



Politécnico de Leiria
Escola de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Mecânica
Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

Sistema de Inserção automática de fibras para Projeção de Betão Reforçado

Anton Mezhyrych

2200164

Leiria, março, 2024



Politécnico de Leiria
Escola de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Mecânica
Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

Sistema de Inserção automática de fibras para Projeção de Betão Reforçado

Anton Mezhyrych
2200164

Relatório do Projeto realizado sob a orientação do
Professor Doutor Carlos Fernando Couceiro de Sousa Neves

Leiria, março, 2024

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de mestrado é uma longa viagem, que inclui uma trajetória permeada por inúmeros desafios, tristezas, incertezas, alegrias e muitos percalços pelo caminho. Mas, apesar do processo solitário a que qualquer investigador está destinado, reúne contributos de várias pessoas, indispensáveis para encontrar o melhor rumo em cada momento da caminhada. Trilhar este caminho só foi possível com o apoio, energia e força de várias pessoas, a quem dedico especialmente este projeto de vida.

Especialmente o meu orientador, Professor Doutor Carlos Fernando Couceiro de Sousa Neves, que sempre acreditou em mim, agradeço a orientação exemplar pautada por um elevado e rigoroso nível científico, um interesse permanente e fecundo, uma visão crítica e oportuna, um empenho inexcedível e saudavelmente exigente, os quais contribuíram para enriquecer, com grande dedicação, passo por passo, todas as etapas subjacentes ao trabalho realizado. Obrigado pela oportunidade de realizar este trabalho e pela confiança e por me atender com paciência todas as vezes que bati à sua porta. Agradeço por todos os ensinamentos e por me guiar nos passos do mestrado. Muito obrigado por tudo!

A todos os amigos e colegas do Instituto Politécnico de Leiria que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram, ou auxiliaram, na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis. Para não correr o risco de não enumerar algum não vou identificar ninguém, aqueles a quem este agradecimento se dirige sabê-lo-ão. Desde já os meus agradecimentos.

Por fim a minha esposa. Por ter caminhado ao meu lado, pela sua paciência, compreensão e ajuda prestada durante a elaboração do presente relatório, com que me brindou constantemente, contribuindo para chegar ao fim deste percurso, quando sacrificava os dias, as noites, os fins-de-semana e os feriados em prol da realização deste estudo. Ela nunca mediou esforços para me ajudar a realizar meus sonhos e vontades. Tudo o que pedi ela sempre fez o possível e o impossível para tornar real e me ensinou a nunca desistir dos meus sonhos.

Enfim, quero demonstrar o meu agradecimento, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente dissertação.

A todos o meu sincero e profundo **Muito Obrigado!**

RESUMO

Na indústria da construção civil, onde a busca por estruturas mais resilientes e duráveis é uma constante, os avanços tecnológicos desempenham um papel crucial na melhoria da qualidade e eficiência. Um domínio de extrema importância é a aplicação de fibras no betão, uma abordagem que tem transformado a maneira como se projetam e edificam estruturas. A incorporação de fibras, sejam elas de aço, polímero ou outros materiais, oferece uma abordagem inovadora para reforçar o betão, conferindo-lhe maior resistência a fissuração, impactos e cargas dinâmicas. Entretanto, para atender às crescentes exigências da indústria, a mera inclusão de fibras não é suficiente, é imperativo garantir a sua distribuição precisa e homogênea. Neste contexto, a necessidade de um mecanismo automatizado e controlado para otimizar a dispersão de fibras no betão torna-se evidente.

O desenvolvimento dos protótipos de mistura e inserção de fibras é encarado como uma jornada que abarca uma série de desafios complexos, requerendo abordagens inovadoras e soluções criativas. Desde o design estrutural dos protótipos até a integração e adaptação destes sistemas, múltiplas etapas críticas são necessárias para assegurar a concretização dos objetivos de eficiência e precisão na adição de fibras.

A complexidade é ampliada quando reconhecemos que a incorporação eficaz de fibras não se limita à tarefa única de mistura. De facto, para garantir uma distribuição homogênea, é necessário pré-processar as fibras, separando-as antes da adição ao betão. Nesse sentido, um notável esforço foi dedicado ao desenvolvimento de um protótipo capaz de separar e dosear as fibras antes de serem introduzidas no mecanismo de mistura.

Este projeto investiga as fases de desenvolvimento desses protótipos, englobando o design, testes e refinamentos necessários. O cerne do trabalho concentra-se na conceção e desenvolvimento de uma nova geração de produtos, evidenciando o compromisso integral com a evolução técnica e prática do processo de mistura e inserção de fibras no betão.

Palavras-chave: Shotcrete, Projeção de betão reforçado com fibras, Mistura de fibras em betão, Separação de fibras, Automação, Controlo.

ABSTRACT

In the construction industry, where the search for more resilient and durable structures is a constant, technological advances play a crucial role in improving quality and efficiency. An extremely important domain is the application of fibers in concrete, an approach that has transformed the way structures are designed and built. The incorporation of fibers, whether made of steel, polymers or other materials, offers an innovative approach to reinforcing concrete, giving it greater resistance to cracking, impacts and dynamic loads. However, to meet the growing demands of the industry, the mere inclusion of fibers is not enough, it is imperative to ensure its precise and homogeneous distribution. In this context, the need for an automated and controlled mechanism to optimize fiber dispersion in concrete becomes evident.

The development of fiber mixing and insertion prototypes is seen as a journey that embraces a series of complex challenges, demanding innovative approaches and creative solutions. From the structural design of the prototypes to the integration and adaptation of these systems, multiple critical steps are necessary to ensure the achievement of the objectives of efficiency and precision in the addition of fibers.

Complexity is magnified when we recognize that effective fiber incorporation is not limited to the single blending task. In fact, to ensure a homogeneous distribution, it is necessary to pre-process the fibers, separating them before adding them to the concrete. In this sense, a notable effort was devoted to the development of a prototype capable of separating and dosing the fibers before being introduced into the mixing mechanism. This advancement underscores the holistic approach taken to improve the entire process of incorporating fibers into concrete.

This dissertation investigates the development phases of these prototypes, encompassing the design, tests and necessary refinements. The core of the work focuses on the design and development of a new generation of products, demonstrating the full commitment to the technical and practical evolution of the process of mixing and inserting fibers into concrete.

Keywords: Mixing prototypes, Fiber separation, Automation, Control, Steel Fibers, Polymeric fibers

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Estrutura do trabalho	2
2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE	3
2.1. Introdução ao betão projetado.....	3
2.1.1. Betão projetado de mistura húmida.....	3
2.1.2. Betão projetado de mistura seca.....	4
2.1.3. Betão Reforçado com Fibra FRC	5
2.1.4. Métodos de aplicação do betão projetado	6
2.2. Fibras de reforço	8
2.2.1. Classificações de fibra.....	8
2.2.2. Fibra metálica (aço).....	8
2.2.3. Fibra de polímero (polipropileno)	10
2.3. Comportamento e distribuição de fibras	11
2.3.1. Centrais de betão	11
2.3.2. Técnica de alimentação de fibras <i>in situ</i> (Sika AG)	13
2.3.3. Equipamento de doseamento de Fibras	14
2.4. Alimentação direta de fibras no betão projetado	15
2.5. Análise Crítica	15
3. REVISÃO DOS TRABALHOS PRELIMINARES.....	17
3.1. Equipamento de medição de força do jato.....	17
3.2. Testes da força com o jato ligado	20
4. DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE INSERÇÃO E SEPARAÇÃO DE FIBRAS.....	25
4.1. Conceito de um sistema Revólver com pistão cilíndrico.....	25

4.1.1.	Protótipo conceptual nº1	25
4.1.2.	Protótipo conceptual nº2	27
4.2.	Conceito de Revólver com pistão triangular.....	32
4.3.	Conceito de um sistema autopropulsado.....	43
4.3.1.	Protótipo nº4.....	43
4.3.2.	Protótipo nº5.....	47
4.4.	Conceito da garganta da tremonha com eixo separador	53
4.5.	Conceito de separação com tapetes.....	55
4.5.1.	Construção do modelo físico.....	55
4.5.2.	Automação do processo	57
4.5.3.	Fluxograma do processo.....	59
5.	TESTES E RESULTADOS	63
5.1.	Protótipo nº4	63
5.1.1.	Características do modelo físico.....	63
5.1.2.	Resultado do teste na prática	64
5.1.3.	Conclusões	64
5.2.	Protótipo de separação de fibras.....	65
5.2.1.	Teste da resposta da célula de carga.....	66
5.2.2.	Teste em série.....	66
5.2.3.	Formulação do problema.....	67
5.2.4.	Estrutura do Modelo de Previsão	68
5.2.5.	Conclusões sobre protótipo	72
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	75
7.	REFERÊNCIAS.....	77
8.	ANEXO A - Código de modelação do Protótipo nº5	81
9.	ANEXO B - Lista dos equipamentos utilizados no protótipo de separação	85
10.	ANEXO C - Código do algoritmo de previsão	87
11.	ANEXO D - Esquema do circuito elétrico da parte de pesagem	91
12.	ANEXO E - Esquema do circuito de controlo de fluxo de fibra	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: APLICAÇÃO DE MISTURA HÚMIDA DE MODO AUTOMATIZADO[6].....	4
FIGURA 2: CONCEITO DE BICO DE PULVERIZAÇÃO[6]	5
FIGURA 3: APLICAÇÃO DO BETÃO PROJETADO POR PROCESSO DE MISTURA ÚMIDA EM TÚNEIS (A, B)[16].....	7
FIGURA 4: APLICAÇÃO DE SFRC NA CONSTRUÇÃO DO PONTE RODOVIÁRIO (USO DE LAJES PRÉ-FABRICADOS)[17].....	9
FIGURA 5: APLICAÇÃO DE SFRC NA CONSTRUÇÃO DO PONTE RODOVIÁRIO (USO DE LAJES PRÉ-FABRICADOS)[17].....	9
FIGURA 6: APLICAÇÃO DO SFRC NA CONSTRUÇÃO DE ESTRADA (LAJES PRÉ-FABRICADOS)[18].....	9
FIGURA 7: FIBRAS METÁLICAS ENGANCHADAS[21]	10
FIGURA 8: FIBRA DE POLIPROPILENO[21].....	11
FIGURA 9: ENTREGA DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO. BETONGINDUSTRI AB, ESTOCOLMO[23]	12
FIGURA 10: A) ADIÇÃO DE FIBRA SEMI-AUTOMATIZADA. B) ADIÇÃO DE FIBRA MANUALMENTE[24].....	13
FIGURA 11: EXEMPLO DE UM SACO COM FIBRA DE PLÁSTICO[24].....	13
FIGURA 12: SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO MEKA[25].....	14
FIGURA 13: PRODUÇÃO DE ELEMENTO COM MÉTODO <i>SPRAY-UP</i> [26].....	15
FIGURA 14: EQUIPAMENTO MEDIÇÃO CONSTRUÍDO EM LABORATÓRIO	17
FIGURA 15: CÉLULA DE CARGA FCOL-C3-200KG[27]	18
FIGURA 16: <i>DIGITAL-ANALOG WEIGHT TRANSMITTER TLB4</i> DA MARCA LAUMAS[28]	18
FIGURA 17: <i>NATIONAL INSTRUMENTS USB-6001</i> [29].....	18
FIGURA 18: ESQUEMA ELETRÓNICO SIMPLIFICADO	19
FIGURA 19: SAÍDA DE TENSÃO PARA ESFORÇO MANUAL E PARA UM TESTE DE 10S.....	19
FIGURA 20: EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO.....	20
FIGURA 21: RESPOSTA DA CÉLULA DE CARGA EQUIVALENTE AO CAUDEL DE 10M ³ /H.....	21
FIGURA 22: RESPOSTA DA CÉLULA DE CARGA EQUIVALENTE AO CAUDEL DE 15M ³ /H.....	21
FIGURA 23: RESPOSTA DA CÉLULA DE CARGA EQUIVALENTE AO CAUDEL DE 20M ³ /H.....	22
FIGURA 24: EQUIPAMENTO DE PROJECÇÃO PM 500 PC[30]	22
FIGURA 25: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA DE PISTÃO DUPLO[31]	23
FIGURA 26: DADOS MEDIDOS DURANTE A PULVERIZAÇÃO A 12 M ³ /H, 18 M ³ /H E 24 M ³ /H[31].....	24
FIGURA 27: PROTÓTIPO PRELIMINAR Nº1	25
FIGURA 28: EXEMPLO DE UMA VÁLVULA DE EQUÍLIBRIO ESTÁTICA[32].....	26
FIGURA 29: EXEMPLO DE VÁLVULAS DE EQUÍLIBRIO DINÂMICAS[33].....	27
FIGURA 30: CILINDRO PNEUMÁTICO.....	28
FIGURA 31: ALTERAÇÃO ESTRUTURAL DO TAMBOR.....	28
FIGURA 32: PISTÃO, MODELO AVANÇADO.....	29
FIGURA 33: MODELO VIRTUAL DO CILINDRO ROTATIVO	29
FIGURA 34: RECIPIENTE PARA FIBRAS	30
FIGURA 35: MODELO PRELIMINAR APROVADO.....	30

FIGURA 36: ESTRUTURA DE GUIAMENTO EXTERIOR	33
FIGURA 37: GUIAMENTO INTERIOR (ESTRUTURA EXTERIOR ESTÁ TRANSPARENTE)	33
FIGURA 38: VISTA DOS PISTÕES DENTRO DE ESTRUTURA DE GUIAMENTO	34
FIGURA 39: ESTRUTURA DE TAMBOR (COR VERDE).....	34
FIGURA 40: A ESTRUTURA CENTRAL RESPONSÁVEL PELA PASSAGEM DO BETÃO.....	35
FIGURA 41: MODELO FINAL DE PROTÓTIPO Nº3	35
FIGURA 42: GRÁFICOS DE COMPOSIÇÃO X * Y.....	39
FIGURA 43: ROLAMENTOS MONTADOS NUM PONTO DA EXTREMIDADE DA GUIA DO PISTÃO	40
FIGURA 44: DIAGRAMA DO MOMENTO FLETOR	41
FIGURA 45: PROTÓTIPO CONCEPTUAL Nº 4.....	44
FIGURA 46: LIMITES INTERNOS DA CÂMARA DO PROTÓTIPO	45
FIGURA 47: DISTÂNCIA DE SEGURANÇA (AB) E COMPRIMENTO ENTRE PALHETAS (AC)	46
FIGURA 48: MODELO DESENVOLVIDO NO MATLAB	48
FIGURA 49: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS TRANSIÇÕES	51
FIGURA 50: PROTÓTIPO DA GARGANTA COM EIXO SEPARADOR	54
FIGURA 51: MECANISMO DE SEPARAÇÃO COM TELAS ABRASIVAS.....	55
FIGURA 52: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MECANISMO	56
FIGURA 53: MECANISMO DE SEPARAÇÃO MODIFICADO	57
FIGURA 54: CÉLULA DE CARGA COM CAPACIDADE MÁXIMA ATÉ 1,5 KG[34]	57
FIGURA 55: SENSOR ELETROMAGNÉTICO DESENVOLVIDO NO AMBIENTE LABORATORIAL	58
FIGURA 56: MOTOR DC DA MARCA DOGA[35]	58
FIGURA 57: MOTOR DC COM ENCODER DA MARCA PITTMAN[36]	59
FIGURA 58: DIAGRAMA DE BLOCOS DO FLUXO DO PROCESSO.....	60
FIGURA 59: MODELO FÍSICO.....	63
FIGURA 60: TESTE DO MODELO FÍSICO	64
FIGURA 61: PROTÓTIPO INDUSTRIAL CONSTRUIDO.....	65
FIGURA 62: GRÁFICO DE MEDIÇÃO DO FLUXO DA FIBRA.....	66
FIGURA 63: GRÁFICO DAS MÉDIAS DOS VALORES.....	66
FIGURA 64: GRÁFICO DAS MÉDIAS DOS VALORES (ESTIMADO)	67
FIGURA 65: FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO MODELO DA PREVISÃO.....	68
FIGURA 66: ESTÁGIO 1 (SEM APLICAÇÃO DO MODELO PREVISÃO)	71
FIGURA 67: ESTÁGIO 2 (SEM APLICAÇÃO DO MODELO PREVISÃO)	71
FIGURA 68: GRÁFICO DE MEDIÇÃO, ESTAGIO 1	72
FIGURA 69:GRÁFICO DE MEDIÇÃO, ESTAGIO 2.....	72
FIGURA 70: PROTÓTIPO INDUSTRIAL DE SEPARAÇÃO DE FIBRA (COM DUPLA DOSAGEM)	73

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE MISTURA SECA E MISTURA HÚMIDA[7].....	5
TABELA 2: RELAÇÃO ENTRE TENSÃO (V) E ESFORÇO (KG).....	20
TABELA 3: VALORES NOMINAIS PARA PARAFUSOS SEGUNDO SUA CLASSE DE RESISTÊNCIA.....	41

1. INTRODUÇÃO

A utilidade do betão reforçado com fibras (FRC) em várias aplicações de engenharia é inegável. A implementação bem-sucedida do FRC em túneis, tabuleiros de pontes, avenidas, docas de carregamento, revestimentos finos não aderentes, almofadas de betão e lajes de betão, tem evidenciado o seu desempenho notável e impulsionado a sua crescente popularidade.

Com a evolução da indústria da construção, a redução dos prazos de projeto, o aumento da eficiência da construção e a maximização do retorno do investimento tornaram-se prioridades fundamentais [1]. Paralelamente, a automação e a robótica assumem hoje um papel crucial para aumentar a segurança, a produtividade e a qualidade nas atividades deste setor [2]. Contudo, a aplicação de betão por projeção ainda depende, em grande medida, do trabalho manual. Isso reforça a necessidade de equipamentos de construção automatizados que possam adaptar-se ao ambiente de trabalho, substituindo a intervenção humana e melhorando a eficácia das operações [3].

Neste projeto, o FRC é aplicado por meio de um sistema robotizado, que integra um subsistema de adição controlada de fibras, em quantidade e tipo, visando assegurar as propriedades desejadas do FRC para a aplicação específica. A automação da projeção oferece um controle mais preciso da espessura do betão projetado e possibilita ajustes em tempo real na quantidade de fibras adicionadas, de acordo com as especificações do projeto estrutural.

O foco do trabalho direcionou-se para a criação de protótipos automatizados que otimizam tanto a incorporação das fibras no betão quanto a sua separação, com objetivo de aumentar a eficiência e a qualidade do processo.

1.1. Objetivo

No âmbito deste projeto, a ênfase é colocada na busca por soluções abrangentes para os desafios presentes no setor da construção civil. Este setor, com sua ampla utilização de betão, acarreta considerável impacto ambiental, exigindo a uma abordagem inovadora e responsável. Os equipamentos de projeção de betão, quando operados em ambientes perigosos, geram condições de trabalho adversas. Com a automação dos equipamentos de projeção de betão, não apenas se pretende melhorar a eficiência do processo, mas também criar um ambiente de trabalho mais seguro.

Nesse contexto, o projeto concentra-se num componente significativo: da automação dos equipamentos de projeção de betão, ao reconfigurar os equipamentos para automatizar etapas como a separação, adição e dosagem de fibras, assim como sua subsequente incorporação no fluxo do betão.

1.2. Estrutura do trabalho

Neste subcapítulo, será apresentada a estrutura geral deste trabalho, fornecendo uma visão panorâmica dos tópicos abordados e da organização do conteúdo:

No primeiro capítulo, serão explorados os métodos e técnicas do betão projetado, juntamente com a distribuição das fibras e as técnicas de introdução no betão projetado.

No segundo capítulo, descreve-se um estudo inicial que caracterizou o comportamento do fluxo de betão num equipamento de projeção.

No terceiro capítulo, são discutidos os desenvolvimentos conceptuais de uma gama de protótipos para mistura de fibras.

No quarto capítulo, serão descritas as ideias e técnicas utilizadas na construção do equipamento de separação de fibras.

No quinto capítulo, serão detalhados os testes realizados e os resultados obtidos na prática deste projeto, oferecendo uma análise abrangente do desempenho do sistema implementado.

No último capítulo, será apresentada uma conclusão geral do trabalho realizado, destacando os principais resultados alcançados e discutindo as possíveis direções futuras para este projeto.

2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

No presente capítulo apresenta-se uma análise detalhada do Estado da Arte, onde serão discutidas as diversas experiências e pesquisas que moldaram o panorama atual da área. Serão abordados os estudos e avanços significativos relacionados com a automação dos equipamentos de projeção de betão, assim como as abordagens adotadas para a integração de fibras no betão reforçado FRC. Por meio de uma análise crítica e comparativa dessas experiências, busca-se estabelecer uma base para o trabalho, identificando lacunas, oportunidades e direções para o trabalho futuro. A partir das lições aprendidas e das contribuições desses estudos, pode contextualizar-se o projeto e demonstrar como ele se alinha, inova e expande os horizontes existentes.

Este capítulo divide-se em cinco secções:

- **Secção 2.1.** Serão explorados os princípios fundamentais do betão projetado.
- **Secção 2.2.** Descreve tipos de fibra que foram utilizadas no projeto.
- **Secção 2.3.** São abordados diversos aspetos relacionados com a distribuição e mistura das fibras em FRC na fase de pré-alimentação.
- **Secção 2.4.** Esta secção descreve métodos e técnicas de inserção de fibra diretamente no fluxo do betão.
- **Secção 2.5.** Resume os principais pontos apresentados nas secções. São destacadas as principais tendências, desafios e avanços na tecnologia do FRC e suas aplicações na construção. Além disso, apontam-se as implicações do Estado da Arte para este projeto, evidenciando como ele se encaixa no contexto geral da investigação e inovação na área.

2.1. Introdução ao betão projetado

2.1.1. Betão projetado de mistura húmida

Desde a década de 1970, o uso de betão projetado húmido (SRFC), que é preferido a outros métodos para suporte principal ou suporte auxiliar para aberturas subterrâneas, aumentou especialmente nas superfícies laterais que podem escorregar durante a escavação da fundação, taludes nas laterais de estradas ou rodovias e teto e paredes em construções de túneis [4], [5].

As razões mais importantes para o sucesso do uso de FRC nessas áreas são que ele pode ser aplicado imediatamente após o processo de escavação, o que dá uma capacidade de carga

precoce à camada de terra desmoronada e deformada, aumenta a resistência ao corte da camada de rocha rapidamente, e o transporte e a colocação da mistura podem ser realizados ao mesmo tempo.

