



Análise da correlação entre a resistência à compressão do concreto e a velocidade do pulso ultrassônico na idade de 28 dias

Giovanna Jácome Freitas, Katylen Saldanha Guedes, Talys Augusto Castro
(gih.jacome.f20@gmail.com, katylenguedes@outlook.com, talys2612@gmail.com)

Professor orientador: Harley Francisco Viana (harley.viana@prof.una.br)
Coordenação de curso de Engenharia Civil

Resumo

O concreto devido a sua alta resistência de suportar cargas ao ser comprimido se tornou ao longo de década um dos materiais mais utilizados na construção civil brasileira. O presente trabalho estuda a correlação da resistência à compressão (ensaio destrutivo) e a velocidade do pulso ultrassônico (ensaio não destrutivo) do concreto com Cimento Portland CP V. O concreto analisado foi utilizado na construção do prédio de aprendizagem 05 da Universidade Federal de Itajubá – Campus Theodomiro Carneiro Santiago – no município de Itabira/MG. Foram obtidos 52 corpos-de-prova retirados de 3 lotes de concretagem da laje do pavimento térreo da edificação. Para essas amostras obteve-se, na idade de 28 dias, a resistência à compressão (f_{ck}) e velocidade do pulso ultrassônico (VPU). Com base nos resultados, determinaram-se curvas de correlação entre os valores da velocidade de propagação do pulso ultrassônico e os valores da resistência à compressão, considerando-se duas abordagens, a primeira utilizando a média dos valores das variáveis obtidas para os 3 lotes, e a segunda, considerando os resultados de 22 corpos-de-prova escolhidos de forma a não repetir os valores de VPU. No presente estudo, para cada correlação, foram testados os cinco modelos de curva mais utilizados na literatura: linear, potência, exponencial, polinômio (2º grau) e logarítmica. Conseguiu-se analisar a qualidade do concreto, os valores de resistência à compressão e determinar as correlações com intuito de se obter parâmetros para o monitoramento da resistência do concreto a partir de ensaios de ultrassom, o que viabiliza uma avaliação rápida do concreto.

Palavras-chave: Concreto; Correlação; Resistência à compressão; Velocidade do pulso ultrassônico.



1. INTRODUÇÃO

O concreto devido a sua alta resistência de suportar cargas ao ser comprimido, se tornou ao longo de década um dos materiais mais utilizados na construção civil brasileira. A resistência à compressão é uma propriedade adotada no dimensionamento dos elementos estruturais em concreto, logo, está diretamente relacionada à segurança e estabilidade estrutural (HELENE, 2003).

Para se construir uma edificação é necessário a realização do projeto estrutural onde se calcula, de acordo com a finalidade da edificação, a carga a ser aplicada na estrutura, fornecendo assim um valor mínimo de resistência, sendo o principal parâmetro de resistência mecânica, a resistência característica à compressão (f_{ck}).

Segundo Evangelista (2002), em diversos países, tem-se observado um enorme emprego dos ensaios *in situ*, com o objetivo de obter resultados mais precisos e confiáveis nas investigações das propriedades do concreto.

Para verificar se o concreto utilizado na edificação atingirá o valor mínimo de resistência estabelecido em projeto, é necessário que ocorra o controle tecnológico desse material (EVANGELISTA, 2002). Esse controle pode ser realizado por meio de ensaios destrutivos que danificam o corpo-de-prova, tendo como ensaio mais recorrente o da determinação da resistência à compressão, segundo a norma ABNT NBR 5739 (2018) ou através dos ensaios não destrutivos que analisam o corpo-de-prova, sem que haja geração de danos ao mesmo. Segundo Schiavon (2015), um tipo de ensaio não destrutivo utilizado em concreto é o da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas (VPU), prescrito na norma brasileira ABNT NBR 8802 (2019).

O presente trabalho busca avaliar curvas de correlação entre os resultados obtidos na realização do ensaio destrutivo de resistência à compressão e do ensaio não destrutivo da velocidade do pulso ultrassônico. Para isso, obtém-se corpos de prova do concreto utilizado na construção do prédio de aprendizagem 05 da Universidade Federal de Itajubá – Campus Theodomiro Carneiro Santiago em Itabira-MG. Na edificação do estudo foi utilizado um volume total de aproximadamente de 2.200 m³ de concreto, sendo que os corpos-de-prova foram coletados da laje do pavimento do térreo que utilizou um volume total de aproximadamente 442 m³ em uma área de 1.659,31 m².

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ensaios destrutivos e não destrutivos

Para estender a durabilidade do concreto e verificar sua aceitação, devem ser utilizados métodos de controle tecnológico, de acordo com as normas brasileiras regulamentadoras (NEVILLE, 1997). No Brasil o controle tecnológico do concreto é preconizado pela norma NBR 12655 (2014), onde esse material é avaliado em seus estados fresco e endurecido.

O principal ensaio mecânico previsto na referida norma é o teste de resistência à compressão do concreto da norma ABNT NBR 5739 (2018), realizada em corpos-de-prova moldados durante o processo de concretagem. Segundo Figueiredo (2005), a moldagem e ruptura dos corpos de prova é a primeira forma de se analisar a qualidade do concreto, além de assegurar a resistência à compressão projetada. O ensaio de resistência à compressão do concreto é um ensaio destrutivo, ou seja, que danifica o elemento ensaiado, no caso os corpos-de-prova.

Para o controle tecnológico há também a utilização de ensaios não destrutivos, ou seja, que não causam nenhum dano ao elemento ensaiado ou ocasionam pequenos danos, que serão reparados após o ensaio. Eles não provocam perda na capacidade resistente do elemento. Esses



ensaios podem ser utilizados em estruturas novas ou antigas. Em estruturas novas, eles podem ser empregados para monitoramento da evolução da resistência ou para esclarecer dúvidas sobre a qualidade do concreto. No caso de estruturas já existentes, visam avaliar a sua integridade e capacidade de resistir às solicitações (EVANGELISTA, 2002).

