

# 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 07/2023 - Interconecta - Coordenador de Projeto

## 1 - UNIDADE PROPONENTE

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

## 2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do projeto: <b>Desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados por fibras de polipropileno para uso em manufatura aditiva</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: 01/05/2023   Término: 31/12/2023</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>	Bolsista	DOUTORADO
Nome: <b>Ulisses Targino Bezerra</b> Matrícula: <b>274025</b>	Tel.: <b>(83) 3226-7373 / (83) 3612-1300 (ramal: 1300)</b> E-mail: <b>dartarios@yahoo.com.br</b>	Voluntário	DOUTORADO

## 5 - DISCRIMINAÇÃO DO PROJETO

<b>Resumo</b>
<b>Introdução</b> <p>A tecnologia da informação, o uso de dados e a robótica estão cada vez mais presentes nos diversos setores da economia, transformando a indústria para a sua geração 4.0. No entanto, esta é uma realidade ainda incipiente na construção civil brasileira, sobretudo o uso da robótica e manufatura aditiva que ainda está muito distante de ser uma realidade na construção civil Brasileira, como destaca o presidente da Comissão de Materiais, Tecnologia, Qualidade e Produtividade da Câmara Brasileira da Indústria da</p>

Construção (COMAT/CBIC): “A expansão da Impressão em 3D no Brasil, no momento, é perfeitamente possível no que se refere a elementos complementares, mas ainda difícil para construção de moradias”, destaca Dionyzio Klavdianos (CBIC, 2017). Este fato está relacionado com a dificuldade de ainda haver muitas questões sobre como estas estruturas 3D funcionarão no mundo real e ao fato de não haver empresas no Brasil que detenham a tecnologia de impressão 3D em concreto (3DCP).

Entretanto, as instituições de pesquisa e desenvolvimento e algumas empresas internacionais estão em uma corrida frenética para validar modelos e criar normativos técnicos que visem respaldar a implantação de casos reais de construções no mundo todo, este foi o tema central das principais discussões do 3º congresso do concreto digital (<https://www.digitalconcrete2022.com/>), no qual o proponente e seus estudantes pesquisadores apresentaram trabalhos sobre a tecnologia de impressão 3D em concreto desenvolvida pelo IFPB. A impressão 3DCP é uma realidade no EUA e Europa, tendo várias institutos de pesquisa e empresas buscando desenvolver suas impressoras e produtos. A Figura 1a apresenta a impressora executando uma construção teste na universidade de Eindhoven (<https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/3d-concrete-printing/>) e a Figura 1b apresenta uma mini-parede construída no IFPB.

Figura 1. Exemplos de impressões 3D em concreto no mundo



a) 3DCP na universidade de Eindhoven



b) mini-parede 3DCP em construção e construída no IFPB

As obras impressas em 3D com concreto têm crescido de forma rápida, saindo da fase laboratorial para a construção de protótipos, as primeiras experiências relatadas são uma ponte de pedestre na Espanha, uma ponte de bicicletas e um edifício na Holanda, um edifício de dois pavimentos em Dubai em 2019, casas e edifícios na China, (BOS; BOSCO; SALET, 2019; ZHANG et al., 2019).

No Brasil há algumas startups que demonstram potencial para desenvolvimento, onde destaca-se Inova House 3D, 3D Home Construction e a 3D EcoHouse que é uma startup criada por alunos de engenharia civil do campus João Pessoa que surgiu após alguns desenvolvimentos de pesquisas do grupo Materiais e construções sustentáveis do IFPB. No entanto, há ainda a necessidade de avaliar o desempenho das misturas cimentícias e da capacidade de impressão das impressoras desenvolvidas, pois cada empresa ou grupo de pesquisa desenvolveu seu próprio sistema de impressão, o que implica na necessidade de validação em testes de protótipos. Todo processo inovador requer uma série de etapas para validação de produto, o que nem sempre tem regramentos normativos definidos, portanto a confirmação do desempenho dos produtos cimentícios (argamassas e concreto) utilizados para impressão 3D e testes de desempenho são necessários.