Betão projetado húmido refere-se à entrega do betão pronto para projeção, composto por agregados, cimento, água e aditivos, numa mistura que seja facilmente trabalhável. Para a aplicação por projeção, o betão húmido é misturado com ar e aditivos aceleradores de presa e, em seguida, é projetado. Esse tipo de betão projetado húmido pode ser processado por meio do método de fluxo denso ou de fluxo fino. O betão projetado de fluxo denso representa, de acordo com a literatura, o processo mais recente e de melhor desempenho [6], (Figura 1). Geralmente, o fluxo denso é preferível quando se necessita de maior resistência inicial e melhor aderência às superfícies, enquanto o fluxo fino é mais adequado para situações que requerem melhor trabalhabilidade e facilidade de aplicação.



Figura 1: Aplicação de mistura húmida de modo automatizado[6]

2.1.2. Betão projetado de mistura seca

No processo de mistura a seco a mistura cimento-agregados é misturada previamente e inserida num alimentador mecânico (equipamento de alimentação) e, na maioria das vezes, é impulsionado por ar comprimido através da mangueira até uma ponteira. O corpo da ponteira é equipado internamente com um anel onde a água é introduzida sob pressão e misturada completamente com os outros ingredientes (Figura 2). O material é ejetado da ponteira em alta velocidade e projetado para a área de trabalho [7].



Figura 2: Conceito de bico de pulverização[6]

Tabela 1: Comparação dos processos de mistura seca e mistura húmida[7].

PROCESSO DE MISTURA SECA	PROCESSO DE MISTURA HÚMIDA
Controlo instantâneo sobre a mistura de água e consistência da mistura no bocal para atender condições variáveis de projeção	A água de mistura é controlada no equipamento da mistura e pode ser medida com precisão
Mais adequado para a utilização de misturas com agregados leves ou materiais refratários.	Maior garantia de homogeneidade na mistura
Capaz de ser transportado para mais longe	Menos perda de poeira e materiais cimentícios durante as operações de bombagem
As mangueiras de entrega são mais fáceis de mover	Normalmente apresenta menor ressalto de mistura, resultando em menor desperdício de água.
Menor volume por tamanho de mangueira.	Maior volume por tamanho de mangueira.

2.1.3. Betão Reforçado com Fibra FRC

As últimas cinco décadas marcaram o desenvolvimento moderno e a expansão do betão reforçado com fibras (FRC), o que levou a uma extensa aplicação e aumento da penetração no mercado. Esse sucesso deve-se, em parte, aos avanços na armadura de fibras, na matriz

cimentícia, na ligação entre a fibra e a matriz e na compreensão fundamental da mecânica do material compósito [8].

O betão é um material frágil com baixa capacidade de resistência ao esforço. A adição de fibras curtas e distribuídas aleatoriamente pode lidar com várias preocupações relacionadas com a fragilidade do betão e com a resistência deficiente ao aparecimento e à propagação de fendas. As fibras, utilizadas como reforço, podem influenciar na prevenção da fissuração em níveis micro e macro.

A utilização de microfibras impede o surgimento e a propagação das fissuras. Após as microfissuras se unirem em macrofissuras, as fibras oferecem mecanismos que impedem a sua propagação. Quase todos os FRCs usados comercialmente são constituídos apenas com um único tipo de fibra. É conhecido que um determinado tipo de fibra pode ser eficaz apenas numa gama limitada, dependendo da origem e da orientação das fissuras. A vantagem de combinar fibras orgânicas (polipropileno e nylon) e fibras inorgânicas (carbono, vidro e amianto) para obter melhores características de resistência à tração e à fratura foi reconhecida por Walton e Mujumdar [9]. Em termos de aplicação, as fibras de aço e polipropileno são as que têm maior utilização [10].

Na literatura sobre de FRC, para obter o melhor desempenho em termos de resistência à tração, ductilidade, tenacidade e durabilidade, é descrita a utilização de uma mistura de duas ou mais tipologias de fibras [11], [12]. Como consequência, múltiplos tipos de fibras são adicionados ao betão híbrido reforçado com fibras (HRFC), o que produz desempenhos híbridos que são melhores que a soma dos desempenhos das fibras individuais [13], [14].

O betão projetado é um método de construção flexível, económico e rápido, mas requer um alto grau de mecanização e especialistas com formação adequada são essenciais para a aplicação bem-sucedida do processo [6].

2.1.4. Métodos de aplicação do betão projetado

O betão projetado não é considerado um material único, mas sim um processo especial de colocação de betão. Uma das características mais importantes do betão projetado, especificamente na aplicação em túneis, é o elevado desenvolvimento de resistência inicial, alcançado na maioria dos casos por meio de um acelerador de presa que, juntamente com o

procedimento de pulverização, permite que o betão seja colocado sem suporte extra, aderindo à superfície e endurecendo em minutos.

Atualmente, o processo de mistura húmida é usado com mais frequência em túneis, (Figura 3), devido ao rendimento maior e à menor produção de poeira em comparação com o processo de mistura seca. Além disso, a quantidade de material de rebote, compreendendo principalmente agregados mais grossos que não aderem ao substrato, é significativamente reduzida pelo processo de mistura húmida.

Um exemplo importante de uso extensivo de betão projetado de mistura húmida é a construção do *Brenner Base Tunnel* (BBT). O BBT é um túnel ferroviário transnacional entre a Itália e a Áustria, composto por um túnel exploratório e dois tubos principais. Incluindo o túnel de desvio perto de Innsbruck, o comprimento total do BBT será de 64 km. Após sua conclusão planeada em 2032, o BBT será o túnel ferroviário mais longo do mundo [15].

Em geral, o betão projetado é utilizado quando o acesso é difícil e a construção de cofragens e aplicação de betão comum não são possíveis ou quando é necessária uma consolidação muito rápida.



Figura 3: Aplicação do betão projetado por processo de mistura úmida em túneis (a, b)[16]

O uso do betão projetado na construção de túneis foi desenvolvido junto com a tecnologia de construção de túneis. Especificamente o Método Austríaco Novo de Escavação de Túneis (NATM), desenvolvido na década de 1960 tem como resultado que a resistência original da rocha circundante é preservada e as cargas do túnel são suportadas pelo próprio túnel e pela rocha circundante. As vantagens do NATM em relação aos métodos mais antigos incluem maior velocidade de trabalho, menor profundidade de escavação de rocha (menor seção transversal necessária) e maior segurança no local de trabalho [16].

2.2. Fibras de reforço

2.2.1. Classificações de fibra

As fibras podem ser benéficas tanto nos estágios micro como macro da fissuração, dependendo do seu tamanho e percentagem sobre o volume de betão. Assim, as duas principais categorias de fibras utilizadas para reforço de betão são macro e micro.

Fibras grandes, com comprimento de 30–60 *mm* e diâmetro de 0,5–1,0 *mm*, são conhecidas como macrofibras. Por outro lado, as microfibras são extremamente pequenas, com diâmetro de cerca de 0,20 *mm* e comprimento geralmente de 5–10 *mm*. Devido ao seu tamanho reduzido, as microfibras interagem com a pasta e a argamassa, impedindo a propagação da fratura e aumentando a resistência à tração aparente do compósito. As macrofibras, por outro lado, oferecem uma capacidade maior de dissipação de energia em relação à fissuração da matriz, preenchendo completamente as macrofissuras formadas e evitando sua expansão e aprofundamento [11].

2.2.2. Fibra metálica (aço)

O uso de fibras metálicas em aço, causa alterações qualitativas nas propriedades físicas do betão reforçado. Pode aumentar muito a resistência à fissuração, ao impacto, à fadiga e à flexão, melhorando a tenacidade e a durabilidade. Uma vez que melhora o comportamento a longo prazo, aumentando a resistência, a tenacidade e a resistência, o betão projetado com fibras (SFRC) usa-se também em outras estruturas como, por exemplo, lajes, habitações, elementos pré-fabricados, pontes o que está referido nas seguintes figuras:



Figura 4: Aplicação de SFRC na construção do ponte rodoviário (uso de lajes pré-fabricados)[17]



Figura 5: Aplicação de SFRC na construção do ponte rodoviário (uso de lajes pré-fabricados)[17]



Figura 6: Aplicação do SFRC na construção de estrada (lajes pré-fabricados)[18]

A especificação ASTM A820-01 abrange os requisitos mínimos para fibras de aço destinadas a serem usadas em betão reforçado com fibras, um exemplo das quais pode ser visto

na Figura 7. Quatro tipos de fibras de aço para este fim são definidos como peças de arame liso ou deformado estirado a frio; folha cortada lisa ou deformada; fibras extraídas por fusão; ou outras fibras de aço que sejam suficientemente pequenas para serem dispersas aleatoriamente numa mistura de betão [19], [20].

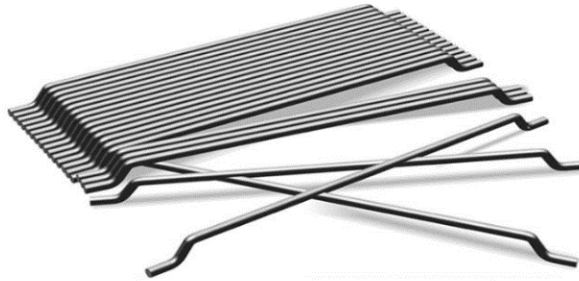


Figura 7: Fibras metálicas enganchadas[21]

As fibras de aço têm um alto módulo de elasticidade e produzem compósitos rígidos e fortes para aplicações estruturais em betão. Fibras de baixo módulo, como o polipropileno, permitem que os compósitos de betão absorvam energia e resistam a impactos e cargas de choque. Glavind e Aare [12], estudaram betões de resistência normal e alta resistência incorporando diversas concentrações de fibras de aço e de polipropileno (PP). A percentagem de aço e fibras de polipropileno utilizada foi de 0,6% e 1,0%, respetivamente. Em misturas híbridas, estes autores usaram 0,5% em volume de fibras de aço e 0,5% em volume de fibras de (PP). Neste trabalho, foi demonstrado que a hibridização dessas duas fibras melhorou a resistência à compressão final do compósito para betão de resistência normal.

2.2.3. Fibra de polímero (polipropileno)

O betão pode também ser reforçado com fibra de polipropileno (Figura 8). É uma fibra sintética, transformada a partir de propileno e utilizada em diversas aplicações. Essas fibras são geralmente usadas em betão para controlar fissuras devido à retração plástica e à retração por secagem. Esta aplicação também reduz a permeabilidade do betão e, assim, reduz a exsudação de água. A fibra de polipropileno pertence ao grupo das poliolefinas e é parcialmente cristalina e apolar. Possui propriedades semelhantes às do polietileno, mas é mais duro e resistente ao calor. É um material branco, robusto com alta resistência química. O polipropileno é fabricado a partir do gás propileno na presença de um catalisador como o cloreto de titânio. A fibra de

polipropileno apresenta boas propriedades de isolamento térmico e é altamente resistente a ácidos, bases e solventes orgânicos [20].



Figura 8: Fibra de polipropileno[21]

Kazemian e Shafei [22] descobriram que a adição de fibras sintéticas ao betão melhora as suas propriedades mecânicas, mesmo em baixas dosagens. Os autores descobriram que uma combinação de fibras sintéticas, incluindo fibras de polipropileno e nylon, resulta em melhor desempenho do (HFRC) em comparação com o uso de tipos de fibra individuais. O estudo também mostrou que a esbelteza das fibras desempenha um papel significativo nas propriedades mecânicas do HFRC, com fibras mais longas resultando em maior resistência. O estudo fornece informação sobre as combinações ideais e proporções de fibras sintéticas para HFRC, o que pode ser útil para o projeto de estruturas de betão com maior resistência e durabilidade.

2.3. Comportamento e distribuição de fibras

2.3.1. Centrais de betão

É de extrema importância conseguir uma distribuição homogênea das fibras no betão pronto evitando a formação de novelos.

Este fenómeno pode ser definido como a situação quando as fibras se enredam em grandes aglomerados ou bolas numa mistura. O emaranhamento e a aglomeração podem ser resultados de diferentes fatores, como fibras já aglomeradas antes de serem adicionadas à mistura, adição rápida que causa dispersão irregular, mistura pouco eficaz. Independentemente

do procedimento de mistura, as fibras devem ser adicionadas bem separadas durante a mistura. Se as fibras forem adicionadas a um caminhão betoneira para serem misturadas, elas devem primeiro ser transferidas do local de armazenamento para a estação central de fibras, em seguida devem ser espalhadas ao longo da correia transportadora e, posteriormente, inseridas na mistura (Figura 9). Seguindo este procedimento, as possibilidades da formação de emaranhados são drasticamente diminuídas. Dessa forma, caso a adição de fibras ocorra na betoneira central de uma central doseadora de betão, os mesmos passos deverão ser seguidos com a única diferença de que a mistura ocorre antes do carregamento para o caminhão betoneira. Um foco significativo deve ser dado continuamente para evitar a formação de novelos. Caso ocorra essa formação durante as operações de mistura, os novelos podem ter que ser retirados manualmente adicionando peso equivalente de fibras [23].



Figura 9: Entrega de Betão Reforçado com Fibra de Aço. Betongindustri AB, Estocolmo[23]

- a) Transferência e deposição de fibras de aço na estação central de fibras
- b) A estação central de fibra começa a vibrar
- c) Os filamentos de fibra de aço estão se espalhando ao longo da correia transportadora
- d) As fibras de aço separadas vão diretamente dentro à betoneira

2.3.2. Técnica de alimentação de fibras *in situ* (Sika AG)

Segundo (*SikaFiber Reinforced Concrete Handbook*) [24] as fibras podem ser fornecidas em sacos ou caixas degradáveis. Fibras embaladas em sacos degradáveis são adicionadas diretamente à mistura, lentamente (Figura 10).

No entanto, quando as fibras são fornecidas em pequenas pastilhas (Figura 11), que são agrupadas com um filme solúvel em água, as pastilhas podem ser incluídas no misturador uma vez que todos os outros materiais (incluindo água) tenham sido adicionados [24].



Figura 10: a) Adição de fibra semi-automatizada. b) adição de fibra manualmente[24]



Figura 11: Exemplo de um saco com fibra de plástico[24]

2.3.3. Equipamento de doseamento de Fibras

Um exemplo proeminente é o sistema recente de alimentação de fibra Meka. É um equipamento de origem turca e pode ser usado para pré-mistura de fibra na produção do betão projetado em fábricas de betão ou para alimentação e dosagem automatizada de fibras em todos os tipos de processos de produção. No entanto, é importante notar que este é apenas um dos muitos mecanismos semelhantes. No mercado, existem inúmeras marcas e variedades de dispositivos destinados a objetivos semelhantes, cada um com as suas características e vantagens únicas.

O mecanismo constituído por um corpo cilíndrico com passagens escalonadas em espiral é montado sobre uma estrutura de aço robusta. Dois vibradores com amplitude ajustável são usados para melhorar a distribuição das fibras. Este sistema é projetado para garantir uma distribuição homogénea das fibras ao longo de todo o processo de preparação das fibras e na posterior adição à betoneira, melhorando assim as propriedades mecânicas e a resistência global do produto final.

O equipamento pode ser abastecido de diversas maneiras, incluindo o uso de *BIG-BAGS* com o auxílio de uma grua ou empilhador. Para sacos de menor dimensão, o processo pode ser realizado manualmente. Essas características no método de alimentação tornam o sistema adequado para diferentes cenários e necessidades de produção [25].

A única desvantagem deste mecanismo é que ele só pode ser utilizado na pré-mistura do betão, ou seja, nas instalações de abastecimento dos camiões, mas por outro lado, ele pode ser adaptado ou modificado de acordo com as necessidades do projeto.



Figura 12: Sistema de alimentação MEKA[25]

2.4. Alimentação direta de fibras no betão projetado

Existem duas técnicas principais de produção de (GFRC), geralmente referidas como *spray-up* e pré-mistura [11].

No processo *spray-up*, a argamassa é produzida separadamente das fibras, que são misturadas apenas no jato da pistola. Os fios de fibra de vidro são cortados dentro da pistola de pulverização no tamanho necessário, normalmente entre 25 mm e 40 mm, e representam cerca de 5% do peso total do GFRC. A posterior compactação com rolo cilíndrico garante a adaptação do GFRC à forma, a impregnação das fibras na argamassa, a retirada do ar retido na mistura e uma densidade adequada.



Figura 13: Produção de elemento com método *spray-up*[26]

No método de produção por pré-mistura, a argamassa e as fibras pré-cortadas são previamente misturadas. A quantidade de fibras adicionadas à argamassa costuma ser de até 3,5%, em termos de peso, e o comprimento das fibras fica em torno de 12 mm. Fibras mais longas levam a uma redução excessiva da trabalhabilidade da mistura [26].

2.5. Análise Crítica

Este estado de arte, embora não tenha revelado resultados significativos em termos de soluções prontas para a adição automatizada de fibras no betão, representou um avanço importante no entendimento das lacunas e desafios existentes na indústria. A pesquisa detalhada

revelou que as soluções de mercado são limitadas ou inexistentes, destacando a carência de alternativas eficazes.

Com base nas informações recolhidas, com este projeto pretende-se contribuir para o preenchimento dessa lacuna. Estes resultados evidenciam a necessidade de prosseguir a investigação no sentido proposto pelo projeto, ou seja, desenvolver um dispositivo de inserção de fibras no fluxo do betão reforçado que seja capaz de superar os desafios identificados, com dosagem precisa e garantindo uma distribuição uniforme das fibras no substrato de betão.

Além disso, o estudo do estado de arte identificou equipamentos e técnicas existentes que podem ser adaptados e modificados para se alinharem com os objetivos do projeto.

3. REVISÃO DOS TRABALHOS PRELIMINARES

3.1. Equipamento de medição de força do jato

Este subcapítulo irá descrever o desenvolvimento dos equipamentos para medir a força de fluxo de betão e o peso final do conjunto dos equipamentos de projeção e ainda medir o caudal do betão à entrada da cabeça de projeção, parâmetro importante para o dimensionamento de todos os subsistemas desenvolvidos neste projeto.

A primeira etapa do trabalho foi pesar o conjunto da ponteira sem mangueira com jato desligado, para entender exatamente qual peso vai atuar no braço do robô que, futuramente, vai substituir o trabalho manual de um operador.

A segunda etapa destas tarefas preparatórias consiste no desenvolvimento de um equipamento para medir a força de jato de betão em operação, com todas as mangueiras ligadas para determinar a ordem de grandeza do esforço adicional a suportar pela reação originada no robô pelo escoamento do betão através da tubeira.

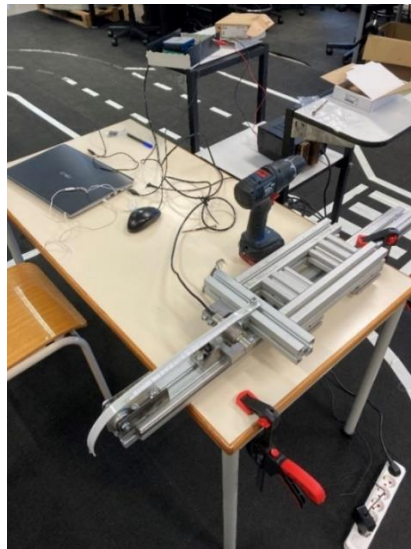


Figura 14: Equipamento medição construído em laboratório

O equipamento consiste numa plataforma que permite apenas o movimento na direção do escoamento sobre o qual é montada a cabeça de projeção. Entre a plataforma e um batente, como podemos ver na Figura 14, foi montado uma célula de carga, cuja função é medir, na direção não constrangida a força de reação. equipamento de projeção.

Ligação a célula de carga

Para obter os valores da força de reação, usou-se uma célula de carga com uma capacidade de medição até 1961 N e foi conectada a um sistema de condicionamento de sinal e visualização (Laumas TLB4).



Figura 15: Célula de carga FCOL-C3-200kg[27]



Figura 16: Digital-Analog Weight Transmitter TLB4 da marca Laumas[28]

Para a recolha de dados em computador, foi utilizada a placa de aquisição de dados *National Instruments USB-6001*, ligada ao TLB4 através de uma ligação analógica, uma vez que o controlador da célula tem a possibilidade de comunicar as leituras através de uma saída em tensão ($0/5 - 10V$).



Figura 17: National Instruments USB-6001[29]

O sistema de aquisição de dados será uma interligação de cada um dos instrumentos, desde a força exercida na célula de carga até aos dados que serão apresentados pelo *Simulink*.

A Figura 18 mostra o diagrama de blocos do sistema de medida.

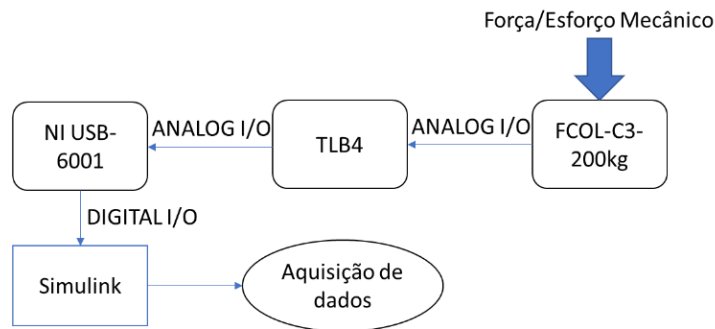


Figura 18: Esquema eletrônico simplificado

Como citado anteriormente, após realizadas as ligações elétricas necessárias, foi observada a existência de uma saída nominal de 1.96 V na saída analógica do dispositivo *NI USB-6001*, sendo necessária a compensação deste valor de *offset* de operação.

A Figura 19 demonstra o gráfico da realização de um esforço manual realizado na célula de carga ao longo de 10 s , mostrando que houve um pico por volta de 2.7 V no final do tempo de amostragem.

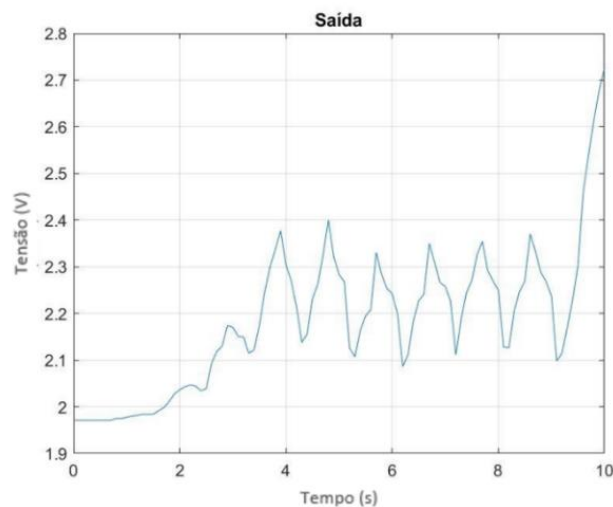


Figura 19: Saída de tensão para esforço manual e para um teste de 10 s

Posteriormente, com a ajuda de pesos conhecidos, foram traduzidos os esforços realizados na carga de tensão (V) para peso (kg) novamente, como mostra a Tabela 2:

Tabela 2: Relação entre tensão (V) e esforço (Kg)

Massa (kg)	Tensão (mV)	Massa / Tensão (mV)	Força (N)	Força (N) / Tensão (mV)
0	0	0	0	0
5	0,1683	29,7089	50.0	297,0885
10	0,3430	29,1545	100.0	291,5452
15,132	0,5254	28.8009	151,3	288,0091

Então é possível verificar que há uma relação de aproximadamente 290 *N.* por unidade de tensão (*mV*), do esforço aplicado à célula de carga.

