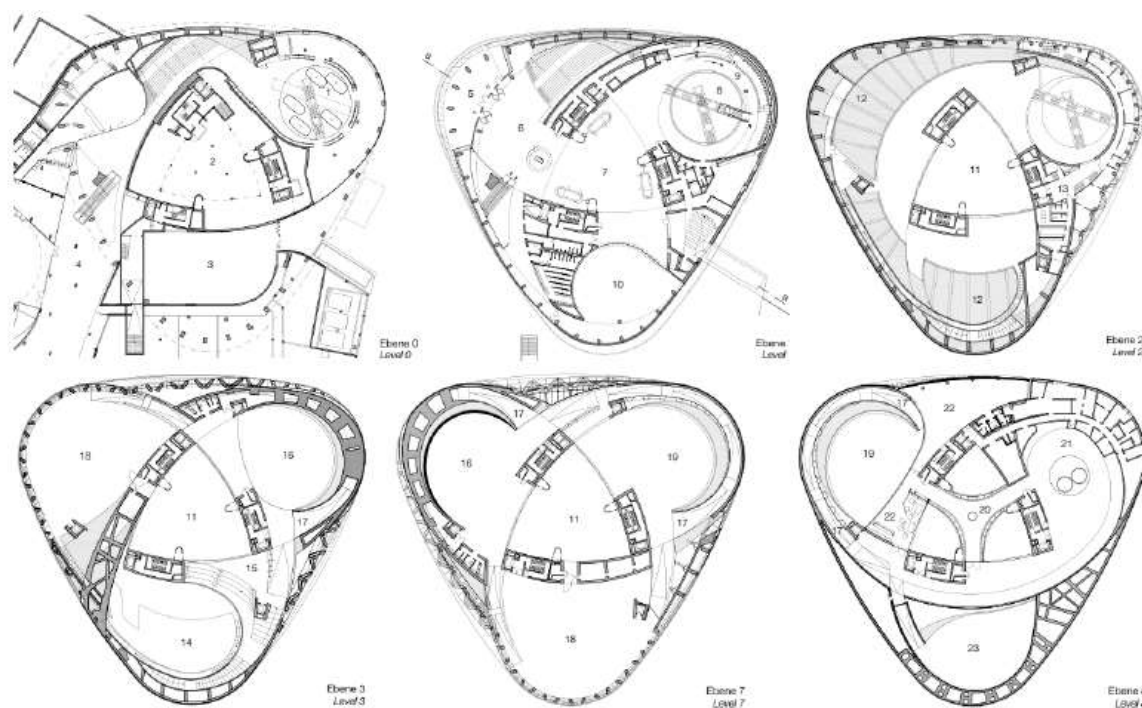


Fonte: [12].

Ao vencer esse concurso o escritório escolhido, o UNStudio, ainda não tinha uma ideia clara sobre a forma de execução do projeto [10] (Figura 3). Assim, os arquitetos responsáveis pelo projeto, Ben Van Berkel e Tobias Hälliser, contrataram outro arquiteto, Arnold Walz, especialista em programação e projetos digitais, para resolver algumas questões essenciais da obra:

“Em que forma de representação pode ser explicada as várias partes do prédio estruturado por rampas, aterros e painéis de parede retorcidos, que quebram a clássica separação do piso? Como adaptar a figura geométrica básica às mudanças necessárias durante o planejamento progressivo do edifício? Como se obter os projetos para as partes complicadas desta entidade espacial, todas elas diferentes?” [10].

