

# INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO

DIRETORIA DE PESQUISA

PROJETOS DE PESQUISA/INOVAÇÃO

Chamada 01/2022 - Interconecta - Coordenador de Projeto

## 1 - UNIDADE PROPONENTE

Campus: <b>CAMPUS-JP</b>
-----------------------------

## 2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do projeto: <b>Avaliação da capacidade de aderência entre camadas e o tempo de deposição na impressão 3D em concreto.</b>	
Grande área de conhecimento: <b>ENGENHARIAS</b>	Área de conhecimento: <b>ENGENHARIA CIVIL</b>
Área temática: <b>Construção civil</b>	Tema: <b>None</b>
Período de execução: <b>Início: 01/04/2021   Término: 31/12/2022</b>	

## 3 - CARACTERIZAÇÃO DOS BENEFICIÁRIOS

Público alvo	Quantidade
--------------	------------

## 4 - EQUIPE PARTICIPANTE

PROFESSORES E/OU TÉCNICOS ADMINISTRATIVOS DO IFPB			
Membro	Contatos	Vínculo	Titulação
Nome: <b>Marcos Alyssandro Soares dos Anjos</b> Matrícula: <b>1372249</b>	Tel.: <b>/ (83) 3612-1300 (ramal: 1300)</b> E-mail: <b>marcos.anjos@ifpb.edu.br</b>	Voluntário	DOUTORADO
Nome: <b>Ana Claudia Leao Borges</b> Matrícula: <b>1375454</b>	Tel.: <b>(83) 99382-1529 / (83) 3612-1300 (ramal: 1300)</b> E-mail: <b>ana.borges@ifpb.edu.br</b>	Voluntário	DOUTORADO

## 5 - DISCRIMINAÇÃO DO PROJETO

<b>Resumo</b>
<b>Introdução</b> A manufatura aditiva inclui todas as tecnologias que baseiam-se no empilhamento de camadas para a construção de um produto final. Seu processo de fabricação consiste, primeiramente no desenho tridimensional do material a partir de programas auxiliados por computadores (CAD), após isso, a peça será dividida em partes bidimensionais por meio de outros softwares de impressão para que, desse modo, seja possível realizar a deposição das camadas e, por fim, a obtenção do produto final.

No caso da impressão 3D em concreto ou apenas 3DCP (*3D concrete printing*), específica para a construção civil, é definida como uma técnica de deposição de camadas de um determinado material, que constrói o produto final com o auxílio de um modelo de computador (Rahu e Santhanam, 2020), permitindo a obtenção de geometrias mais complexas e precisas que a construção convencional.

Para a aplicação na área da construção em específico, a tecnologia pioneira de impressão 3D foi criada na Universidade do Sul da Califórnia, pelo Dr. Behrokh Khoshnevis, que publicou seus primeiros estudos em 1998. Chamada de *contour crafting* (CC), é um dispositivo formado por um robô de pórtico apoiado em trilhos, com um sistema de bombeamento e um bico extrusor, que movimentam-se nos eixos X, Y e Z de forma estável, produzindo estruturas de concreto por meio da deposição de camadas e com a presença de outras camadas intermediárias no meio dos filamentos (Florêncio, 2019), além de duas espátulas que auxiliam no acabamento da estrutura. Tal tecnologia foi pensada por Khoshnevis visando a construção de habitações com baixo custo e de emergência, para que sejam utilizadas em casos de terremotos, inundações, guerras e outros desastres que acarretam a falta de moradia para grande parte de uma população atingida.

Após o *contour crafting*, surgiram outras inovações tecnológicas na área da impressão 3D, como o *concrete printing*. Esse dispositivo foi desenvolvido por uma equipe de pesquisa na *Loughborough University* e, semelhante ao *contour crafting*, apresenta um sistema construtivo que se baseia na extrusão de argamassa de cimento, semelhante a apresentada na Figura 1. Porém, nesse caso, as camadas são depositadas sucessivamente, sem a presença de um filamento intermediário ou espátulas de acabamento. Atualmente, esse é o tipo de método mais utilizado para a impressão tridimensional das estruturas.

