

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA

GABRIEL KICOLAR CAMPOS

**USO DAS TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO K-MEANS E FUZZY C-MEANS PARA
ANÁLISE DE TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NO CONCRETO**

LIMEIRA
2020

GABRIEL KICOLAR CAMPOS

**USO DAS TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO K-MEANS E FUZZY C-MEANS PARA
ANÁLISE DE TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NO CONCRETO**

Versão Final

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Garcia de Carvalho

LIMEIRA

2020

GABRIEL KICIELAR CAMPOS

**USO DAS TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO K-MEANS E FUZZY C-MEANS PARA
ANÁLISE DE TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NO CONCRETO**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Garcia de Carvalho

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marco Antonio de Carvalho
FT/UNICAMP

Profa. Dra. Ana Estela Antunes Da Silva
FT/UNICAMP

Prof Dr. Vitor Rafael Coluci
FT/UNICAMP

RESUMO

A avaliação do estado do concreto é de suma importância, dado que se trata do elemento estrutural mais utilizado na construção civil. Este trabalho tem como objetivo a realização de uma análise qualitativa referente aos resultados das aplicações dos algoritmos de agrupamento *K-Means* e *Fuzzy-C-Means* no tratamento de imagens digitais. As imagens disponibilizadas nesta monografia tratam de tomografias obtidas pelo Ensaio Não Destrutivo (END) de ultrassom no concreto, com a utilização de métodos de Interpolação para estimar os valores de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) desconhecidas. O END de ultrassom é dado pela medição da VPU através do concreto em que, quando existe uma região de baixa compactação, vazios de concretagem ou material danificado, acontece uma redução correspondente na velocidade de pulso calculada, tornando possível determinar a extensão aproximada das imperfeições.

Palavras-chave: Imagem; Tomografia Ultrassônica; Interpolação; Concreto; Vazios de Concretagem; Ensaio não Destrutivo; Agrupamento.

ABSTRACT

The evaluation of the state of the concrete is of paramount importance, given that it is the structural element most used in civil construction. This work aims to carry out a qualitative analysis regarding the results of the applications of the K-Means and Fuzzy-C-Means clustering algorithms in the treatment of digital images. The images available in this monography are tomographic images obtained by the Non-Destructive Test (NDT) of ultrasound in concrete, with the use of Interpolation methods to estimate the values of unknown Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). The ultrasound NDT is given by measuring the UPV through the concrete in which, when there is a region of low compaction, concreting voids or damaged material, a corresponding reduction in the calculated pulse velocity occurs, making possible to determine the approximate extent of the imperfections.

Keywords: Image; Ultrasound Tomography; Interpolation; Concrete; Concreting Voids; Non-Structural Tests; Clustering.

Lista de Figuras

Figura 1. Características de uma onda.	14
Figura 2. Esquema de funcionamento do ultrassom.	17
Figura 3. Equipamento de ultrassom USLab.	18
Figura 4. Métodos de Transmissão.	19
Figura 5. Identificação das faces laterais A e B da viga.	20
Figura 6. Posição dos transdutores no método indireto.	21
Figura 7. Realização de múltiplas medições indiretas.	21
Figura 8. Imagem gerada através da Interpolação por vizinhos.	22
Figura 9. Conjuntos Nebulosos.	24
Figura 10. Fluxo de atividades do estudo.	26
Figura 11. Vigas concretadas utilizadas no estudo – Viga Padrão (VP), Viga segregação (VS) e Viga com vazios de concretagem (VC), armazenadas em área externa.	28
Figura 12. Disposição dos tubos dentro da viga (VC).	29
Figura 13. Representação gráfica da malha demarcada nas faces laterais (A e B) da VP.	30
Figura 14. Representação gráfica da malha demarcada nas faces laterais (A e B) da VC.	30
Figura 15. Paleta "tab20c", padrão Qualitative.	31
Figura 16. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente $a = 2$ e $b = 16$ na Viga Padrão (VP)	32
Figura 17. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente $a = 2$ e $b = 16$ na Viga Vazios de Concretagem (VC).....	32
Figura 18. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 2 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Padrão (VP)	33
Figura 19. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 2 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Vazios de Concretagem (VC)	34
Figura 20. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 16 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Padrão (VP)	

.....	35
Figura 21. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 16 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Vazios de Concretagem (VC)	35
Figura 22. Exemplo de gráfico produto do método de Elbow	39
Figura 23. K-Means e interpolação pelo Inverso da Potência da Distância	42
Figura 24. Fuzzy-C-Means e interpolação pelo Inverso da Potência da Distância....	43
Figura 25. Disposição dos tubos dentro da viga (VC)	44
Figura 26. IDW após aplicação dos algoritmos (a) K-Means e (b) Fuzzy-C-Means ..	45
Figura 27. IDWNP após aplicação dos algoritmos (a) K-Means e (b) Fuzzy-C-Means	45

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação da Qualidade do concreto baseada na velocidade dos pulsos de ultrassom.....	16
Tabela 2. Componentes do concreto (VC).	27
Tabela 3. Dimensões dos tubos.	29
Tabela 4. Algoritmo 1 - Pseudocódigo Algoritmo K-Means.....	37
Tabela 5. Algoritmo 2 - Pseudocódigo Algoritmo FCM.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	11
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS	13
2.1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)	13
2.1.1	Propagação de Ondas.....	14
2.1.2	Medições Acústicas	15
2.1.3	Características que afetam a Velocidade de Pulso no Concreto	15
2.1.4	Tomografia Ultrassônica	16
2.1.5	Métodos de Transmissão	19
2.3	INTERPOLAÇÃO ESPACIAL.....	21
2.3.1	Inverso da Potência da Distância	23
2.3.2	Inverso da Potência da Distância Considerando Pontos Mais Próximos	23
2.4	LÓGICA FUZZY	23
2.4.1	Conjuntos Nebulosos	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	VIGAS DE CONCRETO	27
3.1.1	Pontos de Medição.....	29
3.2	GERAÇÃO DE IMAGENS	30
3.3	<i>DATASET</i>	31
3.3.1	Inverso da Potência da Distância	32
3.3.2	Inverso da Potência da Distância considerando Pontos mais Próximos.	33
3.3.3	Inverso da Potência da Distância considerando pontos mais próximos para $p=2$	33
3.3.4	Inverso da Potência da Distância considerando pontos mais próximos para $p=16$	34
3.4	ALGORITMOS DE AGRUPAMENTO.....	36
3.4.1	Medida de Dissimilaridade	36
3.4.2	<i>K-Means</i>	37
3.4.3	<i>Fuzzy-C-Means</i>	37

3.4.4	Método de <i>Elbow</i>	39
4	RESULTADOS.....	40
4.1	EXPERIMENTOS.....	40
4.1.1	Análise do <i>Dataset</i>	40
4.1.2	Experimento 1 - Análise de Número de <i>Clusters</i>	40
4.1.3	Experimento 2 - Aplicação da Técnica <i>K-Means</i>	41
4.1.4	Experimento 3 - <i>Fuzzy-C-Means</i>	42
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE AGRUPAMENTO.....	44
5	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto é amplamente utilizado em construções civis sendo notoriamente o elemento estrutural mais utilizado na construção civil, o que por si só já demonstra a necessidade de se estudar suas propriedades, sobretudo no atual cenário, em que as exigências de qualidade estão se estabelecendo. Desse modo, tem-se que o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, verificar as qualidades desse elemento tão fundamental, são de suma importância. Os Ensaio Não Destrutivos (END) mostram-se como uma estratégia interessante para monitorar os estados do concreto (LORENZI; TISBIEREK & SILVA, 2007; LORENZI et al., 2013).

Os END têm um papel extremamente significativo para a avaliação do concreto, visto que além de permitirem avaliar estruturas envelhecidas e já degradadas, também podem ser usados para o controle de qualidade de novas estruturas (LORENZI et al., 2013). Shull (2002) exemplifica como os ensaios não destrutivos, também chamados de inspeções não destrutivas, não estão apenas presentes na indústria (ou na construção civil, contexto deste trabalho), mas também no nosso cotidiano. O exemplo é dado da seguinte forma: em uma situação quando vamos a um mercado e selecionamos um melão e começamos a executar uma série de procedimentos com intenção de inspecionar a sua qualidade, primeiramente olha-se para a fruta e a examina, procurando por falhas - isso é um END visual; depois, para determinar se o melão está maduro, são efetuados pequenos tapas em sua superfície esperando ouvir uma determinada resposta sonora - um procedimento que pode ser considerado como um END acústico. A presente monografia irá abordar apenas um método de acústico, especificamente o de ultrassom.

Neste trabalho, na tentativa de melhorar a identificação do problema conhecido como vazio de concretagem, será necessária uma abordagem interdisciplinar entre a construção civil e a informática na geração de imagens tomográficas a partir da implementação de técnicas de agrupamento já muito

conhecidas nas soluções em diversos domínios de aplicações, tais como: biologia, recuperação de informações, medicina, segmentação de imagens e mineração de textos (MENDES, 2017).

As técnicas de agrupamento têm como objetivo agrupar objetos similares em grupos (*clusters*) a partir de um determinado critério previamente estabelecido. Esse critério comumente baseia-se em uma função de dissimilaridade que determina a distância, ou diferença, entre os objetos analisados.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é buscar uma representação mais adequada para a identificação de vazios de concretagem por meio de imagens digitais geradas a partir dos valores de Velocidade de Pulso Ultrassônica medidos através do concreto. Esses dados oriundos do teste ultrassônico serão submetidos a dois métodos de Interpolação para que os valores de pontos desconhecidos sejam estimados. Após a realização dessa estimativa, os algoritmos de agrupamento *K-Means* e *Fuzzy-C-Means* serão aplicados a essas imagens digitais a fim de tratá-las, e os resultados serão comparados a respeito da melhor representação das patologias. Os critérios para determinação da melhor representação consistem na correspondência das patologias em posicionamento e no formato dos grupamentos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta monografia está dividida em cinco capítulos: primeiramente, esta introdução; posteriormente, fundamentação teórica e trabalhos relacionados; em seguida, materiais e métodos; resultados e, pôr fim, a conclusão. O capítulo a seguir, fundamentação teórica e trabalhos relacionados, descreve os principais conceitos que serão vistos ao decorrer deste trabalho; ademais, explica a relação dele com trabalhos anteriores. O terceiro capítulo, materiais e métodos, apresenta os métodos de agrupamento, a forma com que as imagens foram geradas e o *Dataset* contendo as imagens intermediárias (que ainda não foram submetidas aos Algoritmos de

Agrupamento, apenas pelos métodos de Interpolação). No quarto capítulo, resultados, serão apresentados os resultados dos experimentos de análise de número de grupos (*clusters*), bem como serão expostas as imagens concebidas nos experimentos de agrupamento separadas pelo Método de Interpolação e parâmetros utilizados. O último capítulo, conclusão, finalizará este trabalho com as últimas contribuições sobre os assuntos abordados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS

Este segundo capítulo apresenta como fundamentação teórica os conceitos de dois temas essenciais para realização e entendimento deste trabalho, a Tomografia Ultrassônica e Interpolação. Primeiramente, sobre tomografia ultrassônica, será visto uma breve apresentação do que são Ensaios Não Destrutivos e tópicos que servem de alicerce para o assunto, como propagação de ondas, características que afetam a velocidade de pulso no concreto, o equipamento necessário para realização dos ensaios e as técnicas de medições que podem ser aplicadas.

Em seguida, apontam-se algumas definições sobre interpolação espacial junto com os métodos vistos em Gomes e Gonçalves (2018), que são Interpolação por Vizinhos mais próximos, Inverso da Potência da Distância e Inverso da Potência da Distância Considerando Pontos Mais Próximos.