Figura 3: Plantas baixa dos níveis 0, 1, 2, 3, 7 e 8 do Museu

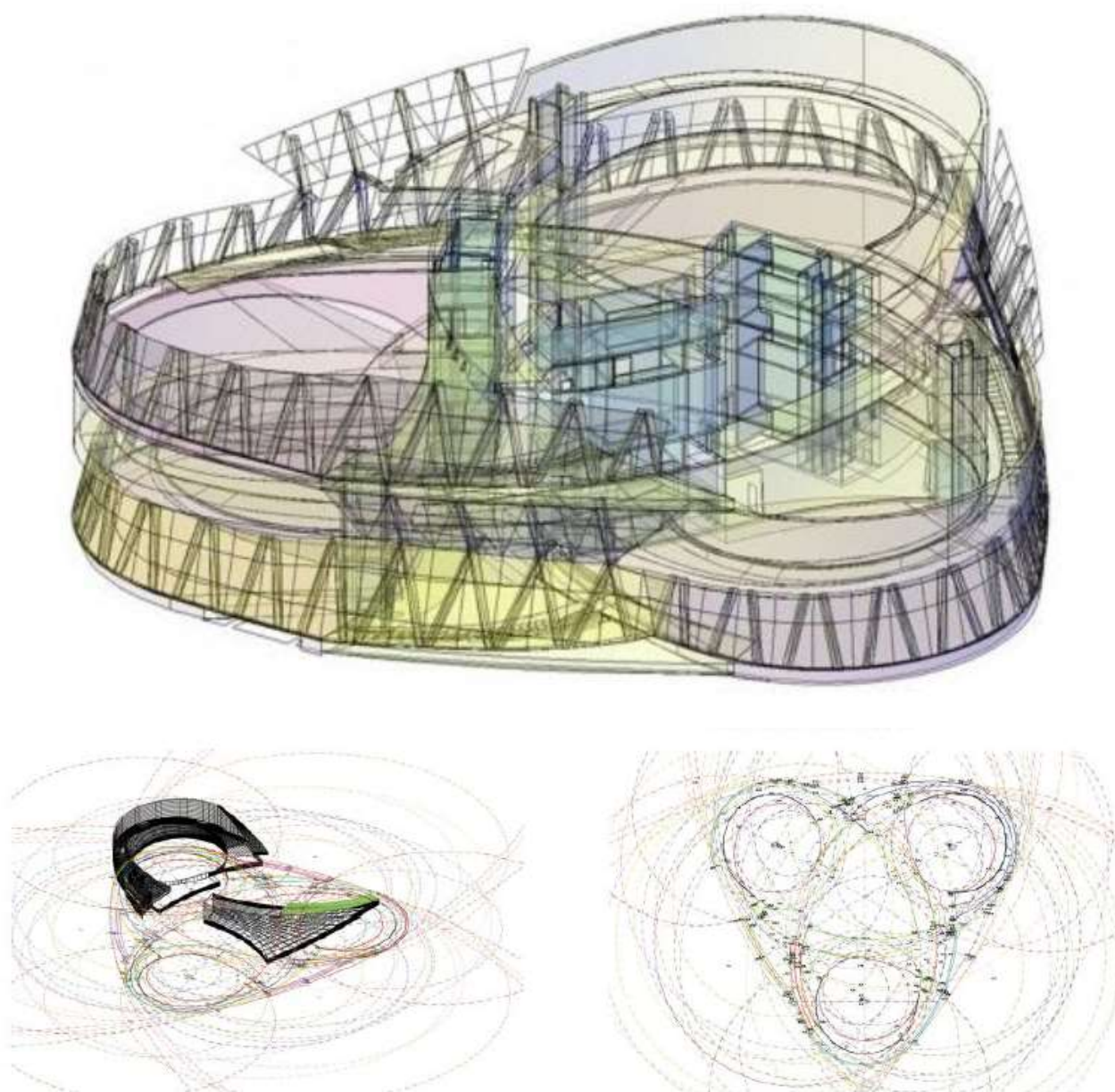


Fonte: [12].

Na realidade, percebeu-se que as ferramentas CAD, existentes na época, não seriam suficientes para a implementação estrutural da ideia e que “as ferramentas tinham que ser adaptadas ao novo desafio” [10]. O trabalho de Arnold Walz em conjunto com os arquitetos do UNStudio foi imprescindível ao processo de projeção e construção do conceito inovador do museu. Para os projetos complementares e planejamento da obra, o *Mastermodell* também serviu de base para a execução.

Esse modelo (Figura 4) se encaixa na descrição da modelagem paramétrica, pois que as informações necessárias para descrever a geometria eram parâmetros modificáveis: “[...] se a posição do átrio ou dos raios das rampas forem alteradas, as curvas tangenciais são recalculadas e a figura é automaticamente redesenhada” [10].