Figura 1. Exemplo de impressora 3D baseada na extrusão de concreto



Fonte: <https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/3d-concrete-printing/>

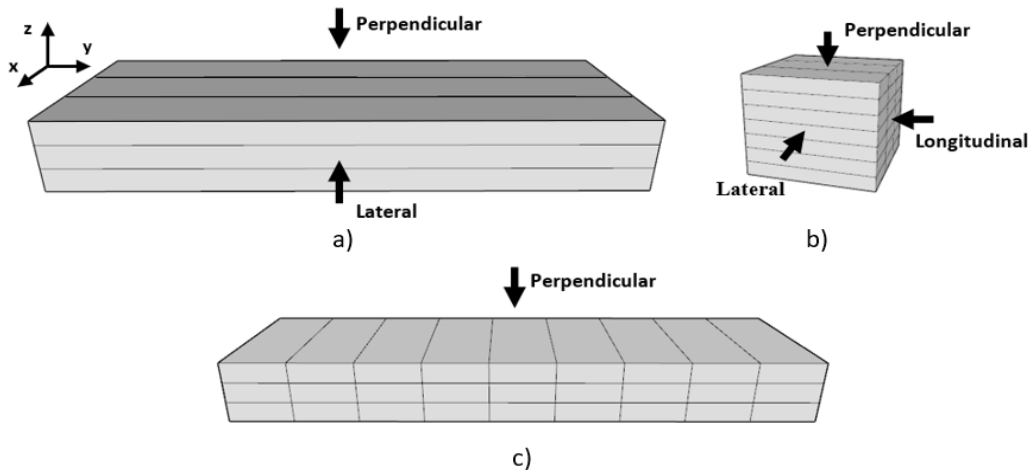
O IFPB dispõe de uma impressora 3D para concreto que foi projetada e montada pelo grupo de pesquisa em materiais e construções sustentáveis do IFPB, essa impressora tem o mesmo princípio da impressora mostrada na Figura 1, no entanto, tem menores dimensões e sistemas mais simples de montagem e controle. Neste sentido, o presente projeto visa avaliar a influência da composição das misturas 3DCP e o tempo de deposição das camadas de impressão no comportamento de aderência entre camadas do concreto produzido por impressão 3D.

#### Justificativa

O concreto ou compósito cimentício para impressão 3D de características peculiares, pois apresenta características anisotrópicas a depender do sentido de avaliação, devido a processo de construção que produz juntas entre as camadas, diferentemente do concreto convencional. A Figura 1 mostra as condições de ensaios normalmente utilizadas para análise de materiais por impressão 3D.

Várias pesquisas enfatizam que a ligação entre camadas pode ficar acometida em função do surgimento de vazios entre os filamentos durante o processo de extrusão. Em decorrência disso, condições relacionadas aos materiais empregados na dosagem, parâmetros da máquina e tempo de deposição entre camadas são apontados como relevantes no controle da força de aderência entre os filamentos (PANDA *et al.*, 2018).

Figura 1. Direção do carregamento em amostras extrudadas.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2019).

Desta forma, há a necessidade de avaliar as diferentes interfaces entre camadas, e sua capacidade de aderência nas diferentes direções, além da influência do tempo de deposição entre camadas, pois por mais que se pretenda construir de forma ininterrupta através do sistema construtivo 3DCP, sabe-se que há problemas inerentes ao processo construtivo, como paradas diversas para manutenção de equipamento, troca de equipes, quebra dos diversos sistemas envolvidos na construção por 3DCP, ou até mesmo paradas programadas para descanso de equipes, assim a aderência dependerá se haverá formação de juntas frias entre camadas e a influência dos diferentes materiais utilizados para produzir os compósitos.

#### Fundamentação teórica

A manufatura aditiva (impressão 3D) em concreto pode proporcionar grande vantagem, em comparação aos métodos convencionais, pois o processo de construção altamente automatizado por impressão de concreto pode reduzir a demanda de recursos (materiais e energia), as emissões de gases de efeito estufa, o desperdício de material, o tempo de construção e o erro humano, além de proporcionar maior liberdade arquitetônica que pode favorecer o conforto térmico das edificações (DE SCHUTTER *et al.*, 2018; HE *et al.*, 2020).

A manufatura aditiva com uso de dados para impressão 3D já é presente na maioria das indústrias, no entanto na construção civil é incipiente e se mostra como uma tecnologia disruptiva para atender às demandas futuras da indústria da construção civil, embora alguns exemplos de estruturas de concreto impressas em 3D estejam disponíveis em todo o mundo, muitos desafios permanecem no nível técnico e de processamento (DE SCHUTTER *et al.*, 2018; SALET *et al.*, 2018), pois em primeiro lugar, ainda não estão disponíveis códigos para testar as propriedades estruturais do concreto utilizado por manufatura aditiva (impressão 3D) (SALET *et al.*, 2018). O concreto ou argamassa comum é testado em cilindros ou prismas para caracterizar seu comportamento através dos modelos constitutivos do material, sendo amplamente estabelecidos nos códigos internacionais, no entanto, a aplicação desses códigos em estruturas de concreto impresso a partir da manufatura aditiva ainda não foi validada (SALET *et al.*, 2018).