#### Justificativa

A manufatura aditiva (impressão 3D) em concreto pode proporcionar grande vantagem, em comparação aos métodos convencionais, pois o processo de construção é altamente automatizado por

impressão de uma mistura cimentícia (compósitos, concreto ou argamassa) que 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). No entanto, não há material cimentício (compósito, concreto ou argamassa) para impressão 3D comercializado no Brasil, esta tecnologia está disponível apenas no mercado Europeu e EUA pela Saint-Gobain internacional (<https://www.saint-gobain.com>) e pela Sika (<https://www.sika.com>), o que irá despertar em breve a concorrência no Brasil, através dessas gigantes do mercado e das empresas brasileiras de produtos cimentício e as empresas regionais.

O material utilizado para impressão 3D em concreto, normalmente é composto por uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo com granulometria controlada, adições minerais, aditivos superplastificante e modificadores de viscosidade e água, e em alguns casos com uso de fibras. Entretanto, há particularidades importantes no uso de fibras na manufatura aditiva, pois as fibras nos concreto para impressão 3D modificam o comportamento do material recém misturado, aumentando a viscosidade e a tensão de escoamento do material, afetando a capacidade de bombeamento e de construção de forma negativa, porém melhora o comportamento no estado endurecido, podendo aumenta a capacidade de deformação do material, evitando fissuras, além de melhorar a resistência à flexão e ductilidade do material.

A eficiência das fibras depende de diversos fatores, como sua relação comprimento-espessura, comprimento da fibras, módulo de elasticidade, dosagem e até mesmo as características do próprio concreto: por exemplo, matrizes cimentícias mais ricas respondem mais eficientemente à adição das fibras, quando são empregados teores e tipos idênticos de fibras (BALAGURU e NAJM, 2004). A definição de matrizes mais ricas são aquelas com menor relação cimento/areia, como no caso das misturas 3DCP.

O presente projeto trata de uma pesquisa experimental que visa submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas, para observar os resultados que a variável produz no objeto. Neste sentido, visa avaliar como o teor (fração volumétrica utilizada) e o comprimento de fibras de polipropileno atuam no comportamento de construtibilidade e resistência de misturas 3DCP utilizando uma impressora projetada e montada pelo grupo de pesquisa em materiais e construções sustentáveis.

#### **Fundamentação teórica**

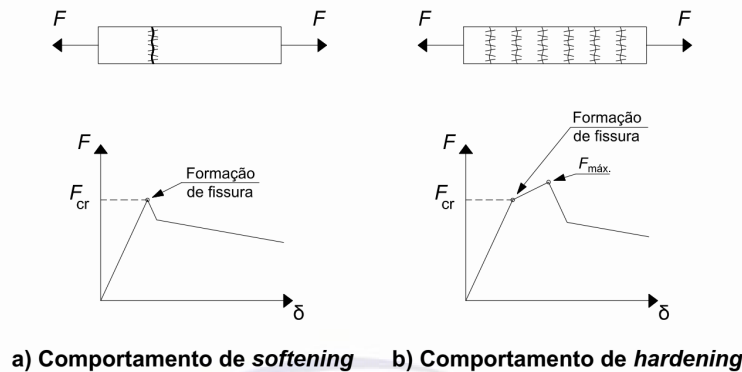
Pesquisas (BENTUR e MINDESS, 2007; BALAGURU e SHAH, 1992) relatam sobre a utilização de fibras desde a antiguidade, cujo objetivo é de reforçar matrizes frágeis, podendo citar como exemplo o uso de palha ou capim como reforços de tijolos de barros secos ao sol. O interesse crescente no desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras teve início, há décadas atrás, com o objetivo de incrementar as propriedades de resinas, metais e cerâmicas.