Figura 4: Modelo paramétrico (Mastermodell) do Museu Mercedes Benz produzido por Arnold Walz

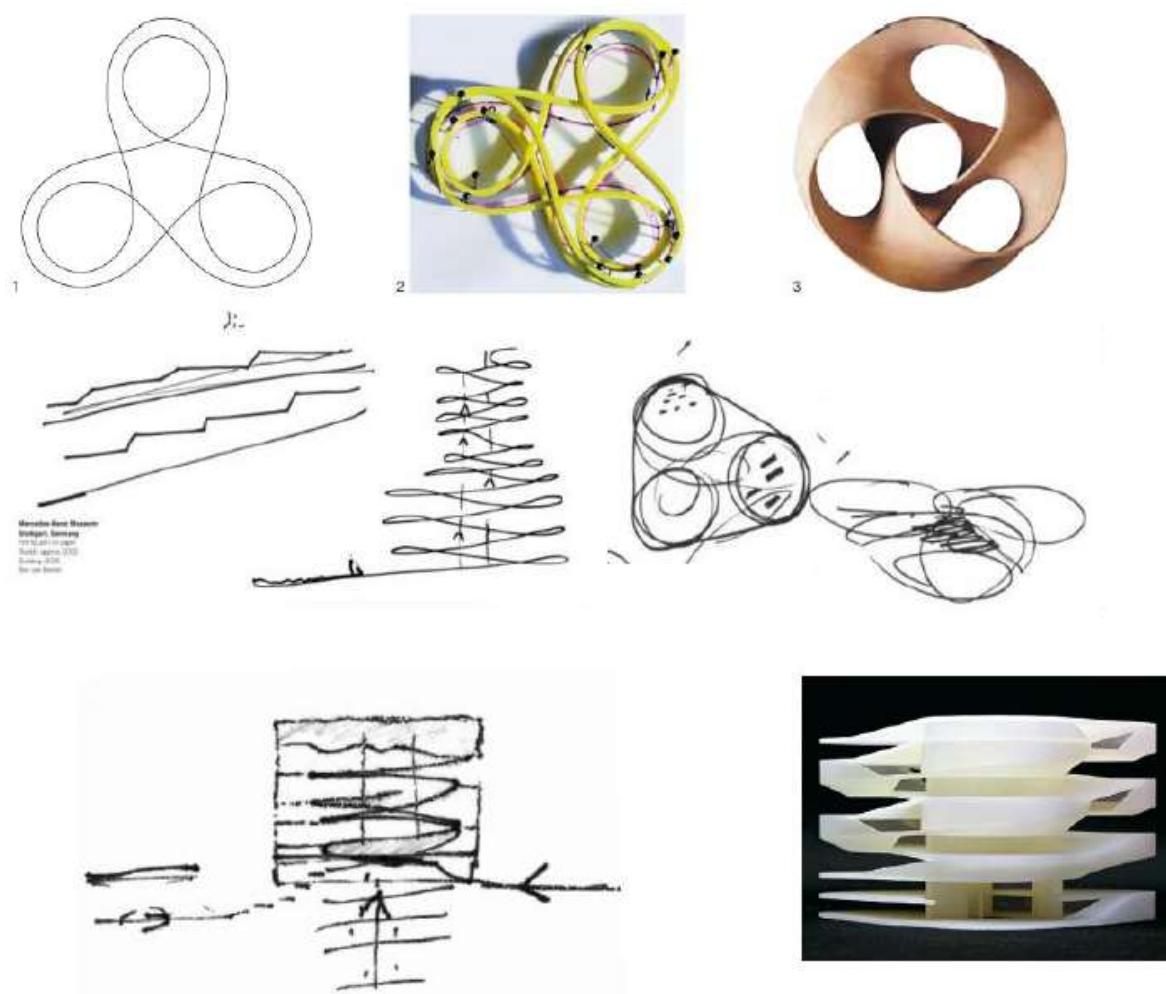


Fonte: [12].

PARAMETRISMO CONCEITUAL

A forma, função e estrutura do edifício da Mercedes Benz seguem um conceito espacial não linear. Uma planta em espiral, como uma folha de trevo (ou os três pontos da marca Mercedes), gira em torno de um espaço vazio triangular para gerar seis níveis, alternativamente um e dois andares de altura, contendo áreas de exposição com rampas que se inclinam suavemente para o próximo nível (Figura 5).

Figura 5 - Inspiração, croquis e modelo do estudo preliminar das formas espiraladas e de trevo do edifício



Fonte: [15].