O ensaio de VPU pode reduzir o número de corpos-de-prova no ensaio de resistência à compressão, já que através da correlação pode-se obter valor para resistência na estrutura. Palácios (2012) ainda acrescenta que um maior volume de ensaios pode ser realizado, contribuindo para maior abrangência na investigação e possibilitando a verificação da homogeneidade de concretos já executados.

Os principais ensaios não destrutivos são os de inspeção visual, esclerometria, tomografia e ultrassonografia para determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. No método do ultrassom (ABNT NBR 8802, 2019), caso o concreto não apresente armaduras, fissuras e vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, isto é, uma linha reta entre os dois transdutores.

Considerando Machado (2009), os ensaios não destrutivos fornecem informações quanto às propriedades do concreto das estruturas, mas a confiabilidade da avaliação dessas propriedades depende da experiência do profissional que realiza essas verificações e das curvas empregadas para correlacionar as grandezas medidas nos ensaios com as propriedades do concreto investigado. A qualidade do concreto é relacionada de acordo com a velocidade de propagação da onda ultrassônica, para a qual Whitehurst (1966) definiu, conforme a Tabela 1, um parâmetro com base em ensaios de concreto, com densidade do concreto de 2400 kg/m³.

Tabela 1 - Relação entre a velocidade de impulso e a qualidade do concreto

Velocidade da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: Whitehurst (1966)

2.2 Curvas de correlação

Considerando os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e de velocidade do pulso ultrassônicos nos corpos-de-prova é possível realizar o controle tecnológico estabelecendo uma correlação entre os resultados desses ensaios. A estimativa da resistência à compressão, utilizando ensaios não destrutivos, é feita empregando curvas correlacionadas às grandezas obtidas nesses ensaios. A obtenção de resultados confiáveis está relacionada com a utilização de curvas de correlação adequadas, desenvolvidas para o tipo de concreto em questão (MACHADO, 2009).

A NM 58 (1996) afirma que quando se deseja estimar a resistência à compressão do concreto em estruturas em execução, é necessário possuir curvas de correlação entre a resistência à compressão de corpos-de-prova normalizados e a velocidade de onda ultrassônica, obtidas previamente em laboratório com o mesmo conjunto de materiais e considerando a



influência das condições de ensaio. Para obtenção das curvas de correlação, segundo a norma, devem ser ensaiados no mínimo 10 corpos-de-prova para cada relação água e cimento.

A correlação da velocidade do pulso ultrassônico e da resistência à compressão do concreto pode ser obtida através do coeficiente de correlação de Pearson. Para determinar o grau de intensidade (Tabela 2) e sentido da correlação, é necessário o conhecimento das seguintes propriedades (SHIKAMURA, 2006):

- O intervalo de variação está entre -1 e +1;
- O coeficiente de correlação é uma medida adimensional, ou seja, independente das unidades de medida das variáveis X e Y.
- Quanto mais próximo de +1 for “r”, maior o grau de associação positivo entre X e Y, com X e Y variando na mesma direção.
- Quanto mais próximo de -1 for “r”, maior o grau de associação negativo entre X e Y, com X e Y variando em sentidos opostos.
- Quanto mais próximo de zero estiver “r” menor será a correlação linear entre X e Y. No qual, “r” sendo igual a zero indica que não há associação entre as variáveis.

Tabela 2 - Parâmetro para interpretação do resultado de correlação

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Shikamura (2014)

Assim, dada a necessidade de verificar tais características e propriedades, a realização de um controle tecnológico para sua aceitação passou a ser primordial, objetivando evitar perdas significativas em termos econômicos, o que inclui a necessidade de reavaliação do projeto estrutural, a execução de eventuais reforços estruturais e até mesmo a demolição e reconstrução de um determinado elemento (SANTIAGO, 2011).

2.3 Trabalhos experimentais

Camargo e Ferrari (2021) analisou a correlação entre a resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico obtidos para 05 corpos-de-prova cimento CP II-Z32 para as idades de 14 dias, 28 dias e 56 dias, tendo estes, os valores de velocidade do pulso ultrassônico superiores a 4.500 m/s caracterizando um concreto de excelente qualidade e com as resistências à compressão variando de acordo com a idade analisada. A melhor correlação entre essas variáveis foi obtida por meio de uma equação polinomial de 2º grau, apresentando R^2 de 0,595.

Godinho *et al.* (2020) utilizaram 03 corpos-de-prova para cada um dos 3 tipos de cimento analisados, CP II e CP IV e CP V, para avaliar a correlação entre a VPU e o fck do concreto. As velocidades de pulso ultrassônico foram maiores que 4000 m/s. As resistências variam de acordo com o tipo de cimento, sendo que em todas há um crescimento de acordo com o crescimento da velocidade do pulso ultrassônico. A correlação entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultrassônico foi estabelecida através de uma equação linear, tendo o coeficiente de determinação R^2 de 0,9337, R^2 de 0,9151 e R^2 de 0,9015 para os cimentos dos tipos CP II Z, CP IV e CP V, respectivamente.