Por fim, também será abordado um tópico importante para a fundamentação do algoritmo de agrupamento *Fuzzy-C-Means*, a respeito de Lógica Nebulosa, que se faz necessário por conta da sua estratégia para resolução deste estudo, o *Fuzzy-C-Means*.

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

Evangelista (2002) definiu: “os ensaios considerados não destrutivos são aqueles que não causam nenhum dano ao elemento ensaiado ou deixam pequenos danos para serem reparados após o ensaio. Eles não provocam perda na capacidade resistente do elemento” (p. 4).

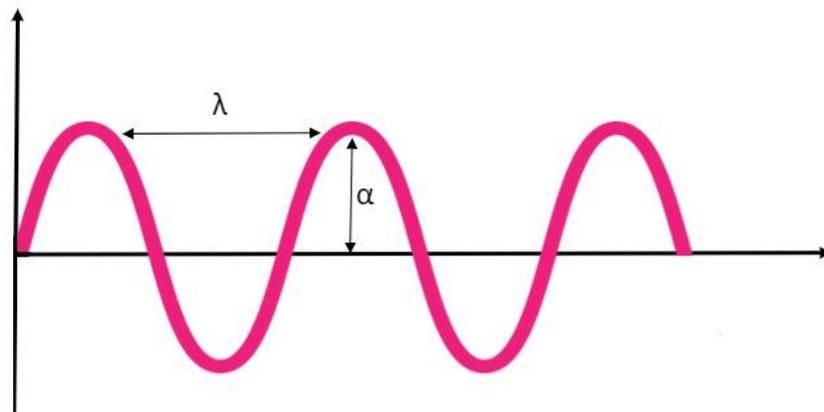
Os END consistem na aplicação de metodologias e técnicas de ensaio que têm como finalidade analisar a estabilidade de algum a material, peças ou equipamentos soldados, fundidos, forjados, laminados etc. Dessa forma, torna-se possível detectar a falta de homogeneidade e defeitos por meio de princípios físicos definidos. Há vários tipos e classificações de END, e uma maneira de classificá-los é pelos seus princípios físicos associados, como Eletromagnetismo, Ondas Eletromagnéticas, Ondas Mecânicas, Capilaridade e Difusão (Pereira, 2013).

2.1.1 Propagação de Ondas

Como ramo da Física, a Acústica é a ciência encarregada do estudo das vibrações e ondas mecânicas em meios materiais. A classificação de ondas mecânicas com base em seu espectro de frequência pode ser dividida em três grupos: os infrassons, que são produzidas por vibrações mecânicas inferiores a 20Hz; os sons produzidos por frequências entre 20Hz e 20kHz; e os ultrassons, formados por frequências superiores a 20kHz (MANTILLA et al., 2003).

Toda onda possui as seguintes características: frequência (f), comprimento de onda (λ) e amplitude (α), conforme a Figura 1.

Figura 1. Características de uma onda.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A frequência f e o comprimento de onda λ estão relacionadas à velocidade de propagação, de modo que se obtém a Equação 1 (BUNGEY; STEPHEN; GRANTHAM, 2006):

$$V = f \lambda \quad \therefore \quad f = \frac{V}{\lambda} \quad (1)$$

2.1.2 Medições Acústicas

Em conformidade com um estudo apresentado por Perlin (2015), pontes feitas de concreto protendido, ou seja, que fazem uso de armadura de aço que comprime previamente a estrutura com o objetivo de minimizar ou anular a fissuração e os deslocamentos dela, estão sujeitas a falhas de concretagem na argamassa interna da bainha de protensão (tubos dentro dos quais a armadura de protensão deve ser colocada). Comumente, nesses casos, as inspeções no concreto são feitas mediante verificações visuais ou com auxílio de aparelhos de endoscopia inseridos em furos na bainha, no entanto, esses métodos não são muito produtivos.

Casos de patologias, trincas, bolhas muitas vezes não estão visíveis, fazendo com que as medições acústicas, que já se mostraram convincentes em diversos países em avaliações feitas pelos setores florestais, madeireiro, e da construção civil, tornassem-se crescentemente um apoio ou até mesmo substitutas das avaliações visuais em várias aplicações (BRASHAW, 2009 *apud* CERRI, 2010).

Como já visto na seção 2.1.1, a velocidade do pulso ultrassônico é dada pela razão entre a distância percorrida pelo pulso e seu tempo de propagação. Para calculá-la, a norma ABNT-NBR:8802 (2019) cita a Equação 2 a seguir:

$$VPU = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Em que L é a distância (m) entre os tradutores e t é o tempo (μ s) do pulso ultrassônico.

2.1.3 Características que afetam a Velocidade de Pulso no Concreto

O concreto influencia a velocidade de pulso por meio de suas propriedades que determinam sua rigidez elástica e sua resistência mecânica. As variações de um conjunto de medidas de velocidade de pulso refletem uma variação correspondente no estado do concreto (IAEA, 2002).

Apesar de simples, o ensaio para verificar a velocidade de pulso deve ser conduzido de maneira cautelosa, de modo que as leituras de velocidade sejam

somente influenciadas pelas propriedades do concreto, e não por outros fatores. Dessa maneira, os fatores que afetam a velocidade do pulso podem ser divididos em dois grupos: (1) fatores resultantes diretamente das propriedades do concreto, sendo algumas características que se enquadram nesse grupo o tamanho do agregado, o tipo de cimento, a concentração de água e a idade do concreto; (2) outros fatores, os quais não estão relacionados às propriedades do concreto, podendo ser exemplificados pela temperatura do concreto, o contato dos transdutores com o material avaliado, a umidade e as condições de cura, comprimento da trajetória e, por fim, o tamanho e forma da amostra (BUNGEY; STEPHEN & GRANTHAM, 2006).

Conforme explicitado por Whitehurst (1966), por meio da VPU é possível classificar a qualidade do concreto, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação da Qualidade do concreto baseada na velocidade dos pulsos de ultrassom.

Velocidade de pulso de ultrassom (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 – 3500	Regular
2000 – 3500	Pobre
< 3500	Muito pobre

Fonte: (WHITEHURST, 1966)

Quando uma região de baixa compactação, vazios ou material danificado está presente no concreto em teste, ocorre uma redução correspondente na velocidade de pulso calculada, de modo que é possível determinar a extensão aproximada das imperfeições (IAEA, 2002).

2.1.4 Tomografia Ultrassônica

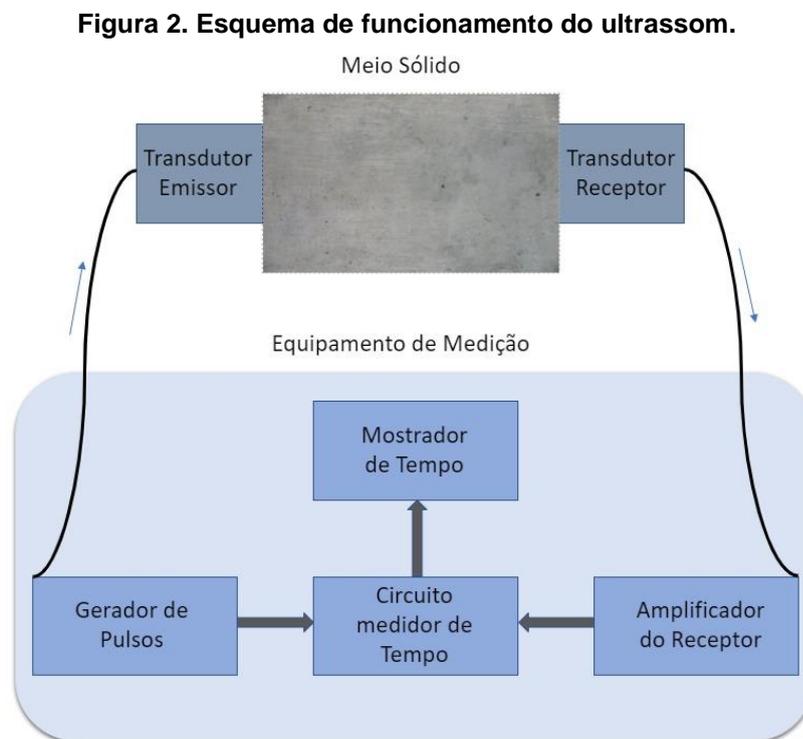
Segundo Perlin (2015), a tomografia é um método matemático que possibilita o mapeamento de toda a seção interna do objeto a partir de múltiplas projeções dele.

Existem dois parâmetros que podem ser medidos na tomografia por ultrassom: a velocidade e atenuação da onda no material. A velocidade é a razão entre a distância percorrida pelo pulso ultrassônico e o seu tempo de propagação, enquanto

a atenuação é a quantidade de energia absorvida pelo material durante a passagem da onda. Este trabalho limita-se a estudar apenas o parâmetro de VPU (PERLIN, 2011).

Briones-Rocha (2017) define que “o método de ultrassom consiste na determinação do tempo que a onda ultrassônica leva para atravessar um determinado material, conhecendo-se a distância entre os transdutores, é possível obter a velocidade ultrassônica” (p. 31).

A Figura 2 demonstra o esquema de funcionamento para aplicação do método de ultrassom.



Fonte: Adaptado de PERLIN et al. (2011).

Evangelista (2002) apresenta algumas vantagens na utilização desse método para avaliação do concreto, uma delas é referente ao equipamento utilizado (será apresentado no capítulo Materiais e Métodos) que, além de ter um custo não muito elevado, também é de fácil operação.

Como é visto em IAEA (2002), existem algumas aplicações da medição da velocidade de pulsos ultrassônicos que passam pelo concreto, elas são:

- Determinação da uniformidade do concreto;

- Medição de mudanças que ocorrem com o tempo nas propriedades do concreto;
- Correlação da velocidade e resistência do pulso como uma medida da qualidade do concreto;
- Determinação do módulo de elasticidade e relação dinâmica de Poisson do concreto.

Para realizar o ensaio de tomografia ultrassônica, são necessários o equipamento de ultrassom propriamente dito e os transdutores. Os transdutores são emissores e receptores de ondas que se propagam no meio em que está sendo inspecionado. Segundo Bungey, Stephen e Grantham (2006), o equipamento do ensaio deve fornecer um meio de gerar um pulso, transmiti-lo ao concreto, receber e amplificar o pulso, medir e exibir o tempo gasto.

Figura 3. Equipamento de ultrassom USLab.



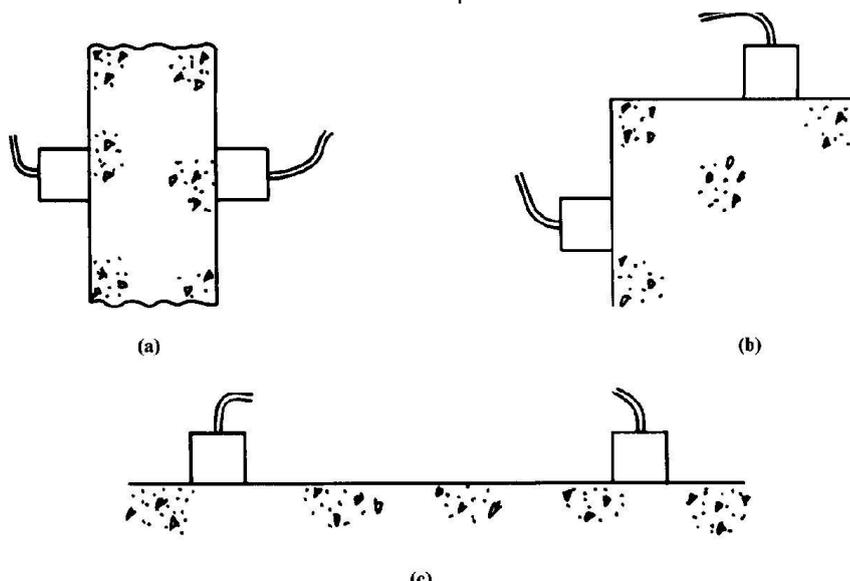
Fonte: CERRI (2010)

O USLab (Figura 3) consiste em um equipamento desenvolvido em pesquisa da Agricef Soluções Tecnológicas Inovadoras em conjunto com a Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Esse equipamento se mostrou adequado para avaliação de concreto convencional e não convencional (quando os agregados são substituídos por outros materiais), tendo sido concluído que suas características permitem realizar com êxito a inspeção e classificação do concreto (CERRI, 2010).