A descrição do partido conceitual, de acordo com Van Berkel, foi: “uma viagem no tempo (...) um espaço espiralado que entrelaça dois prédios em diferentes níveis” [16].

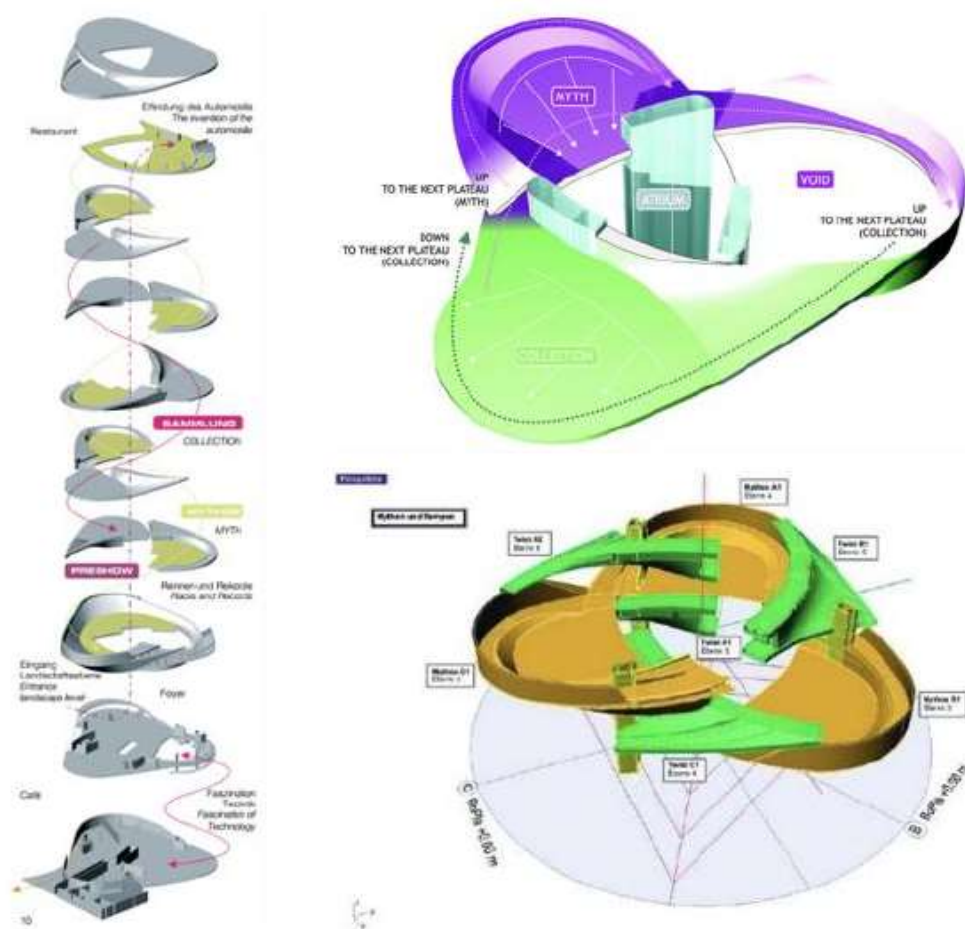
As superfícies rotativas do teto de curva dupla criam uma percepção dos espaços como uma estrutura dinâmica e infinita. A organização do edifício esculturalmente pronunciada estimula assim variedade e flexibilidade e permite uma experiência especial de museu.

Assim, analisando a geometria nos projetos e esboços, observa-se que no eixo vertical o edifício se divide em dois setores, num lado, a mostra da coleção histórica dos veículos da marca e, no outro, a coleção dos carros mais representativos da marca em cada época. As rampas que relacionam longitudinalmente ambos os setores, fazem com que o visitante se movimente de maneira integrada

de um lado para o outro e por entre as coleções com uma liberdade visual que evoca, segundo os autores, mover-se por uma rodovia.