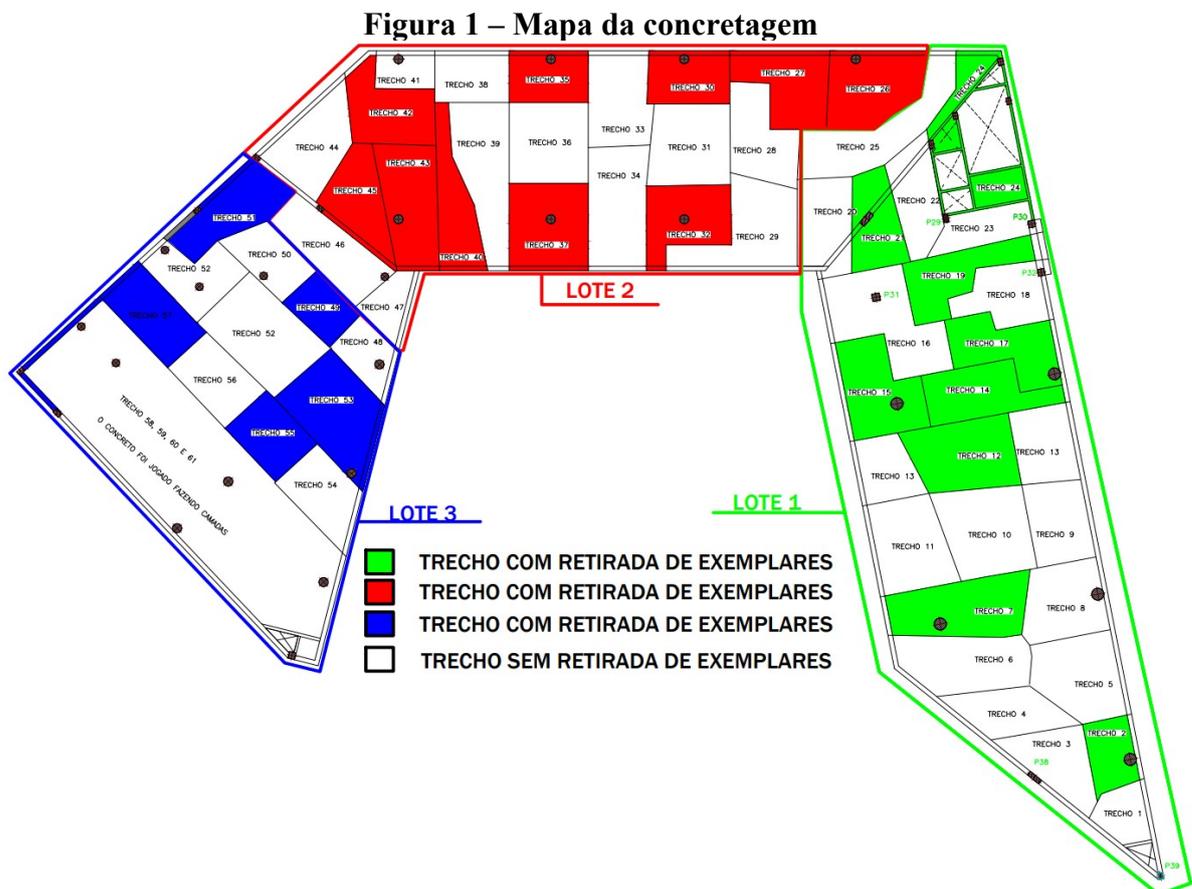
Amâncio *et al.* (2019) realizou um estudo similar com concreto com CPV – ARI, sendo moldados 03 corpos-de-prova para as classes C20, C30 e C40. As velocidades tiveram valores superiores a 4000 m/s, tendo nos 03 corpos-de-prova da classe C40 velocidades acima de 5000

m/s. As resistências à compressão respeitaram valores de acordo com a classe dos cimentos, com isso foi possível estabelecer uma correlação com o coeficiente de determinação R^2 de 0,9328 através de uma equação linear.

Soeiro *et al.* (2018) utilizou métodos não destrutivos diferentes para obtenção da resistência à compressão: esclerometria e velocidade do pulso ultrassônico, sendo obtida na estrutura já concretada. Mesmo com a velocidade de pulso ultrassônico variando entre valores acima de 2000 m/s e abaixo de 4500 m/s e com a resistência à compressão variando entre 20 MPa e um pouco inferior a 45 MPa, foi obtido através de uma equação linear uma correlação com coeficiente de determinação R^2 de 0,9142.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado na construção da laje do pavimento térreo do prédio de aprendizagem 05 da Universidade Federal de Itajubá – Campus Theodomiro Carneiro Santiago em Itabira-MG (Figura 1). Essa laje é do tipo nervurada e foi executada com concreto protendido. Nas vigas e capitéis, tem-se também o concreto armado.



Fonte: Retirado do projeto UNIFEI-PRJ-EXE-EST-101-APP5FO-R03 e modificado pelos autores

A concretagem da laje, devido ao grande volume de concreto, foi dividida em 03 lotes (03 datas distintas), conforme Tabela 3. Os locais de coletas das amostras foram definidos levando em consideração regiões da estrutura submetidas a maiores esforços solicitantes.

Tabela 3 – Datas de concretagem, local de retirada, volumes e número de corpos-de-prova

Data	Local de retirada do concreto	Volume do concreto utilizado no local	Quantidade de corpos-de-prova
25/09/2022	Laje térrea – Lote 01	175 m ³	14
07/10/2022	Laje térrea – Lote 02	142 m ³	20
21/10/2022	Laje térrea – Lote 03	120 m ³	18
		Total	52

Fonte: Elaborado pelos autores

Os lotes 01, 02 e 03 tiveram os trechos coletados dividido pelas cores verde, vermelho e azul, respectivamente, conforme destacado na figura 1. A estrutura foi dividida em 61 trechos de concretagem, sendo as amostras de concreto obtidas de 28 trechos, onde cada trecho corresponde a um caminhão de no máximo 7 m³ de concreto.

Na Figura 2 pode-se visualizar a laje objeto de estudo parcialmente concretada, após a conclusão dos lotes 1 e 2.

Figura 2 – Laje do térreo com os lotes 01 e 02 concretados



Fonte: Elaborado pelos autores

Após a coleta do concreto nos caminhões, foi realizada a avaliação da sua trabalhabilidade por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), seguindo as orientações da norma ABNT NBR NM 67 (1998). Essa análise foi realizada em todas as betonadas, para afins de aceitação provisória do concreto.

Após a determinação do abatimento do tronco de cone, foram moldados dois de corpos-de-prova cilíndricos para cada betonada, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 3), para a realização dos ensaios no estado endurecido. A moldagem dos corpos de prova seguiu a metodologia descrita na norma ABNT NBR 5738 (2015) e as análises das propriedades mecânicas dos concretos foram realizadas aos 28 dias.

Figura 3 – Corpos-de-prova moldados



Fonte: Elaborado pelos autores

Durante a produção dos corpos-de-prova, os moldes foram colocados sobre uma base nivelada, livre de choques e vibrações. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram imediatamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto, protegendo-o também da ação das intempéries. Os corpos-de-prova moldados permaneceram armazenados nessas condições nas primeiras 24 horas de cura.

Até o início dos ensaios no estado endurecido os corpos-de-prova ficaram armazenados em um recipiente contendo água saturada com cal hidratada.