2.1.5 Métodos de Transmissão

De acordo com Bungey, Stephen e Grantham (2006), o equipamento do ensaio de ultrassom utilizado deve inicialmente gerar um pulso eletrônico e, através do transdutor emissor, transformá-lo em rajadas de energia mecânica, que se propagam até o transdutor receptor onde a energia mecânica é convertida novamente em pulso eletrônico. Os transdutores devem ter um posicionamento adequado e uma distância conhecida. Existem três formas de posicionar os transdutores na superfície do material, como é apresentado na Figura 4:

Figura 4. Métodos de Transmissão. Posicionamento dos transdutores. **a** | Transmissão Direta. **b** | Transmissão Semidireta. **c** | Transmissão Indireta.



Fonte: BUNGEY; STEPHEN & GRANTHAM (2006).

Ainda de acordo com Bungey, Stephen e Grantham (2006), são dadas as seguintes explicações para cada método:

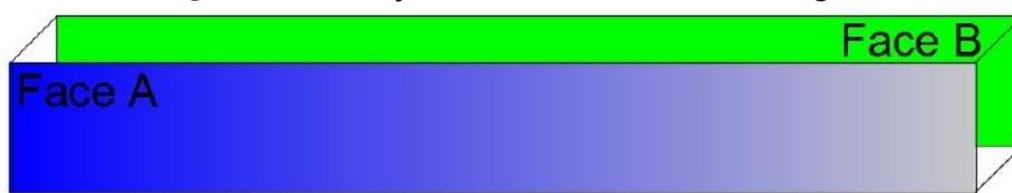
- Transmissão Direta: possui caminho bem definido e é o método mais garantido para a medição do tempo do trânsito do pulso, já que com esse arranjo a energia máxima do pulso é transmitida e recebida;
- Transmissão Semidireta: no método de transmissão semidireta, o comprimento do caminho não é tão bem definido devido ao tamanho finito dos transdutores. Pode ser satisfatório se o ângulo e a distância dos transdutores não forem muito

grandes, caso ao contrário, a sensibilidade se torna menor, já que é possível que nenhum sinal seja claro devido à atenuação do pulso;

- Transmissão Indireta: esse método é o que possui menor sensibilidade, visto que a amplitude do sinal recebido pode ser menor do que 3% comparado com a transmissão direta. É recomendado para detectar patologias na superfície do corpo, dado que a velocidade do pulso irá ser predominantemente influenciadas pelas zonas superficiais do concreto.

A medições de VPU consideradas nesta monografia foram obtidas por meio do método de transmissão indireta nas faces A representadas na Figura 5, das vigas avaliadas.

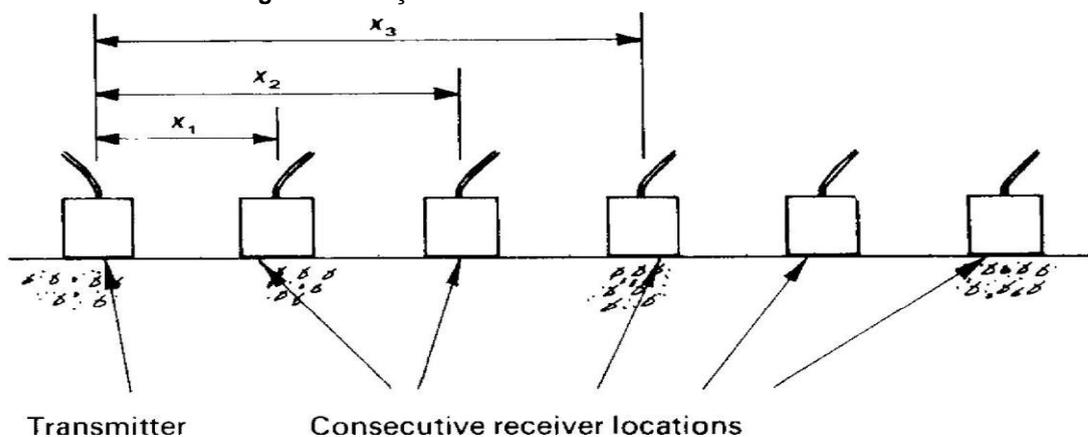
Figura 5. Identificação das faces laterais A e B da viga.



FONTE: BRIONES-ROCHA (2017).

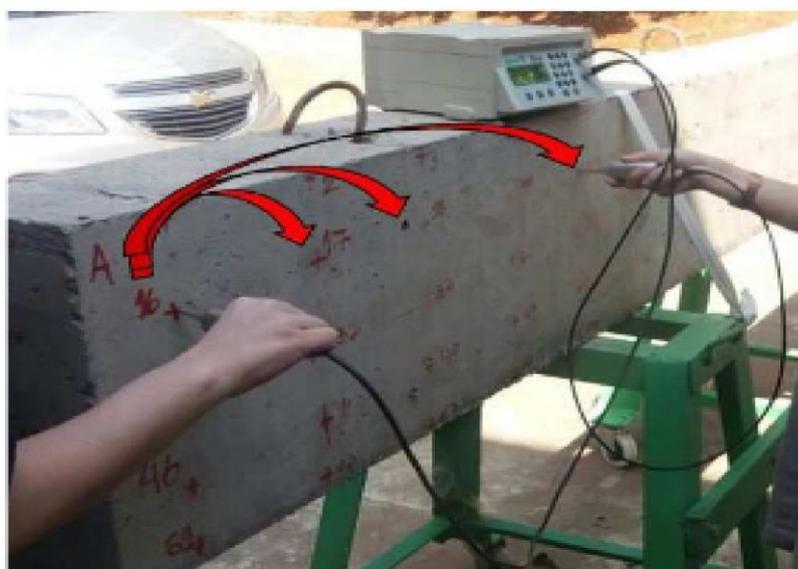
Com a transmissão indireta, em razão do tamanho significativo da área de contato entre os transdutores e o concreto, existe uma incerteza quanto ao comprimento da trajetória do pulso (IAEA, 2002). Segundo Bungey, Stephen e Grantham (2006), para esse método de transmissão, é necessário um procedimento especial, devido ao problema na falta de precisão. Esse procedimento é baseado em uma sequência de leituras, com o transdutor emissor fixo e o transdutor receptor em uma série de pontos incrementais ao decorrer da linha radial escolhida. Essa disposição pode ser vista na Figura 6, que retrata um modelo das posições dos transdutores ao decorrer da linha radial, e na Figura 7, que mostra o ensaio com transmissão indireta realizado por Briones-Rocha et al. (2017).

Figura 6. Posição dos transdutores no método indireto.



Fonte: BUNGEY, STEPHEN & GRANTHAM (2006)

Figura 7. Realização de múltiplas medições indiretas.



Fonte: BRIONES-ROCHA et al. (2017)

2.3 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

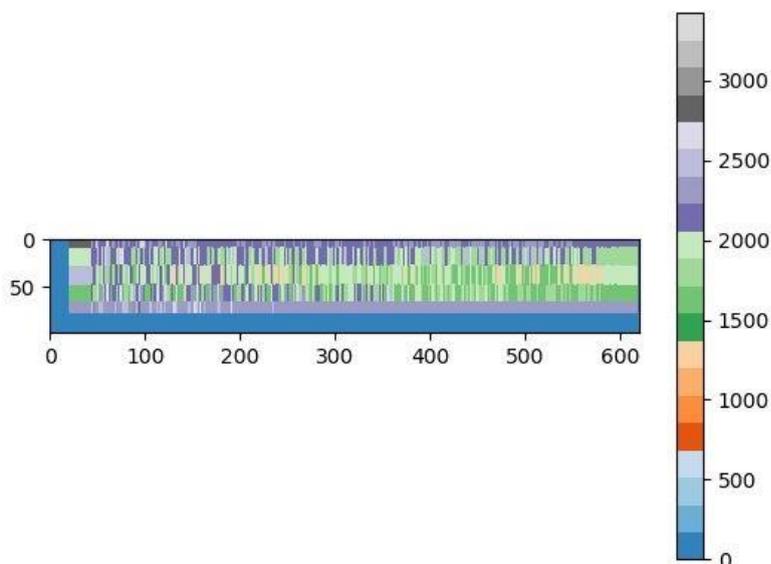
De acordo com Iescheck et al. (2008), a maioria dos fenômenos naturais possuem propriedades que variam em todas as dimensões do espaço. Geralmente, informações sobre essas propriedades são adquiridas de maneira discretas, a partir de um número limitado de medidas pontuais. Os métodos matemáticos de interpolação podem estender por toda a região os dados resultantes dessas medições.

A interpolação é, basicamente, um procedimento de estimação que utiliza dados conhecidos para estimar valores em pontos desconhecidos. Os métodos de interpolação no contexto deste trabalho têm como finalidade estimar os valores de velocidade de pulso ultrassônico em pontos desconhecidos na viga de concreto a partir dos pontos conhecidos.

Gomes e Gonçalves (2018) trabalharam com três métodos para interpolar as medidas de VPU de pontos desconhecidos durante o ensaio de ultrassom no concreto, eles são: Interpolação por Vizinhos mais próximos, Inverso da Potência da Distância e Inverso da Potência da Distância Considerando Pontos Mais Próximos.

A Interpolação por Vizinhos Mais Próximos, conforme Varella (2014), é o interpolador mais simples, dado que ele apenas utiliza o valor do ponto mais próximo para estimar o valor interpolado. Esse método se mostrou ineficaz para gerar uma representação dos vazios de concretagem durante os experimentos, logo, ele não fará parte dos experimentos deste trabalho. Essa ineficácia pode ser verificada pela Figura 8 gerada por esse método, que não representa nenhuma característica da Viga VC.

Figura 8. Imagem gerada através da Interpolação por vizinhos.



Fonte: GOMES, GONÇALVES (2018)

2.3.1 Inverso da Potência da Distância

O método do Inverso da Potência da Distância, do inglês *Inverse Distance Weighting* (IDW), aplica o modelo estatístico denominado “inverso das distâncias”, fundamentado na dependência espacial, que diz que quanto mais próximo um ponto estiver de outro, maior será a correlação entre seus valores. Assim sendo, é atribuído para as observações mais próximas do que para as mais distantes. (VARELLA, 2014)

Shepard (1968) define para esse tipo de interpolação o seguinte método:

$$F(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k(x, y) f^k}{\sum_{k=1}^N w_k(x, y)} \quad (3)$$

Em que $w_k(x, y) = d_k^{-\mu}$, e tipicamente $\mu = 2$, embora outros valores possam ser usados, μ poderia ser substituído por μ_k e poderia ser diferente para cada k .

2.3.2 Inverso da Potência da Distância Considerando Pontos Mais Próximos

De acordo com Shepard (1968), esse método é um aperfeiçoamento do anterior, e possui uma economia computacional significativa, levando em consideração que a função da potência da distância considera que apenas os dados próximos aos pontos são significativos no cálculo de qualquer valor interpolado.