3.2. Testes da força com o jato ligado

Testes realizados em campo

Os testes para a medição da força de reação ao jato de betão (Figura 20) foram realizados na empresa parceira. Contaram com uma estrutura em forma de mesa metálica onde a célula de carga foi instalada, sendo que numa das pontas foi instalada a mangueira que fornece o betão à cabeça de projeção, conseguindo assim simular-se o esforço que será exercido no braço robótico.



Figura 20: Equipamento em funcionamento

Durante os testes de esforço, a máquina de pressurização fornece o betão com $10 \frac{m^3}{h}$, $15 \frac{m^3}{h}$ e $20 \frac{m^3}{h}$ de caudal, sendo o ar comprimido que alimenta a projeção introduzido a uma pressão de 5 bar.

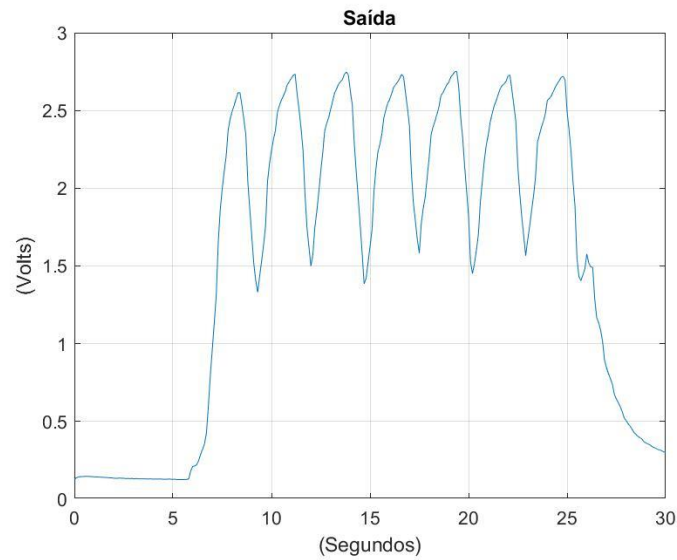


Figura 21: Resposta da célula de carga equivalente ao caudal de 10m3/h

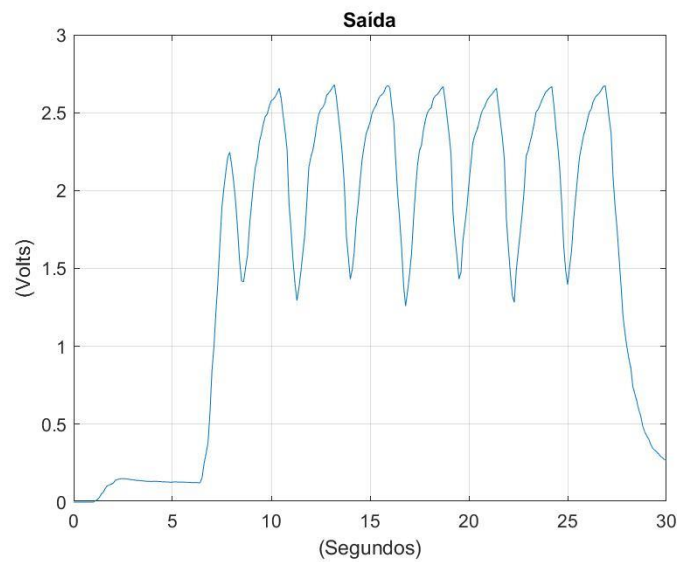


Figura 22: Resposta da célula de carga equivalente ao caudal de 15m3/h

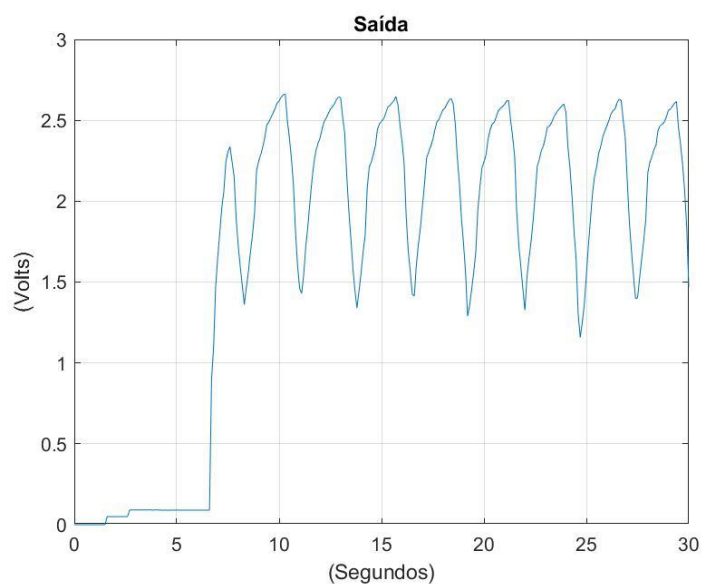


Figura 23: Resposta da célula de carga equivalente ao caudal de 20m³/h

As (Figura 21, Figura 22 e Figura 23) mostram os gráficos do comportamento dos respectivos débitos ($10 \frac{m^3}{h}$, $15 \frac{m^3}{h}$ e $20 \frac{m^3}{h}$) ao longo de 30 s, que foi o tempo utilizado para capturar o comportamento da célula de carga.

A partir da análise dos testes obtidos, é possível observar que mesmo com uma velocidade de débito maior, não houve uma mudança significativa do esforço realizado pelo conjunto mangueira mais betão disparado. Os valores de pico são muito próximos, tendendo aproximadamente a 80 *kgf* que equivalente a um valor cerca de 2,7 *V* em todas as amostras.

A configuração das curvas de carga evidencia e é consequência da tecnologia utilizada para a bombagem, em que foi utilizado um equipamento de projecção PM 500 PC (Figura 24).



Figura 24: Equipamento de projecção PM 500 PC[30]

Aqui, o dispositivo de pressurização do betão é construído por uma bomba de pistão duplo (Figura 25), em que, quando um dos dois pistões empurra o betão para dentro do tubo, o outro pistão puxa o betão da tremonha. Durante este processo, os cilindros-pistão não ficam completamente cheios devido às propriedades reológicas do betão, que controlam o grau de enchimento. Entre os movimentos do pistão, a válvula do tubo *S* que conecta o cilindro de ejeção ao tubo de distribuição e o cilindro de sucção ao reservatório alterna entre os pistões. Esta fase de transição da válvula em forma de *S* resulta num curto intervalo de entrega onde nenhum betão flui para dentro do tubo.

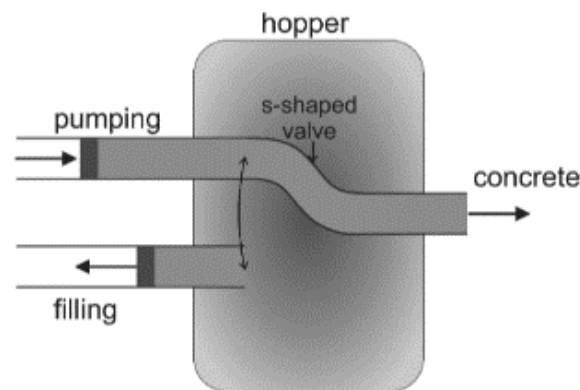


Figura 25: Princípio de funcionamento da bomba de pistão duplo[31]

Num trabalho executado com o mesmo equipamento, (Sakoparnig *et al*) foram obtidos resultados semelhantes. No entanto, ao comparar os resultados obtidos em campo com resultados obtidos na Áustria, chegou-se à conclusão de que equipamento do projeto apresentava uma avaria. Isso é evidenciado pela Figura 26, na qual um aumento na vazão de $12 \frac{m^3}{h}$ resulta em um tempo de 7 s, enquanto um aumento para $18 \frac{m^3}{h}$ resulta em um tempo de 4,5 s. No caso dos testes executados para este projeto, o tempo de aumento para os três regimes de caudal é o mesmo, o que mostrou que, independentemente da configuração colocada no comando da máquina a sua operação foi sempre a mesma. Infelizmente, a máquina não foi reparada em tempo útil para a repetição das experiências, sendo, no entanto, os testes úteis para se conhecer a ordem de grandeza do esforço.

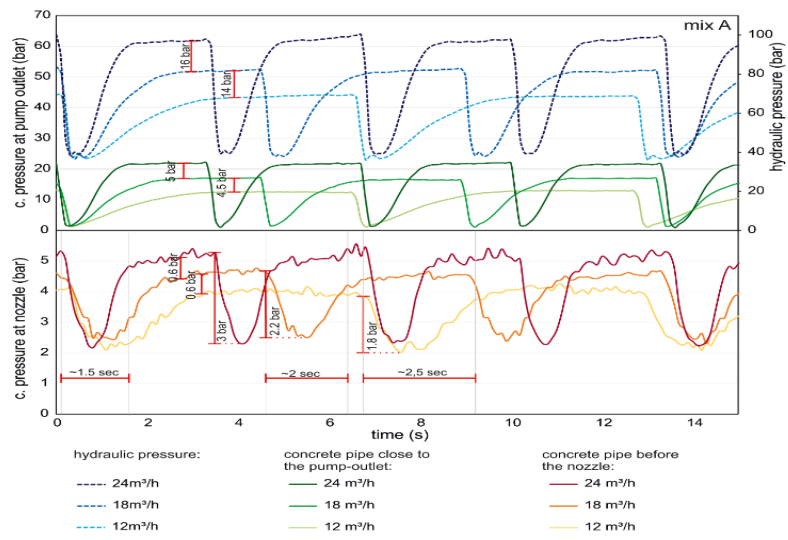


Figura 26: Dados medidos durante a pulverização a 12 m³/h, 18 m³/h e 24 m³/h[31]

4. DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE INSERÇÃO E SEPARAÇÃO DE FIBRAS

4.1. Conceito de um sistema Revólver com pistão cilíndrico

4.1.1. Protótipo conceptual n°1

O primeiro conceito considerado foi o do sistema revólver, ou seja, o mecanismo constituído por um tambor com número variável de câmaras, cujo número depende diretamente da quantidade de fibra que deverá ser alimentada no betão e ao mesmo tempo este abastecimento, neste conceito, é feito por um pistão de forma a cumprir as restrições de quantidade de fibras a carregar no betão.

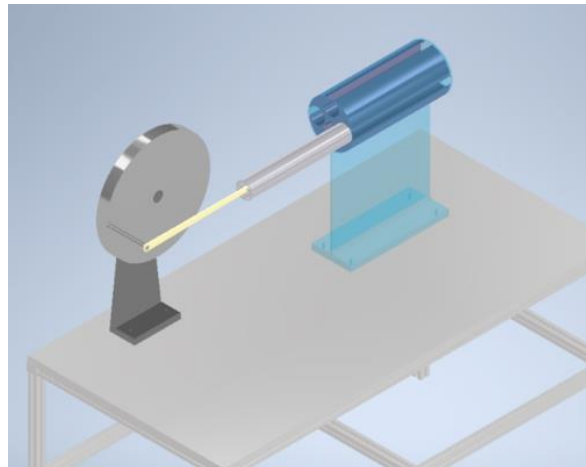


Figura 27: Protótipo preliminar n°1

Observadas todas as condições, chegou-se ao modelo virtual do protótipo, que consistia, pela primeira vez de forma virtual, num tambor com 4 câmaras e 1 pistão. Como pode ser visto na Figura 27, também de forma virtual, com o auxílio da simulação dinâmica que está disponibilizada no *software Autodesk Inventor Professional*, o tambor é instalado no meio da estrutura principal, sendo as fibras alimentadas na parte superior. Assim, quando a câmara estiver cheia e depois de a estrutura rodar 90°, o pistão (acionado por uma biela-manivela apenas para efeitos de simulação) deverá empurrar a fibra para dentro da estrutura por onde passará o betão líquido.

Numa primeira aproximação, o dimensionamento do pistão e do tambor dependeu apenas das quantidades de fibras a aduzir, não se tendo ainda em conta os esforços associados.

Como foi estabelecido que as fibras são adicionadas diretamente ao betão líquido, neste ponto existe uma contrapressão provocada pelo próprio escoamento, que implica a inclusão de uma válvula que impede o refluxo de betão para a câmara.

Existem duas possibilidades genéricas para a tecnologia desta válvula: uma válvula estática, operada pelas diferenças da pressão entre a camara e o fluxo de betão, e uma válvula dinâmica operada por elementos de um sistema de controlo.

Uma válvula estática (Figura 28) é projetada para controlar o fluxo de fluido de forma passiva, sem partes móveis, seja manualmente. As válvulas estáticas são frequentemente usadas em aplicações onde o controle contínuo do fluxo não é necessário. No entanto, uma válvula estática apresenta uma desvantagem, pois não se consegue eliminar completamente o refluxo da massa e, portanto, foi excluída inicialmente.



Figura 28: Exemplo de uma válvula de equilíbrio estática[32]

Por outro lado, uma válvula dinâmica (Figura 29) integra componentes móveis capazes de abrir, fechar ou modular o fluxo e é controlada ativamente, frequentemente por meio de um atuador que responde a sinais de controle, como pressão, fluxo ou eletricidade.

A válvula dinâmica tem o potencial de eliminar o problema do refluxo de betão para o cilindro de alimentação, mas apresenta uma desvantagem na parte de resistência do material que provoca desgaste rápido devido à natureza especialmente abrasiva do betão, seja pela própria natureza do betão e dos inertes que contém, seja pelas próprias fibras metálicas que aumentam a natureza abrasiva da massa e também aumentam o risco de desgaste e encravamento da válvula.



Figura 29: Exemplo de válvulas de equilíbrio dinâmicas[33]

Em resumo, para este primeiro protótipo virtual, podem pesar-se as vantagens e as possibilidades de melhoria:

Vantagens da solução:

- Simplicidade da estrutura do mecanismo
- Simples de controlar
- Possível variedade das dimensões do tambor e do pistão
- Montagem e desmontagem fáceis
- Simples manutenção e limpeza do mecanismo

Melhorias possíveis:

- Aumento do tamanho do protótipo em si
- Aumento das camaras na estrutura do tambor e a quantidade dos pistões para garantir interrupção mínima na carga das Fibras
- Estudo dos possíveis tipos da válvula para reduzir o impacto durante o funcionamento do mecanismo

4.1.2. Protótipo conceptual nº2

Tendo em conta que foram estabelecidos os limites do protótipo anterior, tais como o encravamento das fibras (devido o design do protótipo) e o acionamento dos cilindros, o protótipo seguinte foi desenvolvido com alterações fundamentais.

A decisão final da relação de quantidade das camaras e dos cilindros fez com que o protótipo passe ter 2 camaras e 2 cilindros pneumáticos, e a sua rotação, controlada a partir de um cilindro rotativo, vai desde 0° até 180° .

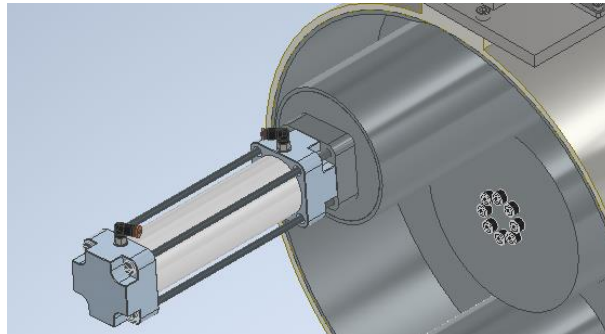


Figura 30: Cilindro pneumático

A alteração que sofreu a estrutura do tambor torna-a mais simples e ligeira, permitindo uma menor dimensão da entrada das fibras no fluxo do betão.

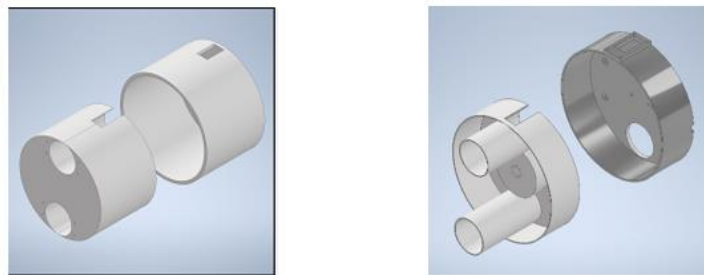


Figura 31: Alteração estrutural do tambor

A segunda alteração muito importante foi que a necessidade de uma válvula dinâmica deixa de existir, uma vez que será o próprio elemento rotativo a executar a função da válvula, como visto na Figura 31 à direita. Neste caso, a própria estrutura ao longo do ciclo do movimento vai abrir e fechar o orifício onde será injetada a fibra sem ter o risco de refluxo do betão.

Para evitar encravamentos e garantir que todas as fibras que estão na camara saem completamente para o fluxo de betão, foi previsto um lábio na parte cima do pistão que, por sua vez, compensará a diferença do espaço entre estrutura do tambor e o pistão.

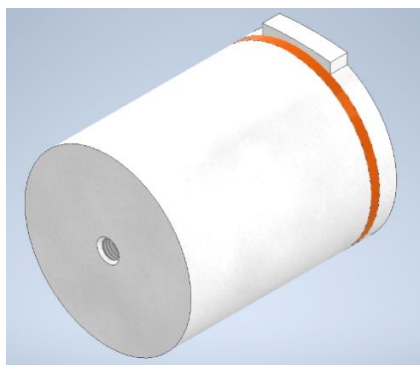


Figura 32: Pistão, modelo avançado

Chegando ao ponto de acionamento do tambor optou-se pela inclusão de um cilindro rotativo, cuja rotação é alternada desde 0^0 aos 180^0 para evitar problemas de emaranhamento dos tubos de ar comprimido.

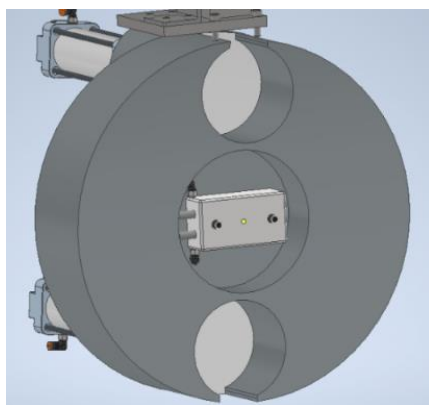


Figura 33: Modelo virtual do cilindro rotativo

No fim de ter o modelo preliminar projetado, foi decidido o desenvolvimento do acumulador das fibras, ou seja, um mecanismo controlável que permita a alimentação proporcionada da fibra, de acordo com o projeto de estabilidade.

Considera-se uma válvula acionada eletricamente na garganta com movimento alternado e limitado entre 0^0 e 90^0 que permite uma distribuição intermitente e coordenada com o movimento do tambor.

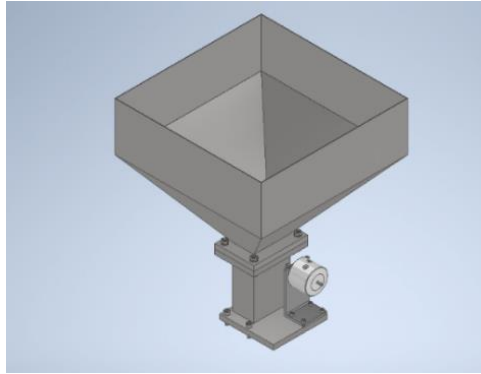


Figura 34: Recipiente para fibras

Na Figura 35 é visto um modelo do protótipo virtual completo que consiste numa garganta com válvula incorporada e um recipiente em que será despejada a fibra, permitindo uma zona de homogeneização das fibras já adicionadas ao fluxo de betão.

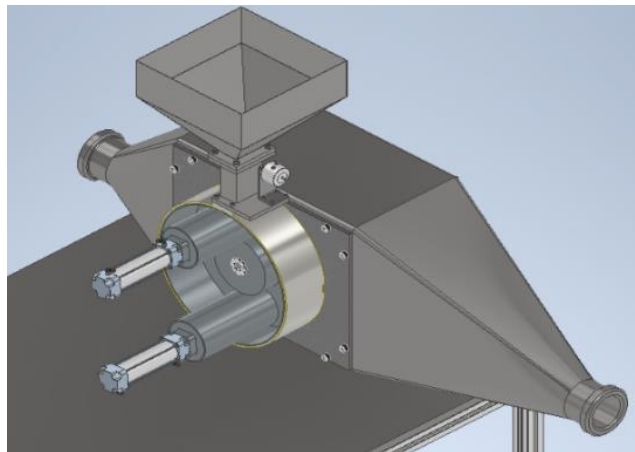


Figura 35: Modelo preliminar aprovado

Funcionamento primário do mecanismo

O funcionamento do mecanismo mencionado anteriormente pode resumir-se assim:

- Camara está no ponto superior, a válvula abre e as fibras caem para câmara.
- O tambor roda 180⁰ para alinhar a camara com o orifício de entrada das fibras.
- O cilindro pneumático avança para frente e empurra as fibras onde serão misturadas com própria massa.
- Neste tempo a segunda camara esta carregada com fibras, o cilindro pneumático permanece fechado para evitar o refluxo da massa e só começa a recuar após o orifício de entrada de fibras ser completamente fechado.

- O ciclo será repetido ao longo da disponibilidade do mecanismo.

Cálculos sobre protótipo n°2

Uma vez que o objetivo é o de injetar 300 Kg de fibras metálicas ou 45 Kg de fibras de polipropileno por hora de trabalho da máquina isto é igual à entrega de $5 \frac{Kg}{min}$ da fibra metálica ou $0,75 \frac{Kg}{min}$ em polipropileno.

Com a estrutura de duas câmaras, é necessária a introdução de 2,5 Kg e 0,375 Kg por cilindro por minuto respetivamente, para cada um dos materiais.