Com o surgimento de novas tecnologias, o concreto atual permite a produção de compósitos de matriz cimentícia com adequada trabalhabilidade de forma a permitir a incorporação de altas frações volumétricas de materiais super finos (adições minerais) e fibras, produzindo, desta forma, compósitos com elevadas propriedades mecânicas. Entretanto, para que estes tipos de materiais sejam utilizados com segurança em obras estruturais faz-se necessário o profundo conhecimento de suas propriedades reológicas, físicas, mecânicas e de durabilidade.

O comportamento mecânico pós-fissuração do concreto reforçado por fibras (CRF) submetido à tração direta, pode ser caracterizado conforme a Figura 2. A Figura 2 indica que, após a fissuração da

matriz de concreto ( $F_{cr}$ ), a curva de força *versus* o deslocamento do CRF pode assumir dois tipos de comportamento: (a) *softening*, caracterizado pela redução gradual dos valores de força abaixo da força  $F_{cr}$ , (b) *hardening*, caracterizado pelo aumento inicial dos valores de força ( $F$ ) com múltipla fissuração antes de se atingir a força máxima ( $F_{máx.}$ ) (ABNT 16935). Sabe-se que o comportamento *hardening* do CRF só é atingido com altos teores de fibras de alto módulo de elasticidade, já o comportamento *softening* pode ser atingido com fibras de baixo módulo desde que sejam colocadas em frações volumétricas em comprimento e relações comprimento/diâmetros adequadas.

Figura 2. Comportamentos de *softening* e *hardening* do CRF sob tração direta



Dentre as vantagens do uso destes materiais pode-se destacar o aumento de desempenho das propriedades anteriormente desfavoráveis do concreto (retração e fluência), aliando-se assim, à maior tenacidade proporcionada pela inclusão de fibras poliméricas.

### Objetivo geral

O presente projeto consiste em um método de pesquisa experimental que visa estudar a influência do teor de fibras (fração volumétrica,  $v_f$ ) e do comprimento da fibra na capacidade de construção e nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios para impressão 3DCP.

#### Objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais precursores dos compósitos;
- Realizar a dosagem dos compósitos;
- Determinar e analisar o comportamento reológico dos compósitos com diferentes teores de fibra;
- Determinar e analisar as propriedades físicas dos compósitos;
- Avaliar a capacidade de construir peças por impressão 3DCP e analisar o comportamento mecânico dos compósitos reforçados por fibras.

### Metas

- 1 - Etapa 1: Caracterização dos materiais precursores.
- 2 - Avaliação do teor e tamanho de fibra.
- 3 - Determinar e analisar o comportamento reológico e as propriedades físicas dos compósitos
- 4 - Determinação da capacidade de construção
- 5 - Determinação do comportamento mecânico
- 6 - Relatório parcial e final, de acordo com o edital

### 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: Filer calcário (F) e metacaulim (MK)

Agregados naturais: Areia de rio com granulometria controlada

Aditivo químico: Superplastificantes (SP) e modificadores de viscosidade (VMA)

Fibras de polipropileno com 6 mm e 12 mm.

## **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

	<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Laboratório</b>
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: Avaliação do teor e tamanho de fibra.**

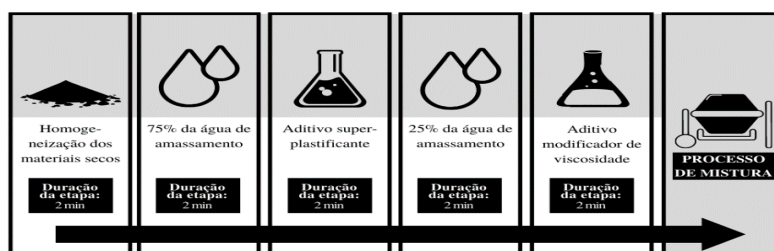
Para o estudo da melhor resposta do comportamento das fibras será empregado o método de planejamento experimental de experimentos, onde serão definidas misturas com frações volumétricas ( $v_f$ ) de 0,5% e 1%, e assim será analisada a influência dos dois comprimentos e dois teores de fibras de acordo com o método estatístico de análise de experimentos, utilizando a composições de 3DCP descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Planejamento experimental – composição das misturas de análise