2.4 LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy* atualmente é um elemento fundamental em diversos sistemas e contam que ela foi incluída nos meios científicos em 1965 por meio do artigo chamado “*Fuzzy Sets de Asker Zadeh*”, publicado no *Journal Information and Control* (CHENCI; RIGNEL & LUCAS, 2011).

Zadeh (1965) apresenta a dificuldade de agrupar em classes os objetos do mundo real, devido à falta de critérios precisos para realizar tal associação. Ele exemplifica essa questão com classes que não possuem um senso matemático, como determinação de uma classe de homens altos (em qual altura um homem deixaria o grupo de homens de estatura baixa para alta?) ou a classe de mulheres bonitas. A

partir desses questionamentos, o artigo desenvolve o que então é uma nova proposta de determinar e expressar essas classes, os Conjuntos Nebulosos (*Fuzzy Sets*).

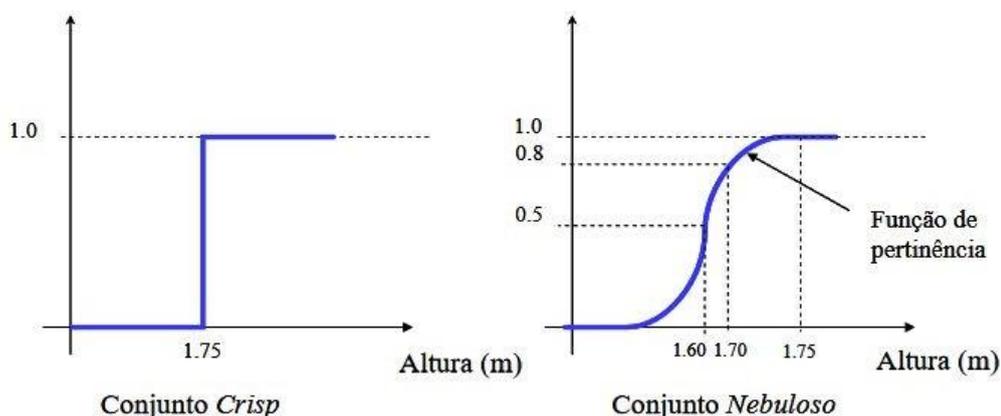
A lógica *Fuzzy* (Lógica Nebulosa, LN) possibilita expressar conhecimento em forma de regra que se assemelha com a linguagem natural, diferentemente da lógica clássica que possui apenas dois estados, falsidade ou verdadeiro (0 ou 1), ela pode assumir valores de todo o intervalo entre 0 e 1, assim, pode-se ter um estado de meia verdade, 0,5, quase verdade 0,9, ou quase falsidade 0,1 (SILVA, 2005).

2.4.1 Conjuntos Nebulosos

Sampaio et al. (2007) exemplifica a diferença de conjuntos exatos (*crisp*) e nebulosos (*fuzzy*) da seguinte forma: na lógica exata, quando é definido, o conjunto A de pessoas de estatura alta é formado por pessoas com 1,75 m.

Enquanto na lógica nebulosa esse conjunto é composto por pessoas que medem entre 1,60 e 1,75. A função de pertinência vista na Figura 9 descreve o grau de verdade entre o intervalo [0, 1], em que 0 representa a falsidade absoluta e 1 a verdade absoluta.

Figura 9. Conjuntos Nebulosos.



Fonte: SAMPAIO et al. (2007)

Ainda de acordo com Sampaio et al. (2007), as funções de pertinência de operações do conjunto nebuloso são definidas da mesma maneira que nos conjuntos convencionais. Entretanto, a teoria dos conjuntos nebulosos e LN são generalizações

dos conjuntos ordinários e da lógica clássica e proporcionam uma estrutura sistemática para representar conhecimentos qualitativos.

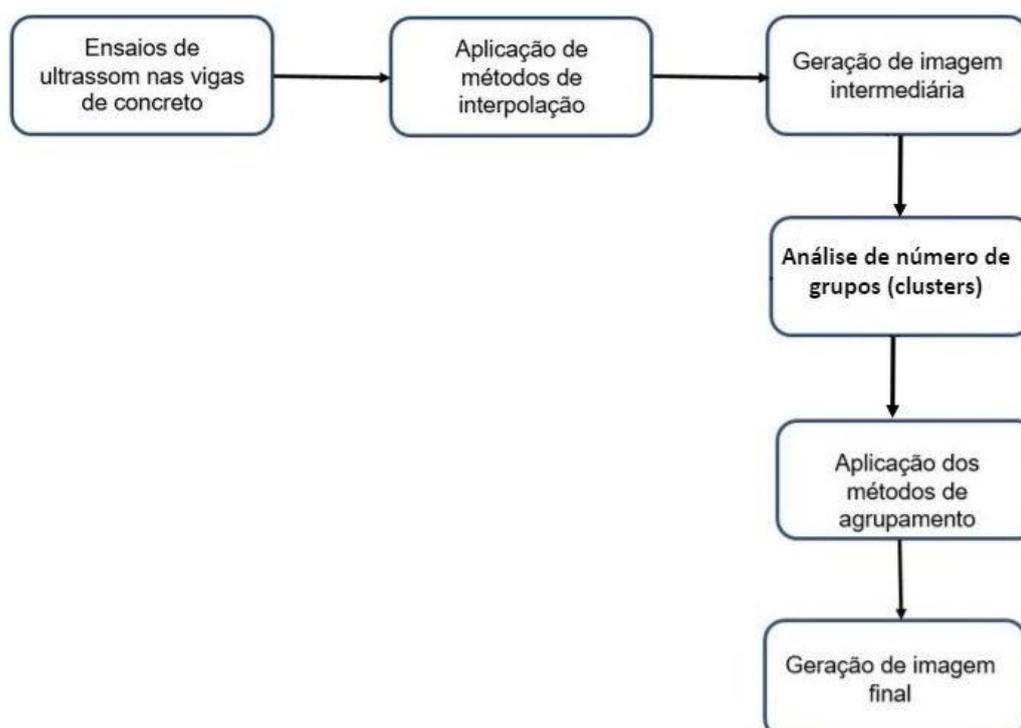
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará um esclarecimento das atividades, a descrição das vigas utilizadas nos ensaios de ultrassom, o método para geração das imagens, os parâmetros que por eles podem ser utilizados para determinar a paleta de cores e o *Dataset* construído por meio da aplicação dos métodos de interpolação Inverso da Potência da Distância e Inverso da Potência da Distância considerando pontos mais próximos. Finalmente, também serão descritas as técnicas de *clustering*.

3.1 FLUXO DE ATIVIDADES

Como visto até aqui, este estudo possui várias etapas. A Figura 10 tem como objetivo ilustrar o fluxo de atividades, considerando desde as atividades dos trabalhos anteriores até as atividades propostas neste, que são a determinação dos números de *cluster* (análise visual e método de *Elbow*) e aplicação dos algoritmos de agrupamento.

Figura 10. Fluxo de atividades do estudo.



Fonte: Autoria Própria, 2020

A primeira etapa foi realizada no estudo de Briones-Rocha (2017), que executou os ensaios de ultrassom, assim obtendo os valores de VPU. Esses valores servem de entrada para a aplicação desenvolvida por Gomes e Gonçalves (2018), que gera uma matriz de resultado com pontos intermediários aos pontos de medição, de modo que os pontos intermediários são interpolados para posteriormente gerarem um polígono representando a viga de concreto – resultados podem ser consultados no subtópico 3.4. As representações serão submetidas ao experimento usando o método de *Elbow* e análise visual para obtenção de um valor estimado de *clusters* para que, assim, sejam inicializados os experimentos com os métodos de agrupamento *K-Means* e a geração das imagens finais.

3.1 VIGAS DE CONCRETO

Briones-Rocha et al. (2017) que realizaram as medições em três tipos de vigas concretas para os ensaios, a Viga Padrão (VP), Viga com vazios de concretagem (VC) e Viga com segregação de agregados (VS).

Como verificado na seção 2.1.3, a composição do concreto é determinante para a medição da VPU pelo o ensaio de tomografia ultrassônica. A Tabela 2 apresenta os materiais manipulados na concretagem das vigas.

Tabela 2. Componentes do concreto (VC).

Material	Tipologia	kg/m³
Cimento	CPII E 40 RS	284
Agregado grauído	Basalto (\emptyset máx 19.0 mm)	993
Agregado miúdo	Areia de quartzo (\emptyset máx 1,2 mm)	720
Agregado miúdo	Areia artificial (\emptyset máx 4,8 mm)	180
Aditivo	Plastificante Polifuncional	1,73
Relação a/c	0,64	
Abatimento (Slump Test)	110 mm	

Fonte: BRIONES-ROCHA (2017)

Para execução do experimento, as vigas foram concretadas em concreto armado com as seguintes dimensões:

- Largura: 0,20 m;
- Altura: 0,40 m;
- Comprimento: 3,00 m.

As vigas e suas dimensões podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11. Vigas concretadas utilizadas no estudo – Viga Padrão (VP), Viga segregação (VS) e Viga com vazios de concretagem (VC), armazenadas em área externa.

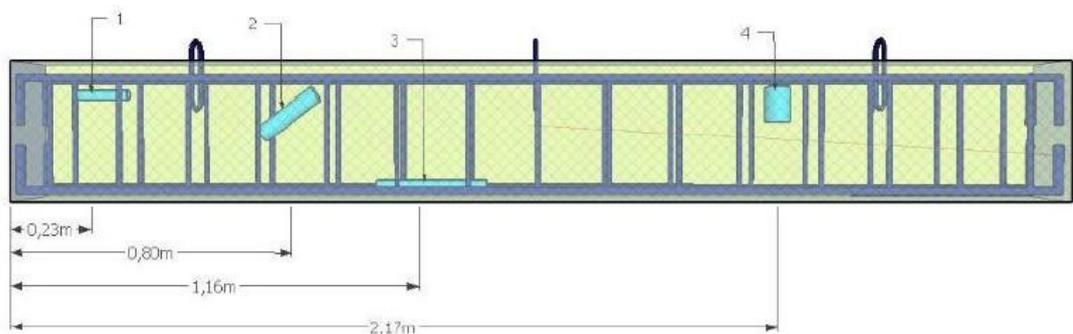


Fonte: BRIONES-ROCHA et al. (2017)

Nos experimentos de interpolação executados por Gomes e Gonçalves (2018), foram considerados apenas dados da viga com vazios de concretagem (VC). No atual trabalho também será considerada a Viga Padrão (VP), que não possui nenhuma patologia, para que, após os experimentos com algoritmos de agrupamento, os resultados possam ser comparados. Essa comparação tem como objetivo determinar se os procedimentos realizados servem, de alguma forma, para representar a patologia de vazio de concretagem.

Durante a concretagem da VC, foram posicionados 4 tubos de PVC a fim de simular uma das patologias mais comuns, o vazio de concretagem. Esses tubos estão dispostos conforme a Figura 12, e suas dimensões são apresentadas na Tabela 3.

Figura 12. Disposição dos tubos dentro da viga (VC).



Fonte BRIONES-ROCHA et al. (2017)

Tabela 3. Dimensões dos tubos.