Neste protótipo, tendo em conta as dimensões dos cilindros, o volume total disponível por cilindro é de:

$$V_c = \pi * R^2 * C = 589 \times 10^{-6} m^3 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$$R_c = 0,025 \text{ m (raio do pistão)}$$

$$C = 0,3 \text{ m (cumprimento da câmara)}$$

No entanto, a quantidade de fibras efetivamente entregue deve ser calculada tendo em conta a densidade aparente que resulta do arranjo aleatório das fibras metálicas no espaço disponível. Este valor foi obtido experimentalmente em ensaios laboratoriais com uma cavidade de teste. Além disso, admite-se, mesmo assim, que não será possível obter o total enchimento da câmara em operação normal, pelo que se estima apenas um enchimento da câmara a 50%.

Dados do teste experimental de densidade aparente:

- Massa de fibras metálicas dentro de cavidade: 0,2423 Kg
- Massa de fibras PP dentro de cavidade: 0,018 Kg
- Volume de cavidade de teste: $3,1 * (0,0325^2) * 0,09 = 0,000299 \text{ m}^3$
- Densidade aparente das fibras de PP (ρ_{ap}^p): $\frac{0,018Kg}{0,000299m^3} = 60,2 \frac{Kg}{m^3}$
- Densidade aparente das fibras metálicas (ρ_{ap}^m): $\frac{0,2423Kg}{0,000299m^3} = 810,37 \frac{Kg}{m^3}$

Tomando estes valores e a taxa de carga, mencionada atrás, de 50%, em cada introdução, admite-se um valor máximo para a massa introduzida por cada avanço do cilindro de,

$$M_{max} = 0,5 \rho_{ap} V_c \quad \text{Eq. 2}$$

Correspondendo a de 0,24 Kg para fibras metálicas e de 0,017 Kg para as fibras de polipropileno.

No caso das fibras metálicas, para se atingirem os $5 \frac{Kg}{min}$ seria necessário executar 21 ciclos por minuto, ou seja, o tambor terá de executar um movimento a cada 2,8s. Com o caso das fibras de polipropileno, a adução de $0,75 \frac{Kg}{min}$ implica a execução de 44 ciclos por minuto, ou seja, um movimento a cada 1,36 s.

Conclusões sobre protótipo nº2

Infelizmente ao longo do processo da investigação sobre o protótipo chegou-se à conclusão de que o protótipo não cumpre as especificações. Em particular, não garante a quantidade de fibras necessária. De facto, para as dimensões arbitradas, o ciclo de funcionamento é muito rápido, podendo haver dificuldades no carregamento das fibras, uma vez que este é feito por gravidade e a janela temporal para este carregamento é muito curta (cerca de 0,2s, considerando apenas a queda livre).

Por outro lado, o acionamento pneumático e o movimento alternado, podem contribuir para a dificuldade em atingir ciclos de trabalho tão rápidos.

4.2. Conceito de Revólver com pistão triangular

Protótipo conceptual nº 3

Tendo em conta as limitações do segundo protótipo conceptual, a nova iteração segue duas linhas de projeto, a saber, o aumento do número de câmaras e do respetivo volume, para aumentar consequentemente a quantidade de fibras por rotação do tambor e a substituição do movimento alternado pelo movimento de rotação numa única direção.

Como consequência deste movimento unidirecional, o acionamento pneumático do movimento dos cilindros foi substituído por uma ação mecânica, resolvendo o problema da alimentação de ar comprimido a um cilindro em movimento.

Assim, os movimentos dos cilindros são feitos através de um guiamento numa superfície cilíndrica, permitindo um único acionamento. Por uma questão de distribuição de esforços e de alinhamento, este guiamento é duplo e construído recorrendo a duas estruturas cilíndricas concêntricas. Neste protótipo, o acionamento é feito a partir de um motor elétrico.

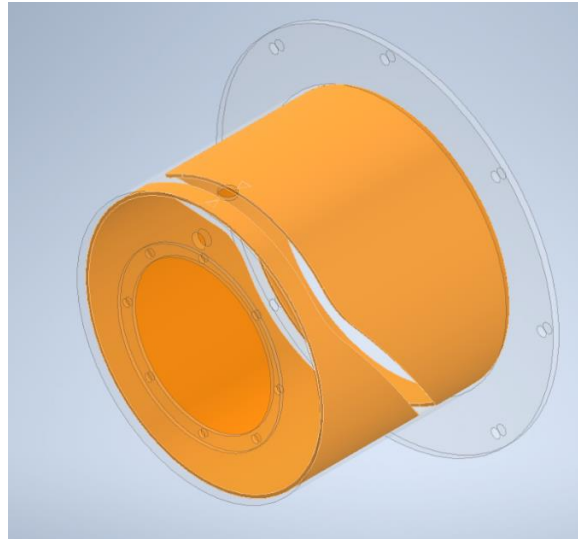


Figura 36: Estrutura de guiamento exterior

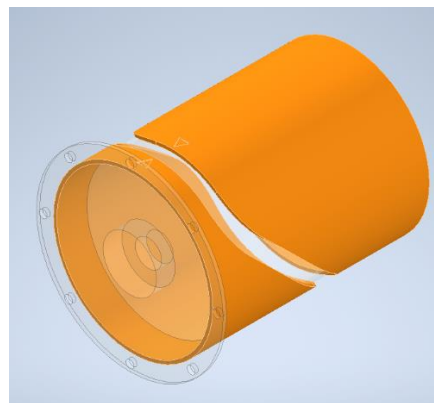


Figura 37: Guiamento interior (estrutura exterior está transparente)

Os elementos apresentados (Figura 36 e Figura 37) são montados juntos e formam uma única estrutura. Essa configuração permite a criação de um curso alternado dos pistões, seguindo as guias da came. Essas guias são projetadas de forma a manter proporções adequadas de diâmetros maiores para menores, garantindo um curso linear dos pistões sem causar desalinhamentos. Esse design contribui significativamente para a entrega eficiente de fibras ao fluxo de betão.

Na Figura 38, é possível observar os pistões envolvidos pelo sistema externo e interno de cames. Quando o motor inicia a rotação do tambor, os pistões são obrigados a mover-se para frente e para trás, seguindo o padrão determinado pelo sistema de cames.

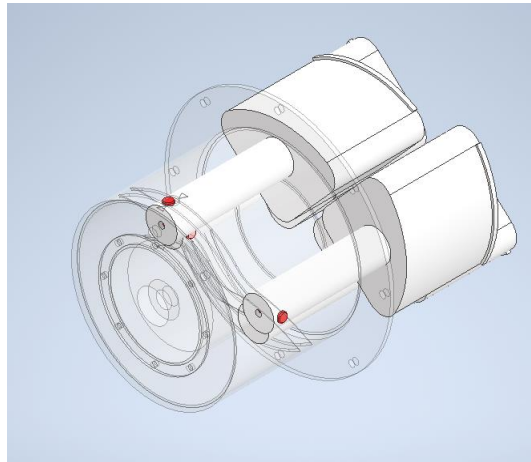


Figura 38: Vista dos pistões dentro de estrutura de guiamento

Conforme ilustrado na Figura 39, foi realizada uma abertura na parte traseira da estrutura central para permitir a introdução da fibra no fluxo do betão. Essa abertura foi projetada de modo a evitar qualquer ação de retrocesso quando a câmara do pistão passar por ela, prevenindo assim a possível liberação de cimento pela abertura durante o carregamento da fibra.

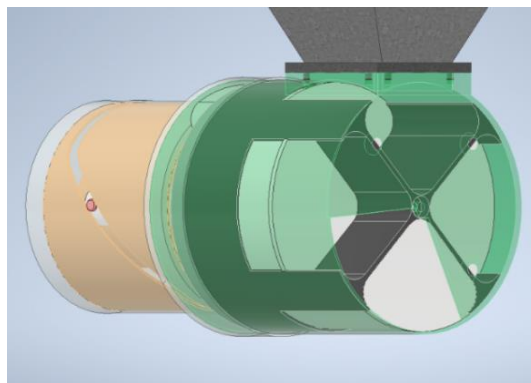


Figura 39: Estrutura de tambor (cor verde)

Também foi modelada outra estrutura pela qual o betão passa (Figura 40). As dimensões e a configuração desta estrutura são ainda fictícias, pois é necessário analisar a passagem do betão e seu comportamento dentro dela. Além disso, é importante investigar se esta estrutura

mecânica causará uma zona de turbulência na região superior e se as partículas de fibra serão capazes de sair completamente dela.

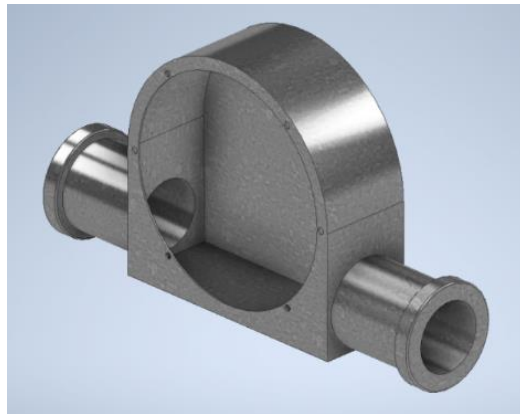


Figura 40: A estrutura central responsável pela passagem do betão

Como resultado dos estudos e trabalhos realizados neste protótipo, na Figura 41 é apresentado o modelo virtual aprovado para o estágio pré-construção.

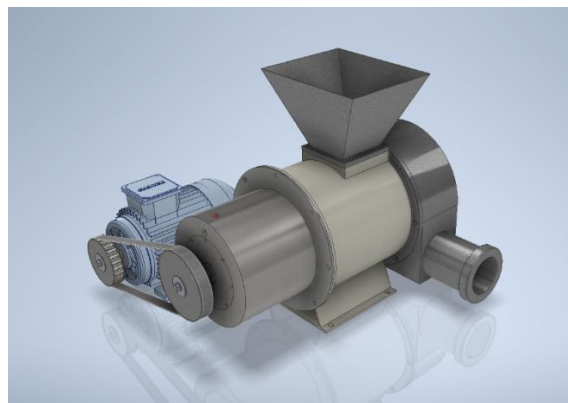


Figura 41: Modelo final de Protótipo n°3

Cálculos sobre protótipo n°3

Este capítulo revelará em detalhe todas as ações e cálculos recebidos durante o trabalho sobre o protótipo. Devido a esses cálculos, conseguem-se obter dados precisos que afetarão a construção do protótipo e todos os elementos adjacentes.

Para se poder calcular a velocidade de rotação necessária para o tambor, parte-se da quantidade de fibras a introduzir. Como foi já visto atrás, as quantidades de projeto, terão, como valores máximos.

$$C_m (\text{metálicas}) = 300 \frac{Kg}{h} \Rightarrow 5 \frac{Kg}{min} \quad \text{Eq. 3}$$

$$C_m (PP) = 4.5 \frac{Kg}{h} \Rightarrow 0.075 \frac{Kg}{min} \quad \text{Eq. 4}$$

A densidade aparente das duas substâncias foi calculada com o mesmo procedimento descrito na (pag.31) através de uma experiência de laboratório com um recipiente que é semelhante em tamanho ao pistão projetado.

$$\text{Densidade aparente de fibras } \textit{metálicas} = 810,37 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\text{Densidade aparente de fibras } PP = 60.2 \frac{Kg}{m^3}$$

A partir dos dados obtidos nas experiências de campo e conjugando os obtidos em [31], calcula-se a taxa de fluxo volumétrico, ou seja, o volume de fluido que atravessa uma dada área de seção transversal por unidade de tempo:

$$C_v = \frac{C_m}{\text{Densidade}} = \frac{\text{Caudal mássico}}{\text{Densidade do produto}} \quad \text{Eq. 5}$$

vem:

$$C_v (\text{metálicas}) = 810,37 \frac{Kg}{m^3} = 0.0062 \frac{m^3}{min} \quad \text{Eq. 6}$$

$$C_v (PP) = \frac{0.075 \frac{kg}{min}}{60.2 \frac{kg}{m^3}} = 0.00125 \frac{m^3}{min} \quad \text{Eq. 7}$$

Em seguida, é necessário calcular a força que atua na base do pistão. Esse cálculo também é muito importante e acabará afetando a seleção de um motor adequado.

Para os cálculos futuros é necessário saber o volume bruto do cilindro, ou seja, a capacidade de enchimento de uma camara:

$$V_b = \text{Área} * \text{Comprimento} \quad \text{Eq. 8}$$

Com os valores da área e do comprimento obtidos a partir do modelo virtual:

$$\text{Área} = 0,0107 \text{ m}^2, \text{Comprimento} = 0.165 \text{ m} \quad \text{Eq. 9}$$

que dará um valor de:

$$V_b = 0,001177 \text{ m}^3 \quad \text{Eq. 10}$$

No momento, não se dispunha de dados medidos sobre a pressão que o fluxo produz, portanto, foi realizada uma simulação usando *CFD* (dinâmica de fluidos computacional), na qual foi inserido um caudal de $\frac{20\text{m}^3}{h}$ e viscosidade do betão 22 Pa. s [6] e a área de mangueira com comprimento de 2 m , o que resultou em um valor estimado de 20 bar .

O resultado obtido não pode ser tomado como preciso, mas como uma ordem de grandeza para projeto, pois o software usado não foi projetado para trabalhar com esse tipo de líquidos, ou seja, betão armado com brita.

Sabendo a pressão que o fluxo produz, calcula-se a força que afeta diretamente a base do pistão:

$$F_n = \text{Área} * \text{Pressão} \quad \text{Eq. 11}$$

$$F_n = 0.0107 \text{ m}^2 * 20 \text{ bar} = 2144 \text{ Kgf} \cong 21 \text{ kN}$$

Seguintemente, calcula-se a velocidade de rotação (*RPM*) necessária para cumprir as restrições, sabendo que a taxa do enchimento do cilindro não pode exceder a 50%, assim vem:

RPM necessário para fibra metálica:

$$RPM = \frac{0,0062}{\frac{1,17 \times 10^{-3}}{4 \times 0,5}} = 2,6495 \text{ RPM} \quad \text{Eq. 12}$$

RPM necessário para fibra de Polipropileno:

$$RPM = \frac{0,00125}{\frac{1,17 \times 10^{-3}}{4 \times 0,5}} = 0,53 RPM \quad \text{Eq. 13}$$

Para selecionar um motor adequado, há que cruzar a velocidade angular e a potência necessária para forçar as fibras para o betão à taxa necessária

Velocidade angular será:

$$\omega = \frac{RPM \times 2\pi}{60} \quad \text{Eq. 14}$$

resulta em:

$$\omega = 0,27 \text{ rad/s, para fibras metálicas}$$

$$\omega = 0,055 \text{ rad/s, para fibras polipropileno}$$

Nessa trajetória, considerando o ponto mais desfavorável, pode calcular-se o ângulo entre as forças de modo a calcular a força tangencial F_t (tangente ao guiamento) e, conseqüentemente, a força motora F_m necessária para provocar o movimento do tambor que, por sua vez, permite calcular o binário necessário ao movimento.

Deste modo vem:

força motora:

$$Fm = Ft * \cos 36^0 = 35635 * 0,8 = 28508 N \quad \text{Eq. 15}$$

força normal:

$$Fn = Ft * \sin 36^0 = 35635 * 0,59 = 21025 N \quad \text{Eq. 16}$$

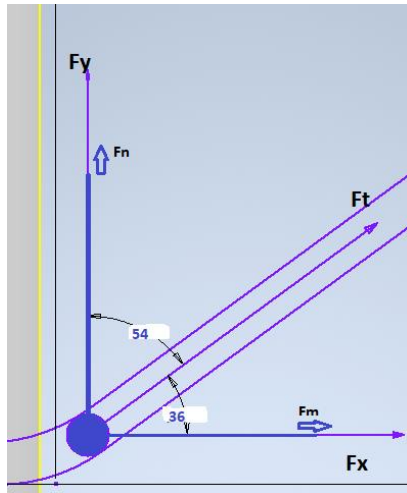


Figura 42: Gráficos de composição X * Y

A partir dos resultados arbitrados anteriormente pode-se calcular a força tangencial, sabendo que:

$$F_n = F_t * \sin 36^\circ \quad \text{Eq. 17}$$

obtém-se:

$$F_t = \frac{21025}{0,59} = 35635 \text{ N} \quad \text{Eq. 18}$$

Com base nestes cálculos, pode obter-se a potência necessária para o motor a partir do binário máximo:

$$T_m = 0,11 \times F_m = 3136 \text{ N.m} \quad \text{Eq. 19}$$

$$P_m = T_m \times \omega \quad \text{Eq. 20}$$

onde $F_m = 28508 \text{ N}$ para dois tipos de fibra, P_m para fibras metálicas = $846,7 \text{ W}$ e sucessivamente P_m para fibras polipropileno = $172,48 \text{ W}$.

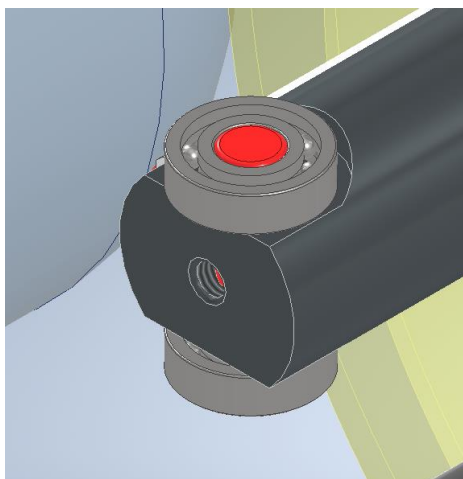


Figura 43: Rolamentos montados num ponto da extremidade da guia do pistão

Cálculo da tensão no eixo dos rolamentos do guiamento

Pela natureza do projeto, o ponto onde poderão ocorrer problemas de esforços é o pino que serve de eixo aos rolamentos que seguem as superfícies de guiamento (Figura 43).

Com base no projeto, pode aproximar-se este cálculo pela tensão normal numa barra encastrada de secção circular sujeita a flexão.

Para isso, temos os dados necessários, em que o diâmetro do pino = $0,012\text{ m}$, comprimento total = $0,056\text{ m}$, e o comprimento entre as extremidades da guia = $0,032\text{ m}$, e a força, cujo resultado foi calculado no capítulo anterior, em que as extremidades do pino estão sujeitas a $F_n = 21025\text{ N}$, ou seja, a força oposta na base do pistão.

Vem:

$$\sigma_{normal} = \frac{F * L * r}{4 * I} \quad \text{Eq. 21}$$

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad \text{Eq. 22}$$

onde F – força aplicada sobre pino, r - raio do pino, I – momento de inércia de uma barra de secção circular e L – comprimento do componente. Observando a Figura 44 o comprimento corresponde aos segmentos AB e DF sendo que $L_{AB} = L_{DF} = 0,012\text{ m}$:

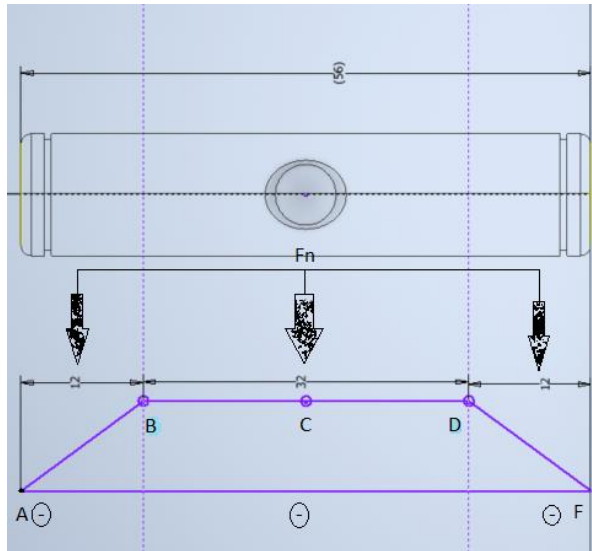


Figura 44: Diagrama do momento fletor

Deste modo calcula-se a tensão:

$$\sigma_{normal} = \frac{21025 * 0,012}{\pi * 0,006^3} \cong 371 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 23}$$

Tabela 3: Valores nominais para parafusos segundo sua classe de resistência

Classe de Resistência	8.8	9.8	10.9	12.9
Resistência à Tração / MPa	800	900	1.000	1.200
Limite de Escoamento / MPa	640	720	900	1.080

Considerando os dados da Tabela 3, a resistência à tração nominal de um parafuso de classe de resistência corrente (8.8) corresponde a 800 MPa. Portanto, com base nos cálculos apresentados anteriormente, a tensão a que o pino está sujeito, não é significativa em relação à resistência à tração do material.

Conclusão:

No que respeita ao funcionamento deste protótipo, é importante destacar que o escoamento do betão não é constante. Conforme foi já visto anteriormente, o caudal vai variando ao longo do processo, resultando em cargas e descargas rápidas. Isso torna desafiante o fornecimento a taxa constante de fibras no betão. Controlar a rotação do tambor torna-se mais complexo devido a essas flutuações, sendo esse o principal ponto crítico do desenvolvimento deste protótipo. Essa complexidade está intrinsecamente relacionada com a tecnologia da máquina de projeção de betão, em particular do sistema de bombagem, como se referiu na (pag.23).

Apesar das limitações mencionadas, este segundo protótipo consegue melhorias significativas em relação ao primeiro protótipo. Substitui-se o controle pneumático dos cilindros por um sistema de cames, tornando o mecanismo mais prático e fácil de controlar. Além disso, a rotação do tambor agora é controlada por um motor elétrico, proporcionando maior precisão, havendo uma relação entre o ajuste da velocidade de rotação e a regulação da taxa de alimentação de fibras.

Embora o sistema de cames seja promissor, é fundamental calcular todas as forças envolvidas, incluindo as geradas pelo caudal, bem como as forças motrizes e tangenciais decorrentes do movimento do tambor. Esses cálculos são essenciais para escolher o motor elétrico adequado para acionar o mecanismo.

Nos cálculos preliminares, conseguiu-se avançar o projeto do sistema de introdução de fibras para um estado de protótipo virtual pré-construção. Resolveram-se questões conceituais e desenvolveu-se uma solução detalhada o suficiente para informar a primeira implementação física nas próximas fases do projeto.

No entanto, após uma análise aprofundada em conjunto com a empresa parceira, foi identificado um conjunto significativo de problemas potenciais. Isso incluía uma complexidade da estrutura mecânica e uma dificuldade de controlo sobre o protótipo devido à instabilidade do fluxo do betão. Como resultado dessas considerações, a decisão final foi e de manter esse protótipo em um estado virtual, sem avançar para a construção física.