Após os tempos de cura de 28 dias, os corpos-de-prova foram transportados para o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UNIFEI – *Campus* de Itabira, onde eles foram submetidos ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, seguindo o método de medida direta (Figura 4), utilizando ultrassom portátil digital *Pundit Lab +* e seguindo os procedimentos do ensaio conforme ABNT NBR 8802 (2019). As análises de VPU foram realizadas em 52 corpos-de-prova, sendo analisada para os trechos 1, 2 e 3, a quantidade de 14, 20 e 18 corpos-de-prova, respectivamente.

Figura 4 – Execução da medição direta da velocidade de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Elaborado pelos autores

Determinada as velocidades do pulso ultrassônico nos corpos-de-prova, foi realizado o capeamento dos corpos-de-prova com enxofre, mantendo as superfícies planas, lisas e limpas para a realização do ensaio de resistência à compressão, seguindo a norma da ABNT NBR 5739

(2018). O teste foi realizado na Máquina Universal modelo Emic, Modelo DL 20000/PC200 conforme Figura 5.

Figura 5 – Teste de resistência à compressão em andamento



Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa aos 28 dias foi determinada no projeto estrutural para garantir a estabilidade da estrutura. Na tabela 4 são apresentadas as médias dos resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos realizados aos 28 dias, separados por lotes concretados da laje do pavimento térreo do prédio de aprendizagem 05 da Universidade Federal de Itajubá - Campus Theodomiro Carneiro Santiago em Itabira-MG.

Todos os concretos avaliados atenderam o projeto estrutural da edificação, que estabeleceu que o concreto utilizado devia apresentar trabalhabilidade de $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ e resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, aos 28 dias.

A tabela 5 apresenta a quantidade de corpos-de-prova que foram escolhidos de forma a não repetir os valores de velocidade de pulso ultrassônico, conforme tabela 6. Foi realizada a escolha de maior quantidade de exemplares para realizar um comparativo com a correlação que utilizou somente a média por lotes.

Tabela 4 – Ensaio com idade de 28 dias

Resumo das médias dos ensaios de 28 dias			
Laje do térreo	Abatimento do tronco de cone (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)
Lote 01	118,6	40,89	4499,5
Lote 02	124,5	40,44	4547,25
Lote 03	132,1	31,41	4471,94

Fonte: Elaborado pelos autores



Tabela 5 – Ensaio com variados corpos-de-prova

Laje do térreo	Quantidade de corpos-de-prova (28 dias)
Lote 01	9
Lote 02	9
Lote 03	4

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 6 – Corpos-de-prova selecionados

Corpo-de-prova	Trecho retirado	Lote	fck (Mpa)	VPU (m/s)
21	12	1	38,39	4566
22	12	1	38,59	4514
27	14	1	38,03	4535
28	14	1	37,13	4494
33	15	1	37,85	4504
39	17	1	41,3	4454
40	17	1	37,82	4464
45	19	1	36,12	4444
57	24	1	41,97	4576
61	26	2	39,26	4555
66	27	2	37,61	4651
81	37	2	41,77	4587
85	40	2	39,49	4629
94	43	2	36,69	4618
97	45	2	30,78	4474
102	P34, P38 E P39	2	32,82	4415
105	P29, P30, P31, P33 E P32	2	38,75	4376
106	P29, P30, P31, P33 E P32	2	33,92	4434
110	49	3	32,39	4597
118	53	3	34,27	4484
121	55	3	33,1	4385
122	55	3	36,13	4347

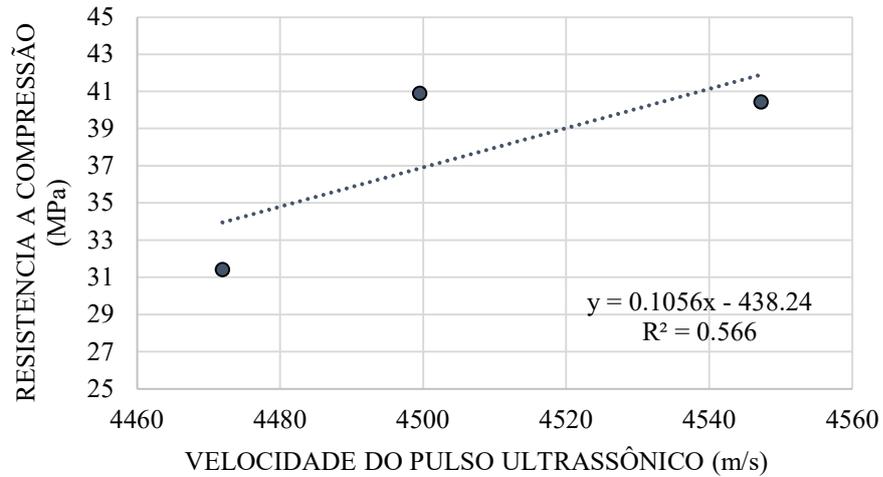
Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode ser observado nas tabelas 4 e 6 que o concreto utilizado pode ser classificado como de ótima qualidade e em alguns exemplares até mesmo como excelente, conforme a classificação de Whitehurst (1966). Malhotra e Carino (2004) afirmam que o efeito da idade do concreto sobre a velocidade do pulso ultrassônico é semelhante ao efeito da idade sobre a resistência à compressão do concreto. Segundo os autores, no início, as velocidades crescem rapidamente, e em idades mais avançadas este crescimento é reduzido.

Através da ferramenta *Excel* foram realizados gráficos de dispersão com a média por lote aos 28 dias e por uma quantidade de corpos-de-prova por lote. Na análise dos gráficos determinou-se o coeficiente de determinação R^2 e a equação da correlação entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultrassônico, conforme apresentados na Tabela 7.