Várias pesquisas buscam entender o comportamento do 3DCP do ponto de vista reológico, e também quanto ao comportamento sob cargas de compressão, flexão, aderência entre as camadas, ensaios não destrutivos, influência da deposição das camadas e anisotropia do material, além do uso de adições minerais, resíduos e fibras (PANDA et al., 2019; ROUSSEL, 2018; KAZEMIAN, A. et al.).

#### Objetivo geral

O presente projeto consiste em um método de pesquisa experimental que visa estudar a influência de diferentes concentrações de cimento e o tempo de deposição entre camadas de construção de compósitos cimentícios para impressão 3DCP.

#### Objetivos específicos:

Caracterizar os materiais precursores dos compósitos;

Realizar a dosagem dos compósitos;

Produzir compósitos por impressão 3D com diferentes tempos de deposição;

Determinar e analisar as propriedades de aderência entre camadas dos compósitos 3DCP;

#### Metas

- 1 - Caracterização dos materiais precursores.
- 2 - Estudo da dosagem
- 3 - Produção dos compósitos por impressão 3DCP
- 4 - Determinação da aderência entre camadas
- 5 - Relatórios

#### Metodologia da execução do projeto

Para execução do projeto são necessários analisar a viabilidade de uso de diversos materiais, a princípio os materiais selecionados para análise neste trabalho são descritos abaixo:

Cimento Portland CP V - ARI

Adições minerais: Metacaulim e filer calcário

Agregados naturais: Areia de rio

Aditivo químico: Superplastificantes (SP) e hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)

#### Métodos e técnicas

##### Etapa 1: Caracterização dos materiais precursores.

Para caracterizar e avaliar as propriedades dos materiais precursores serão utilizados os métodos expostos na Tabela 1. Os equipamentos para os ensaios e análises descritos na Tabela 1 estão disponíveis no IFPB/campus-João Pessoa e reitoria/IFPB.

Tabela 1. Ensaios a serem realizados

		Propriedade	Método	Laboratório
Agregados, Cimento, adições e minerais	Distribuição granulométrica		Peneiramento	IFPB
	Massa específica (ME)		Chapman/balança hidrostática	IFPB
	Teor de Material pulverulento		Lavagem dos agregados	IFPB

Absorção de água por imersão	Balança hidrostática	IFPB
Área superficial	BET	IFPB

### Etapa 2: Estudo da dosagem.

Para o estudo de dosagem será empregado o método proposto por Dias (2022)(DIAS, 2022), onde serão definidas misturas variando a relação volume de pasta/volume de agregado ( $V_p/V_{ag}$ ) em cinco níveis diferentes, com duas relações água/materiais secos (A/Ms) diferentes. A partir disto, serão determinadas as relações constitutivas básicas dessas composições, para em seguida analisar as propriedades reológicas e físicas das misturas cimentícias.