Tubo	Diâmetro	Comprimento
1	75 mm	10 cm
2	25 mm	30 cm
3	50 mm	20 cm
4	25 mm	15 cm

Fonte: BRIONES-ROCHA et al. (2017)

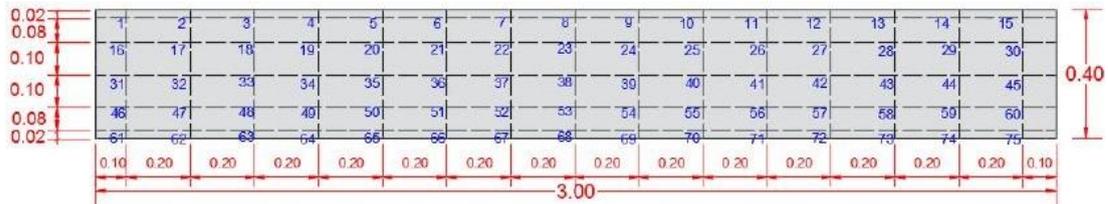
3.1.1 Pontos de Medição

Conforme verificado no tópico 2.1.2, para se obter o valor da VPU é preciso conhecer a distância que o pulso percorreu e o tempo que ele levou; desse modo, foi necessário definir uma malha (matriz) em que cada coordenada existente se tornasse um ponto de medição, neste tópico são apresentadas essas malhas definidas por Briones-Rocha et al. (2017).

A seguir, ambas as vigas terão suas respectivas malhas e mostra-se como foram determinadas levando em consideração suas particularidades:

- Pontos de Medição VP: Briones-Rocha et al. (2017) relatam que a malha para a VP foi demarcada de acordo com a literatura e a precisão necessária para a pesquisa. A Figura 13 representa as linhas de leituras de ensaio de ultrassom (totalizando 5 linhas) e as distâncias entre os eixos X e Y, respectivamente, 0,20 m e 0,10 m, respeitando-se uma margem de 0,02 m nas arestas da viga, a fim de permitir o posicionamento dos transdutores.

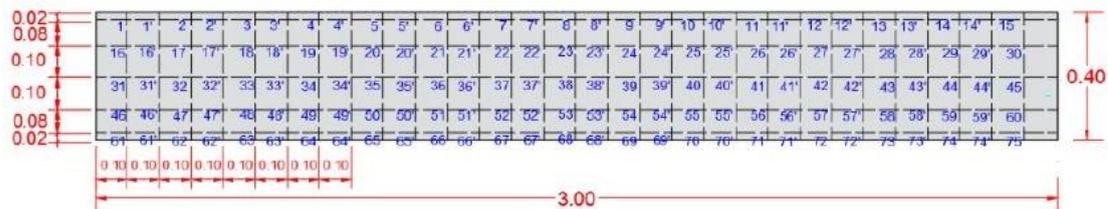
Figura 13. Representação gráfica da malha demarcada nas faces laterais (A e B) da VP.



Fonte: BRIONES-ROCHA et al. (2017)

- Pontos de Medição VC: A Figura 14 demonstra graficamente como a foi demarcada nas faces da VC, as distâncias entre os pontos são iguais à viga VP no eixo Y, sendo alteradas para 0,10 m as distâncias de leituras no eixo X. Essa alteração foi necessária devido às dimensões dos vazios implantados na viga, como pôde ser visto no tópico 2.2.

Figura 14. Representação gráfica da malha demarcada nas faces laterais (A e B) da VC.



Fonte: BRIONES-ROCHA et al. (2017)

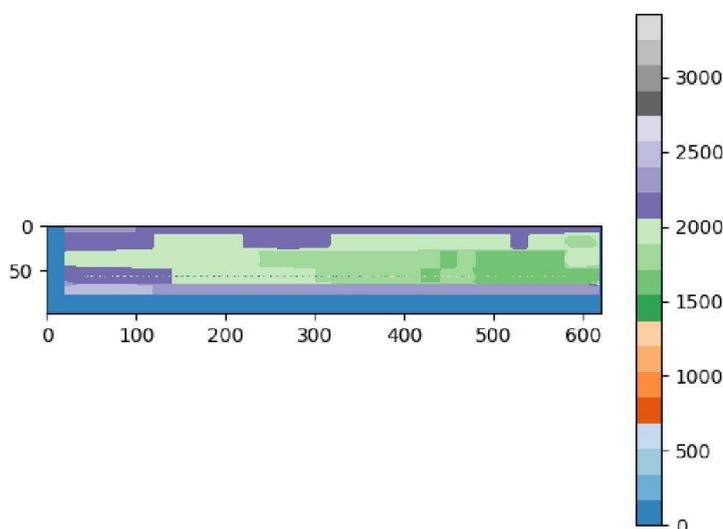
3.2 GERAÇÃO DE IMAGENS

Neste subtópico, serão apresentados os padrões de paletas que a biblioteca de plotagem utilizada oferece, bem como o teste realizado por Gonçalves (2018) para verificação de qual paleta seria utilizada.

Um dos parâmetros que pode ser definido por meio da biblioteca matplotlib, utilizada para plotagem das imagens, é a escolha da paleta de cores. Existe uma variedade de paletas, as quais são divididas nos seguintes padrões: *Perceptually Uniform Sequential*, *Sequential*, *Sequential*, *Diverging*, e *Qualitative*, *Miscellaneous*.

Gonçalves (2018) testou o uso de várias paletas de cores diferentes e a que obteve o melhor resultado foi 'tab20c', apresentada na Figura 15.

Figura 15. Paleta "tab20c", padrão Qualitative.



Fonte: GONÇALVES (2018).

A paleta 'tab20c' do padrão *Qualitative* foi escolhida pois apresentou com melhor nitidez as patologias presentes na viga e suas velocidades. Ela, ao contrário das outras, não possui um espectro de cores tão amplo, permitindo uma melhor distinção dos dados apresentados.

3.3 DATASET

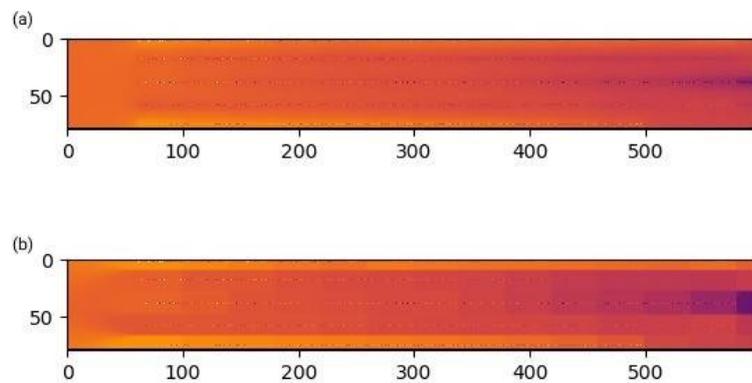
As imagens apresentadas neste tópico são produto da utilização da aplicação desenvolvida por Gonçalves (2018) com uma configuração de parâmetros diferente da utilizada em sua pesquisa, o que se deve à particularidade dos experimentos realizados nesta monografia. Diferentemente de Gonçalves (2018), para este trabalho, na etapa de interpolação, é desejado que a paleta de cores tenha mais sutileza em suas transições, deixando de ter cores tão 'sólidas' para que, no momento em que forem realizados os experimentos com os algoritmos de agrupamento, seja considerado uma quantidade maior de valores de VPU representados na imagem. A paleta escolhida para este trabalho foi a 'inferno' de padrão *Diverging*, e seu uso será apresentado nos subtópicos a seguir. O *dataset* será dividido conforme o método de interpolação utilizado.

Os próximos subtópicos possuem as imagens intermediárias divididas por método de interpolação e a viga a ser representada.

3.3.1 Inverso da Potência da Distância

Na Figura 16, as imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente (a) $p=2$, (b) $p=16$ na VP:

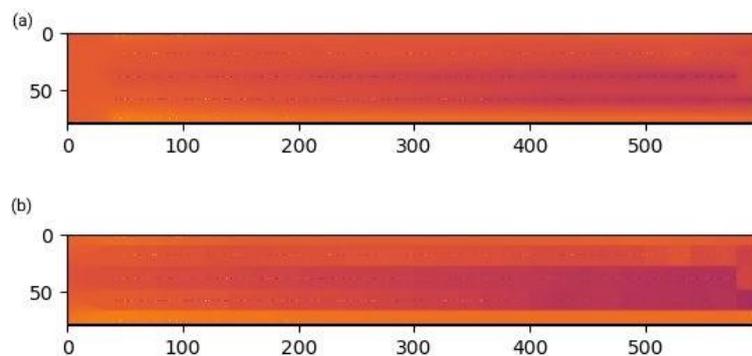
Figura 16. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente $a \mid 2$ e $b \mid 16$ na Viga Padrão (VP).



Fonte: Autoria Própria, 2020

A seguir, as imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente (a) $p=2$, (b) $p=16$ na VC (Figura 17):

Figura 17. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente $a \mid 2$ e $b \mid 16$ na Viga Vazios de Concretagem (VC).



Fonte: Autoria Própria, 2020

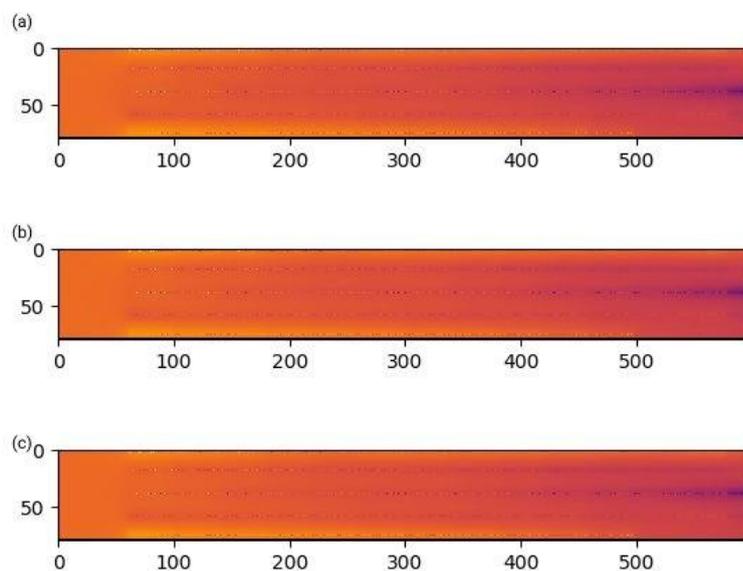
3.3.2 Inverso da Potência da Distância considerando Pontos mais Próximos

Para a geração das imagens usando esse método, foram considerados percentualmente 10%, 30% e 50% dos pontos mais próximos ao ponto a ser estimado, assim, quanto menor o número de pontos mais próximos utilizados, maior o peso dos mesmos sobre a estimativa.

3.3.3 Inverso da Potência da Distância considerando pontos mais próximos para $p=2$

A seguir, as imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente $p=2$ e considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% dos pontos mais próximos na VP (Figura 18):

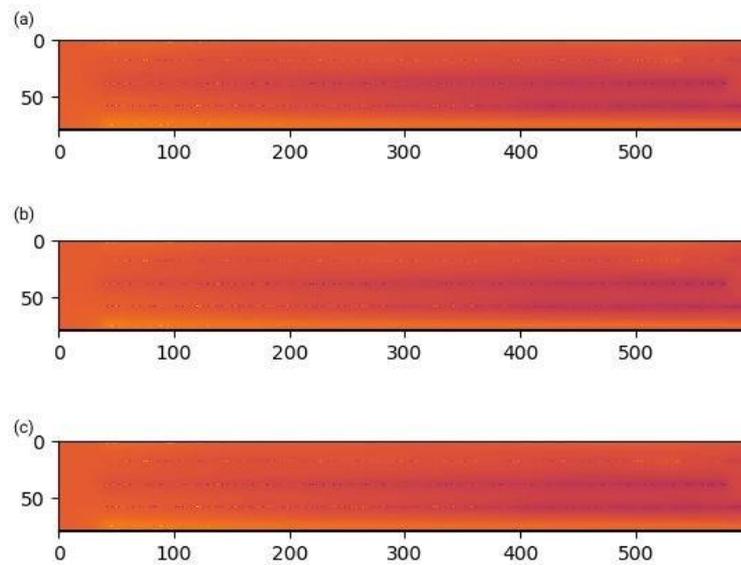
Figura 18. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 2 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Padrão (VP).