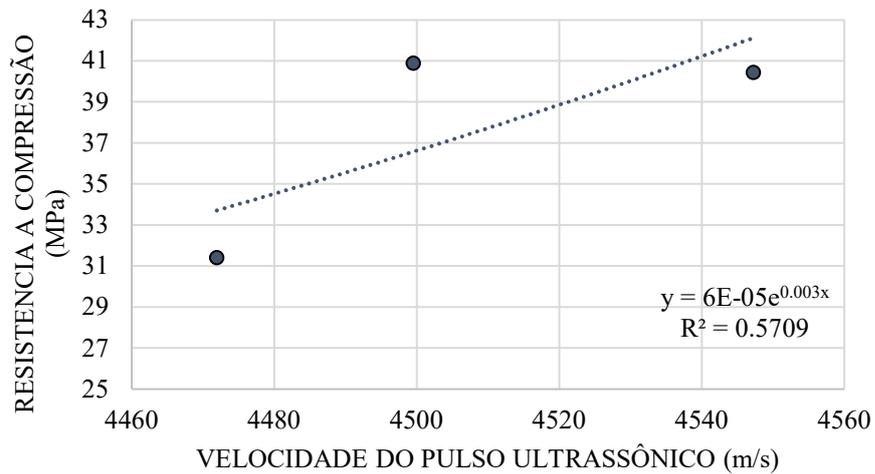


Figura 6 – Gráfico de dispersão - média com 28 dias – Linear



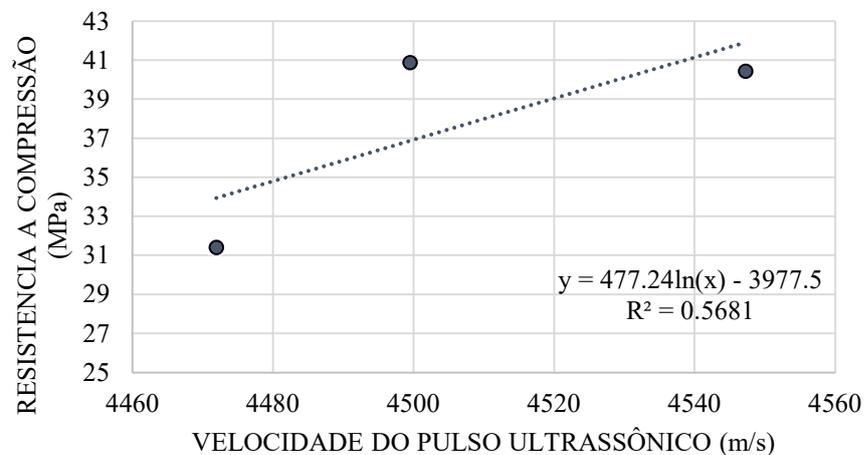
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7 – Gráfico de dispersão – média com 28 dias - Exponencial



Fonte: Elaborado pelos autores

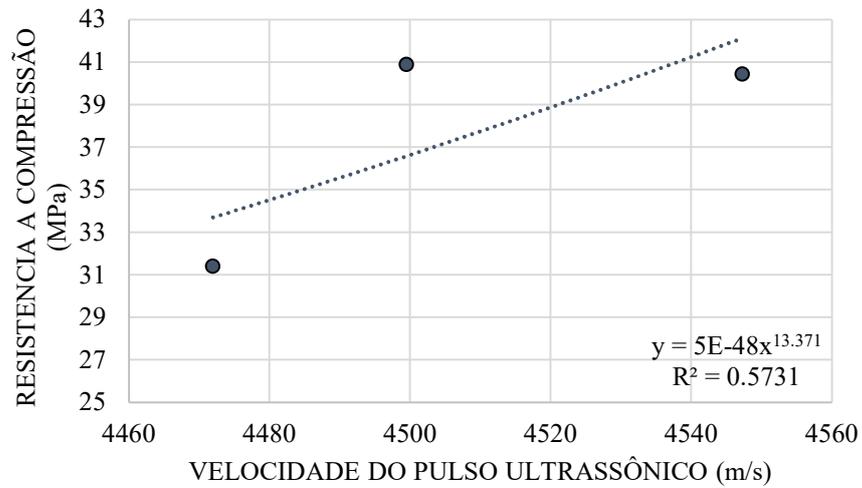
Figura 8 – Gráfico de dispersão – média com 28 dias - Logarítmica