4.3. Conceito de um sistema autopropulsado

4.3.1. Protótipo nº4

Com base no trabalho realizado em protótipos anteriores, são vários os problemas que o protótipo enfrenta, como a complexidade da estrutura mecânica, que levará ao desgaste das peças, uma vez que as peças trabalharão em ambiente corrosivo, o que levará à oxidação e destruição da estrutura molecular do aço. Neste caso, é necessário selecionar cuidadosamente o material, bem como uma série de vedações entre o tambor e a estrutura, bem como o pistão e a câmara no caso da 2º e 3º protótipos, ou seja, é preciso selecionar com cuidado o material certo para os anéis de vedação, pois eles trabalharão em meio líquido e abrasivo e com isso sofrerão enorme desgaste. Um problema adicional é instabilidade do fluxo de saída do betão, que é causado pelo design da máquina de projeção de betão, o que dificulta o controlo do fornecimento de fibra em relação ao fluxo de betão, ou seja, neste caso, como foi mencionado acima, no momento do crescimento do fluxo do betão, o fornecimento de fibra aumenta, e no caso contrário, quando ocorre o descarregamento, adução da mesma diminui. Este conjunto de dificuldades potenciais, levou a uma nova abordagem do problema.

O conceito para o próximo protótipo foi baseado no princípio de funcionamento de uma bomba de palhetas rotativas de ação simples. A bomba de palhetas rotativas é um rotor circular girando dentro de uma cavidade circular mais larga. Os centros destes dois círculos são descentrados. As palhetas são livres para entrar e sair do rotor com a criação de câmaras entre as palhetas que fazem o trabalho de bombagem. Em alguns casos, estas palhetas podem ser de comprimento variável e/ou tensionadas para manter contacto com as paredes internas do corpo da bomba.

A estrutura do mecanismo foi modelada de tal forma que, no momento em que o betão entrar no interior da estrutura, a pressão criada pelo fluxo pressionará a superfície das palhetas, pressionando-as contra a carcaça do estator, resultando na formação de duas cavidades hermeticamente separadas uma da outra e assim criará um movimento circular anti-horário e tenderá para o ponto de saída sem criar um fluxo reverso do betão, pois a diferença de área acima, como mostrado abaixo na Figura 45 no ponto A, e na entrada da área onde o betão líquido irá se acumular, ponto B, é várias vezes menor.

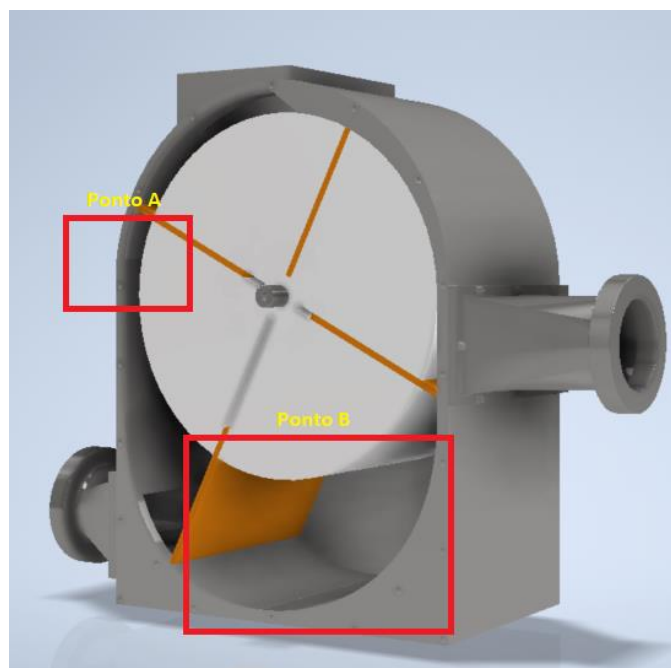


Figura 45: Protótipo conceptual nº 4

Cálculos sobre dimensionamento do protótipo:

O cálculo das dimensões deste protótipo depende diretamente de duas restrições que foram previamente discutidas antes do início da modelação sobre protótipo.

A primeira delas é a localização dos orifícios de entrada e saída de betão devido ao facto de que as palhetas devem formar um camara hermeticamente fechada, ou seja, no momento em que a entrada é fechada pela palheta, a próxima palheta deve bloquear a saída assim forma uma cavidade preenchida com betão, melhorando assim o controle sobre esse mecanismo e simplificando o controle sobre o fornecimento de fibras, ou seja, sabendo a taxa de escoamento de betão que passa em um determinado momento, poderemos fornecer a quantidade equivalente de fibra de acordo com as preferências da entidade promotora do projeto.

A segunda limitação era que o volume da câmara não deveria ser inferior a 6 l, pois a vazão de betão é de $20 \frac{m^3}{h}$, o que equivale a $6 \frac{l}{s}$, ou seja, se o volume da câmara for igual ou superior a 6 l, o tambor girará a uma velocidade de 4 rotações em 4 segundos, também com o aumento do volume da câmara, o tempo de rotação aumenta proporcionalmente, aumentando assim a janela temporal para alimentação da fibra.

Assim, foi possível seguir com uma versão preliminar de dimensionamento para aferir da exequibilidade do conceito. Assim, com uma área base da câmara igual a $0,036 \text{ m}^2$ e uma largura da estrutura de $0,2 \text{ m}$, como se pode observar na Figura 46, assim vem:

$$\text{Volume} = \text{Área} * \text{Comprimento}$$

Eq. 24

$$0,036 \text{ m}^2 * 0,2 \text{ m} = 0,0072 \text{ m}^3 \Rightarrow 7,2 \text{ l}$$

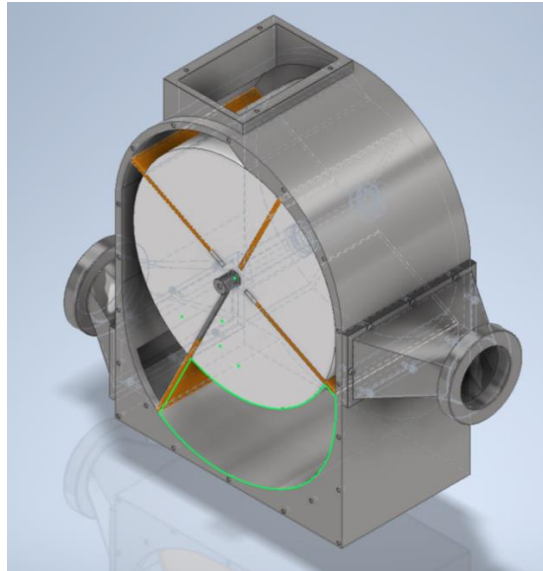


Figura 46: Limites internos da câmara do protótipo

Com base nos dados arbitrados acima, tem-se o volume da câmara que é de $7,2 \text{ l}$. Sabendo que a velocidade de entrada do betão é de $6 \frac{\text{l}}{\text{s}}$, então calcula-se a frequência exata de uma volta completa do rotor, sabendo que $6 \text{ l} = 1 \text{ s}$, ou seja $1 \text{ s} \approx 0,017 \text{ min}$, que dará um resultado em que passagem do betão com volume da camara de $7,2 \text{ l} \approx 1,12 \text{ s}$, assim uma volta completa do rotor será de $4,48 \text{ s}$, que no total é de $13,4 \text{ RPM}$.

Com base nos cálculos feitos, pode-se calcular a janela temporal para alimentar a fibra. Assim vem:

$$\omega = \frac{\text{RPM} \times 2\pi}{60} = 1,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Eq. 25

Desta forma, sabendo que a forma da estrutura interna é redonda e a estrutura exterior tem um raio de 180 mm , então o comprimento da circunferência por um quarto da volta, que o

comprimento total entre as palhetas, pode ser calculada usando a fórmula comprimento da circunferência:

$$C_c = \frac{2\pi r}{4} \approx 566 \text{ mm} \quad \text{Eq. 26}$$

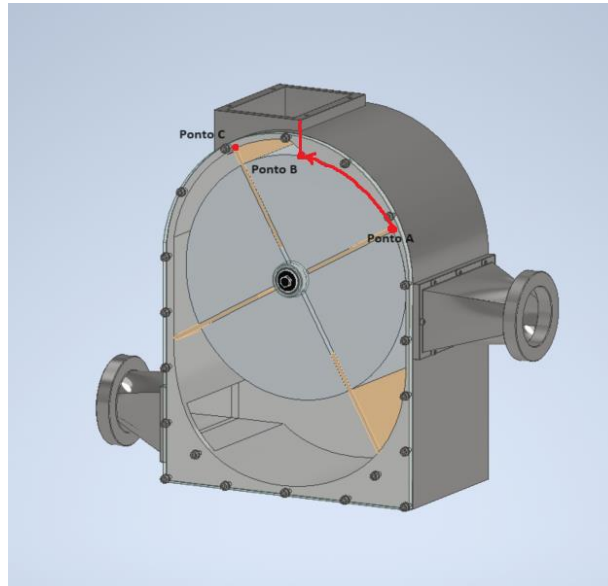


Figura 47: Distância de segurança (AB) e comprimento entre palhetas (AC)

Dado o valor do comprimento total entre palhetas $C_c = 566 \text{ mm}$ e o comprimento da garganta entre os pontos B e $C = 108 \text{ mm}$, assinalados na Figura 47, calcula-se a distância de segurança entre os pontos A e B que é uma distância em que as palhetas não provocam desestabilização da alimentação da fibra no protótipo. Como resultado, tem-se:

$$AB = C_c - BC = 566 \text{ mm} - 108 \text{ mm} = 458 \text{ mm} \quad \text{Eq. 27}$$

Para determinar o tempo disponível na janela temporal calcula-se velocidade linear a partir de seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Velocidade} &= r * \omega \\ V &= 180 \text{ mm} * 1,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 252 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 28}$$

Portanto para calcular o tempo necessário para percorrer a distância de segurança, que é nossa janela temporal disponível, usa-se a fórmula do tempo:

$$Tempo = \frac{Distância}{Velocidade}$$

Eq. 29

$$T = \frac{458 \text{ mm}}{252 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} \approx 1,81 \text{ s}$$

Conclusão:

Com base em todos os cálculos, conhecendo a velocidade de rotação do rotor e a janela temporal para alimentação da fibra, chega-se à conclusão, sabendo que o consumo de fibra deve ser equivalente ao fluxo de betão e é de $5 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$ e que a relação de escoamento do caudal que é $6 \frac{\text{l}}{\text{s}}$, sabendo que o rotor gira a uma velocidade de $13,4 \text{ RPM}$, vem que, para 1 RPM é necessário de alimentar $0,37 \text{ Kg}$ de fibra o que, neste caso, apresenta um excelente resultado, visto que o funcionamento deste mecanismo será contínuo e, por outro lado, o escoamento do caudal não é constante, ou seja, como foi descrito no capítulo anterior, o escoamento do betão terá um tempo de descarregamento após cerca de $2,7 \text{ s}$ de crescimento, reduzindo assim a rotação do rotor e, ao mesmo tempo, aumentando a janela temporal. Assim, a desvantagem vista anteriormente devida à forma das interrupções no fornecimento de betão transforma-se em vantagem.

Por outro lado, este protótipo pode ser ajustado a diferentes caudais de betão variando as dimensões da câmara, em particular a sua largura, ao mesmo tempo reduzindo a velocidade do rotor e com isso aumentando a janela temporal em que a fibra será alimentada, desta forma facilitando o controle do fornecimento de fibra.

O principal conceito que este protótipo encerra é a garantia da entrega de um volume fixo de betão em função da rotação independente do caudal de betão. Assim, a quantidade de fibras a introduzir em cada passagem de uma câmara (volume entre palhetas) pela janela de introdução é constante, facilitando grandemente o controlo desta variável.

4.3.2. Protótipo nº5

Modelação e desenvolvimento

Este subcapítulo apresenta o trabalho realizado na modelação e desenvolvimento de um novo protótipo de um sistema autopropulsado segundo o princípio apresentado no protótipo anterior. Neste caso, o trabalho centrou-se na configuração geométrica da superfície interior do

corpo da bomba para garantir a exequibilidade das diversas zonas (de bombagem, de adução de fibras de entrada de betão e de saída da mistura.) Além disso, para evitar os problemas de excesso de atrito verificados no protótipo anterior, optou-se por construir um guiamento a partir de um caminho de cames interior, obrigando as palhetas através deste mecanismo em vez de recorrer ao atrito com as paredes do corpo da bomba.

Os cálculos foram realizados recorrendo a simulações feitas usando o software MATLAB que é uma linguagem de programação de alto nível e um ambiente de desenvolvimento técnico, projetado para cálculos numéricos, análise de dados e visualização. Possui uma ampla gama de funções e ferramentas que permitem aos investigadores e engenheiros modelar e analisar eficientemente vários sistemas e processos.

Na Figura 48, apresentada abaixo, pode observar-se o novo modelo virtual desenvolvido:

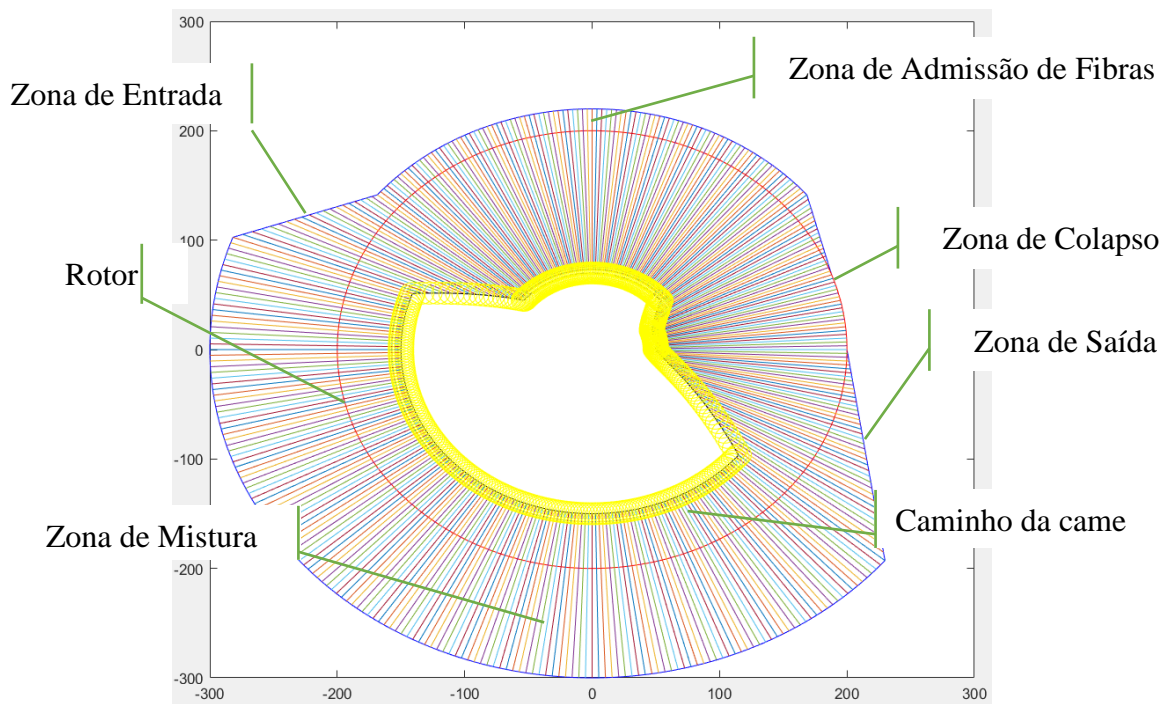


Figura 48: Modelo desenvolvido no MATLAB

- O contorno azul representa a estrutura externa geral do mecanismo, fornecendo suporte do rotor.
- O círculo vermelho representa o rotor, que é a parte central do mecanismo responsável pela rotação e pelo movimento das palhetas.

- A linha amarela indica o caminho da came, que servirá como guia para as palhetas do rotor. Essa alteração foi proposta após o teste do último protótipo, no qual foi identificado um problema de deslizamento das palhetas devido ao alto atrito. A implementação da came como guia proporcionará um movimento mais suave e controlado das palhetas, evitando o deslizamento indesejado.
- As linhas multicoloridas representam as diferentes posições das palhetas devido à rotação do rotor. Cada cor indica uma posição específica das palhetas ao longo da rotação do rotor, permitindo uma análise visual das diferentes configurações e possibilidades de funcionamento do mecanismo.

A informação fornecida pela Figura 48 é essencial para compreender o projeto e o funcionamento do novo protótipo do mecanismo. Através dessa representação visual, é possível identificar as modificações propostas para solucionar os problemas encontrados no protótipo anterior, bem como visualizar a interação entre as diferentes partes do mecanismo.

É importante ressaltar que o modelo é uma representação virtual e serve como uma ferramenta para análise preliminar e visualização do projeto. Para uma validação completa do novo protótipo, os dados foram enviados para a empresa parceira do projeto, que é responsável pelo projeto industrial final e pela construção dos equipamentos.

Nota de cálculos sobre o protótipo n°5:

Os parâmetros e cálculos que serão apresentados neste subcapítulo foram estabelecidos com base nas observações e resultados obtidos do último protótipo físico construído.

A análise do protótipo físico precedente desempenhou um papel essencial na definição desses parâmetros e na realização dos cálculos subsequentes. Cada valor foi escolhido com base nas limitações e evidências extraídos do protótipo anterior, assegurando assim uma correlação direta e aplicabilidade prática dos resultados.

Com base nas lições aprendidas e nas necessidades do projeto, os seguintes parâmetros geométricos e dimensionais foram estabelecidos como ponto de partida, ainda que todo o algoritmo desenvolvido possa ser modificado facilmente alterando estes parâmetros:

- $R_i = 200 \text{ mm}$ (o raio interno do tambor é definido como 200 mm . Este parâmetro é um fator determinante na geometria geral do protótipo);

- $R_{ca} = 20 \text{ mm}$ (troço do raio da câmara de admissão que representa o espaço entre o tambor e estrutura externa);
- $R_{eca} = R_i + R_{ca}$ (R_{eca} – raio exterior da camara de alimentação da fibra entre ângulos a_2 e a_3 que é 220 mm);
- $L_p = 150 \text{ mm}$ (representa o comprimento das palhetas no mecanismo);
- $R_e = 300 \text{ mm}$ (raio da estrutura exterior entre ângulos a_4 e a_5);
- $H_{pr} = 200 \text{ mm}$ (largura da estrutura do protótipo);

Esses parâmetros geométricos e dimensionais formam a base do projeto do protótipo, e as suas escolhas foram fundamentais para a modelagem do mecanismo.

O próximo passo do processo de modelação do novo protótipo envolveu a definição das transições entre diferentes zonas de funcionamento. Estas transições foram determinadas com base em ângulos específicos que demarcam as mudanças de comportamento do mecanismo. A seguir, detalham-se as transições chave que foram definidas:

Transição do Colapso para a Câmara de Admissão:

Para estabelecer uma entrada suave na câmara de admissão (de fibras), foi escolhido um ângulo de início de 20 graus (a_1) e um ângulo de término de 40 graus (a_2). Essa transição é de extrema importância para prevenir infiltrações indesejadas de betão na câmara de alimentação da fibra.

Transição da Câmara de Admissão para a Zona de Alimentação:

A transição da câmara de admissão para a zona de alimentação (de betão) foi definida entre 140 graus (a_3) e 160 graus (a_4). Este intervalo permite que o mecanismo direcione adequadamente a fibra da câmara de admissão para a zona de entrada do betão, preparando-o para o próximo estágio do ciclo de operação.

Transição da Alimentação para a Zona de Colapso:

Para assegurar uma saída controlada da zona de alimentação, a transição para a zona de colapso foi definida entre 320 graus (a_5) e 360 graus (a_6). Esta faixa de ângulos garante que o fluido seja redirecionado de forma gradual, evitando turbulências ou bloqueios no processo.

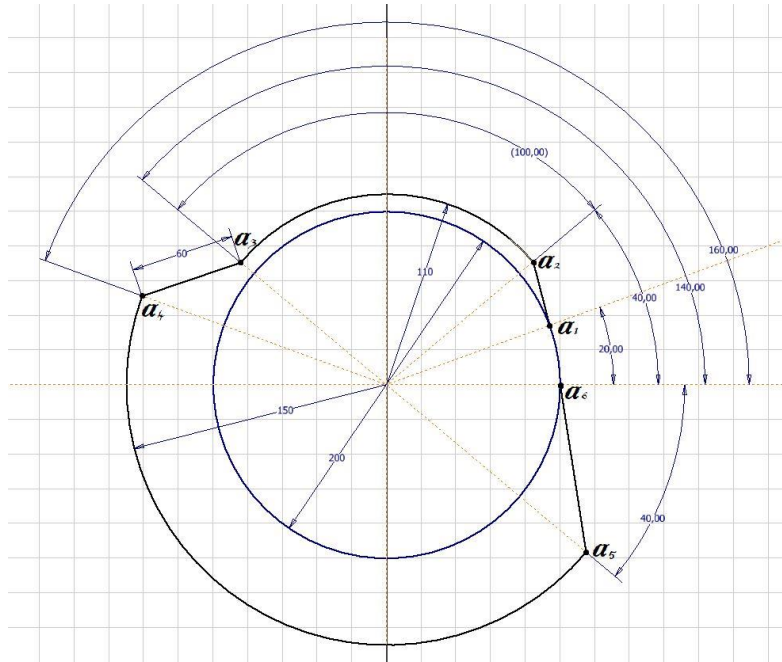


Figura 49: Representação gráfica das transições

Estas definições angulares foram fundamentais para garantir um desempenho otimizado do protótipo e uma operação eficiente ao longo de todo o ciclo.

Análise e Cálculos por Meio do MATLAB:

Cada uma dessas transições é acompanhada por cálculos, executados utilizando a função polinomial do primeiro grau $y = ax + b$.