### Etapa 3. Produção dos compósitos por impressão 3DCP.

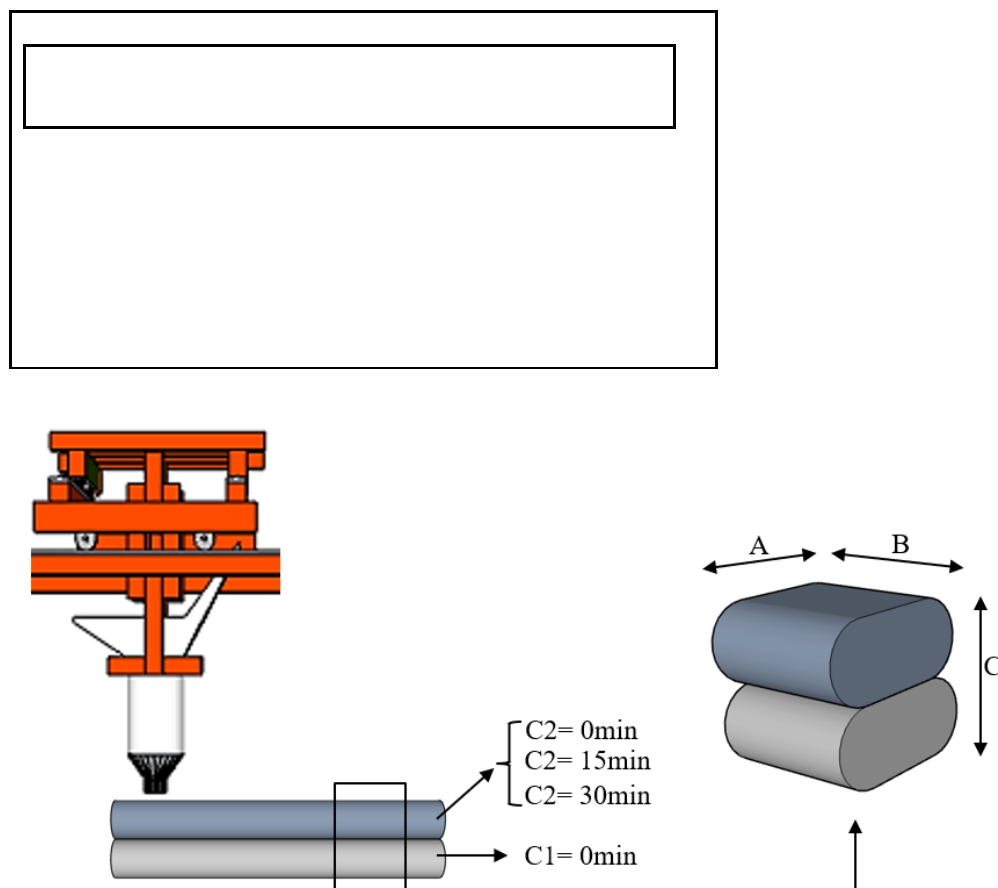
Serão produzidos compósitos diferentes com variações das relações volume de pasta/volume de agregado  $V_p/V_{ag}$  e água/materiais secos (A/Ms), esta produção se dará por manufatura aditiva utilizando a impressora do grupo de pesquisa do IFPB, seguindo a seguinte sequência:

Pesagem dos materiais e produção dos compósitos;

Impressão das camadas com a variação do tempo, conforme demonstrado na Figura 2.

As camadas impressas dos diferentes espécimes serão preparadas a partir de diferentes lotes do mesmo traço (composição), sendo essas impressas com atraso de deposição entre C1 e C2 de 0, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas e 24 horas. Com relação as dimensões das amostras a serem ensaiadas, terão seu comprimento corresponde a 50 mm x 50 mm x 50 mm (dimensão A, B e C da Figura 2).

Figura 2. Produção e obtenção das amostras para o ensaio de deslocamento vertical e aderência entre as camadas.



Fonte: Dias (2022).

#### Etapa 4. Determinação da aderência entre camadas.

A aderência entre as camadas será determinada com base no ensaio de resistência a tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011), com a configuração mostrada na Figura 2b, que é comumente adotada na literatura (RASHID et al., 2015; WENG et al., 2021; GENG et al., 2020). A execução do ensaio se dará em no mínimo quatro amostras cortadas do filamento inicial por disco diamantado após 28 dias de cura submersa. Conforme Figura 2b, dois filamentos de madeira mole serão colocados na região da junção interfacial para garantir a correta posição do carregamento, sendo essa exercido a uma velocidade de 2,5 mm/min.

O cálculo da resistência de aderência entre as camadas em função do tempo foi realizado através da Equação 2:

$$R_{ad} = \frac{2F}{\pi A}$$

(Eq. 2)

Em que:  $R_{ad}$  (MPa) é a resistência de aderência entre as camadas; F (N) a carga última aplicada e A (mm<sup>2</sup>) a área de interface aderida.

#### Disseminação dos resultados

##### Acompanhamento e avaliação do projeto durante a execução

A avaliação será realizada ao longo da execução do projeto com reuniões semanais entre os participantes e com apresentação dos resultados da pesquisa a cada mês por meio de relatórios para o coordenador do projeto e a partir desses resultados as metas e atividades serão atualizadas no SUAP. Serão produzidos os relatórios, parcial e final, conforme previsto no edital. Durante a execução da pesquisa e com o avanço da obtenção dos resultados serão escritos artigos para divulgação científica em congressos nacionais e/ou internacionais.