Fonte: Elaborado pelos autores

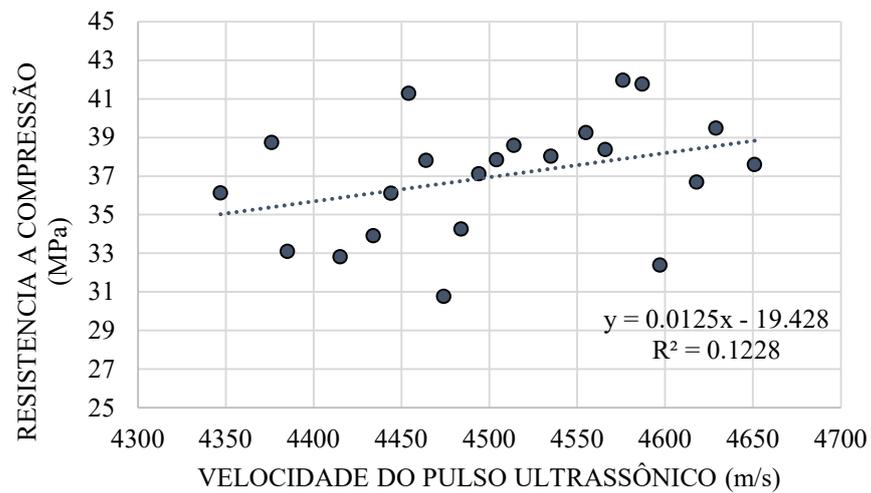


Figura 9 – Gráfico de dispersão – média com 28 dias - Potência



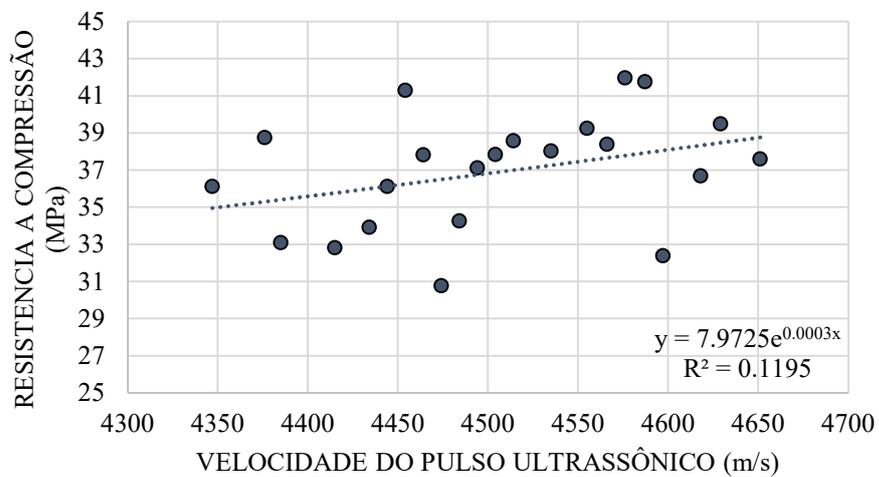
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 10 – Gráfico de dispersão – 28 dias - Linear



Fonte: Elaborado pelos autores

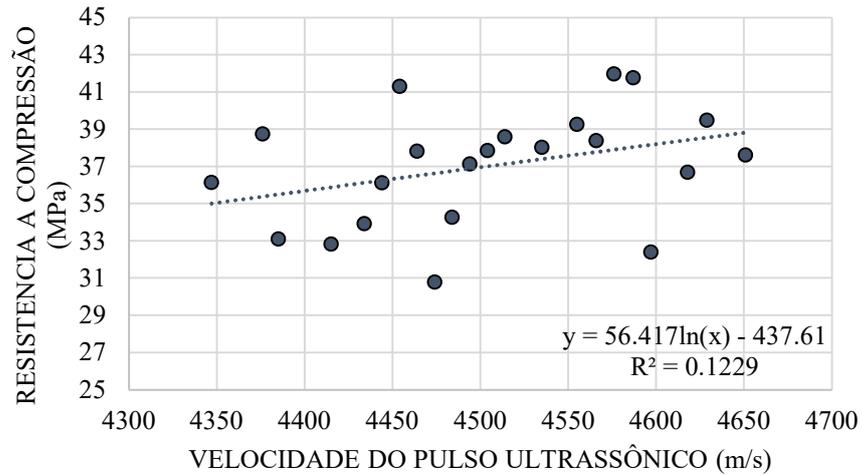
Figura 11 – Gráfico de dispersão – 28 dias – Exponencial



Fonte: Elaborado pelos autores

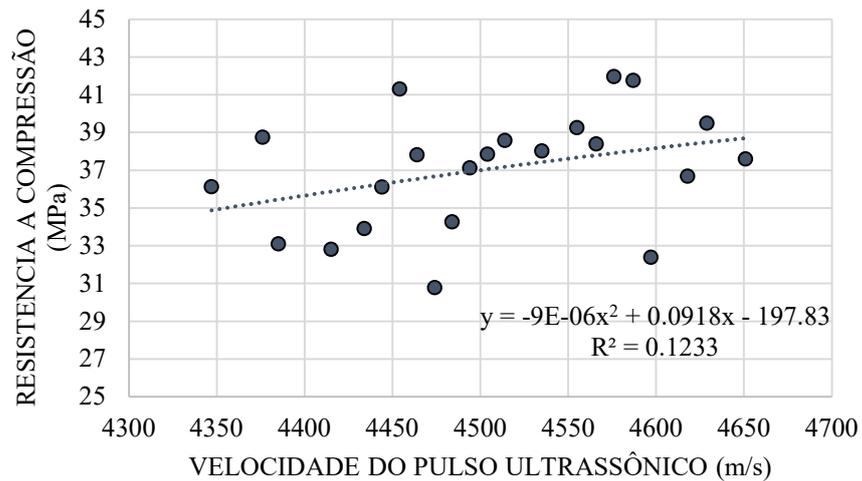


Figura 12 – Gráfico de dispersão – 28 dias - Logarítmica



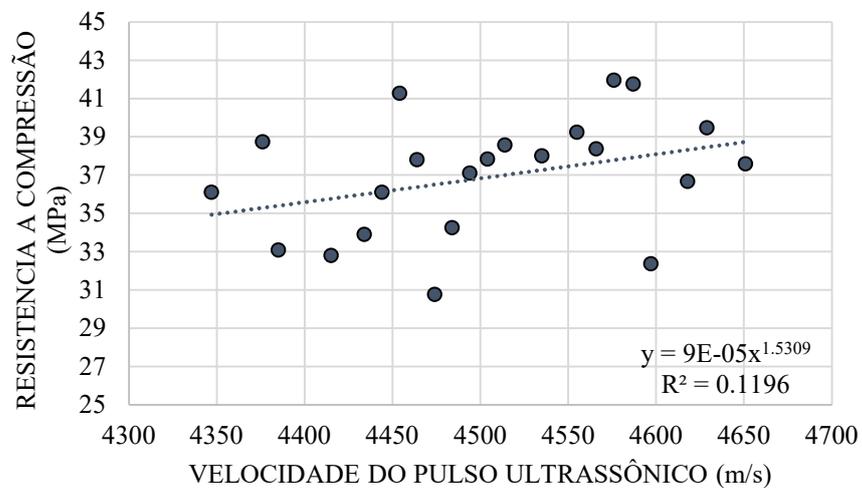
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 13 – Gráfico de dispersão – 28 dias - Polinomial



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 14 – Gráfico de dispersão – 28 dias - Potência



Fonte: Elaborado pelos autores



Tabela 7 – Resultados da correlação

Método	Gráfico de dispersão	Equação	R ²	R
Média	Linear (Fig. 6)	$y = 0,1056x - 438,24$	0,566	0,7523
	Exponencial (Fig. 7)	$y = 6E-05e^{0,003x}$	0,5709	0,7555
	Logarítmica (Fig. 8)	$y = 477,24\ln(x) - 3977,5$	0,5681	0,7537
	Potência (Fig. 9)	$y = 5E-48x^{13,371}$	0,5731	0,7570
Sem média	Linear (Fig. 10)	$y = 0,0125x - 19,428$	0,1228	0,3504
	Exponencial (Fig. 11)	$y = 7,9725e^{0,0003x}$	0,1195	0,3505
	Logarítmica (Fig. 12)	$y = 56,417\ln(x) - 437,61$	0,1229	0,3505
	Polinomial (Fig. 13)	$y = -9E-06x^2 + 0,0918x - 197,83$	0,1233	0,3511
	Potência (Fig. 14)	$y = 9E-05x^{1,5309}$	0,1196	0,3458