O Museu foi pensado como a “nova” vitrine da Mercedes Benz na época, porque expõe e comunica por meio da edificação e sua espacialidade os principais valores associados à marca: liberdade, tecnologia, durabilidade, limpeza, e distinção essenciais na concepção do projeto [16] [17]. Outro aspecto interessante é que a forma, estrutura, acabamentos e uso de alta tecnologia para a Na visualização vertical do projeto (Figura 4), Van Berkel descreve a ideia da estrutura como duas mãos entrelaçadas, cujos dedos representam os pavimentos. Contudo, aparentemente pela parte de fora se observam só três pavimentos, enquanto no interior o entrelaçamento forma uma edificação de nove níveis [16] [17] [18]. construção, simbolizavam, de acordo com o *slogan* da Mercedes, o escopo e o arrojo da marca.

Figura 6: Perspectiva dos níveis verticalizados e detalhes dos setores e coleções do museu



Fonte: [19].

Entretanto para analisar a estrutura única do Museu Mercedes-Benz, comparou-se três soluções arquitetônicas utilizadas em três edifícios de enorme importância para a arquitetura museológica do século XX.

Primeiro, a Galeria Nacional de Berlim projetada por Mies van der Rohe, caracterizada por amplas salas de exposição sem pilares, e, esse mesmo efeito do espaço livre, desobstruído e ainda entrelaçado é alcançado no Museu Mercedes-Benz que possui uma similar estrutura com suporte complicado e capaz de possibilitar os grandes vãos livres e conectados entre si.

Em segundo, o sistema de construção, combinado com um sistema de circulação que retoma e segue a estrutura museológica explorada por Frank Lloyd Wright no Museu Guggenheim em Nova York, cuja rampa corre por dentro circular para baixo. A única diferença é que ao invés de um fluxo contínuo numa só direção, no Mercedes-Benz Museu, o fluxo de visitantes inicia em uma das espirais entrelaçadas para baixo e pode seguir em qualquer direção.

Por fim, outra similaridade identificada, ainda quanto ao sistema de circulação, foi a solução do Centro Pompidou de Richard Rogers e Renzo Piano em Paris, onde este sistema foi disposto na parte periférica do prédio.

Quanto à estética externa, o modelo paramétrico permitiu a definição do tamanho exato e a melhor posição das peças de vidro que compõem a fachada (Figuras 7 e 8). Ressalta-se que os arquitetos da UNStudio também usaram o modelo mestre para o detalhamento, criando planilhas de trabalho e projetos complementares correspondentes para as empresas executoras. Dessa forma, tanto os 1.800 elementos únicos de vidro trapezoidal da fachada, quanto a forma de aço das colunas de concreto, puderam ser manipulados por meio do modelo paramétrico, servindo de preparação do projeto de execução [10].