ATIVIDADE	INÍCIO DO PLANO	DURAÇÃO DO PLANO	INÍCIO DURAÇÃO		MESES											
			REAL	REAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Meta 1: Caracterizar os materiais precursores dos compósitos	1	2	1	2	█											
Meta 2: Estudo de dosagem	1	2	1	2	█											
Meta 3: Produção dos compósitos por impressão 3DCP	3	7	3	7		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Meta 4: Determinação da aderência entre camadas	5	5	5	5				█	█	█	█	█	█	█	█	█
Meta 5: Relatórios																
Relatório parcial, de acordo com o edital	7	1	7	1							█	█				
Relatório final, de acordo com o edital	9	2	9	2										█	█	

#### Atividade: Plano de trabalho do bolsista

##### 1. Identificação

Nome Lindemberg Augusto do Nascimento Silva	Matrícula 202012220019
Orientador	Unidade Acadêmica UA1
Área de concentração/ atuação Engenharia civil/ materiais e processos construtivos	Assinatura do orientador
Instituição /empresa onde realiza o estágio IFPB	Período de duração do projeto: 04/2022 a 12/2022

## 2. Descrições do trabalho/pesquisa

Tema Desenvolvimento de novos materiais	Título Avaliação da capacidade de aderência entre camadas e o tempo de deposição na impressão 3D em concreto
Objetivo geral Avaliar o comportamento reológico de mistura por impressão 3D	Objetivos específicos <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados de caracterização dos materiais precursores;</li> <li>▪ Realizar o estudo de dosagem das misturas;</li> <li>▪ Proporcionar os materiais de acordo com a dosagem, pesar e misturar os materiais para obter compósitos cimentícios;</li> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados das propriedades de aderência dos compósitos cimentícios;</li> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados de construtibilidade;</li> </ul>

## Atividade: Plano de trabalho dos voluntários

### 1. Identificação

Nomes Gustavo de Lima Seixas Cunha Douglas Ewerton de Lira Oliveira	Matrícula 202012220019 201922220009
Orientador Ana Cláudia Leão	Unidade Acadêmica UA1
Área de concentração/ atuação Engenharia civil/ materiais e processos construtivos	Assinatura do orientador
Instituição /empresa onde realiza o estágio IFPB	Período de duração do projeto: 04/2022 a 12/2022

## 2. Descrições do trabalho/pesquisa

<b>Tema</b> Desenvolvimento de novos materiais	<b>Título</b> Avaliação da capacidade de aderência entre camadas e o tempo de deposição na impressão 3D em concreto
<b>Objetivo geral</b> Avaliar o comportamento reológico de mistura por impressão 3D	<b>Objetivos específicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados de caracterização dos materiais precursores;</li> <li>▪ Realizar o estudo de dosagem das misturas;</li> <li>▪ Proporcionar os materiais de acordo com a dosagem, pesar e misturar os materiais para obter compósitos cimentícios;</li> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados das propriedades de aderência dos compósitos cimentícios;</li> <li>▪ Realizar ensaios para obtenção dos resultados de construtibilidade;</li> </ul>

### Atividade: Plano de trabalho do Orientador

#### 1. Identificação

<b>Nome</b> Ana Cláudia Leão	<b>Matrícula</b> 1375454
<b>Orientador</b>	<b>Unidade Acadêmica</b> UA1
<b>Área de concentração/ atuação</b> Construção Civil	<b>Assinatura do orientador</b>
<b>Instituição /empresa onde realiza o projeto:</b> IFPB	<b>Período de duração do projeto:</b> 04/2022 a 12/2022

#### 2. Descrições do trabalho/pesquisa

<b>Tema</b> Desenvolvimento de novos materiais	<b>Título</b> Avaliação da capacidade de aderência entre camadas e o tempo de deposição na impressão 3D em concreto
<b>Objetivo geral</b> Propor, orientar, treinar, acompanhar os ensaios de laboratório e avaliar os bolsistas	<b>Objetivos específicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propor o projeto</li> <li>▪ Propor as matérias-primas</li> <li>▪ Propor e avaliar as dosagens</li> <li>▪ Propor métodos de para avaliação das propriedades</li> <li>▪ Treinar a bolsista para a execução dos ensaios</li> <li>▪ Orientar a execução dos ensaios de laboratório</li> <li>▪ Avaliar e discutir os resultados com os bolsistas</li> <li>▪ Orientar a escrita de artigos e relatórios técnicos</li> </ul>



**Atividade: Plano de trabalho do Co-orientador****1. Identificação**

Nome Marcos Alyssandro Soares dos Anjos	Matrícula 1372249
Orientador	Unidade Acadêmica UA1
Área de concentração/ atuação Construção Civil	Assinatura do orientador
Instituição /empresa onde realiza o projeto: IFPB	Período de duração do projeto:

**2. Descrições do trabalho/pesquisa**

Tema Desenvolvimento de novos materiais	Título Avaliação da capacidade de aderência entre camadas e o tempo de deposição na impressão 3D em concreto
Objetivo geral Co-orientar e avaliar os bolsistas	Objetivos específicos <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Treinar a bolsista para a execução dos ensaios</li> <li>▪ Orientar a execução dos ensaios de laboratório</li> <li>▪ Avaliar e discutir os resultados com os bolsistas</li> <li>▪ Orientar a escrita de artigos e relatórios técnicos</li> </ul>

**Referências bibliográficas**

ARUNOTHAYAN, A. R. et al. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119546, 2020.

DE SCHUTTER, G. et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, n. June, p. 25–36, 2018.

DIAS, L. DE S. **Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP)**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

DING, T. et al. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118654, 2020.

HE, Y. et al. Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. **Energy and Buildings**, v. 222, 2020.

HOSSEINI, E. et al. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, n. October 2018, p. 112–119, 2019.

PANDA, B. et al. Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, n. November 2018, p. 75–83, 2019.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 112, n. March, p. 76–85, 2018.

SALET, T. A. M. et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing\*. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 222–236, 2018.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 447–454, 2018.

## 6 - CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Meta	Atividade	Especificação	Indicador(es) qualitativo(s)	Indicador físico		Período de execução	
				Unid.de Medida	Qtd.	Início	Término
1	1	Realizar ensaios de caracterização: Distribuição granulométrica, Massa específica (ME), Teor de Material pulverulento, Absorção de água por imersão, Área superficial	Obtenção dos dados de caracterização.		100	Previsto para 01/04/2021   Iniciado em 01/04/2021	Previsto para 31/05/2022   Concluído em 31/05/2022
2	1	Realizar os estudo de dosagem empregado o método proposto por Dias (2022) Numero de misturas e dosagens definidas	Definir misturas variando a relação volume de pasta/volume de agregado (Vp/Vag) em cinco níveis diferentes, com duas relações água/materiais secos (A/Ms) diferentes		100	Previsto para 01/04/2021   Iniciado em 01/04/2021	Previsto para 31/05/2022   Concluído em 31/05/2022
3	1	Produção dos compósitos Ensaio executados e dados coletados	Produzir camadas impressas com atraso de deposição entre C1 e C2 de 0, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas e 24 horas. Após 28 dias cortar as peças com dimensões das amostras a serem ensaiadas, terão seu comprimento corresponde a 50 mm x 50 mm x 50 mm		100	Previsto para 01/06/2022   Iniciado em 01/06/2022	Previsto para 31/12/2022   Concluído em 31/12/2022
4	1	Realizar ensaios de aderência Dados coletados a partir dos ensaios	Obtenção dos dados de ensaio de resistência de aderência à tração por compressão diametral		100	Previsto para 01/05/2021   Iniciado em 01/05/2021	Previsto para 31/12/2022   Concluído em 31/12/2022
5	1	Relatório parcial relatório enviado	Entrega de relatório parcial		100	Previsto para 01/08/2022   Iniciado em 01/08/2022	Previsto para 31/08/2022   Concluído em 31/08/2022
5	2	Relatório Final	Entrega de relatório final conforme edital		100	Previsto para 01/01/2023   Iniciado em 01/01/2023	Previsto para 31/01/2023   Concluído em 31/01/2023

## 7 - PLANO DE APLICAÇÃO

Classificação da despesa	Especificação	PROEX (R\$)	DIGAE (R\$)	Campus proponente (R\$)	Total (R\$)
339018	Auxílio Financeiro a Estudantes	0	0	3600.00	3600.00
339020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
449020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
<b>TOTAIS</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15600.00</b>	<b>15600.00</b>

## 8 - CRONOGRAMA DE DESEMBOLSO

Despesa	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12
339018 - Auxílio Financeiro a Estudantes	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	0	0	0
339020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
449020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Anexo A**

## MEMÓRIA DE CÁLCULO

CLASSIFICAÇÃO DE DESPESA	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE DE MEDIDA	QUANT.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	ATIVO
339018 - Auxílio Financeiro a Estudantes	Bolsa para estudante	mês	9	400.00	3600.00	Sim
<b>TOTAL GERAL</b>					<b>3.600,00</b>	