Fonte: Autoria Própria, 2020

As imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente $p=2$ e considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% dos pontos mais próximos na VC (Figura 19):

Figura 19. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 2 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Vazios de Concretagem (VC).

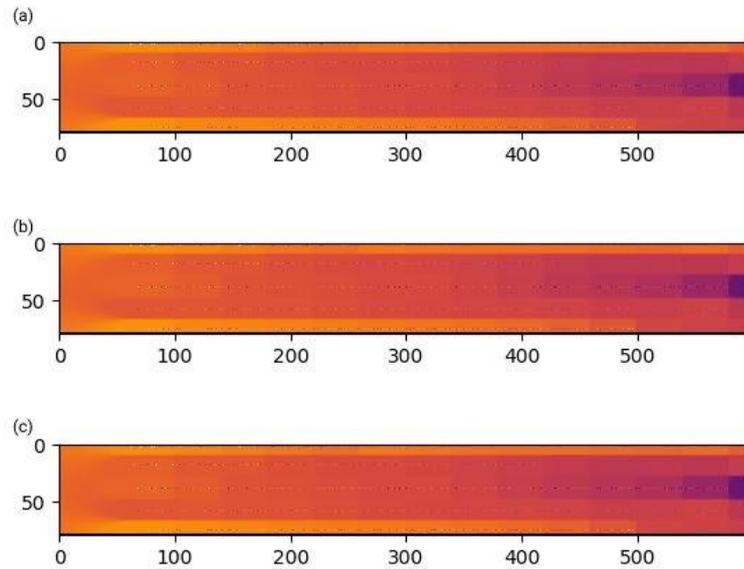


Fonte: Autoria Própria, 2020

3.3.4 Inverso da Potência da Distância considerando pontos mais próximos para $p=16$

A seguir, as imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente $p=16$ e considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% dos pontos mais próximos VP (Figura 20):

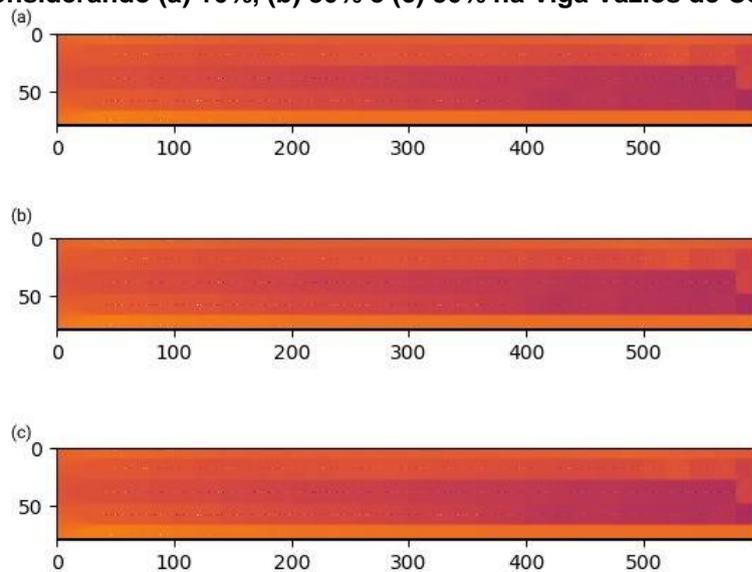
Figura 20. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 16 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Padrão (VP).



Fonte: Autoria Própria, 2020

A seguir, as imagens geradas usando o método Inverso da Potência da Distância com expoente $p=16$ e considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% dos pontos mais próximos VC (Figura 21):

Figura 21. Imagens geradas através do método Inverso da Potência da Distância utilizando expoente 16 considerando (a) 10%, (b) 30% e (c) 50% na Viga Vazios de Concretagem (VC).



Fonte: Autoria Própria, 2020

3.4 ALGORITMOS DE AGRUPAMENTO

Este tópico tem como objetivo apresentar os algoritmos de agrupamento, o método para o cálculo de distância (dissimilaridade) escolhido, e a análise para determinação do número inicial de K *clusters*.

De acordo com Linden (2009), a “análise de agrupamento, ou clustering, é o nome dado para o grupo de técnicas computacionais cujo propósito consiste em separar objetos em grupos, baseando-se nas características que estes objetos possuem” (p. 18).

A necessidade de classificar elementos em grupos por suas características está presente em várias áreas do conhecimento, como nas Ciências Biológicas, Ciências Sociais e Comportamentais, Ciências da Terra, Medicina, Informática, entre outras (DONI, 2004). Neste trabalho, a análise de agrupamento é referente aos pontos (pixels) das imagens tomográficas após utilização de técnicas de interpolação, com o objetivo de tentar identificar e deixar mais explícitas as patologias de vazão de concretagem.

3.4.1 Medida de Dissimilaridade

Existem vários métodos conhecidos empregados na obtenção de uma medida de dissimilaridade, como é visto em Braun e Kozakevicius (2014). As mais comumente empregadas em técnicas de agrupamento são: Distância Euclidiana, Cityblock, Chebyshev, Canberra, Bray-Curtis, e Mahalanobis.

Neste trabalho, a métrica de dissimilaridade a ser empregada será a Distância Euclidiana, que será utilizada tanto no algoritmo *K-Means* como no *Fuzzy-C-Means*. A distância euclidiana pode ser definida, de acordo com Yanling (2018), como:

$$dis(x_i, x_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2} \quad (4)$$

Em que $1 \leq i, j \leq n$, n é o número de amostras de dados.

3.4.2 K-Means

O *K-Means* é um dos mais simples algoritmos de aprendizado não supervisionado que soluciona o conhecido problema de *clustering*. Ele realiza a divisão de objetos em *clusters* que são semelhantes entre si e diferentes dos objetos pertencentes a outro *cluster*. O procedimento segue uma maneira simples e fácil de classificar um determinado conjunto de dados por meio de um determinado número de *clusters* (suponha k *clusters*) fixados a priori.

A Tabela 4 traz a adaptação do pseudocódigo do algoritmo *K-Means* de Coletta (2011).

Tabela 4. Algoritmo 1 - Pseudocódigo Algoritmo K-Means

Passos	Descrição
1.	Entre com k sendo o número de grupos;
2.	Selecione os centroides dos grupos iniciais (v_1, v_2, \dots, v_k) ;
3.	Calcule a distância $\ x_j - v_i\ $ entre elementos e os centroides;
4.	Atribua cada elemento ao grupo de centroide mais próximo;
5.	Recalcule os centroides dos grupos segundo seus elementos;
6.	Pare se o critério de convergência foi atingido ou se o número de iterações chegou ao limite. Se não, retorne ao passo 3.

Fonte: Adaptado de Colleta (2011).

3.4.3 Fuzzy-C-Means

Tronco (2015) define que o *Fuzzy-C-Means* é um algoritmo híbrido, resultante da combinação de lógica *fuzzy* com a teoria de agrupamentos de dados.

Uma vantagem dos algoritmos de agrupamento *fuzzy* é a capacidade de representar de uma maneira mais adequada a incerteza, o que é muito importante para, por exemplo, ao indicar que um indivíduo não é típico de nenhuma das classes, mas possui similaridade em maior ou menor grau com mais de uma classe (CAVALCANTI, 2009).

Com o uso do *Fuzzy-C-Means*, cada um dos grupos protótipos é computado levando-se em consideração todos os objetos e suas respectivas pertinências aos grupos. Esse algoritmo busca, por meio de um procedimento iterativo, minimizar a função objetivo nas equações (5) e (6) (COLETTA, 2011).

$$\min_{u_{ij}, v_i} J = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^k u_{ij}^m \|x_j - v_i\|^2 \quad (5)$$

$$s. a. \begin{cases} 0 \leq u_{ij} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^k u_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \\ 0 < \sum_{j=1}^N u_{ij} < N \quad \forall i \in \{1, \dots, k\} \end{cases} \quad (6)$$

Em que $x \in \mathbb{R}^d$ ($j = 1, \dots, N$) são objetos a serem agrupados em k grupos, $v_i \in \mathbb{R}^d$ ($i = 1, \dots, k$) são os protótipos dos grupos, u_{ij} simboliza a pertinência do j -ésimo objeto ao i -ésimo objeto e, por último, $m \in]1, \infty[$ é um parâmetro de ponderação que controla o quão *fuzzy* é uma partição. Geralmente, adota-se $m = 2$.

A Tabela 5 expõe a adaptação do pseudocódigo do algoritmo *Fuzzy-C-Means* de Coletta (2011), da mesma forma vista no subtópico anterior:

Tabela 5. Algoritmo 2 - Pseudocódigo Algoritmo FCM.

Passos	Descrição
1.	Entre com k sendo o número de grupos;
2.	Selecione os centroides dos grupos iniciais (v_1, v_2, \dots, v_k) ;
3.	Calcule a distância $\ x_j - v_i\ $ entre elementos e os centroides;
4.	Compute as pertinências da matriz de partição <i>fuzzy</i> ;
5.	Compute os centroides dos grupos;
6.	Pare se o critério de convergência foi atingido ou se o número de iterações chegou ao limite. Se não, retorne ao passo 3.

Fonte: Adaptado de Coletta (2011).

A seguir, as definições dos cálculos realizados nos passos 4 e 5:

4. Cálculo das pertinências da matriz de partição *fuzzy*:

$$u_{ij} = \left[\sum_{p=1}^c \left(\frac{\|x_j - v_i\|}{\|x_j - v_p\|} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (7)$$

5. Cálculo do centroide de cada classe:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^N u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^N u_{ij}^m} \quad (8)$$

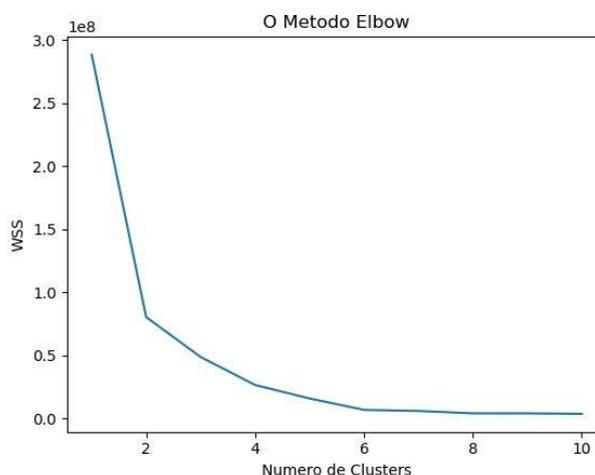
3.4.4 Método de *Elbow*

Na revisão de Kodinariya e Makwana (2013), é visto que, em diversos problemas que empregam técnicas de agrupamento, espera-se como resultado da análise o número de grupos em que os objetos serão partidos. Mas, para outras análises, o número de *clusters* (k) é importante para o seu início. A tarefa de decidir com qual quantidade de *cluster* os algoritmos devem ser inicializados exige um conhecimento especializado do domínio sobre os conjuntos de dados pressupostos. Existem muitos métodos disponíveis para estimar o número de *clusters*, como índices estatísticos, método baseado em variância, Teoria da Informação, método de ajuste de qualidade etc.

Devido às possíveis dissimilaridades mínimas, pouco perceptíveis visualmente nas imagens tomográficas a serem analisadas, este trabalho vai fazer o uso do método de *Elbow* para inicializar os algoritmos com uma entrada de *clusters* (k) iniciais de uma forma mais adequada, diminuindo a chance de conduzir o estudo com um número de grupos incongruente que afete negativamente a geração da imagem produto do tratamento.