Os pontos de transição são obtidos considerando as coordenadas polares (r, a) , onde r é a distância radial do centro em relação ao ângulo a . A partir desses pontos, os coeficientes "a" e "b" da equação de reta $y = ax + b$ são calculados, permitindo modelar com precisão as transições. Assumindo que a origem é o centro do protótipo, os pontos de transição são calculados da seguinte forma:

Transição do Colapso para a Câmara de Admissão:

$$Pt_{a1}(a_1) = (R_i * \cos(a_1), R_i * \sin(a_1))$$

$$Pt_{a2}(a_2) = (R_{ca} * \cos(a_2), R_{ca} * \sin(a_2))$$

$$Pr_{a1}(\text{ponto } a_1) = \frac{Pt_{a1}(2) - Pt_{a2}(2)}{Pt_{a1}(1) - Pt_{a2}(1)}$$

$$Pr_{a2}(\text{ponto } a_2) = \frac{(Pt_{a1}(2) * Pt_{a2}(1) - Pt_{a2}(2) * Pt_{a1}(1))}{(Pt_{a2}(1) - Pt_{a1}(1))}$$

Transição da Câmara de Admissão para a Zona de Alimentação:

$$Pt_{a3}(a_3) = (R_{ca} * \cos(a_3), R_{ca} * \sin(a_3))$$

$$Pt_{a4}(a_4) = (R_e * \cos(a_4), R_e * \sin(a_4))$$

$$Pr_{a3}(\text{ponto } a_3) = \frac{Pt_{a3}(2) - Pt_{a4}(2)}{Pt_{a3}(1) - Pt_{a4}(1)}$$

$$Pr_{a4}(\text{ponto } a_4) = \frac{(Pt_{a3}(2) * Pt_{a4}(1) - Pt_{a4}(2) * Pt_{a3}(1))}{(Pt_{a4}(1) - Pt_{a3}(1))}$$

Transição da Alimentação para a Zona de Colapso:

$$Pt_{a5}(a_5) = (R_e * \cos(a_5), R_e * \sin(a_5))$$

$$Pt_{a6}(a_6) = (R_i * \cos(a_6), R_i * \sin(a_6))$$

$$Pr_{a5}(\text{ponto } a_5) = \frac{Pt_{a1}(2) - Pt_{a2}(2)}{Pt_{a1}(1) - Pt_{a2}(1)}$$

$$Pr_{a6}(\text{ponto } a_6) = \frac{(Pt_{a5}(2) * Pt_{a6}(1) - Pt_{a6}(2) * Pt_{a5}(1))}{(Pt_{a6}(1) - Pt_{a5}(1))}$$

Onde Pt_a – ponto de transição do ângulo, Pr_a – ponto de início e fim da reta entre os pontos de transição.

Geometria da Superfície Externa:

A geometria da superfície externa é modelada com base nos pontos de transição e nos ângulos de cada segmento. Para cada ângulo a no intervalo de 0^0 a 360^0 , calcula-se o raio da superfície externa conforme as seguintes condições:

$$\theta_{base} = [0^0 : 360^0]$$

$$\text{Se } 0^0 \leq \theta_{base} < 20^0:$$

$$\text{raio } (r) = R_i$$

$$\text{Se } 20^0 \leq \theta_{base} < 40^0:$$

$$\text{raio } (r) = (Pr_{a2} / (\text{sin}(\theta_{base}) - Pr_{a1} * \text{cos}(\theta_{base})))$$

$$\text{Se } 40^0 \leq \theta_{base} < 140^0:$$

$$\text{raio } (r) = R_{eca}$$

$$\text{Se } 140^0 \leq \theta_{base} < 160^0:$$

$$\text{raio } (r) = (Pr_{a4} / (\text{sin}(\theta_{base}) - Pr_{a3} * \text{cos}(\theta_{base})))$$

Se $160^\circ \leq \theta_{base} < 320^\circ$:

$$raio(r) = R_e$$

Se $320^\circ \leq \theta_{base} \leq 360^\circ$:

$$raio(r) = (Pr_{a6} / (\text{sin}(\theta_{base}) - Pr_{a5} * \text{cos}(\theta_{base})))$$

$$raio(r) = R_i$$

Cálculo de Volume:

Além disso, o script realiza cálculos para determinar o volume de bombeamento em cada quarto de volta, o que é feito usando a fórmula da área de setor circular, multiplicado pela largura da câmara:

$$\pi * (R_e^2 - R_i^2) * \left(\frac{90^\circ}{360^\circ}\right) * \frac{H_{pr}}{10^6} = 7,8540 \text{ litros} \quad \text{Eq. 30}$$

Para referência completa, o código fonte do script está disponível no Anexo A.

4.4. Conceito da garganta da tremonha com eixo separador

Nesta seção descreve-se o conceito e o funcionamento de um protótipo desenvolvido para garantir a separação adequada de fibras a serem incorporadas no fluxo betão. O principal objetivo do protótipo é assegurar que as fibras não sejam alimentadas em novelos ou camadas que dificultem o controlo da alimentação dos filamentos durante o processo de mistura com o betão.

Descrição do Protótipo:

O protótipo foi projetado com base no conceito de utilizar um eixo com pinos em movimento para repelir a fibra para os lados, dividindo-a em pequenas camadas. Isso, por sua vez, tem o efeito desejado de separar os filamentos e guiá-los para o fluxo do betão.

Funcionamento do Protótipo:

O funcionamento do protótipo é relativamente simples e pode ser descrito da seguinte maneira:

- O eixo com pinos em movimento é ativado quando as fibras entram na garganta. Esses pinos têm a função de repelir as fibras para os lados.
- Como resultado da ação dos pinos, as fibras são divididas em pequenas camadas à medida que se movem através do protótipo.
- A divisão em camadas subsequente acaba por separar os filamentos individuais das fibras.
- Após a separação dos filamentos, eles são guiados para o fluxo do betão, onde podem ser efetivamente incorporados.

Projeto Mecânico:

Devido a considerações mecânicas, uma das paredes da garganta do protótipo foi projetada em forma de grade. Isso foi feito para garantir o movimento livre dos pinos no eixo, pois a grade permite que os pinos se movam sem obstáculos. No entanto, uma preocupação adicional surgiu em relação à possibilidade de liberação das fibras para fora do protótipo devido à presença da grade. Para evitar o problema potencial de liberação de fibras para fora do protótipo devido à grade, foi considerada a instalação de uma proteção adicional.

Na Figura 50 pode ver-se o protótipo criado em ambiente laboratorial.



Figura 50: Protótipo da garganta com eixo separador

Conclusões sobre protótipo:

Este protótipo provou não ser satisfatório, porque se verifica o encravamento da fibra entre a superfície da parede e os pinos do eixo separador, o que é causado pelo fator de forma da fibra. Quando a fibra atinge o pino, ocorre uma colisão que faz com que a fibra fique em

posição paralela à base da parede da garganta, criando um obstáculo ao pino, provocando assim uma paragem na rotação do eixo.

4.5. Conceito de separação com tapetes

4.5.1. Construção do modelo físico

Para obviar aos problemas encontrados no primeiro protótipo, foi construído um mecanismo de separação de fibras utilizando duas esteiras com superfícies rugosas que a Figura 51 mostra. O objetivo desse mecanismo foi o de aumentar o atrito e facilitar a separação das fibras.

A função básica do mecanismo (Figura 52) consistia em criar uma zona de atrito entre as esteiras devido ao movimento em direções diferentes. Esse atrito auxilia na separação das fibras, impedindo a formação de novelos e direcionando-as para a entrada do sensor eletromagnético e posterior adução ao protótipo. A distribuição das fibras depende das velocidades de rotação das esteiras, resultando em camadas de fibras progressivamente menores e mais uniformemente separadas.



Figura 51: Mecanismo de separação com telas abrasivas

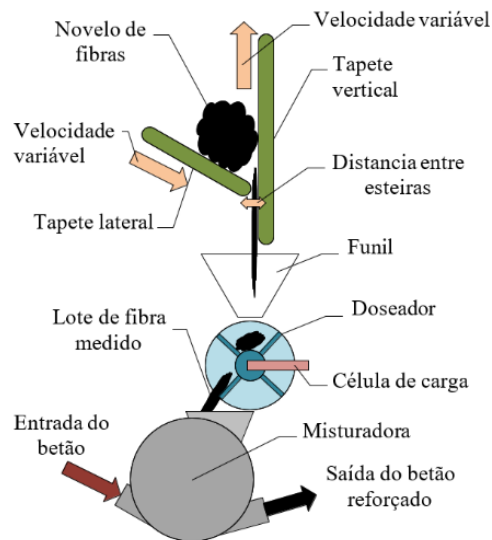


Figura 52: Princípio de funcionamento do mecanismo

Após a realização das primeiras experiências, concluiu-se que a eficiência do modelo preliminar não foi suficiente para atender aos requisitos desejados, e a qualidade do protótipo apresentou algumas limitações significativas, que comprometeram o desempenho esperado. Especificamente, o estado do protótipo não permitiu uma alimentação eficiente das fibras, refletindo a necessidade de melhorias adicionais no design. Esse resultado levou a um estudo mais detalhado para identificar possíveis melhorias e aumentar o suprimento de fibras.

Vários fatores foram considerados durante este estudo, incluindo:

- Materiais alternativos para as esteiras com maior abrasividade, a fim de melhorar o processo de separação de fibras.
- Modificação do design para incorporar mecanismos ou componentes adicionais que melhorem a separação de fibras.
- Ajuste das velocidades de rotação das esteiras com implementação de automação para otimizar a eficiência de separação e alimentação ajustável de fibra.
- Exploração de diferentes técnicas ou tecnologias de separação que possam apresentar melhores resultados.

A Figura 53 mostra as alterações que foram aplicadas neste mecanismo de separação para prosseguir o passo de automatização que será descrito no próximo subcapítulo.



Figura 53: Mecanismo de separação modificado

4.5.2. Automação do processo

O próximo passo crucial foi a automação desse processo, que envolveu a sincronização do fornecimento de fibras com equipamentos de medição, como uma célula de carga e um sensor eletromagnético mostrados nas figuras abaixo. O objetivo foi o de desenvolver um novo tipo de sensor para medição do caudal de fibras.

Foi construído um mecanismo de recolha das fibras separadas para as fornecer em sincronismo com a passagem da câmara de admissão de fibras pela janela de introdução. Além disso, um sistema de medição da massa de fibras separadas usando uma célula de carga foi integrado no mecanismo para medir e registar o peso exato de fibra fornecido em cada janela temporal em tempo real.



Figura 54: Célula de carga com capacidade máxima até 1,5 Kg[34]

Ao mesmo tempo, foi estudado um sensor eletromagnético para detetar, usando outro princípio, o mesmo o caudal de fibras.

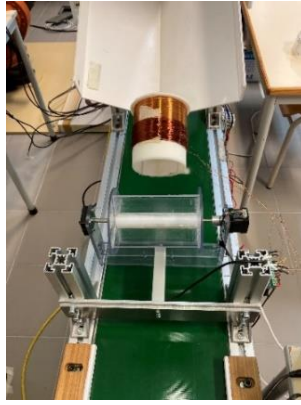


Figura 55: Sensor eletromagnético desenvolvido no ambiente laboratorial

Outro objetivo importante consistia no controle do fluxo da fibra para o que se instalou um motor DC com o qual se ajusta a velocidade rotação do tapete vertical conforme a quantidade de fibra necessária em cada momento.

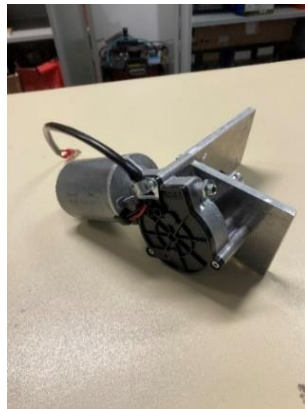


Figura 56: Motor DC da marca DOGA[35]

Levando em consideração a exclusão da motorização da esteira lateral, foi identificada a necessidade de encontrar uma solução alternativa para o controle de alimentação. Como resultado, decidiu-se incluir um rolo adicional dentro do tapete vertical, visando controlar a abertura entre as esteiras.

Para possibilitar o acionamento desse rolo adicional, foi instalado um motor DC com encoder incremental incorporado, juntamente com os respectivos guias. Essa configuração permitiu o movimento do rolo, possibilitando ajustar a distância desejada entre as esteiras.

Essa modificação proporcionou um maior controle sobre o processo de separação de fibras, pois tornou possível regular com precisão a abertura entre as telas. Além disso, o ajuste

automatizado da abertura permitiu regular o fluxo da fibra de acordo com as necessidades específicas do projeto.

A inclusão do rolo adicional e a automação do seu acionamento contribuíram significativamente para a melhoria da eficácia do controle sobre o protótipo. Essa modificação permitiu uma manipulação mais precisa da quantidade de fibra a ser separada, resultando em um melhor desempenho geral do protótipo.

Portanto, a capacidade de regular a abertura entre as esteiras de forma automatizada proporcionou maior flexibilidade e eficiência ao processo de separação de fibras, atendendo aos objetivos do projeto de forma mais precisa.

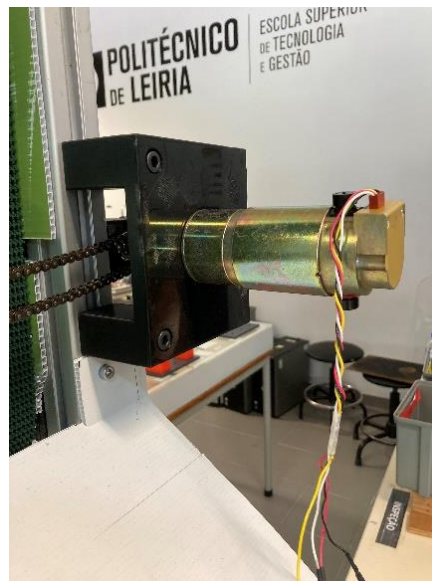


Figura 57: Motor DC com encoder da marca Pittman[36]

Os esquemas elétricos dos circuitos utilizados, são apresentados nos Anexos D, E.

4.5.3. Fluxograma do processo

A fim de visualizar e compreender melhor o funcionamento do sistema de automação, foi desenvolvido um diagrama de blocos (Figura 58) que ilustra de forma clara as principais componentes e suas interações.

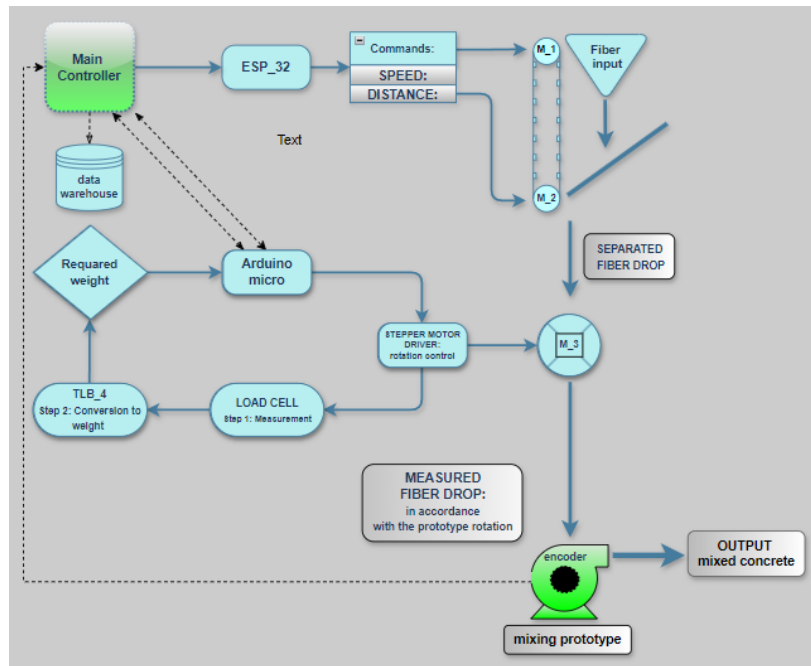


Figura 58: Diagrama de blocos do fluxo do processo

No caso do nosso sistema de automação para o processo de separação de fibras, o diagrama de blocos inclui os seguintes componentes principais:

- Motores DC: (M_1) controlo de velocidade e (M_2) controlo de distância de abertura da passagem de fibras;
- Motor de passo: (M_3) que controla a dosagem da fibra;
- Placa Arduino micro (controlador da parte de medição da fibra);
- Placa Esp32 (controlador da parte do fluxo da fibra);
- Célula de carga em conjunto com sensor eletromagnético (conjunto dos equipamentos que são responsáveis por medição da fibra);
- TLB4 é um transmissor de peso para medir e transmitir informações precisas sobre o peso de cargas;
- Peças mecânicas (perfis alumínio, acessórios de aperto e etc.);

Para referência completa, a lista dos componentes mencionados acima está presente no anexo B.

Etapa 1: Alimentação e Início do Processo

A primeira etapa do processo envolve a descarga da fibra em um recipiente formado entre as esteiras. Isso marca o início do fluxo de trabalho automatizado, preparando a fibra para passar pelas etapas subsequentes.

Etapa 2: Controle de Velocidade e Abertura

Nessa etapa, os motores do tapete vertical e do rolo de abertura são controlados por um microcontrolador ESP32. A ESP32WROOM é uma placa de desenvolvimento baseada naquele microcontrolador, que oferece recursos avançados e ampla capacidade de comunicação. Uma das razões pelas quais foi escolhida a placa ESP32 é a presença de portas DAC (*Digital-to-Analog Converter*), através das quais se pode gerar um sinal analógico em tensão proporcional à velocidade desejada para o motor. Usando comandos específicos, é possível definir a posição inicial, as velocidades de rotação e as aberturas entre as esteiras. A variação desses parâmetros ao longo dos testes permite encontrar a combinação ideal para otimizar a separação da fibra.

Etapa 3: Separação e Registo do Fluxo:

Nessa etapa, a fibra passa pelo processo de separação, impulsionada pelas esteiras em movimento. Ao final do percurso, um sensor eletromagnético é utilizado para registrar o fluxo da fibra.

Etapa 4: Dosagem e Controle de Peso

A fibra é direcionada para o doseador. Através da célula de carga em conjunto com transmissor do peso e do motor passo, é realizado o controle do peso da fibra. Quando o peso desejado é alcançado, o doseador realiza a descarga da quantidade processada. Esse conjunto de componentes é controlado por uma placa Arduino micro, que desempenha um papel fundamental na automação do processo de separação de fibras.

Etapa 5: Verificação e Análise dos Resultados

Para a verificação e calibração do sistema de doseamento, a fibra descarregada do doseador foi submetida a uma etapa de pesagem manual. Nessa etapa, os dados digitais são comparados com os valores reais, permitindo uma avaliação precisa do desempenho do mecanismo. Os resultados obtidos foram utilizados para analisar a eficácia de todo o sistema de separação e dosagem.

As conclusões e resultados dos testes serão apresentados no capítulo seguinte com informação detalhada sobre o todo processo dos testes do respetivo equipamento.

5. TESTES E RESULTADOS

5.1. Protótipo nº4

5.1.1. Características do modelo físico

Na Figura 59, é possível observar o primeiro modelo do protótipo físico construído pela empresa parceira. A estrutura foi construída conforme os dados enviados, e suas dimensões e alterações foram ajustadas de acordo com o volume da câmara de passagem do betão. A câmara foi construída com um volume de 7,2 l, o que representa um pouco mais do que a taxa de alimentação inicial do betão, que era de 20 m³/hora, correspondendo a 6 l, por segundo.

No entanto, o intervalo de tempo disponível para a alimentação da fibra é de 1,8 s, que corresponde ao tempo necessário para que as pás percorram uma distância de $\frac{1}{4}$ da volta sem criar sobrecargas de fibra por uma câmara. Dessa forma, a pá anterior pode se posicionar para a posição da próxima pá quando a quantidade desejada de fibra é alimentada que é de pelo menos 80 g, por cavidade formada entre duas palhetas.



Figura 59: Modelo físico

5.1.2. Resultado do teste na prática

O teste foi realizado nas dependências da própria empresa com o objetivo de avaliar o desempenho do protótipo. Durante o teste, as entradas e saídas do protótipo foram adaptadas de acordo com as conexões das tubulações pelas quais o betão líquido fluiria quando a máquina estivesse em funcionamento. No entanto, quando o betão foi introduzido no protótipo, o rotor que deveria guiar as palhetas de acordo com a geometria interna da estrutura não se moveu, o que resultou no acúmulo e aumento da pressão dentro da estrutura. Esse aumento de pressão levou à rotura de uma das tampas protetoras, ocasionando danos irreparáveis ao protótipo, como pode ser visto na Figura 60.



Figura 60: Teste do modelo físico

5.1.3. Conclusões

Após o teste, e em conjunto com a empresa parceira, identificou-se como principal problema o atrito entre a base das palhetas e as paredes da câmara o que causou o desalinhamento das patilhas nas suas sedes de guiamento, o que, por sua vez causou ainda maior atrito nestas sedes, impedido o deslizamento das palhetas. A contribuir para este atrito, o maior fator foi identificado como o facto de se usarem molas para pressionar as palhetas contra a parede da câmara para garantir a estanquicidade entre câmaras.

Os resultados destes testes deram origem ao desenvolvimento do protótipo nº5, que também foi construído e testado pela empresa parceira. Ainda que apenas testes preliminares

tenham sido efetuados no protótipo industrial (Figura 61), identificou-se de novo um problema de bloqueio do rotor, desta vez por causa de uma deficiente estanquicidade entre as palhetas e a parede da câmara, permitindo a passagem de alguns dos constituintes inertes (brita) que bloquearam a zona de colapso, encravando o mecanismo.

É importante realçar que o protótipo industrial foi concebido com base nas características do protótipo de teste, mencionado anteriormente, contudo numa escala consideravelmente maior, com o intuito de responder às exigências e especificações do projeto. Esta ampliação dimensional foi efetuada para assegurar a viabilidade e eficácia do projeto num contexto de produção em grande escala.



Figura 61: Protótipo industrial construído

5.2. Protótipo de separação de fibras

Neste subcapítulo, serão apresentados os resultados dos testes realizados para obter informações sobre a resposta dos equipamentos utilizados. O principal objetivo desses testes foi comparar os dados fornecidos pela célula de carga e pelo sensor eletromagnético (desenvolvido por outra equipa dentro do projeto) com os valores de pesagem obtidos manualmente.

5.2.1. Teste da resposta da célula de carga

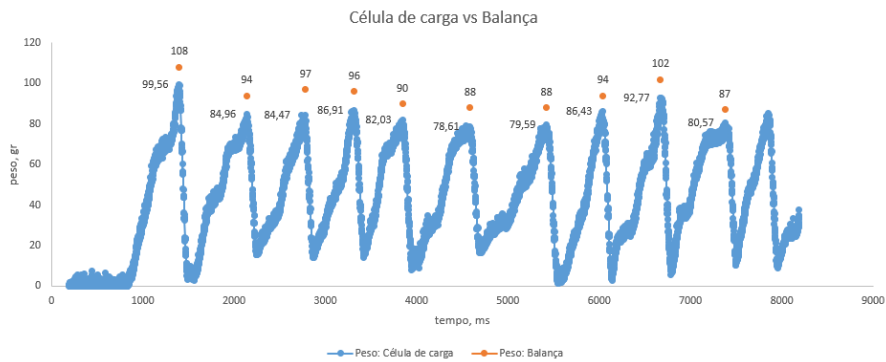


Figura 62: Gráfico de medição do fluxo da fibra

A Figura 62 apresenta o gráfico resultante do teste realizado em ambiente laboratorial, onde a linha azul representa a resposta da célula de carga. Observa-se que essa linha exhibe flutuações ao longo do tempo, o que indica variações na quantidade de fibra detetada pela célula de carga. Os picos nessa linha correspondem aos pesos máximos registrados imediatamente antes da rotação do doseador. Além disso, foram adicionados pontos de cor laranja ao gráfico para representar os pesos que foram registrados manualmente usando uma balança.