Figura 7 - Vista do modelo, corte e detalhamento das peças de vidro

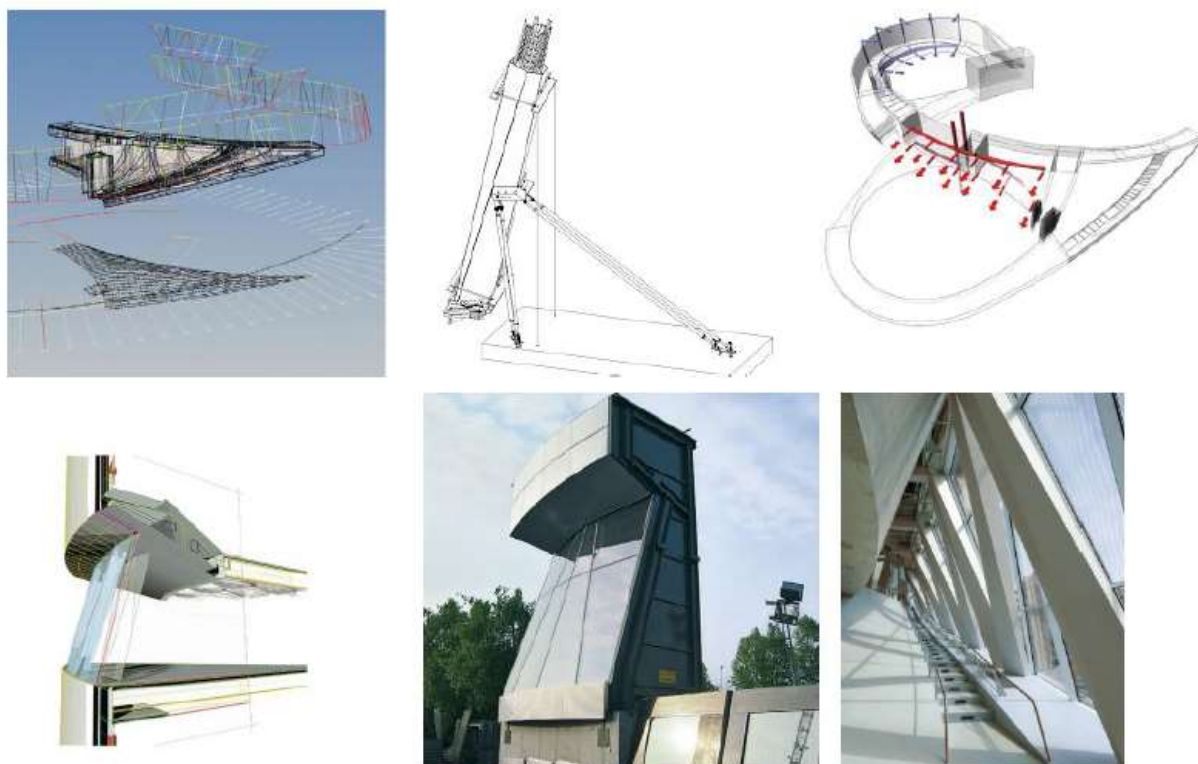


Fonte: [20] [21].

As ferramentas de desenho paramétrico facilitaram também a produção dos desenhos executivos e a fabricação dos componentes empregados no canteiro de obras. Expõe-se que:

“[...] o edifício foi composto com menos de cem parâmetros, os quais continham sua geometria e possibilitaram administrar as inúmeras mudanças durante seu processo de realização e verificar as consequências trazidas a cada nova decisão tomada. Sem essa administração rigorosa da geometria, não haveria tanta liberdade na arquitetura” [22].

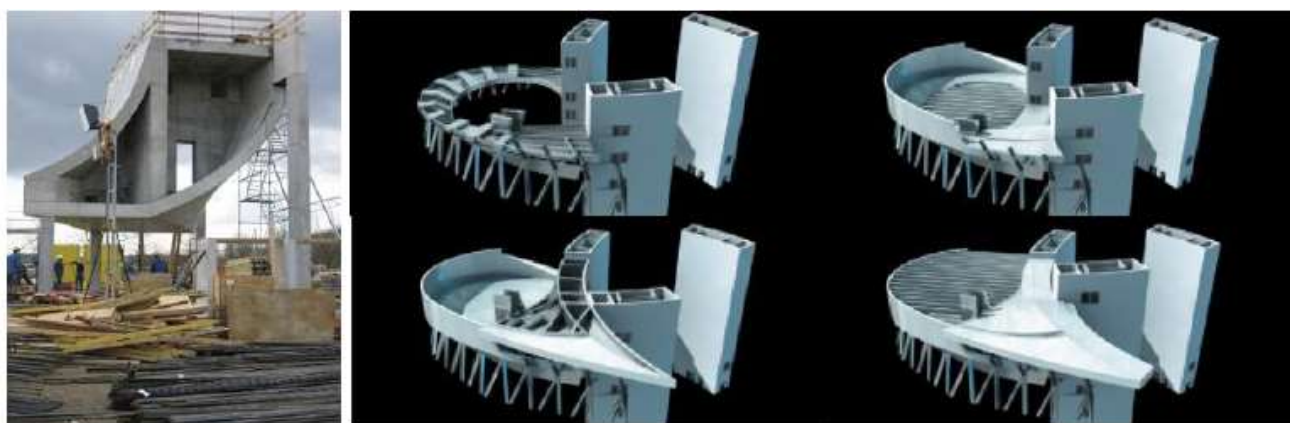
Figura 8 - Modelo, detalhamentos, escala real e instalação das peças de vidro



Fonte: [12].

ESTRUTURA PARAMETRIZADA

A estrutura do Museu Mercedes Benz é composta pelo núcleo de concreto moldado no local, vigas de concreto e colunas angulares de suporte de cargas exteriores. Os três elementos de concreto circundam o átrio, sendo sua principal função a estruturação do edifício. As vigas por seu formato complexo, foram projetadas tridimensionalmente por causa das cargas e curvaturas, que trabalham em conjunto com o piso (Figura 9).