A Figura 22 exemplifica um gráfico produzido pelo Método de *Elbow*, que demonstra a variância dos dados até 10 *clusters*. É possível observar que, nesse caso, essa variância passa a se estabilizar a partir de 4 *clusters*.

Figura 22. Exemplo de gráfico produto do método de *Elbow*.



Fonte: Autoria Própria, 2020

WSS: do inglês *Within-Cluster-Sum-of-Squares*, ou soma de quadrados dos *clusters*.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados e a descrição de cada passo.

4.1 EXPERIMENTOS

Essa seção exhibe os experimentos e a preparação de cada um deles.

4.1.1 Análise do *Dataset*

Para iniciar os experimentos, inicialmente foi realizada uma seleção das imagens do *Dataset* com maior potencial de representar a patologia de vazios de concretagem após utilização dos algoritmos de agrupamento. A seleção foi baseada na comparação dos resultados dos métodos de interpolação levando em consideração conclusões exibidas em trabalhos anteriores.

Gonçalves (2018) concluiu que ambos os métodos (Inverso da Potência e Inverso da Potência considerando vizinhos mais próximos) produzem imagens mais definidas quando o expoente $p \geq 16$, mas, ainda assim, apresentam anomalias de velocidades mais altas do que em medições realizadas em rotas que não possuem vazios de concretagem, essas anomalias são explicadas pelo posicionamento dos tubos de PVC próximos à superfície do concreto onde velocidades mais altas foram encontradas, logo, as medições dos pontos referentes às patologias sofreram influência dessas medições na estimativa de valores desconhecidos. As imagens que foram submetidas aos algoritmos de agrupamento são as aquelas possuem o expoente $p = 16$, para os dois métodos de interpolação.

4.1.2 Experimento 1 - Análise de Número de *Clusters*

O primeiro passo para esta análise consiste na utilização do Método de *Elbow* para obtenção do número de *clusters* com que os algoritmos de agrupamento serão

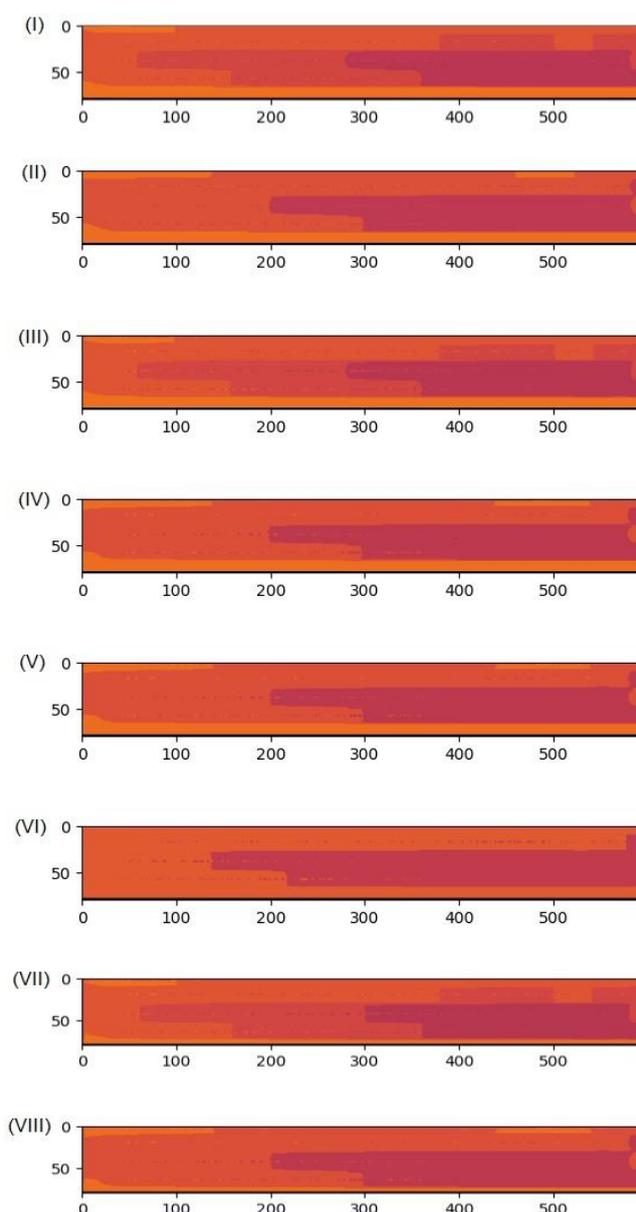
inicializados. Este experimento foi realizado para todas as imagens produzidas pelos métodos de interpolação vistos anteriormente.

O Método de *Elbow* acaba convergindo sempre em quatro *clusters* e, mesmo que visualmente a imagem aparente ter mais grupos na análise visual, optou-se por um número reduzido de três *clusters* justamente para verificar o comportamento dos algoritmos de agrupamento que, dessa forma, serão forçados a dividir os conjuntos de cores de modo a tentar pormenorizar os vazios de concretagem. Para termos de comparação, os algoritmos de agrupamento também foram inicializados com um número de *clusters* escolhido após uma análise visual.

4.1.3 Experimento 2 - Aplicação da Técnica K-Means

Neste subtópico, serão apresentados os resultados atingidos com aplicação do algoritmo de agrupamento K-Means, com suas imagens separadas pelas quantidades de *clusters* determinadas pelos métodos de *Elbow* e Análise Visual e métodos de interpolação a seguir (Figura 23):

Figura 23. K-Means e interpolação pelo Inverso da Potência da Distância. (I) considerando $K=4$; (II) considerando $K=3$; (III) considerando 10% dos pontos mais próximos e $K=4$; (IV) considerando 10% dos pontos mais próximos e $K=3$; (V) considerando 30% dos pontos mais próximos e $K=4$; (VI) considerando 30% dos pontos mais próximos e $K=3$; (VII) considerando 50% dos pontos mais próximos e $K=4$; (VIII) considerando 50% dos pontos mais próximos e $K=4$.



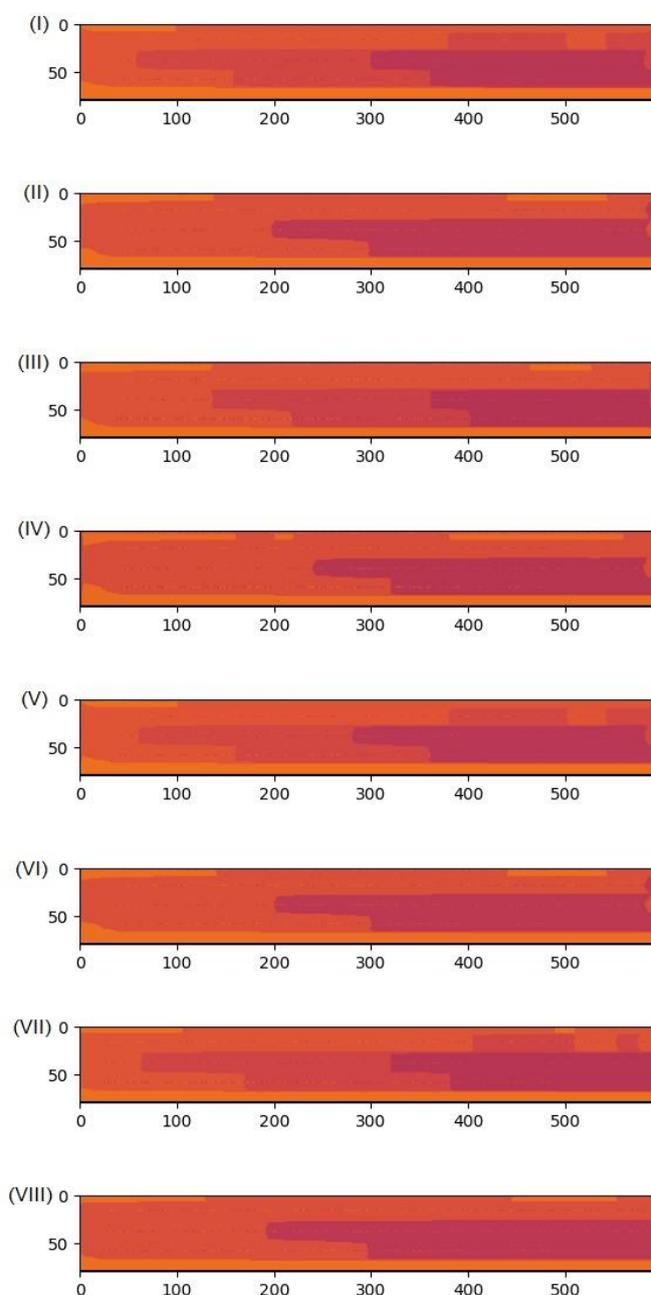
Fonte: Autoria Própria, 2020

4.1.4 Experimento 3 - Fuzzy-C-Means

Neste subtópico, serão apresentados os resultados atingidos com aplicação do algoritmo de agrupamento *Fuzzy-C-Means*, esses resultados terão suas imagens

separadas pelas quantidades de *clusters* determinadas pelos métodos de *Elbow* e Análise Visual e métodos de interpolação a seguir (Figura 24):

Figura 24. Fuzzy-C-Means e interpolação pelo Inverso da Potência da Distância. (I) considerando $K=4$; (II) considerando $K=3$; (III) considerando 10% dos pontos mais próximos e $K=4$; (IV) considerando 10% dos pontos mais próximos e $K=3$; (V) considerando 30% dos pontos mais próximos e $K=4$; (VI) considerando 30% dos pontos mais próximos e $K=3$; (VII) considerando 50% dos pontos mais próximos e $K=4$; (VIII) considerando 50% dos pontos mais próximos e $K=4$.

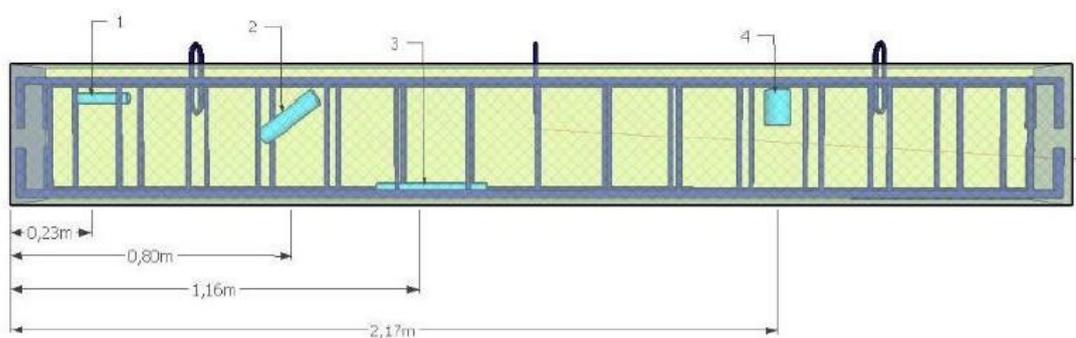


Fonte: Autoria Própria, 2020

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE AGRUPAMENTO

Este subtópico foi reservado para comparar a utilização dos algoritmos vistos nesta monografia, bem como para discutir os seus resultados. Para esta atividade, é importante trazer a Figura 12 (Figura 25), que ilustra o posicionamento dos canos de PVC na VC que simula os vazios de concretagem.

Figura 25. Disposição dos tubos dentro da viga (VC).



Fonte BRIONES-ROCHA et al. (2017).

A partir da comparação dos resultados com a Figura 12 (Figura 25), pode-se compreender o quão efetivas foram as aplicações dos algoritmos de agrupamento juntamente com os algoritmos de interpolação para gerar imagens digitais tomográficas.