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados obtidos (tabela 7), observa-se que as medida amostral da correlação de Pearson indica moderado e baixo graus de associação entre as variáveis no sentido positivo, obtidos para os dois métodos de análise, média e sem média, respectivamente, indicando que, de alguma maneira a resistência à compressão aumenta à medida que a velocidade do pulso ultrassônico aumenta. Para as correlações geradas com a média dos valores de resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico, a curva de potência resultou em um maior coeficiente de determinação, $R^2 = 0,5731$. Portanto, nesse caso, 57,31% da variabilidade da variável resposta (resistência à compressão) é explicada pelo modelo potência. Por outro lado, as curvas de correlação geradas sem a média dos valores das variáveis estudadas apresentaram valores de R^2 muito baixos, tendo o modelo polinomial o maior valor de R^2 (0,1233). O valor baixo para R^2 pode ter ocorrido devido a sensibilidade que o método de VPU apresenta, sendo mais facilmente afetado por alterações na composição do concreto, o mesmo também foi observado por Ferrari e Vicenti (2020) e Palácios (2012). Esse fato também pode estar associado a possível falha no contato do transdutor com a superfície do elemento a ser ensaiado. Ferrari e Vicenti (2020) encontraram um coeficiente de determinação de 0,11 obtido para a correlação entre os resultados de ensaios realizados com corpos-de-prova. Para ensaios realizados com testemunhos, os autores acharam um coeficiente de determinação de 0,58 através de um polinômio de segundo grau.



CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a correlação entre a resistência à compressão do concreto fabricado com CP V com a velocidade do pulso ultrassônico por meio de diferentes equações: linear, exponencial, logarítmica, polinomial (2º grau) e potência. O concreto utilizado na construção da laje do pavimento térreo do prédio de aprendizagem 05 Universidade Federal de Itajubá - Campus Theodomiro Carneiro Santiago em Itabira-MG satisfaz os requisitos estabelecidos em projeto, como trabalhabilidade de 120 mm \pm 20 mm e resistência à compressão de 30 MPa.

Utilizando a média dos 3 lotes de concretagem as correlações obtidas entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultrassônico dos concretos podem ser classificadas de acordo com os parâmetros de Pearson como forte, com os coeficientes de determinação de aproximadamente 57%, a depender da equação utilizada. Já ao efetuar a análise sem a consideração dos valores médios das variáveis estudadas (dados de 22 CP's) obteve-se um coeficiente de determinação de, aproximadamente, 12%, sendo uma correlação considerada fraca.

Avaliando as correlações dos resultados de fck e VPU dos 22 corpos-de-prova obtidas e considerando os resultados reportados pela maior parte dos estudos revisados, verifica-se uma divergência entre resultados. O fato deste trabalho apresentar uma maior quantidade de corpos-de-prova analisados é uma possível justificativa para essa ocorrência. Muitos trabalhos encontrados na literatura estabelecem correlações entre a fck e VPU utilizando poucos corpos-de-prova. Além disso, os valores baixos para o coeficiente de determinação R² podem ter ocorrido devido a sensibilidade que o método de VPU apresenta, conforme salientado por outros pesquisadores.

Para trabalhos futuros sugere-se a avaliação da correlação entre o fck e VPU englobando diferentes idades do concreto. Adicionalmente, um estudo estatístico mais aprofundada dos resultados aqui obtidos também se faz necessário, como, por exemplo, a avaliação dos erros envolvidos na aplicação das curvas de correlação estabelecidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANCIO, F. A.; DIAS, A. R. O.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. **Correlação entre o ensaio de ultrassom e as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos convencionais** – Universidade Federal do Ceará, 2019. Acesso em: 04 de nov. de 2021, Disponível em: < <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/viewFile/635/398> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738 – Concreto – **Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1938/abnt-nbr5738-concreto-procedimento-para-moldagem-e-cura-de-corpos-de-prova> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1939/abnt-nbr5739-concreto-ensaio-de-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos> >



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8802 – Concreto endurecido – **Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/3489/abnt-nbr8802-concreto-endurecido-determinacao-da-velocidade-de-propagacao-de-onda-ultrassonica> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 33 – Concreto - **Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/6469/abnt-nm33-concreto-amostragem-de-concreto-fresco> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 58 – Concreto endurecido – **Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 1996. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/10187/abnt-nm58-concreto-endurecido-determinacao-da-velocidade-de-propagacao-de-onda-ultra-sonica>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 67 – Concreto – **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. Acesso em: 04 de set. de 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/10190/abnt-nm67-concreto-determinacao-da-consistencia-pelo-abatimento-do-tronco-de-cone> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12655 – Concreto de cimento Portland — **Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 11 de set. 2021, Disponível em: < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/6336/abnt-nbr12655-concreto-de-cimento-portland-preparo-controle-recebimento-e-aceitacao-procedimento> >

BUNGEY, J. H., 1989, **The Testing of Concrete in Structures**, 2 ed., London, Surrey University Press. Acesso em: 11 de set. 2021, Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=KUJZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=bungey+The+Testing+of+Concrete+in+Structures&ots=O7zo5vYfz3&sig=ZT21hHGRb53iBDSKUiHuRmFC3Nw#v=onepage&q=bungey%20The%20Testing%20of%20Concrete%20in%20Structures&f=false> >

CAMARGO, M. V.; FERRARI, V. J. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)** – Universidade Estadual de Maringá, 2021. Acesso em 18 de nov de 2021 Disponível em < <https://www.scielo.br/j/rmat/a/cdB4GMSqTghQVXGkxzz44dk> >

CHUNG, H. W., e Law, K.S.,1983, “**Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique**”, Concrete International, October, pp.42-49 . Acesso em: 11 de set. 2021, Disponível em: < <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/9183> >



EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em engenharia civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. Acesso em: 11 de set. 2021, Disponível em: < <https://docplayer.com.br/7562461-Avaliacao-da-resistencia-do-concreto-usando-diferentes-ensaios-nao-destrutivos-ana-catarina-jorge-evangelista.html> >

FERRARI, Vladimir José; MANTOVANI, Jaqueline Vicentini. Esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico para estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 1, p. 49-61, 2020.