<b>Cimento</b>	<b>Filer</b>	<b>MK</b>	<b>Agregado</b>	<b>A/C</b>	<b>Fibra 6 mm (%)</b>	<b>Fibra 12 mm (%)</b>
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	0,00	-
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	0,50	-
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	1,00	-
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	-	0,00
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	-	0,50
1,000	0,5	0,17	3,30	0,60	-	1,00

Em seguida serão realizados os processos de mistura (Figura 3) para obtenção das misturas 3DCP e assim poder ter as amostras frescas (recém misturadas) para analisar a propriedades no estado fresco descritas na etapa 3 e as propriedades no estado endurecido descritas na etapa 4.

Figura 3. Esquemática do processo de mistura dos compósitos 3DCP



Fonte: Barbosa (2022).

### Etapa 3. Avaliação das propriedades reológicas e físicas das misturas cimentícias.

A tabela 3 apresenta os testes que serão realizados nas misturas cimentícias definidas na etapa anterior, com o intuito de avaliar a reologia e as propriedades físicas das misturas cimentícias em análise.

Tabela 3. Ensaios a serem realizados para a caracterização das propriedades dos compósitos cimentícios

Propriedade	Ensaio	Laboratório
Viscosidade aparente	Espalhamento na mesa de consistência	Lab3DCP-IFPB
Viscosidade real	Viscosímetro rotacional	Lab3DCP-IFPB
Densidade de massa e teor de ar incorporado	Método gravimétrico	Lab3DCP-IFPB

### Etapa 4. Determinação da capacidade de construção.

Para a análise de viabilidade da impressão das misturas cimentícias serão moldadas peças por impressão 3D, utilizando a impressora projetada e construída pelo grupo de pesquisa do coordenador deste projeto e que está disponível nos laboratórios de engenharia civil do IFPB. A capacidade de impressão será avaliada com base no método proposto em Chen et al. (2020), em que se considera a construção de peças com 400 mm de comprimento e 5 camadas sobrepostas.

### Etapa 5. Determinação do comportamento mecânico.

A orientação da carga de ensaio em relação a disposição dos filamentos possui grande influência no comportamento mecânico dos compósitos impressos. Sabendo disso, se faz necessário definir um sistema de coordenadas, no caso desta pesquisa será utilizada a coordenada Z que consiste na direção de deposição das camadas impressas.

Após a impressão das misturas 3DCP serão realizadas extração de peças destinadas a avaliação das propriedades mecânicas, estas serão submetidas a cura úmida por imersão até as idades de ensaio. A Tabela 4 apresenta a esquematização dos testes previstos no estado endurecido com a respectiva distribuição dos corpos-de-prova.

Tabela 4. Esquemática dos ensaios mecânicos que serão realizados

Ensaio	Método de ensaio	Amostra		Idades	Quantidade de amostras por idade
		Formato	Dimensões (mm)		
Resistência à flexão	ABNT NBR 13279:2005	Prismático	40 x 40 x 160	7 e 28 dias	4
Resistência à compressão	ABNT NBR 13279:2005	Cúbico	40 x 40 x 40	7 e 28 dias	4
Resistência de aderência	Ting <i>et al.</i> (2019)	Cúbico	50 x 50 x 50	7 e 28 dias	4

### 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, 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.

#### Cronograma

ATIVIDADE	INÍCIO DO PLANO	DURAÇÃO DO PLANO										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Meta 1: Caracterizar os materiais precursores dos compósitos	1	1										
Meta 2: Avaliação do teor e tamanho de fibra.	2	3										
Meta 3: Determinar e analisar o comportamento reológico e as propriedades físicas dos compósitos	2	3										
Meta 4: Determinação da capacidade de construção	3	7										
Meta 5: Determinação do comportamento mecânico	4	8										
Meta 6. Relatório parcial e final, de acordo com o edital	5	2										

#### Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado por fibras – Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

BALAGURU, P. N.; NAJM, H. High-performance fiber-reinforced concrete mixture proportions with high fiber volume fractions. **ACI Materials Journal**, v.101, n<sup>o</sup>. 4, pp.281-286. 2004.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites International Edition**, 1992.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber-Reinforced Cementitious Composites 2<sup>nd</sup> Edition. **Modern Concrete Technology Series**. 2007.