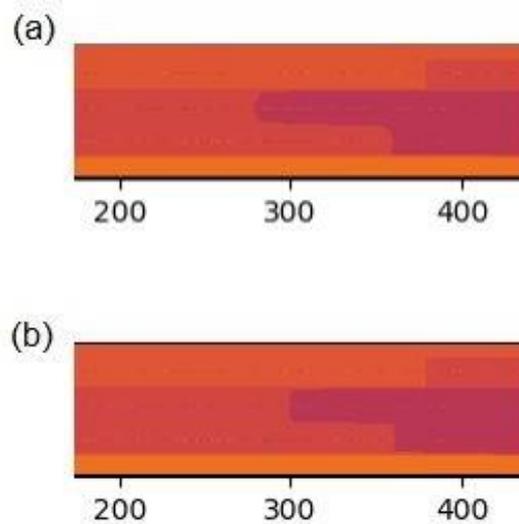
De acordo com as Figuras 23 e 25, observa-se que a utilização do método Inverso da Potência da Distância gerou imagens muito similares após serem tratadas pelo *K-Means* e *Fuzzy-C-Means*.

Esses resultados só não são idênticos visualmente pois, conforme a Figura 25, consegue-se notar um leve adiantamento e 'arredondamento' das bordas dos agrupamentos localizados na parte central das imagens produzidas pelo método *K-Means*. Contudo, esses detalhes não significam uma melhor ou pior representação por parte de um dos algoritmos de agrupamento na representação da VC, basicamente, ambos não representam os vazios de concretagem se confrontados com a Figura 12 (Figura 25).

Observando-se os resultados alcançados pelos algoritmos de agrupamento a partir do método Inverso da Potência Considerando Pontos Mais Próximos, pode-se

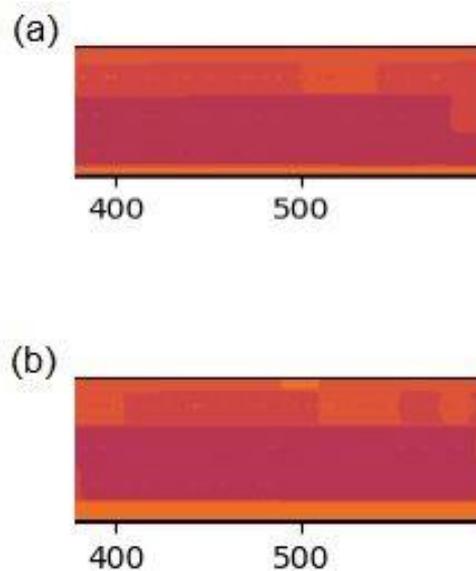
ter conclusões bem aproximadas do que com o método Inverso da Potência da Distância. Como a Figura 26 exibe, a única diferença notável é o modo como alguns grupos são separados do lado direito da imagem. Mas, novamente, isso não pode ser entendido como um desempenho melhor ou pior por parte dos algoritmos de agrupamentos avaliados nesta monografia.

Figura 26. IDW após aplicação dos algoritmos (a) K-Means e (b) Fuzzy-C-Means.



Fonte: Autoria Própria, 2020

Figura 27. IDWNP após aplicação dos algoritmos (a) K-Means e (b) Fuzzy-C-Means.



Fonte: Autoria Própria, 2020

Com base nos resultados exibidos, é muito difícil apontar qual algoritmo é melhor no contexto deste estudo. Talvez se as anomalias não fossem tão presentes após submissão aos métodos de Interpolação, as imagens produzidas pelas técnicas de Agrupamento poderiam ser menos parecidas e mais singulares. Isso poderia facilitar a determinação de qual técnica teria um desempenho melhor em relação a outra.

Ambos algoritmos de agrupamento (Figuras 26 e 27) contribuíram de certo modo na análise das imagens, diminuindo a quantidade de agrupamentos das imagens intermediárias que não representavam nenhuma característica da viga. A diminuição desses grupos poderia ser ainda maior se a estimativa de velocidades de pontos desconhecidos tivesse apresentado resultados melhores.

As anomalias são a maior problemática deste estudo e do seu antecessor, deixando a observação das patologias pouco visíveis e até mesmo irreconhecíveis. Inclusive, elas estão presentes nos resultados de Interpolação (em ambos os métodos) com dados da viga VP, em que se esperava a apresentação de uma imagem com uma menor quantidade de cores, mais uniforme, já que essa não possui nenhuma patologia, e a variação de velocidades é menor, o que não pode ser constatado nas Figuras 16 e 20.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, primeiramente pode-se concluir que, no escopo deste trabalho, o método de *Elbow* tendo como resultado $K=4$ conseguiu auxiliar pouco os algoritmos de agrupamento a desconsiderar as anomalias. Isso ocorre porque, mesmo com o espectro de cores maior da paleta 'inferno' em relação à 'tab20c' (utilizada no trabalho anterior), as anomalias ainda são muito significativas no momento do agrupamento.

De acordo com Gonçalves (2018), as anomalias têm sua origem pela consideração de valores de altas velocidades resultantes da presença dos vazios de concretagem próximos à superfície. Porém, é possível concluir que foram agravadas também pelo método de Transmissão Indireto que, em concordância com a literatura, já foi constatado que é o método com maior imprecisão. Junto a esses dois fatores há a qualidade dos métodos de interpolação considerados, que podem não ter sido os melhores para gerar imagens intermediárias para utilização dos algoritmos *K-Means* e *Fuzzy-C-Means*.

Acerca da proposta deste trabalho de melhorar a visualização das patologias de vazio de concretagem, as técnicas de agrupamento não tiveram resultados muito destoantes, tal qual pode ser observado comparando-se as Figuras 30 e 34, uma vez que ambas consideraram praticamente da mesma forma as anomalias. Não foi possível resolver o problema e seus resultados possuem uma representatividade das vigas de forma não muito diferente das vistas no estudo anterior (levando-se em consideração o uso de paleta de cores diferentes), que fez uso apenas dos métodos de Interpolação.

Em comparação, o *K-Means* e *Fuzzy-C-Means* não demonstraram uma diferença considerável entre seus resultados: ambos geram imagens similares. Para trabalhos futuros, é recomendada a utilização de dados de medições de velocidade obtidos por outro método de transmissão, além da utilização de outros algoritmos de Interpolação e Agrupamento, ou até mesmo outros métodos de medir a dissimilaridade incluídos nestes últimos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BORGES, V. R. P. Comparação entre as Técnicas de Agrupamento K-Means e Fuzzy C-Means para Segmentação de Imagens Coloridas. *In*: Encontro Anual de Computação, 8., 26-28 out. 2010, Catalão. **Anais [...]**. Catalão, Universidade Federal de Goiás, 2010.
- BRAUN, E, KOZAKEVICIUS, A. J. Revisitando Conjuntos E Distâncias Para Encontrar Pontos Vizinhos. *In*: Encontro Regional de Estudantes de Matemática da Região Sul, 10., 13-16 nov. 2014, Bagé. **Anais [...]**. Bagé, Fundação Universidade Federal do Pampa, 2014.
- BRIONES-ROCHA, A. I. C. et al. **Identificação de patologias em vigas de concreto armado utilizando inspeção por ultrassom**. 2017. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2017.
- BUNGEY, J. H.; STEPHEN, G. M. & GRANTHAM, M. G. **Testing of concrete in structures**. 4. ed. Londres e Nova York: Taylor & Francis, 2006.
- CERRI, D. G. P.; GRAY, G. R.; GONÇALVES, R. Equipamento de ultrassom para materiais não metálicos. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 11, n. 26, p. 11-16, 2010.
- CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G. S.; LUCAS, C. A. Uma introdução à lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2011.
- COLETTA L. F. S. **Agrupamento de dados fuzzy colaborativo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemática e Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- CONSULARO, L. A. **Técnicas de Mineração de Dados para Análise de Imagens**. 2000. Tese (Doutorado em Ciências – Física Computacional) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- COSTA, A. et al. Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. **Relatório. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos**, 2005.
- DONI, M. V. **Análise de Cluster**: Métodos Hierárquicos e de Particionamento. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas de Informação) – Faculdade de Computação e Informática, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2004.
- DUANA, Y.; LIU, Q.; XIA, S. An Improved Initialization Center K-means Clustering

Algorithm Based on Distance and Density. *In: AIP Conference Proceedings*, p. 040046, 18 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5033710>. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5033710>>. Acesso em 10 jun. 2020.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

GONÇALVES, A. **Análise de técnicas de interpolação para geração de imagens digitais tomográficas do concreto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas de Informação) – Universidade Estadual de Campinas, 2018.

IESCHECK, A. L.; SLUTER, C. R.; AYUP-ZOUAIN, R. N. Interpolação qualitativa de dados espaciais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 4, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Guidebook on nondestructive testing of concrete structures. **Training course series**, n. 17. Vienna, 18 dez. 2002.

KODINARIYA, T. M.; MAKWANA, P. R. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. **International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies**, v. 1, n. 6, p. 90-95, nov. 2013.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. **Geoscience Australia**, n. 23. 2008. 137 p.

LINDEN, R. Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, v. 4, n. 4, p. 18-36, 2009.

LORENZI, A. et al. Utilização de Ensaio não Destrutivos para Controle da Qualidade do Concreto. **Revista da ABENDI**, 56. ed., jun. 2013.

LORENZI, A.; TISBIEREK, F. T.; SILVA, L. C. P. Ultrasonic pulse velocity analysis in concrete specimens. *In: Conferencia Panamericana de END*, 4., out. 2007, Buenos Aires. **Anais [...]**. Buenos Aires, Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales, 2007.

MANTILLA, E. V. C.; AZEVEDO JR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

MENDES, J. C. **Agrupamento de dados e suas Aplicações**. 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

PEREIRA, J. A. V. **Estudo e Aplicação de Ensaio Não Destrutivos** - Líquidos penetrantes, Ultra sons, Radiografia digital - Técnica tangencial medição de espessuras. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2013.

PERLIN, L. P. **Tomografia Ultrassônica Em Concreto E Madeira: Desenvolvimento De Ferramenta Computacional**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PERLIN, L. P. **Tomografia Ultrassônica Em Concreto**: Desenvolvimento De Ferramenta Computacional. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RAMÍREZ, F. C. **Deteção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 2015. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SAMPAIO, L. M. D.; OLIVEIRA, M. J. F.; IGNACIO, A. A. V. Lógica Nebulosa: Aplicações E Tendências. *In*: Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha-SPOLM, 10., 07-08 nov. 2007, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2007.

SCIKIT-LEARN. Disponível em:
<<https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. 1968.

SHEPARD, Donald. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *In*: **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. jan. 1968. p. 517-524.

SHULL, P. J. (Ed.) **Nondestructive Evaluation**: theory, techniques, and applications. The Pennsylvania State University. 2002.

SILVA, R. A. C. Inteligência Artificial Aplicada a Ambientes de Engenharia de Software: Uma Visão Geral. **INFOCOMP Journal of Computer Science**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 27-37, dez. 2005.

SKFUZZY: 2.0 docs. Disponível em:
<<https://pythonhosted.org/scikitfuzzy/api/skfuzzy.html>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

TRONCO, T. R. **Algoritmo de Agrupamento Fuzzy C-Means para Aprendizado e Tomada de Decisão em Redes Ópticas de Próxima Geração**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

VARELLA, C. A. A. Mapeamento da variabilidade espacial.. **IT190 Princípios em Agricultura de Precisão**, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2014.

WHITEHURST, E. A. **Evaluation of concrete properties from sonic tests**. **American Concrete Institute Monograph**, v. 2, p. 27, 1966.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, jun. 1965.