FIGUEIREDO, E. P. **Inspeção de Estruturas de Concreto com problemas de Resistência, fissuras e deformações**, IBRACON, São Paulo, 2005. Acesso em: 05 de nov. de 2021, Disponível em: < http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/pdfs/revista91.pdf >

GODINHO, J. P.; DE SOUZA JUNIOR, T. F.; MEDEIROS, M. H. F.; A SILVA, M. S.; **Fatores de influência na velocidade de pulso ultrassônico no concreto** – Revista IBRACON de estruturas e materiais, volume 13, number 2 , pag. 222-247, 2020. Acesso em: 10 de nov. de 2021 Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/riem/a/mmkd3qMHspP8cyzhDtTFc4K/?lang=pt#:~:text=Dentre%20os%20mais%20variados%20fatores,NBR%208802%20%5B%2010%5B10%5D> >

HELENE, P.; PACHECO, J. **Controle da Resistência do Concreto**. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int., Mérida – México, 2013. Acesso em: 10 de nov. de 2021 Disponível em: < <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/bt63.pdf> >

MACHADO M. D.; SHEHATA L. C. D.; SHEHATA E. M., **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. IBRACON, Volume 2, 2009. Acesso em: 04 de set. de 2021 Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/riem/a/rMbGVKBMynQps4fQBPWBfFb/abstract/?lang=pt#:~:text=Este%20estudo%20visou%20prover%20os,utilizados%20no%20Rio%20de%20Janeiro.> >

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Savador E. Giamusso. 1ª Ed. Pini, São Paulo, 1997. Acesso em: 12 de out. de 2021, Disponível em: < <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A4NHBS/1/275.pdf> >

PALACIOS, M. P. G., “**Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto**”, Dissertação de M.Sc., FT/UnB, Brasília, 2012. Acesso em: 11 de set. de 2021, Disponível em: < <https://1library.org/document/y4gnodky-emprego-destrutivos-extracao-testemunhos-avaliacao-resistencia-compressao-concreto.html> >

SANTIAGO, W. C. **Estudo da não conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural**. 2011. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Acesso em: 04 de set.2021 Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06022012-081447/publico/2011ME_WagnerCarvalhoSantiago.pdf >



SCHIAVON, Karen Fernanda Bompan. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto** / Karen Fernanda Bompan Schiavon; orientador Vladimir Guilherme Haach. São Carlos, 2015. Acesso em: 12 de out. de 2021 Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14082015-091127/pt-br.php> >

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação**, LEG, UFPR, 2006. Acesso em: 12 de out. 2021 Disponível em: < <https://www.unifafibe.com.br/revista/index.php/fafibeonline/article/view/726> >

SOEIRO, J. M.; COSTA, S. S.; SILVA, A. P.; CHAHUD, E. **Ensaio não destrutivo - ensaio de ultrassom e pacômetrona avaliação da qualidade do concreto armado** - Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2018. Acesso em: 12 de nov. 2021 Disponível em: < https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/107_endeduep.pdf >

V. M. . Malhotra and N. J. Carino, **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2a edition. New York: CRC Press, 2004 Acesso em: 10 de nov. 2021 Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=09uBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&q=V.+M.+Malhotra+and+N.+J.+Carino,+Handbook+on+Nondestructive+Testing+of+Concrete,+2a+edition&ots=FwLCqVVrPQ&sig=PHZt7EjWpAnQimxdbCCpa5Hj0g#v=onepage&q=V.%20M.%20Malhotra%20and%20N.%20J.%20Carino%20Handbook%20on%20Nondestructive%20Testing%20of%20Concrete%202a%20edition&f=false> >

WHITEHURST, E. A. **Evaluation of concrete properties from sonic test**. Detroit American Concrete Institute, 1966. Acesso em: 10 de out. de 2021, Disponível em: < <https://www.ajol.info/index.php/njt/article/view/123556> >



Ata da defesa de trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil

Às 19:40 horas do dia 05 do mês de dezembro de 2022, reuniu-se para a defesa pública *online*, por meio da plataforma Zoom, junto ao Centro Universitário UNA - Itabira, a Banca Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a velocidade do pulso ultrassônico**, escrito pelos alunos **Giovanna Jácome Freitas, Katylen Saldanha Guedes, Taiys Augusto Castro**, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Abrindo a sessão, o Presidente da Banca, Professor orientador Harley Francisco Viana após dar conhecimento aos presentes do procedimento de defesa, passou a palavra aos alunos para apresentação oral do trabalho. Após a apresentação do trabalho, os alunos foram arguidos pelos membros da banca. Em seguida, a Banca Examinadora reuniu-se, sem a presença dos alunos e do público, para julgamento e expedição do resultado final. A banca examinadora atribuiu as seguintes notas:

	Trabalho escrito (10)	Apresentação Oral (10)
Notas	8,3	8,5
Média Aritmética	8,4	

Os alunos foram considerados **APROVADOS** com **Nota Final 8,4**, sendo esse resultado final comunicado publicamente pelo Presidente da Banca Examinadora.

A publicação do conceito final fica condicionada a postagem de uma cópia definitiva da versão digital do trabalho em pdf (incluir a folha de assinaturas assinada) no RUNA, com todas as correções solicitadas pela banca, bem como da autorização para publicação do trabalho pelo Centro Universitário Una - Itabira (termo de cessão de direitos).

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Banca Examinadora.

Prof. Harley Francisco Viana
Prof. Orientador

Profa. Livia L. Ferreira dos Santos
Examinador 1

Prof. Edcarlos A. Nunes Coura
Examinador 2

Itabira, 5 de dezembro de 2022.