5.2.2. Teste em série

Foi decidido construir um gráfico de superfície 3D com base nos dados obtidos durante 63 testes (Figura 63), que consistiram em 9 estágios, sendo que cada estágio foi dividido em 7 testes distintos. Um teste consistiu em 7 velocidades do tapete vertical controladas sequencialmente e uma distância constante entre o tapete lateral e vertical, que variava em cada estágio.

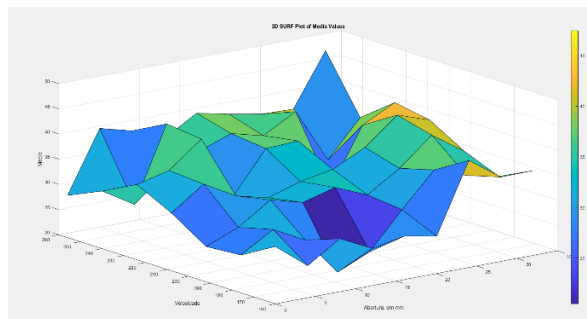


Figura 63: Gráfico das médias dos valores

O objetivo desta ação foi de criar um gráfico de superfície para analisar o comportamento dos dados e verificar a possibilidade de criar um *offset* da previsão partir do qual será realizado um controle preciso sobre a alimentação das fibras. No entanto, observou-se que a dispersão dos valores é muito alta numa mesma linha de aberturas.

Sendo assim, fez-se outra análise na qual os valores discrepantes (*outliers*) foram eliminados para confirmar se é possível criar um conjunto de dados mais consistente que atenda ao objetivo inicial.

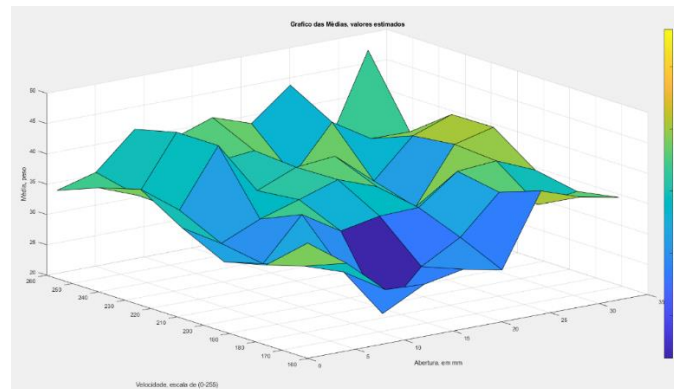


Figura 64: Gráfico das médias dos valores (estimado)

Na comparação entre os dois gráficos, observa-se uma ligeira diferença, na qual o gráfico de superfície da Figura 64 apresentou mais zonas de cor verde. Isso indica que as médias dos valores ficaram mais próximas da média desejada, no entanto, o resultado desejado não foi alcançado devido ao equipamento utilizado.

Optou-se, então por uma abordagem diferente, tentando modelar a relação entre os valores medidos pela célula de carga e os correspondentes valores medidos numa balança após a descarga completa, procurando encontrar um modelo de previsão que, baseado do ritmo de crescimento dos valores da célula de carga, proponha um valor esperado para o peso final após descarga.

5.2.3. Formulação do problema

Neste subcapítulo, será detalhado o processo de desenvolvimento do modelo de previsão utilizado neste estudo.

Considerando as informações fornecidas anteriormente, a primeira análise realizada foi a investigação da relação com o equipamento de transmissão do peso. O objetivo foi determinar

se havia algum atraso na recepção dos dados, o que poderia afetar os valores finais e explicar as discrepâncias entre os pesos medidos pela célula de carga e os pesos obtidos manualmente. Como resultado, identifica-se um atraso de 0,875 s, o qual está pré-configurado pelo fabricante.

Os testes da célula de carga realizados no laboratório consistem em 63 estágios em que o peso programado era de 80 g de fibras por lote e na realidade nem um dos lotes foi igual ao 80 g, como visto na Figura 62. Isso levou à preparação de um algoritmo de previsão em que o valor programado será menor do 80 g, o que em sua vez permite o doseador virar antes de entrar em sobrecarga.

5.2.4. Estrutura do Modelo de Previsão

Na base dos testes anteriormente realizados será apresentada uma análise detalhada dos dados obtidos e como eles são visualizados por meio de um fluxograma (Figura 65).

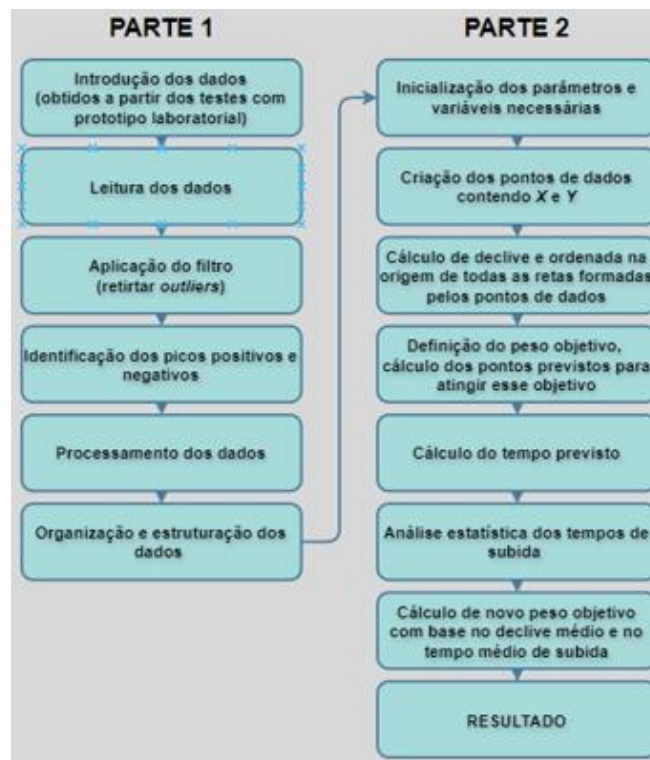


Figura 65: Fluxograma do funcionamento do modelo da previsão

O fluxograma acima descreve o processo de análise e visualização dos dados conforme se segue:

Parte 1:

- Introdução dos dados obtidos nos testes do protótipo laboratorial:

Estes dados consistem na resposta da célula de carga.

- Um filtro de mediana é aplicado aos dados de peso para suavizar os *outliers*:

A necessidade de aplicar um filtro de mediana reside na procura de uma representação mais estável dos dados.

- Identificação de picos positivos e negativos:

Esses picos representam valores significativamente mais altos (picos positivos) ou mais baixos (picos negativos) do que os valores ao redor deles, os picos positivos são valores máximos registados antes de concluir a uma pesagem.

- Processamento e estruturação dos dados para posterior aplicação na parte 2 do código:

Envolve preparar os dados para serem utilizados nas análises e cálculos subsequentes.

Parte 2:

- Criação dos pontos de dados contendo x e y de todos os pontos relevantes:

Esta etapa é essencial para a compreensão da relação entre o tempo (x) e o peso (y) durante o processo de dosagem. Esses pontos fornecem uma representação visual dos dados, permitindo a identificação de padrões, tendências e relações entre as variáveis. Isso é fundamental para análises posteriores e para a construção de modelos preditivos onde esses pontos são utilizados para calcular o tempo previsto para atingir um peso objetivo.

- Cálculo do declive (m) e ordenada na origem (b) de todas as retas formadas pelos pontos de dados utilizando a equação da reta $Y = mx - b$:

$$(\text{declive}) m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{Eq. 31}$$

$$(\text{ordenada na origem}) b = y - m * x1 \quad \text{Eq. 32}$$

- Definição do peso objetivo:

$$Y_{objetivo} = 80 \text{ gramm} \quad \text{Eq. 33}$$

$Y_{objetivo}$ é o peso na base de qual foi construído respectivo modelo de previsão.

- Cálculo do tempo previsto:

$$X_{previsto} = \frac{Y_{objetivo} - b}{m} \quad \text{Eq. 34}$$

O tempo previsto é o tempo estimado necessário para que o sistema atinja um determinado valor do peso em que o doseador começa a girar para respeitar o peso estipulado.

- Cálculo do novo peso objetivo com base na inclinação média e no tempo médio de subida:

$$T_{subida} = X_{previsto} - X_{inicial} \quad \text{Eq. 35}$$

Tempo de subida é um novo tempo de ciclo de cada pesagem que é um resultado do algoritmo de previsão.

O tempo de subida representa o intervalo de tempo necessário para o sistema alcançar o peso desejado a partir do momento em que inicia a dosagem. Ele é um componente crítico do ciclo de pesagem, influenciando diretamente na precisão do processo de dosagem.

$$Novo \text{ Peso}_{objetivo} = \bar{m} * \overline{T_{subida}} \quad \text{Eq. 36}$$

O novo peso objetivo é o valor desejado para a pesagem. Calcula-se com base na inclinação média das retas formadas pelos pontos de dados e no tempo médio de subida. O resultado desse cálculo é um peso objetivo ajustado que leva em consideração a dinâmica do sistema, ajudando a melhorar a precisão das previsões e a eficiência do controle.

Resultado:

Nesta seção, realiza-se uma análise comparativa dos resultados antes e depois da aplicação do modelo de previsão. Inicialmente, apresentam-se os gráficos que ilustram a distribuição dos dados e possíveis inconsistências antes da implementação do modelo, como demonstrado nas figuras subsequentes:

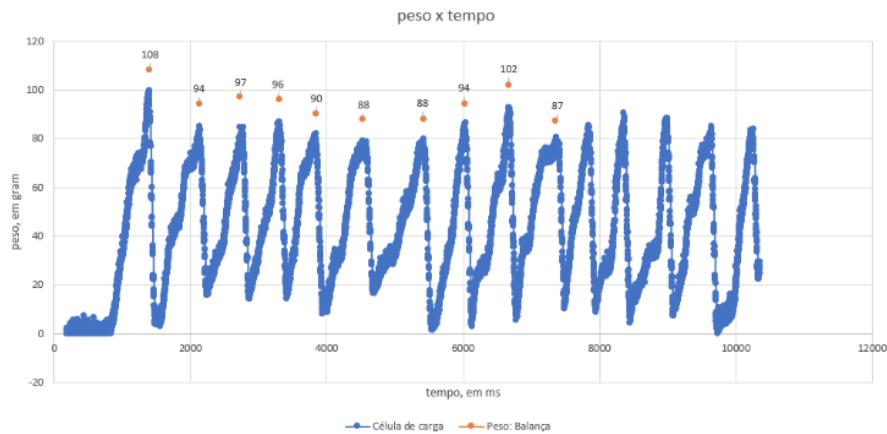


Figura 66: Estágio 1 (sem aplicação do modelo previsão)

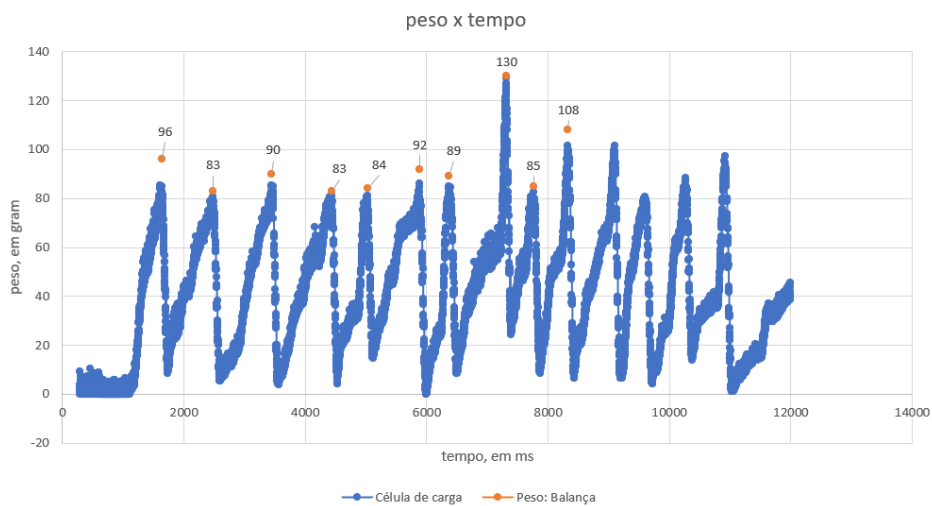


Figura 67: Estágio 2 (sem aplicação do modelo previsão)

Em seguida, destacam-se os resultados após a aplicação do modelo, demonstrando a redução da dispersão e a melhor adequação dos dados ao modelo proposto. Isso evidencia a eficácia do modelo de previsão em fornecer estimativas mais precisas e confiáveis, contribuindo significativamente para a otimização dos processos.

Após a aplicação do modelo de previsão, o novo peso objetivo foi de 68 g. Antes de implementação do modelo, a média do peso foi de 94.4 g, (Figura 66), enquanto após a aplicação, a média do peso foi de 78 g, (Figura 68).

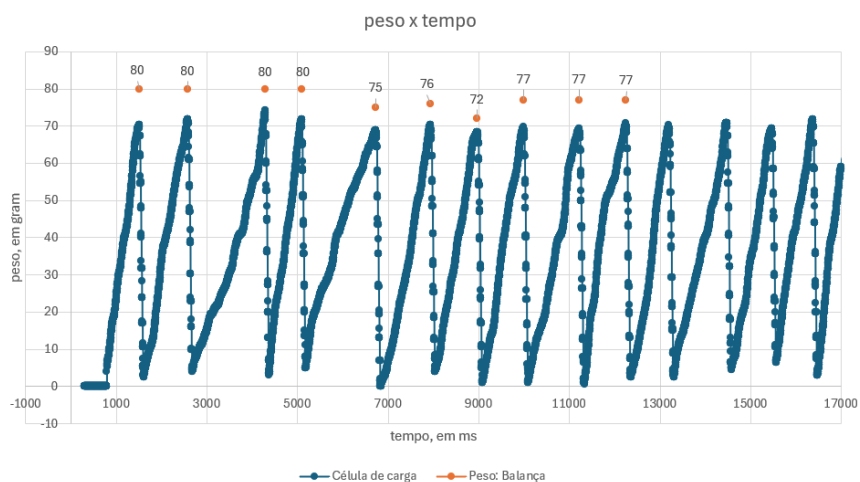


Figura 68: Gráfico de medição, estágio 1

Como resultado do modelo previsão o novo peso objetivo do segundo estágio era de 72 g. Antes da aplicação do modelo, a média do peso real foi de 94 g, conforme a Figura 67 e após a aplicação, a média do peso passou a ser de 80.9 g, conforme observado na Figura 69.

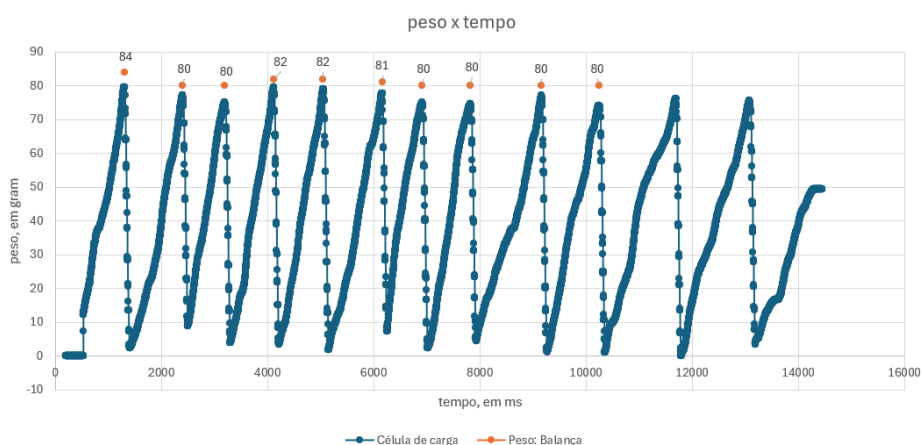


Figura 69: Gráfico de medição, estágio 2

O código para o modelo de previsão pode ser consultado no Anexo C.

5.2.5. Conclusões sobre protótipo

A implementação do script apresentado neste estudo revelou-se crucial para a melhoria da precisão no controle da alimentação de fibra. Os resultados obtidos demonstram que o uso do script possibilitou uma significativa otimização do processo. As análises realizadas

evidenciaram uma notável melhoria na eficácia do sistema, indicando que o script proporcionou resultados que melhoram efetivamente o sistema de medição.

É importante destacar que, embora o equipamento laboratorial anterior tenha sido útil para conduzir experiências preliminares, sua eficácia era limitada. No entanto, com a implementação do script, foi possível superar essas limitações e alcançar resultados muito mais satisfatórios.

A inclusão de um buffer adicional no protótipo industrial, baseado nas previsões fornecidas pelo script, permitirá uma melhor gestão da carga de fibra, resultando num processo de alimentação mais estável. É importante ressaltar que, devido ao estágio atual de construção do protótipo, a melhoria dos resultados depende exclusivamente da aplicação desse buffer adicional, uma vez que outras otimizações ainda estão em fase de implementação.

O protótipo do sistema de separação (Figura 70) foi construído, na base de resultados qualitativamente semelhantes ao protótipo físico construído no laboratório, e integrado no protótipo industrial final (Figura 61) que, por sua vez, permite a ação dupla da dosagem na forma de uma balança intermedia instalada entre o recipiente de fibras e a plataforma com duas células de carga ligadas em simultâneo. Infelizmente não houve oportunidade de aplicar o algoritmo de previsão no equipamento final devido ao atraso na respetiva implementação.



Figura 70: Protótipo industrial de separação de fibra (com dupla dosagem)

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo capaz de misturar betão projetado com fibra metálica. O processo iniciou-se com a exploração de diversas abordagens para a mistura dos materiais, seguido pelo desenvolvimento de protótipos específicos para a mistura da fibra metálica.

Foram enfrentados desafios significativos em cada uma das abordagens propostas:

Na primeira abordagem, considerou-se a injeção da fibra utilizando um pistão pneumático, inspirado num sistema de revólver. No entanto, a complexidade na escolha do equipamento, que necessitava de prevenir o refluxo do betão e garantir a quantidade correta de fibra num tempo determinado, inviabilizou essa abordagem.

A segunda tentativa envolveu o uso de um movimento alternado de pistões controlados por meio de um motor e um sistema de cames. Apesar dos esforços e da complexidade mecânica, o protótipo chegou a uma fase de pré-construção e resultou numa nova geração de conceito de protótipo autopropulsado.

As tentativas finais resultaram no desenvolvimento de dois protótipos da gama dos autopropulsados. Apesar do potencial teórico desses protótipos, na prática, enfrentaram dificuldades durante os testes devido à complexidade geométrica do protótipo e ao seu sistema de acionamento. Concluiu-se que é necessário realizar uma revisão detalhada no sistema de guia das palhetas e na parte de deslizamento interno da estrutura do protótipo.

Na área da separação das fibras, foram feitos esforços consideráveis para melhorar o processo devido ao aumento do encravamento das fibras. Concluiu-se que a presença de dois tapetes rotativos não é essencial para o processo. A eficiência operacional do protótipo está intrinsecamente ligada à qualidade do mecanismo. No entanto, no protótipo laboratorial, não foi possível obter uma estabilidade completa, mas espera-se superar essa limitação em um cenário industrial.

Em seguida, ao considerar a automatização do equipamento, surgiu um novo desafio que é da correta dosagem de cada lote de fibras. Essa questão destacou a importância de desenvolver um algoritmo de previsão capaz de lidar com as variações no sistema que podem afetar a sua estabilidade e precisão.

Não obstante os resultados experimentais em laboratório terem sido promissores, o estado atual do desenvolvimento do protótipo industrial não permitiu, em tempo útil, integrar nele este algoritmo. Sugere-se que essa integração seja considerada para futuros trabalhos, visando garantir uma operação mais eficiente e precisa do sistema de separação.

Além disso, há oportunidade para melhorias neste algoritmo. Uma sugestão seria integrar um sistema único em que o controle do fluxo dependa do sistema de medição, permitindo um controle automático do fluxo da fibra que atenda aos requisitos necessários. Isso pode resultar em uma operação mais contínua e precisa do processo de separação das fibras.

7. REFERÊNCIAS

- [1] R. K. S. A. Kamath, 'Robotics in construction: opportunities and challenges International Journal of Recent Technology and Engineering, 8 (2S11) (2019), pp. 2227-2230.', *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2S11, pp. 2227–2230, Nov. 2019, doi: 10.35940/ijrte.B1242.0982S1119.
- [2] M. jeong Kim, H.-L. Chi, X. Wang, and L. Ding, 'Automation and robotics in construction and civil engineering J. Intell. Robot. Syst., 79 (3–4) (2015), pp. 347-350.', *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 79, Aug. 2015, doi: 10.1007/s10846-015-0252-9.
- [3] Y. Wang *et al.*, 'Intelligent spraying robot for building walls with mobility and perception', *Autom. Constr.*, vol. 139, p. 104270, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104270.
- [4] L. M. Massone and F. Nazar, 'Analytical and experimental evaluation of the use of fibers as partial reinforcement in shotcrete for tunnels in Chile', *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 77, pp. 13–25, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.tust.2018.03.027.
- [5] G. Duarte, M. Bravo, J. de Brito, and J. Nobre, 'Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete', *Constr. Build. Mater.*, vol. 210, pp. 696–708, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.156.
- [6] J. Schlumpf and J. Höfler, 'Shotcrete in Tunnel Construction'.
- [7] J. Gamarra, 'POTENTIAL APPLICATION OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH WET-MIX SHOTCRETE SYSTEM IN TUNNELING'.
- [8] A. E. Naaman, 'Fiber reinforced concrete: five decades of progress', in *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Composite Materials*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018, pp. 35–56. doi: 10.21452/bccm4.2018.02.01.
- [9] P. L. Walton and A. J. Majumdar, 'Cement-based composites with mixtures of different types of fibres', *Composites*, vol. 6, no. 5, pp. 209–216, Sep. 1975, doi: 10.1016/0010-4361(75)90416-4.
- [10] W. Yao, J. Li, and K. Wu, 'Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction', *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 1, pp. 27–30, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00913-4.
- [11] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. CRC Press, 2006.
- [12] V. S. Vairagade and S. A. Dhale, 'Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review', *Hybrid Adv.*, vol. 3, p. 100035, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.hybadv.2023.100035.
- [13] N. Bantia and S. Mohamad Soleimani, 'Flexural Response of Hybrid Fiber-Reinforced Cementitious Composites - ProQuest'. Accessed: Sep. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/3b3a3f9365367dabcb4f5407e1512c3c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=37076>
- [14] X. Shu, R. K. Graham, B. Huang, and E. G. Burdette, 'Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar', *Mater. Des. 1980-2015*, vol. 65, pp. 1222–1228, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.015.