BOS, F. P.; BOSCO, E.; SALET, T. A. M. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. **Virtual and Physical Prototyping**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 160–174, 2019. DOI: 10.1080/17452759.2018.1548069.

CBIC. Importância do advento da impressão 3D para a construção civil. Disponível em: <<https://cbic.org.br/importancia-do-advento-da-impressao-3d-para-a-construcao-civil/>>. Acesso em: 05 de março de 2022.

DE SCHUTTER, Geert; LESAGE, Karel; MECHTCHERINE, Viktor; NERELLA, Venkatesh Naidu; HABERT, Guillaume; AGUSTI-JUAN, Isolda. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 112, n. June, p. 25–36, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001.

HE, Yawen; ZHANG, Yamei; ZHANG, Chao; ZHOU, Hongyu. Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 222, 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110110.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D printing. **Constr. Build. Mater.**, 205, p.586-601, 2019.

TING, G. H. A.; TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 21(4), p.994-1003, 2019.

ZHANG, Jingchuan; WANG, Jialiang; DONG, S.; YU, Xun; HAN, Baoguo. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 125, n. April, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105533.

## 6 - CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Meta	Atividade	Especificação	Indicador(es) qualitativo(s)	Indicador físico		Período de execução	
				Unid.de Medida	Qtd.	Início	Término
1	1	Caracterizar os materiais precursores	Realização dos ensaios e determinação da propriedades básicas dos materiais		100	Previsto para 01/05/2023   Iniciado em 01/05/2023	Previsto para 31/05/2023   Concluído em 31/05/2023
2	1	Realizar a dosagem e ensaios preliminares para avaliação da qualificação da fibra	definição dos teores e tamanho de fibras que são possíveis de aplicar em concreto para impressão 3D (DCP)		0	01/06/2023	31/08/2023
3	1	Realizar ensaios de Viscosidade aparente, Viscosidade real, Densidade de massa e teor de ar incorporado	Ensaio realizados e determinação dos valores para cada teor e tamanho de fibra selecionado		100	Previsto para 01/06/2023   Iniciado em 01/06/2023	Previsto para 31/08/2023   Concluído em 31/08/2023
4	1	Avaliar a capacidade de construção a partir da construção de peças por impressão 3D em concreto utilizando a impressora projetada e montada pelo grupo de pesquisa do IFPB	Construção de peças 3DCP com determinação da capacidade de construção		0	01/07/2023	30/11/2023
5	1	Determinação das resistências à flexão, compressão e aderência dos concretos 3DCP	Ensaio realizados e valores dos ensaios obtidos		0	01/08/2023	31/12/2023
6	1	Produção de relatório parcial	Entrega de relatório parcial		0	01/08/2023	31/08/2023
6	2	Produção de relatório final	Entrega de relatório final		0	01/01/2024	31/01/2024

## 7 - PLANO DE APLICAÇÃO

Classificação da despesa	Especificação	PROEX (R\$)	DIGAE (R\$)	Campus proponente (R\$)	Total (R\$)
339018	Auxílio Financeiro a Estudantes	0	0	8000.00	8000.00
339020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
<b>TOTAIS</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>20000.00</b>	<b>20000.00</b>



Classificação da despesa	Especificação	PROEX (R\$)	DIGAE (R\$)	Campus proponente (R\$)	Total (R\$)
449020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
<b>TOTAIS</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>20000.00</b>	<b>20000.00</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	700.00	700.00	700.00	700.00	700.00	700.00	700.00	700.00	0	0	0	0
339020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	6000.00	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	pagamento de bolsas a estudantes	mês	8	700.00	5600.00	Sim
339020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	Despesas de custeio do projeto	Mês	1	6000.00	6000.00	Sim
<b>TOTAL GERAL</b>					<b>11.600,00</b>	