Figura 9 - Peças de concreto e suas conexões

Fonte: [20].

Os ângulos não são apenas estruturais, a forma deles também ajudam a quebrar o vidro que os segue em pedaços triangulares que podem então seguir as curvaturas externas. A complexidade do edifício é explicitada, quando se percebe que quase todo elemento penetra em outro [15].

Dentro da lógica do arquiteto, e, observado externamente, o Museu parece ser distribuído em três pavimentos, entretanto, o interior revela uma distribuição em nove pavimentos, incluindo o térreo, com vãos entrelaçados que se inclinam descendentes tendo como eixo o átrio central.

RESULTADO DA ANÁLISE

Quando estudado de maneira conjunta entre descrição de outros autores, depoimentos dos arquitetos e análise visual, destaca-se que o projeto trabalha com a integração de três ideias dentro de um mesmo conceito. Uma para a distribuição não linear da dimensão horizontal, outra para o entrelaçamento da dimensão vertical e, por fim, a ideia de hélice para o movimento, o que intensifica a vivência espacial e a adaptabilidade ao uso.

Esta obra, embora replique o conceito de visita de cima para baixo, já visto em outros museus, se diferencia, por romper com a linearidade dimensional, visto que “no museu você sente que o espaço te circunda (...) diferente da ideia clássica da arquitetura modernista (...) o espaço não está só na sua frente, você pode atravessá-lo” [16].

A tecnologia viabilizou nesta obra uma quebra do paradigma formal por meio da consolidação de uma estrutura de formas complexas, contudo factíveis. A concepção formal do Museu da Mercedes Benz não seria construída sem o auxílio da modelagem paramétrica.

Existem três desafios na modelagem paramétrica: i) a redução máxima das informações necessárias para a descrição matemática do edifício; ii) a ligação correta dos parâmetros no sistema de equação para descrever a forma; iii) a verificação se os algoritmos programados realmente geram a geometria desejada [10].

Evidenciou-se que para vencer esses desafios é necessário um conhecimento integral da geometria e das técnicas paramétricas, conciliados com as especificações de design, construção e fabricação; o que requer uma coordenação cuidadosa “entre arquitetos, planejadores e artistas” [10].

Isto pode significar, em concordância com Van Berkel, um compromisso do arquiteto com a tecnologia, pois em breve “além de desenhar e criar modelos, nós (os arquitetos) também nos tornaremos programadores” [16].

Não obstante, como resultados da análise percebeu-se que dentre as obras que utilizam métodos paramétricos, o museu da Mercedes Benz, foi um dos pioneiros no emprego da técnica da modelagem paramétrica nos primeiros estágios do projeto de execução, e ao longo de toda obra, definindo e redefinindo com eficiência e rapidez dimensões, formas e técnicas construtivas até chegar a sua forma final, que correspondia, por sua vez à forma livre do projeto vencedor do concurso.

CONCLUSÃO

O Museu da Mercedes Benz como obra paradigmática, embora que executado há quase duas décadas atrás, exemplifica com clareza que a modelagem paramétrica adquire, na cultura projetual da contemporaneidade, um *status* ampliado de metodologia projetual, para além da modelagem de informações da construção. A manipulação de parâmetros de informação, possibilita a criação das mais variadas configurações arquitetônicas, potencializando processos e resultados dentro do exercício do projeto.

A forma complexa do projeto, que trabalha a integração de diferentes ideias espaciais dentro de um mesmo conceito, foi concretizada graças à modelagem paramétrica. A formação associativa de regras permitiu gerar uma configuração edificável alinhada à intensificação da vivência espacial e adaptação ao uso conceptualizado.

Edifícios são compostos literalmente por milhares de partes individuais, e de inúmeras conexões. O uso de parâmetros para definir geometria e elementos construtivos, tem provado ser cada vez mais eficaz no processo de projeto. No geral, os parâmetros facilitam as constantes modificações, verificam soluções e permitem inovações, caminhos esses que fazem parte do exercício da arquitetura.

No caso específico do Museu Mercedes Benz, conclui-se que os parâmetros se tornaram imprescindíveis para a obtenção do resultado, passando desde o processo do projeto com a geração da volumetria e seus fechamentos complexos e na solução estrutural inovadora. A decisão por esta abordagem deixou intrínseco o conceito de formação associativa que subsidiou a obra.