- [15] ‘Brenner Base Rail Tunnel’, Railway Technology. Accessed: Aug. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/projects/brennerbase-tunnel/>
- [16] I. Galan, A. Baldermann, W. Kusterle, M. Dietzel, and F. Mittermayr, ‘Durability of shotcrete for underground support– Review and update’, *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 465–493, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151.
- [17] ‘Bridges & Overlays Using SFRC’, Home. Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://stewols.com/applications/bridges-overlays/>
- [18] ‘Roads & Pavements - Heavy Duty Tracks’, Home. Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://stewols.com/applications/roads-pavements-heavy-duty-tracks/>
- [19] ‘Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete’. Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/a0820-01.html>
- [20] ‘Fiber-reinforced concrete - Advantages, types and applications’. Accessed: Aug. 28, 2023. [Online]. Available: <https://constrofacilitator.com/fiber-reinforced-concrete-advantages-types-and-applications/>
- [21] ‘Fibras Metálicas | BricoButikk’. Accessed: Aug. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.bricobutikk.pt/products/fibras-metalicas>
- [22] M. Kazemian and B. Shafei, ‘Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concretes made with low dosages of synthetic fibers’, *Struct. Concr.*, vol. 24, no. 1, pp. 1226–1243, 2023, doi: 10.1002/suco.202100915.
- [23] ‘Oustampasidis - Fiber distribution in ready-mix concrete.pdf’. Accessed: May 18, 2023. [Online]. Available: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1415002/FULLTEXT01.pdf>
- [24] ‘SikaFiber® Reinforced Concrete Handbook.pdf’. Accessed: Sep. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.sika.com/content/dam/dms/corporate/a/glo-fiber-reinforced-concrete-handbook.pdf>
- [25] ‘28-05-2020_71546_2---meka_fds_fiber_feeding_dosing_en_v20-1.pdf’. Accessed: Sep. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.mekaglobal.com/upload/files/28-05-2020_71546_2---meka_fds_fiber_feeding_dosing_en_v20-1.pdf
- [26] J. p. j. g. Ferreira and F. a. b. Branco, ‘The Use of Glass Fiber–Reinforced Concrete as a Structural Material’, *Exp. Tech.*, vol. 31, no. 3, pp. 64–73, 2007, doi: 10.1111/j.1747-1567.2007.00153.x.
- [27] ‘FCOL: Bending Beam Load Cell - LAUMAS’, LAUMAS Elettronica S.r.l. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.laumas.com/pt/produto/fcol-bending-beam-load-cells/>
- [28] ‘TLB4: DIGITAL-ANALOG WEIGHT TRANSMITTER (RS485) - LAUMAS’, LAUMAS Elettronica S.r.l. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.laumas.com/en/product/tlb4-digital-analog-weight-transmitter-rs485/>
- [29] ‘USB-6001’. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-pt/shop/model/usb-6001.html>
- [30] ‘Product Detail’, Northamerica. Accessed: Sep. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.putzmeister.com/web/northamerica/product-detail/-/product/202/spm-500-wetkret>

- [31] M. Sakoparnig *et al.*, ‘On the significance of accelerator enriched layers in wet-mix shotcrete’, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 131, p. 104764, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.tust.2022.104764.
- [32] ‘Válvula equilibrio estática Honeywell DN100 flangeada | Sanitop > Store’. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sanitop.pt/v%C3%A1lvula-equil%C3%ADbrio-est%C3%A1tica-honeywell-dn100-flangeada>
- [33] ‘Válvula de bola | Cinpro’. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.cinpro.com.mx/project/valvula-de-bola/>
- [34] ‘LC-4101-K003 | Single Point Load Cell - LC-4101 Series | A&D | MISUMI’. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/223011627587/?HissuCode=LC-4101-K003>
- [35] ‘DC motors’, Doga Parts. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.dogaparts.es/en/dc-motors/>
- [36] ‘Brushed DC Motors by Pittman Motors’. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.haydonkerkpitman.com/products/motors/brushed-dc-motors>
- [37] ‘Nema 14 linear stepper motor with 180mm length Tr5*2’, jugetek. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.jugetek.com/product-page/nema-14-linear-stepper-motor-with-180mm-length-tr5-2>
- [38] ‘TLB4: DIGITAL-ANALOG WEIGHT TRANSMITTER (RS485) - LAUMAS’, LAUMAS Elettronica S.r.l. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.laumas.com/en/product/tlb4-digital-analog-weight-transmitter-rs485/>
- [39] ‘ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation’. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>
- [40] ‘Micro | Arduino Documentation’. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/micro>

8. ANEXO A - Código de modelação do Protótipo nº5

```
% Variáveis

ri=200; % raio interior
acdepth=20; % profundidade da câmara de admissão
ra=ri+acdepth; % raio da câmara de admissão
flaplength=150; % tamanho da alheta
camradius=10; % raio do rolo de came

% Transição do colapso para a câmara de admissão
at_init_angle=20;
at_end_angle=40;

% Transição da câmara de admissão para a zona de alimentação
ft_init_angle=140;
ft_end_angle=160;

% Transição da alimentação para a zona de clalapse
ct_init_angle=320;
ct_end_angle=360;

% Largura da caixa (para cálculo de volume)
width=200;

% Tamanho da boca de entrada
in_depth=60;

% Parâmetros calculados
% raio da zona de alimentação, calculado a partir da profundidade de
entrada de 60 mm de 10 graus na entrada
% o raio externo na seção de bombeamento torna-se:

re=300;
% Valores de equação inicial, final e de linha (y = ax + b) para as
transições

% Colapso para admissão
at_1=[ri*cosd(at_init_angle),ri*sind(at_init_angle)];
at_2=[ra*cosd(at_end_angle),ra*sind(at_end_angle)];
aat=(at_1(2)-at_2(2))/(at_1(1)-at_2(1));
bat=(at_1(2)*at_2(1)-at_2(2)*at_1(1))/(at_2(1)-at_1(1));

% Admissão para alimentação
ft_1=[ra*cosd(ft_init_angle),ra*sind(ft_init_angle)];
ft_2=[re*cosd(ft_end_angle),re*sind(ft_end_angle)];
aft=(ft_1(2)-ft_2(2))/(ft_1(1)-ft_2(1));
bft=(ft_1(2)*ft_2(1)-ft_2(2)*ft_1(1))/(ft_2(1)-ft_1(1));

% Colapso para admissão
ct_1=[re*cosd(ct_init_angle),re*sind(ct_init_angle)];
ct_2=[ri*cosd(ct_end_angle),ri*sind(ct_end_angle)];
act=(ct_1(2)-ct_2(2))/(ct_1(1)-ct_2(1));
bct=(ct_1(2)*ct_2(1)-ct_2(2)*ct_1(1))/(ct_2(1)-ct_1(1));
```

```

% Geometria da superfície externa

angulo_base=[0:360];
l=zeros(size(angulo_base));
for i=1:length(angulo_base);
if angulo_base(i) < at_init_angle
    l(i)=ri;
elseif angulo_base(i) < at_end_angle
    l(i)=bat/(sind(angulo_base(i))-aat*cosd(angulo_base(i)));
elseif angulo_base(i) < ft_init_angle
    l(i)=ra;
elseif angulo_base(i) < ft_end_angle
    l(i)=bft/(sind(angulo_base(i))-aft*cosd(angulo_base(i)));
elseif angulo_base(i) < ct_init_angle
    l(i)=re;
elseif angulo_base(i) < ct_end_angle
    l(i)=bct/(sind(angulo_base(i))-act*cosd(angulo_base(i)));
else
    l(i)=ri;
end
end

% Superfície externa
clf
axis square;
plot(l.*cosd(angulo_base),l.*sind(angulo_base),"b")
hold

% Plot círculo interno
plot(ri*cosd(angulo_base),ri*sind(angulo_base),"r");

% Alhetas
for i=1:length(angulo_base);
plot([l(i)*cosd(angulo_base(i)) (l(i)-
flaplength)*cosd(angulo_base(i))],[l(i)*sind(angulo_base(i)) (l(i)-
flaplength)*sind(angulo_base(i))])
end

pause

% Caminho central do rollo de came
plot((l-flaplength).*cosd(angulo_base),(l-
flaplength).*sind(angulo_base),"k")

% Caminho do rollo de came
for i=1:length(angulo_base);
posx=(l(i)-flaplength)*cosd(angulo_base(i));
posy=(l(i)-flaplength)*sind(angulo_base(i));
rectangle('Position',[posx-camradius posy-camradius 2*camradius
2*camradius],'Curvature',[1 1],'EdgeColor','Yellow');
end

hold

```

```

% Cálculo do volume por quarto de volta com base num varrimento de 90° em
re
% em litros
vol=pi*(re^2-ri^2)/4*width/10^6

%% Animação:

pause
clf
% Superfície externa
clf
axis square;
plot(l.*cosd(angulo_base),l.*sind(angulo_base),"b")
hold

% Traçar círculo interno
plot(ri*cosd(angulo_base),ri*sind(angulo_base),"r");
% Alhetas

% Caminho central do rollo de came
plot((l-flaplength).*cosd(angulo_base),(l-
flaplength).*sind(angulo_base),"k")

for i=1:length(angulo_base)-2;
    % Calcular ângulos para as 4 abas

angles=[rem(angulo_base(i)+1,360),rem(angulo_base(i)+90,360)+1,rem(angulo_b
ase(i)+180,360)+1,rem(angulo_base(i)+270,360)+1]
    % Traçar as alhetas na posição
    for j=1:4
        plot([l(angulo_base(i)+1)*cosd(angles(j)) (l(angulo_base(i)+1)-
flaplength)*cosd(angles(j))],[l(angulo_base(i)+1)*sind(angles(j)) (l(angulo_base(i)+1)-
flaplength)*sind(angles(j))],'k')
    end
    pause(.1);
    % Apagar
    for j=1:4
        plot([l(angulo_base(i)+1)*cosd(angles(j)) (l(angulo_base(i)+1)-
flaplength)*cosd(angles(j))],[l(angulo_base(i)+1)*sind(angles(j)) (l(angulo_base(i)+1)-
flaplength)*sind(angles(j))],'w')
    end
end
end

```


9. ANEXO B - Lista dos equipamentos utilizados no protótipo de separação

Equipamento:	Descrição:	Fonte:	Quantidade:
Motor DC	Motor DC da marca DOGA	[35]	1
Motor DC	Motor DC da marca PITTMAN	[36]	1
Motor passo	Motor passo da marca JUGETEK	[37]	1
Célula de carga	Célula de carga da marca MISUMI	[34]	1
TLB4	Transmissor de peso digital-análogo	[38]	1
ESP32WROOM	Placa desenvolvimento	[39]	1
Arduino_micro	Placa microcontrolador	[40]	1

10. ANEXO C - Código do algoritmo de previsão

```
%% Parte 1

mat=teste1Vel2Abertura0;
mat.tempo;
findpeaks(mat.peso);
hold off

filtro=50; % o filtro para eliminar os outliers
sig=medfilt1(mat.peso(200:8000),filtro); % range
findpeaks(sig);
posind=findpeaks(sig);
hold on

[pval,plock]=findpeaks(sig); % picos positivos peso x tempo
[nval,nlock]=findpeaks(-sig); % picos negativos peso x tempo

plot(plock,pval,"r*")
plot(nlock,-nval,"g*")

index=min(length(plock),length(nlock));
rate=(pval(2:index)-nval(1:index-1))./(((plock(2:index)-nlock(1:index-1)))*10);

mean(rate(2:end))
std(rate(2:end))

av=mean(rate(2:end));
err=rate(2:end)-av;
mean(sqrt(err.^2))

disp(size(plock,1)+size(nlock,1))
allDots = zeros(size(plock,1)+size(nlock,1),2);
a=1; b=1;
for i=1:(size(plock,1)+size(nlock,1))
    if mod(i,2)==1 % odd
        allDots(i,1) = plock(a,1); % x
        allDots(i,2) = pval(a,1); % y
        a=a+1;
    else
        allDots(i,1) = nlock(b,1); % x
        allDots(i,2) = -nval(b,1); % y
        b=b+1;
    end
end
end

a = 2;b = 3;

for i=1:(size(allDots,1)/2)-1

    line(allDots(a:b,1),allDots(a:b,2),'Color','r');

    a=a+2;b=b+2;

end

% Estatística:

dim=size(nval,1)-1;
```

```

mediaAmostra=zeros(dim,1);
tempoCarga=zeros(dim,1);
for i=1:size(nval,1)-1
    mediaAmostra(i,1) = (pval(i+1,1)+nval(i,1))/2; % média entre picos do
tempo: positivos x negativos
    tempoCarga(i,1) = (plock(i+1,1)-nlock(i,1))/100; % tempo de enchimento
do doseador
    tempoCiclo(i,1) = (nlock(i+1,1)-nlock(i,1))/100; % tempo ciclo
    tempoDescarga(i,1)=(tempoCiclo(i,1))-(tempoCarga(i,1)); % tempo entre
dosagens

end
desvioPadrao = std(mediaAmostra(:,1));
mediaTotalAmostras = mean(mediaAmostra(:,1));
mediaTotalTempoCarga = mean(tempoCarga(:,1));
mediaTempoCiclo = mean(tempoCiclo(:,1));
mediaTotalTempoDescarga = mean(tempoDescarga(:,1));

xlabel('Tempo, ms')
ylabel('Peso, gram')
title('Gráfico modelo de previsão')

%% Parte 2

% Y = mx + b -> equação principal do modelo previsão

% pontos -> contém x,y de todos os pontos
% angulo -> contem inclinação (m) de todas as retas
% b_ -> contém 'b' de todas as retas
% pos26 = (size(pval,1)-1)*2;
% pos14 = (size(pval,1)-1);
% peso real = matriz de 10 estágios (em gramm)

pesoReal = [97 108 96 96 99 104 90 110 104 102];
pos14 = length(pesoReal);
pos26 = 2*pos14;
pontos = zeros(2,pos26); % matriz dos zeros

aN = zeros(2,pos14);
% aN (1 -> 1,3,5,7,9
% aN (2 -> 2,4,6,8,10
k1 = 1;
k2 = 1;
for k = 1:pos26 %1:26 % Criar índices
    if ~mod(k,2)==0 % impar
        aN(1,k1) = k; % impar
        k1 = k1+1;
    else
        aN(2,k2) = k; % par
        k2 = k2+1;
    end
end
end

for k=1:pos14 %1:13
    pontos(2,aN(1,k) ) =abs (nval(k)); % y1
    pontos(1,aN(1,k) ) =abs (nlock(k)); % x1
    pontos(2,aN(2,k) ) =abs (pesoReal(k)); % y2 -> valores reais
    pontos(1,aN(2,k) ) =abs (plock(k+1)); % x2, "k+1" ignora primeiro valor

```

```

end

angulo = zeros(pos26,1);
b_ = zeros(pos26,1); % quando x = 0 / declive (b)
for k = 1:pos26 % 1:26
if ~mod(k,2)==0 % impar
    angulo(k,1) = (pontos(2,k+1)-pontos(2,k))./(pontos(1,k+1)-
pontos(1,k)); % calculo do angulo (m)
    b_(k,1) = pontos(2,k)-angulo(k,1)*pontos(1,k); % calculo do declive
(b)
else
    angulo(k,1) = angulo(k-1,1);
end
end

pesoObjetivo = 80; % y3 (peso estipulado conforme o objetivo)
b_(aN(2,:),1) = b_(aN(1,:),1); % correção propria variável (eliminar zeros)

% y2 = pontos(2,aN(2,k))

pontoPrevisto=zeros(pos14,2);
for k=1:pos14 %1:14

    pontoPrevisto(k,2) = pesoObjetivo; % ----->>>>      Y
    pontoPrevisto(k,1) = ((pesoObjetivo - b_(aN(2,k)))./angulo(aN(2,k),1));
% eq. principal % -----> X
    % x1= (y1-b1) / m1 - Calculo de tempo previsto
end

% x1 = ponto inicial
% x2 = pontos(1,aN(2,k) )
% x3 = tempo previsto

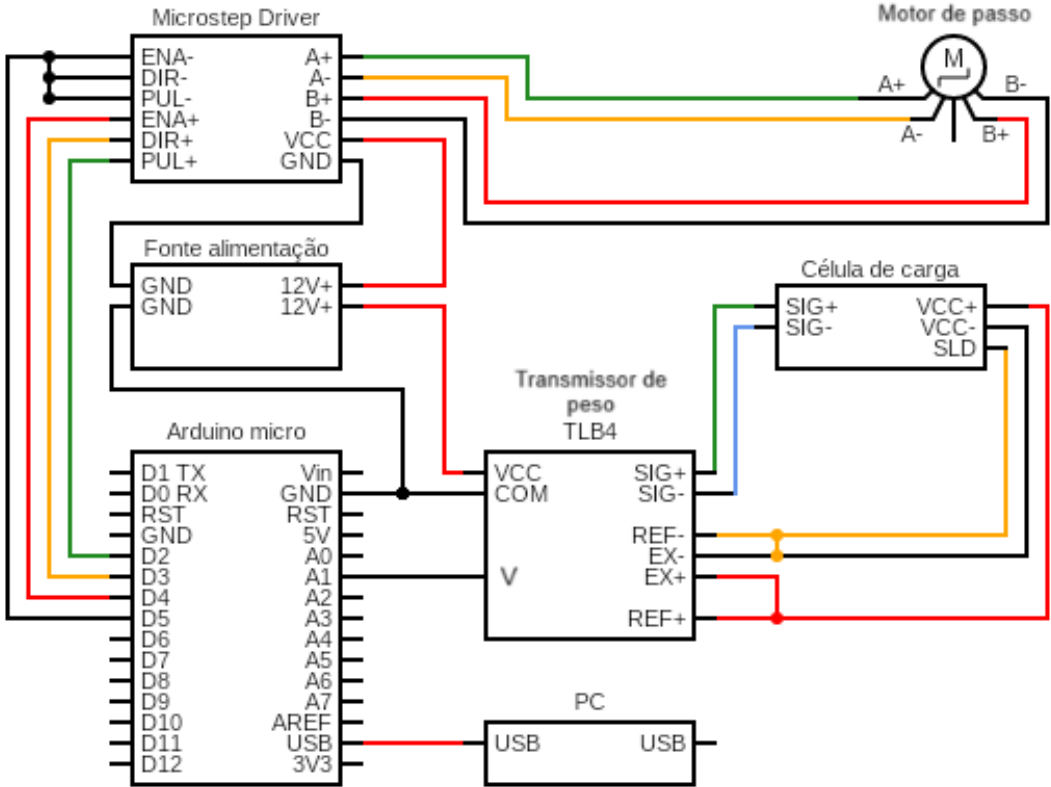
% tempoSubida = x1 - x3
% y = mx + b; onde b = 0
tempoSubida = (pontoPrevisto(:,1) - pontos(1,aN(1,:)))/100; % 100 é um
valor de correção para obter o tempo em segundos
mediaTempoSubida = mean(tempoSubida);
media_angulo = mean(angulo) * 100; % 100 é valor de correção

Novo_Peso_Objetivo = (media_angulo * (mediaTempoSubida)) + 0;

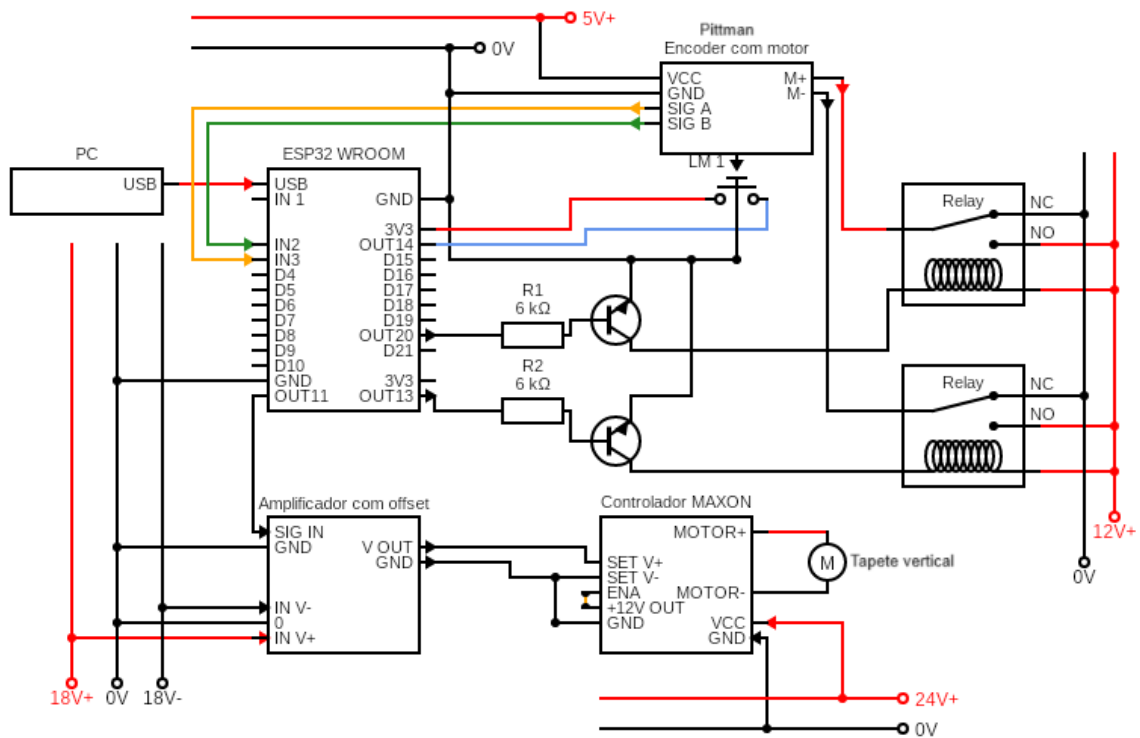
plot(pontos(1,:),pontos(2,:));hold
on;plot(pontoPrevisto(:,1),pontoPrevisto(:,2),'o')
legend('Resposta da célula de carga','Peso medido','Picos positivos','Picos
negativos')

```


11. ANEXO D - Esquema do circuito elétrico da parte de pesagem



12. ANEXO E - Esquema do circuito de controlo de fluxo de fibra



Legenda:

M Tapete vertical	Motor – Regulador de velocidade
Pittman	Motor Pittman – Regulador de distância entre tapetes
R1 e R2	Resistências de 6 KΩ
LM 1	Sensor <i>limit-switch</i> , para motor Pittman