REFERÊNCIAS

- [1] KALAY, Yehuda E. *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design*. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [2] OXMAN, R. Performance-based design: current practices and research issues. *International Journal of Architectural Computing*, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008.
- [3] BRAIDA, F.; LIMA, F.; FONSECA, J.F.; MORAIS, V. 101 conceitos de arquitetura e urbanismo na era digital. São Paulo: ProBooks, 2016.
- [4] SCHUMACHER, P. *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*. Londres. 2008. Disponível em: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.html>. Acesso em: 02 jun 2021.
- [5] OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, v. 52, n. 2017, p. 4–39, 2017.
- [6] SCHUMACHER, Patrik. *The Autopoiesis of Architecture, Vol.2: A New Agenda for Architecture*, John Wiley & Sons Ltd., Londres 2012.
- [7] TOLEDO, A. M. *Arquitetura digital e métodos de geração da forma: representação, concepção e produção da arquitetura contemporânea*. Ímpeto, v. 6, p. 32-36, 2016.
- [8] OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, v. 27, n. 3, p. 229–265, 2006.
- [9] ANDRADE, Max L. V. X. de. *Projeto performativo na prática arquitetônica recente: estrutura conceitual*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, p.472, 2012.
- [10] SCHINDLER, C., SCHEURER, F. Die Rückkehr der Geometrie: Parametrische Modelle komplexer Räume. In: ARCH + 189, ARCH + Verlag, Aachen. 2008. p. 66-69. Disponível em: https://issuu.com/schindlersalmeron/docs/2008_schindlerscheurer_arch_189_geo. Acesso em: 21 fev. 2021.
- [11] ALBAYRAK, Canan; TUNÇER, Bige. Performative architecture as a guideline for transformation. In: RESPECTING FRAGILE PLACES - 29th eCAADe Conference Proceedings, University of Ljubljana, Faculty of Architecture, Slovenia, p.501-510. Disponível em: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2011_117. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [12] REVISTA DETAIL - Review of Architecture and Construction details. Volume 2006 Número 9. P.970 - 992.

- [13] MUSEU Mercedes-Benz / UNStudio. [S.l.: s.d.]. ArchDaily Brasil. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/874583/museu-mercedes-benz-unstudio>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- [14] SEDREZ, M.; CELANI, G. A forma não importa. Entrevista com Arnold Walz. Entrevista, São Paulo, ano15,n.058.03,Vitruvius,jun.2014Disponívelem:<https://vitruvius.com.br/index.php/revistas/read/entrevista/15.058/5208?page=2>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- [15] WALZ, A.; BRAUN, S.; RIECK, A.; BULLINGER, S.; KÖHLER-HAMMER, K.; BAUER, W. FUCON 4.0 – Nachhaltiges Bauen durch digitale und parametrische Fertigung. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. 2015. 129p.
- [16] DUTCH PROFILES: UNSTUDIO. [S.l.: s.n.: s.d.]. 1 vídeo. Publicado no Youtube. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=k_ulbec0hcg. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [17] UNSTUDIO DOCUMENTARY PART 1. [S.l.: s.n.: s.d.]. 1 vídeo. Publicado no Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qPVPimCCGkA>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [18] UNSTUDIO DOCUMENTARY PART 2.[S.l.: s.n.: s.d.]. Publicado no Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZJlxjSjgBvl>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- [19]MERCEDESBenzMuseum.[S.l:s.n:s.d.].Disponívelem:<http://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [20] WINGATE, C. UNStudio, Mercedes Benz Museum: A study from concept to detail. [S.l.]. 2012. Disponívelem:https://gd1studio2012.files.wordpress.com/2012/08/2mercedesbenz_unstudio_chris-wingate.pdf. Acesso em: 21 fev.2021
- [21] PARAMETRIC building modeling: Mercedes Benz Museum Stuttgart. 1 vídeo. [S.l.: s.n.: s.d.]. Publicado no Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=osvTEbNxMoA>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [22] LIMA, C. C. de; CORREIA, D.A.; BARBOSA, N. M.; TOLEDO, A. M. Modelo associativo e design paramétrico: da subjetividade à precisão. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ""