



Dissertação

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

***Conceção e Implementação de um Sistema de
Deposição Multifuncional para Fabrico Aditivo em
Minerais***

Mafalda Rosa Ganchas

Leiria, *setembro* de 2025



Dissertação

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

***Conceção e Implementação de um Sistema de
Deposição Multifuncional para Fabrico Aditivo em
Minerais***

Mafalda Rosa Ganchas

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Flávio Craveiro, e coorientação do Doutor Agostinho da Silva, Professor, ambos da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *setembro* de 2025

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de diferentes formas, foram parte essencial desta caminhada.

Aos meus orientadores, sendo muito mais do que guias académicos. Pela paciência, pela confiança e por todo o conhecimento partilhado, que não apenas enriqueceram este trabalho, mas também transformaram-me enquanto pessoa e profissional.

Aos meus familiares e amigos, que no momento de incerteza ajudaram-me e ainda celebraram cada pequena vitória. Todo e qualquer apoio que foi recebido na forma de palavra, gesto de carinho e em forma de confiança foram essenciais para eu seguir em frente nos dias mais complicados.

À minha avó Leocádia Santos, cuja partida recente deixou um silêncio profundo, mas também a lembrança viva da força, do afeto e da sabedoria que sempre partilhou. Este trabalho é, em parte, um reflexo do que ensinou-me sobre perseverança e amor incondicional.

À minha fiel companheira, a minha querida gata Mini. Esteve comigo muitas jornadas e em grande parte nesta, silenciosa, mas presente em cada madrugada de estudo, em cada pausa para respirar, em cada instante de solidão transformado em companhia. A sua partida, no decorrer deste processo, deixou um vazio imenso, mas também a lembrança doce de que o amor e a presença verdadeira não conhecem limites de tempo.

Esta conquista é também delas.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado representa um percurso exigente, que só foi possível graças ao contributo e apoio de várias pessoas e instituições, a quem quero expressar a minha gratidão.

Aos meus orientadores, Doutor Agostinho da Silva e Doutor Flávio Craveiro, pela orientação científica, pela paciência e pela confiança depositada ao longo deste trabalho. Ao Doutor Joel Vasco, pelo apoio e pela partilha de conhecimento.

À minha família, pelo amor e suporte incondicional. Em especial, à minha mãe, Isilda Rosa, pelo carinho e persistência; ao meu pai, José Ganchas, pelo exemplo de dedicação e trabalho; e à minha irmã, Nádía Ganchas, pelo companheirismo.

Aos meus amigos, que tornaram esta jornada mais leve e significativa, em especial João Coutinho, Cristiana Cavaleiro, Catarina Brites, Simão Farinha e Vítor Lopes, pelo encorajamento e amizade.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, pelo ambiente académico que possibilitou a realização desta investigação.

À CEI – Companhia de Equipamentos Industriais, Lda., pela colaboração e disponibilidade de toda a equipa, em particular dos Engenheiros Álvaro Gouveia e Nuno Cardoso, cujo contributo foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os que, de forma direta ou indireta, fizeram parte desta caminhada, deixo o meu agradecimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a conceção e desenvolvimento de uma câmara de mistura e de um tubo focalizador destinados à deposição de materiais cimentícios em plataformas de fabrico digital, com enfoque na sustentabilidade dos recursos e na integração em sistemas híbridos de fabrico aditivo e subtrativo. O fabrico aditivo (FA), ou impressão 3D, tem vindo a transformar o setor da construção e outras indústrias, permitindo a produção de componentes complexos e personalizados com menor desperdício de material. Contudo, a sua aplicação a materiais minerais continua a levantar desafios técnicos, sobretudo ao nível da compatibilidade reológica, da eficiência da mistura em linha e da robustez dos sistemas de extrusão.

A investigação foi conduzida segundo a metodologia *Design Science Research* (DSR), através de um processo iterativo que abrangeu a identificação da problemática, a definição de objetivos específicos, a conceção da solução, a demonstração computacional e a validação experimental. O artefacto desenvolvido — constituído por uma câmara de mistura passiva e um tubo focalizador modular — foi projetado para garantir homogeneidade dos materiais, flexibilidade de integração com equipamentos híbridos e otimização da deposição em processos de fabrico digital.

A validação envolveu simulações de Computational Fluid Dynamics (CFD), que confirmaram a eficácia da geometria em gerar padrões de mistura adequados a pastas cimentícias com comportamento não newtoniano. Posteriormente, a prototipagem e os ensaios laboratoriais permitiram avaliar a compatibilidade do injetor com sistemas híbridos (CNC, Controlo Numérico Computorizado, + M-Tec Duo-Mix 3DCP). Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da solução, evidenciando ganhos de desempenho na mistura, maior adaptabilidade funcional e melhorias na sustentabilidade do processo.

Conclui-se que o artefacto desenvolvido constitui um contributo inovador para o fabrico digital com materiais minerais, colmatando lacunas identificadas na literatura e abrindo novas perspetivas de aplicação industrial. Adicionalmente, o estudo reforça o valor da DSR como metodologia de investigação orientada para a criação de conhecimento aplicável, com contributos de natureza teórica, prática e metodológica.

Palavras-chave: Fabrico aditivo; Recursos Minerais; Materiais cimentícios; Reologia; Fabrico híbrido

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

This dissertation presents the design and development of a mixing chamber and a focusing nozzle for depositing cementitious materials in digital manufacturing platforms, with emphasis on resource sustainability and integration into hybrid additive–subtractive systems. Additive manufacturing (AM), or 3D printing, has been transforming construction and other industries by enabling the production of complex, customized components with reduced material waste. However, applying this technology to mineral-based materials still poses challenges, particularly regarding rheological compatibility, in-line mixing efficiency, and extrusion robustness.

Following the Design Science Research (DSR) methodology, the study adopted an iterative process comprising problem identification, objective definition, solution design, computational demonstration, and experimental validation. The proposed artefact—a passive mixing chamber combined with a modular focusing nozzle—was conceived to ensure material homogeneity, enable flexible integration with hybrid equipment, and optimize deposition in digital manufacturing processes.

Validation involved Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, which confirmed the effectiveness of the geometry in generating suitable mixing patterns for non-Newtonian cementitious pastes. Prototyping and laboratory testing further demonstrated the injector’s compatibility with hybrid systems (CNC + M-Tec Duo-Mix 3DCP). Results highlighted improvements in mixing performance, functional adaptability, and process sustainability.

Overall, the developed artefact constitutes an innovative contribution to advancing digital manufacturing with mineral-based materials, addressing key gaps in the literature and creating new opportunities for industrial applications. In addition, the study reinforces the value of DSR as a methodology for producing applicable knowledge, offering theoretical, practical, and methodological contributions to the field of sustainable digital manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing; Mineral resources; Cementitious materials; Rheology; Hybrid manufacturing

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE FIGURAS	XVI
LISTA DE EQUAÇÕES	XVII
ABREVIACÕES E ACRÓNIMOS	XX
1. INTRODUÇÃO	2
1.1. Motivação e Pertinência do Estudo	3
1.2. Estrutura da Dissertação	4
2. PROBLEMÁTICA	6
2.1. Estado da Arte	6
2.2. Desafios do Fabrico Aditivo Aplicado aos Recursos Minerais	7
2.3. Formulação do Problema e Objetivo Central da Investigação	9
3. METODOLOGIA	11
3.1. Abordagem Metodológica: <i>Design Science Research</i>	12
3.2. Etapas Metodológicas da <i>Design Science Research</i>	13
3.2.1. Diagnóstico e Definição do Problema	13
3.2.2. Definição dos Objetivos	14
3.2.3. Desenvolvimento do Artefacto	14
3.2.4. Demonstração	14
3.2.5. Avaliação e Validação	15
3.3. Justificação da Metodologia	15
	xi

4.	REVISÃO DE LITERATURA	17
4.1.	Fabrico Aditivo com Recursos Minerais: Potencial e Desafios	17
4.2.	Reologia de Materiais Cimentícios Extrudíveis	19
4.3.	Sistemas Extrusores e Mistura em Linha: Estado Atual e Limitações	20
4.4.	Integração de Extrusores em Plataformas de Fabrico Híbrido	21
4.5.	Síntese Crítica da Literatura e Lacunas Tecnológicas	21
5.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
5.1.	Sustentabilidade e Eficiência na Utilização de Recursos Minerais	25
5.2.	Flexibilidade Reológica e Compatibilidade Multimaterial	26
5.3.	Integração em Plataformas de Fabrico Híbrido	26
6.	FUNDAMENTAÇÃO E PROJETO TÉCNICO DA SOLUÇÃO	27
6.1.	Fundamentação Científica e Tecnológica	27
6.1.1.	Reologia de Materiais Cimentícios com Recursos Minerais	28
6.1.2.	Mistura Multimaterial	29
6.1.3.	Inserção de Aditivos Localizados	29
6.1.4.	Mistura Estática	30
6.1.5.	Geometria Convergente da Câmara de Extrusão	30
6.1.6.	Modularidade e Compatibilidade com Sistemas Digitais Avançados	31
6.1.7.	Síntese da Fundamentação Científica	31
6.2.	Projeto e Configuração Técnica do Artefacto	31
6.2.1.	Estrutura Funcional Tripla: Canais A, B e C	33
6.2.2.	Unidade de Mistura Estática Helicoidal	34
6.2.3.	Geometria Convergente com Saída Calibrada	37
6.2.4.	Características Técnicas Relevantes	39
6.2.5.	Compatibilidade com Sistemas Avançados	40
7.	DEMONSTRAÇÃO DA SOLUÇÃO TÉCNICA	43
7.1.	Objetivos da Demonstração Virtual por Simulação CFD	44
7.2.	Preparação da Simulação Computacional	44
7.2.1.	Definição da Geometria e Domínio de Simulação	45
7.2.2.	Caracterização dos Fluidos e Modelo Reológico	45

7.2.3.	Condições de Contorno e Cenários de Operação	45
7.2.4.	Geração da Malha Computacional	45
7.3.	Geometria e Domínio da Simulação	46
7.3.1.	Definição do Fluido e Modelo Reológico	47
7.4.	Condições de Fronteira, e Malha Computacional	48
7.4.1.	Configuração das Condições de Fronteira e Cenários	48
7.4.2.	Malha Computacional	49
7.4.3.	Valores esperados	50
7.5.	Demonstração e Análise dos Resultados Perfil da Velocidade	54
7.5.1.	Velocidade de Escoamento dos Materiais	55
7.5.2.	Avaliação da Distribuição da Densidade	58
7.5.3.	Comparação Teórica e Simulada da Mistura A+B	64
7.6.	Síntese da Demonstração de Exequibilidade	66
8.	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E OPERACIONAL DA SOLUÇÃO	68
8.1.	Plataforma Híbrida de Validação	69
8.1.1.	Módulo aditivo	69
8.1.2.	Módulo subtrativo	70
8.2.	Requisitos e Compatibilidade Estrutural	71
8.2.1.	Integração do Artefacto	71
8.2.2.	Compatibilidade com o Sistema de Alimentação	72
8.2.3.	Flexibilidade na Mistura de Materiais	72
8.2.4.	Robustez Estrutural e Operacional	73
8.3.	Compatibilidade Operacional em Plataforma Híbrida de Fabrico Digital	73
8.3.1.	Formulação e Preparação da Pasta Cimentícia	73
8.3.2.	Ciclo Híbrido de Operação	76
8.3.3.	Compatibilidade Operacional e Resultados Experimentais de Extrusão	77
8.4.	Configurabilidade e Modularidade do Artefacto	78
8.4.1.	Configuração Estrutural e Operacional	78
8.4.2.	Escalabilidade e Evolução Tecnológica	79
8.5.	Síntese do Processo e Resultados de Avaliação do Artefacto	79
9.	CONCLUSÃO	81
	BIBLIOGRAFIA	84

ANEXOS	95
Anexo A	95
Anexo A.1: Mistura – A90% B10%	95
Anexo A.2: Mistura – A80% B20%	97
Anexo A.3: Mistura – A70% B30%	99
Anexo A.4: Mistura – A60% B40%	101
Anexo A.5: Mistura – A50% B50%	103
Anexo A.6: Mistura – A40% B60%	105
Anexo A.7: Mistura – A30% B70%	107
Anexo A.8: Mistura – A20% B80%	109
Anexo A.9: Mistura – A10% B90%	111
Anexo B Ficha técnica Secil Maestro CEM II/B-L 32.5N	113
Anexo C Ficha técnica Cin Quartz G300	115

Lista de Tabelas

Tabela 1 Lacunas presentes na literatura vs. contributos da presente dissertação	23
Tabela 2 Modos Operacionais da Câmara de Mistura e Tubo Focalizador	33
Tabela 3 Requisitos técnicos do misturador estático helicoidal	36
Tabela 4 Requisitos técnicos da geometria convergente.....	38
Tabela 5 Características técnicas do artefacto e respetiva justificação científica	39
Tabela 6 Cenários de Trabalho	49
Tabela 7 Parâmetros de entrada da simulação	50
Tabela 8 Parâmetros de saída da simulação	50
Tabela 9 Características comuns da mistura ao longo dos testes	53
Tabela 10 Características da mistura em cada teste.....	53
Tabela 11 Resultados da simulação do SolidWorks na função Flow Simulation	65
Tabela 12 Erro absoluto e relativo.....	65
Tabela 13 Pasta A vs. Pasta B	72

Lista de Figuras

Figura 1 Abordagem Esquemática DSR	13
Figura 2 Artefacto - câmara mistura e tubo focalizador	32
Figura 3 Interior do Artefacto.....	34
Figura 4 Misturador Helicoidal Estático	36
Figura 5 Cut View do Artefacto	38
Figura 6 Simulação da velocidade no interior do artefacto.....	56
Figura 7 Simulação da velocidade de saída.....	57
Figura 8 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A90% B10%).	59
Figura 9 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A80% B20%).	59
Figura 10 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A70% B30%).	60
Figura 11 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A60% B40%).	60
Figura 12 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A50% B50%).	61
Figura 13 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A40% B60%).	61
Figura 14 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A30% B70%).	62
Figura 15 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A20% B80%).	62
Figura 16 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A10% B90%).	63
Figura 17 Sistema M-Tec Duo-Mix 3DC	69
Figura 18 Centro Híbrido Colaborativo Cei-Zipor.....	70
Figura 19 Cimento CEM II/B-L 32.5 N da marca Secil Maestro.....	74
Figura 20 Carga mineral de quartzo G300 da CIN.....	74
Figura 21 Extrusão contínua da pasta cimentícia em ensaio.....	75
Figura 22 Cordão extrudido com perfil regular e coeso	75
Figura 23 Representação esquemática do ciclo híbrido de fabrico digital.....	76

Lista de Equações

Eq. 1 – Expressão Matemático Herschel–Bulkley	19
Eq. 2 - Área de saída	51
Eq. 3 - Velocidade de saída	51
Eq. 4 - Caudal entrada A/B	51
Eq. 5 - Densidade média:	51
Eq. 6 - Tensão de escoamento média:.....	52
Eq. 7 - Consistência média:	52
Eq. 8 - Índice de escoamento médio:	52
Eq. 9 - Erro Absoluto	52
Eq. 10 - Erro Relativo	53

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abreviações e Acrónimos

FA	Fabrico Aditivo
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DSR	<i>Design Science Research</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
3DCP	<i>3D Concrete Printing</i>
DFAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
RM	Recursos Minerais
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
FGM	<i>Functionally Graded Material</i>
PVA	<i>Polyvinyl Alcohol</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
SAR	<i>Split-And-Recombine</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
DEM	<i>Discrete Element Method</i>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

A indústria da construção, responsável por uma fração significativa do consumo global de recursos e energia, enfrenta atualmente desafios críticos relacionados com a sustentabilidade ambiental, a eficiência produtiva e a digitalização dos processos (Buswell et al., 2018; Tay et al., 2017a). Entre os materiais mais relevantes para o setor destacam-se os recursos minerais, em particular os ligantes cimentícios, que constituem a base de grande parte das soluções construtivas contemporâneas. A procura por alternativas sustentáveis que promovam a valorização de materiais reciclados e a redução da pegada ecológica torna-se, assim, uma prioridade estratégica (Ma et al., 2018).

Neste enquadramento, o fabrico aditivo, também designado impressão 3D, emerge como uma tecnologia com potencial transformador, ao permitir a deposição incremental de pastas e argamassas cimentícias com maior liberdade geométrica, minimização de desperdícios e customização avançada de componentes construtivos (Ngo et al., 2018). No entanto, a integração de materiais minerais em processos de FA continua a ser limitada por constrangimentos técnicos, entre os quais se destacam o controlo reológico, a necessidade de mistura em linha durante a extrusão e a compatibilidade com sistemas automatizados (Kazemian et al., 2017a).

Em paralelo, a convergência entre processos aditivos e subtrativos tem promovido o fabrico híbrido como paradigma emergente, capaz de conjugar a versatilidade da deposição camada a camada com o rigor dimensional e o acabamento superficial característicos da maquinação CNC (Wangler et al., 2019; Zaid & El Ouni, 2024a).

É neste cenário que se enquadra a presente dissertação, cujo propósito consiste na conceção e desenvolvimento de uma câmara de mistura e de um tubo focalizador concebidos para otimizar o fabrico aditivo de materiais cimentícios sustentáveis. O artefacto proposto integra funcionalidades de mistura em linha, modularidade estrutural e compatibilidade com plataformas híbridas de fabrico digital, contribuindo para uma utilização mais racional dos recursos minerais e para uma maior eficiência no setor da construção (Zuo et al., 2024).

1.1. Motivação e Pertinência do Estudo

Os recursos minerais constituem a base material da indústria da construção, mas a sua exploração intensiva está associada a impactos ambientais significativos e a um elevado consumo energético (Ma et al., 2018). A crescente pressão para reduzir a pegada ecológica do setor impõe a necessidade de soluções inovadoras que favoreçam a eficiência no uso de ligantes cimentícios, a incorporação de materiais reciclados e a valorização de resíduos de origem mineral.

Neste contexto, o fabrico aditivo representa uma tecnologia decisiva, ao possibilitar a deposição controlada de pastas e argamassas cimentícias com redução substancial de desperdícios e maior precisão construtiva (Buswell et al., 2018; Ngo et al., 2018). No entanto, a utilização de materiais minerais em FA permanece limitada por desafios técnicos: (1) necessidade de controlo reológico rigoroso, para assegurar a extrudabilidade e a estabilidade dimensional; (2) importância da mistura ativa em linha, essencial para manter a homogeneidade de composições multicomponentes; e (3) compatibilidade física e funcional com sistemas automatizados de deposição, ainda pouco explorada em materiais cimentícios (Kazemian et al., 2017a; Malaeb et al., 2015).

O objetivo central desta dissertação consiste no desenvolvimento e validação, segundo a metodologia *Design Science Research* (DSR), de um artefacto extrusor multifuncional constituído por uma câmara de mistura e um tubo focalizador, projetados especificamente para o fabrico aditivo de materiais cimentícios sustentáveis (Hevner et al., 2004). A pertinência desta investigação assenta em três dimensões fundamentais:

- Sustentabilidade de recursos: promover uma utilização mais racional de ligantes minerais, viabilizando a incorporação de materiais alternativos e reciclados em consonância com estratégias de economia circular (Ma et al., 2018).
- Flexibilidade e adaptabilidade: permitir a extrusão de formulações mono e multicomponentes, assegurando a resposta a diferentes exigências de aplicação e de desempenho (Malaeb et al., 2015).
- Integração tecnológica: garantir compatibilidade com plataformas híbridas de fabrico digital, nomeadamente sistemas de projeção contínua e maquinaria CNC, explorando a complementaridade entre processos aditivos e subtrativos (Gamil & Cwirzen, 2022; Wangler et al., 2019).

A validação preliminar do artefacto será realizada por simulação computacional, com recurso a modelos de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), assegurando que o desempenho hidráulico e reológico é adequado às condições operacionais previstas (Liravi et al., 2017). Adicionalmente, a solução será preparada para etapas futuras de prototipagem física e ensaios experimentais, abrindo perspectivas para a sua implementação em contextos reais de fabrico digital.

1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação organiza-se de forma sequencial seguindo a metodologia DSR, assegurando a progressão lógica desde o enquadramento e definição do problema até à conceção, demonstração e validação da solução proposta. A estrutura é composta por nove capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: enquadramento geral, motivação, objetivos e organização do documento.

Capítulo 2 – Problemática: diagnóstico crítico dos desafios técnicos, funcionais e de sustentabilidade no fabrico aditivo com materiais cimentícios e formulação do problema de investigação.

Capítulo 3 – Metodologia: fundamentação e etapas da DSR adotada (identificação do problema, objetivos, desenvolvimento, demonstração e avaliação).

Capítulo 4 – Revisão de Literatura: análise crítica do estado da arte em fabrico aditivo com recursos minerais, reologia de pastas cimentícias, mistura em linha e integração em plataformas híbridas.

Capítulo 5 – Objetivos Específicos: tradução das lacunas identificadas em metas operacionais que orientam o desenvolvimento do artefacto.

Capítulo 6 – Fundamentação e Projeto Técnico da Solução: princípios científicos e de engenharia que suportam o *design* e a configuração da câmara de mistura e do tubo focalizador.

Capítulo 7 – Demonstração da Solução Técnica: evidências de viabilidade por simulação CFD e análise do desempenho hidrodinâmico/reológico.

Capítulo 8 – Validação Experimental e Operacional da Solução: ensaios de integração e operação em contexto de fabrico híbrido (CNC + M-Tec Duo-Mix 3DCP), avaliando compatibilidade e robustez.

Capítulo 9 – Conclusão: síntese dos contributos, limitações e propostas de trabalho futuro.

Esta estrutura assegura a coerência metodológica e científica da investigação, permitindo acompanhar de forma sequencial a evolução do trabalho, desde a formulação do problema até à sua validação em contexto experimental.

2. Problemática

A consolidação do fabrico aditivo no setor da construção civil, em especial quando aplicado a materiais cimentícios de base mineral, encontra-se condicionada por um conjunto de desafios técnicos, funcionais e de sustentabilidade. Apesar dos avanços registados na última década, persistem limitações estruturais nos sistemas de extrusão, que comprometem a adoção alargada de tecnologias digitais de fabrico sustentável (Buswell et al., 2018; Kazemian et al., 2017a).

Esta secção tem como finalidade enquadrar de forma sistemática os fatores que justificam a presente investigação. Para tal, apresenta-se numa primeira fase uma revisão do estado da arte, identificando os principais contributos e limitações reportados na literatura científica relativamente ao fabrico aditivo de materiais cimentícios. Em seguida, discute-se de forma crítica os desafios e requisitos associados aos recursos minerais, com destaque para a sustentabilidade da sua utilização, a variabilidade das composições e a integração em plataformas híbridas de fabrico digital. Por fim, formula-se de modo explícito o problema central de investigação e o objetivo principal da dissertação, estabelecendo a ligação direta entre a análise crítica do contexto atual e a solução técnica proposta.

2.1. Estado da Arte

O fabrico aditivo aplicado à construção civil tem registado um crescimento expressivo, com particular destaque para as tecnologias baseadas na extrusão contínua de materiais cimentícios (Buswell et al., 2018; Tay et al., 2017a). A utilização de matérias-primas minerais — como pastas de cimento, composições geopoliméricas ou resíduos minerais moídos — revela elevado potencial no domínio da sustentabilidade ambiental e da economia circular (Kazemian et al., 2017a; Ngo et al., 2018). Todavia, esse potencial encontra-se condicionado por diversos desafios técnicos que permanecem por superar.

Um dos entraves mais relevantes corresponde à complexidade reológica dos materiais cimentícios, frequentemente modelados por leis não-Newtonianas, como o modelo de Herschel–Bulkley (Wangler et al., 2019; Zaid & El Ouni, 2024a). Estas composições caracterizam-se por elevada viscosidade, tensão de escoamento significativa e forte dependência temporal, fatores que dificultam o controlo preciso do fluxo durante a extrusão.

Adicionalmente, verifica-se a escassez de sistemas de mistura ativa em linha, capazes de assegurar a homogeneidade de materiais multicomponentes. Esta limitação torna-se

particularmente crítica em contextos que exigem a combinação simultânea de fases distintas — ligantes e inertes, matrizes e reforços ou aditivos específicos —, comprometendo a estabilidade da deposição (Kaszyńska et al., 2020; Zuo et al., 2024).

Outro obstáculo prende-se com a reduzida modularidade funcional dos extrusores convencionais, maioritariamente concebidos para um único tipo de material. Tal característica restringe a reconfigurabilidade dos sistemas e limita a sua adaptabilidade às exigências variáveis do fabrico digital (Sukontasukkul et al., 2024). Paralelamente, subsiste uma incompatibilidade frequente com plataformas híbridas, como sistemas robotizados ou centros CNC, decorrente da ausência de soluções com integração mecânica e funcional suficientemente flexível (Guamán-Rivera et al., 2022; Singh et al., 2023a).

A estas limitações acresce a escassez de mecanismos de controlo ativo e monitorização integrada nos bicos extrusores. A inexistência de sensores e algoritmos de retroalimentação impede a adaptação dinâmica às variações nas propriedades do material durante a deposição, comprometendo a fiabilidade do processo (Alami et al., 2023; Gamage et al., 2024).

Face a estas lacunas, os avanços recentes em *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) e em fabrico híbrido adaptativo destacam a necessidade de soluções mais versáteis. Entre estas incluem-se: a deposição de materiais com propriedades diferenciadas numa mesma peça (*functional grading*), a incorporação localizada de fibras, pigmentos ou agentes químicos durante a extrusão, e a alternância entre operações aditivas e subtrativas para otimizar a precisão geométrica, o acabamento superficial e a integração de componentes adicionais (Mawas et al., 2025a).

Não obstante a expansão contínua das aplicações do FA com cimento, a maioria dos sistemas extrusores permanece estruturalmente limitada, operando com fluxos unidirecionais, concebidos para materiais únicos e sem capacidade de adaptação em tempo real às exigências do processo. Este cenário evidencia a necessidade urgente de desenvolver extrusores modulares, adaptáveis e integrados com plataformas híbridas, que respondam de forma eficaz às exigências contemporâneas da construção digital sustentável (Boddepalli et al., 2023; Craveiro, Duarte, et al., 2019).

2.2. Desafios do Fabrico Aditivo Aplicado aos Recursos Minerais

O fabrico aditivo com base em recursos minerais (RM) exige o desenvolvimento de soluções tecnológicas capazes de conciliar a variabilidade das composições utilizadas, a

sustentabilidade da sua origem e o cumprimento de requisitos rigorosos de desempenho das peças produzidas. Estas exigências convergem num conjunto de necessidades técnicas prioritárias, diretamente alinhadas com os objetivos desta dissertação.

A primeira necessidade refere-se à otimização da matéria-prima, entendida como a gestão eficiente dos materiais incorporados no processo. Tal implica, por um lado, a capacidade de processar misturas contendo resíduos minerais ou pasta residual proveniente de operações de corte, promovendo a valorização de subprodutos e a circularidade de recursos (Grigolato et al., 2022; Sukontasukkul et al., 2024). Por outro lado, exige a minimização de desperdícios através de mecanismos de extrusão precisa, com controlo rigoroso do caudal, e a capacidade de adaptação às variações naturais das matérias-primas, frequentemente sujeitas a alterações de densidade, absorção de água ou sensibilidade às forças de corte (Boddepalli et al., 2023).

A segunda necessidade corresponde à flexibilidade no processamento multimaterial. Os sistemas de extrusão devem ser compatíveis com uma ampla gama de pastas cimentícias, incluindo aquelas formuladas com cimento Portland, cal hidráulica ou ligantes alternativos. Devem ainda possibilitar o processamento de geopolímeros, compósitos cimentícios e argamassas aditivadas com aceleradores, retardadores, pigmentos ou adições reativas. Nestes casos, a elevada viscosidade e a reduzida fluidez de algumas formulações justificam a integração de misturadores em linha ou canais de extrusão concebidos para assegurar fluxo homogéneo e contínuo (Zaid & El Ouni, 2024b).

A terceira necessidade prende-se com a integração em plataformas híbridas e digitais. A operação conjunta com equipamentos que combinam processos aditivos e subtrativos — como centros CNC equipados com cabeças extrusoras — requer o desenvolvimento de interfaces de montagem universais ou adaptáveis a diferentes configurações comerciais (Zaid & El Ouni, 2024b). Além disso, a geometria e a estrutura interna dos extrusores devem ser concebidas para acomodar variações de caudal e pressão sem comprometer a eficácia da mistura ou a continuidade da deposição, garantindo uma coordenação eficiente com operações de fresagem destinadas a ajustes geométricos e acabamentos de elevada precisão (Pan, Teng, et al., 2022).

Por último, assume particular relevância a reconfigurabilidade funcional dos sistemas extrusores. Estes devem permitir alternância entre extrusão monocomponente e multicomponente, possibilitar a incorporação localizada de reforços — como fibras, cargas

estruturais ou agentes químicos — e permitir a adaptação da configuração da câmara de mistura e do tubo focalizador às exigências específicas de diferentes peças ou projetos, sem necessidade de substituição integral do sistema (Pan, Guo, et al., 2022; Perrot et al., 2016a).

Estas exigências convergem para a definição de uma nova geração de extrusores para fabrico aditivo com RM: dispositivos flexíveis, modulares e integráveis, concebidos para responder às exigências da construção digital sustentável, assegurando desempenho técnico robusto e elevado grau de adaptabilidade operacional (Faleschini et al., 2023).

2.3. Formulação do Problema e Objetivo Central da Investigação

A análise crítica do estado da arte, em articulação com a identificação das necessidades técnicas associadas ao fabrico aditivo com recursos minerais, permite explicitar um problema central que limita de forma significativa o avanço sustentável desta tecnologia. Os extrusores atualmente disponíveis apresentam carências marcantes em três dimensões-chave: flexibilidade operacional, mistura ativa em linha e integração funcional com plataformas híbridas (Chen et al., 2023; Sukontasukkul et al., 2024). Estas lacunas comprometem a qualidade técnica do processo, a sustentabilidade dos recursos utilizados e a capacidade de adaptação a diferentes contextos construtivos baseados em materiais de origem mineral.

Em particular, destaca-se a inexistência de soluções capazes de articular de forma eficaz quatro requisitos fundamentais:

- Mistura ativa multicomponente: assegurar a homogeneização de materiais com diferentes origens e propriedades físico-químicas;
- Compatibilidade com múltiplos equipamentos: garantir integração funcional com impressoras 3D, sistemas de projeção automática e centros CNC híbridos;
- Modularidade e escalabilidade: possibilitar a adaptação estrutural em função do tipo de material ou da aplicação;
- Integração com sistemas inteligentes: preparar a solução para automação, monitorização em tempo real e controlo adaptativo do processo (Rahman et al., 2023; Zaid & El Ouni, 2024b).

Deste diagnóstico resulta a formulação da problemática central: a necessidade de conceber e desenvolver uma câmara de mistura e um tubo focalizador tecnologicamente

avançados, orientados para o fabrico aditivo de recursos minerais sustentáveis, com flexibilidade suficiente para processar diferentes formulações e compatibilidade plena com equipamentos híbridos de fabrico digital (Faleschini et al., 2023).

O objetivo principal da presente investigação consiste, assim, na conceção, desenvolvimento e validação, com base na metodologia DSR, de um artefacto extrusor multifuncional capaz de responder a este conjunto de requisitos. Tal abordagem metodológica, de natureza iterativa e orientada para a aplicação prática, constitui um enquadramento robusto para a criação de artefactos inovadores com valor científico e impacto tecnológico comprovado (Hevner et al., 2004; L. Wang et al., 2024).

3. Metodologia

O enquadramento metodológico de uma investigação orientada para a conceção e desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras exige uma abordagem capaz de articular rigor científico com relevância prática. No presente trabalho, essa abordagem assume particular importância, dado o foco na criação de um artefacto extrusor multifuncional destinado ao fabrico aditivo de materiais cimentícios sustentáveis, compatível com plataformas híbridas de fabrico digital.

Para responder a esta exigência, optou-se pela adoção da metodologia DSR, uma metodologia estruturada, iterativa e amplamente reconhecida na área da engenharia e dos sistemas de informação (Hevner et al., 2004; Peffers et al., 2012). A DSR assenta no princípio de que a construção de artefactos — sejam modelos, métodos, protótipos ou sistemas — deve ser fundamentada em conhecimento científico rigoroso e validada em contextos de aplicação reais, assegurando simultaneamente contributo prático e valor académico (Herwix et al., 2022).

A relevância da DSR no contexto desta dissertação decorre da sua capacidade para lidar com problemas complexos e multidimensionais, como os associados à utilização de recursos minerais em processos de fabrico aditivo. Por meio de ciclos sucessivos de diagnóstico, conceção, prototipagem e avaliação, esta metodologia permite desenvolver soluções que não apenas respondem às necessidades técnicas identificadas — mistura eficiente em linha, flexibilidade composicional e integração com sistemas híbridos —, mas que também contribuem para o avanço do conhecimento científico sobre fabrico digital sustentável (Gregor & Hevner, 2013; Dresch & Lacerda, 2016).

Assim, a estrutura metodológica adotada nesta investigação organiza-se em torno das etapas fundamentais da DSR: identificação do problema, definição dos objetivos, desenvolvimento do artefacto, demonstração em contexto de aplicação e avaliação sistemática do desempenho. Estas etapas orientaram todo o processo de investigação, desde a análise preliminar das limitações dos extrusores convencionais até à validação funcional da solução proposta em cenários representativos de fabrico digital.

3.1. Abordagem Metodológica: *Design Science Research*

A metodologia DSR constitui uma metodologia orientada para a resolução de problemas complexos através do desenvolvimento de artefactos inovadores, validados em contextos de aplicação reais e sustentados por rigor científico (Hevner et al., 2004). A sua natureza iterativa e sistemática torna-a particularmente adequada a investigações que visam aliar contributo prático e relevância académica, como é o caso do fabrico aditivo com recursos minerais.

Após a identificação do problema e motivação – compreender e justificar a relevância do desafio de investigação, seguindo a proposta de Gregor e Hevner (2013), a DSR organiza-se nas seguintes etapas fundamentais, Figura 1:

- Definição dos objetivos da solução – estabelecer critérios técnicos e funcionais que orientam a conceção do artefacto;
- Desenvolvimento – projetar e implementar a solução proposta;
- Demonstração – testar o artefacto em cenários representativos de aplicação;
- Avaliação – analisar sistematicamente os resultados e validar a sua adequação ao problema identificado.

No âmbito desta dissertação, a adoção da DSR justifica-se pela necessidade de conceber e avaliar um extrusor multifuncional (câmara de mistura e tubo focalizador) destinado ao fabrico aditivo de materiais cimentícios sustentáveis. O processo de investigação foi desenvolvido de forma iterativa, permitindo: (i) partir do diagnóstico das limitações dos extrusores convencionais; (ii) definir objetivos claros relacionados com sustentabilidade, flexibilidade reológica e integração em plataformas híbridas; (iii) conceber e modelar o artefacto proposto; (iv) demonstrar a sua eficácia por meio de simulações CFD; e (v) avaliar o desempenho do sistema em cenários representativos de fabrico digital.

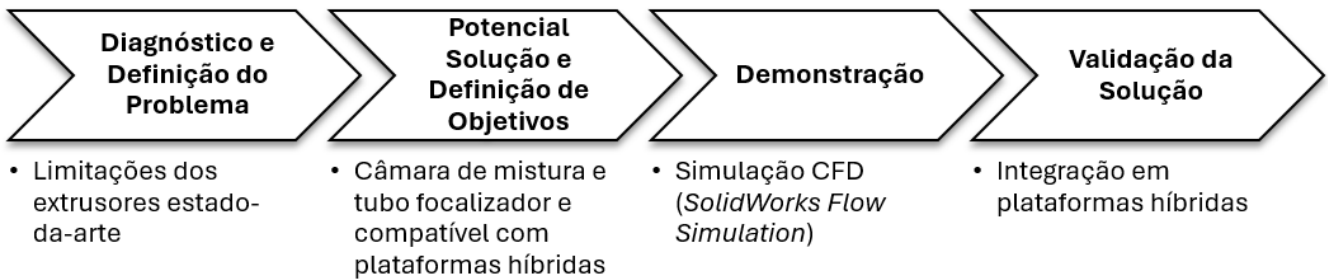


Figura 1 Abordagem Esquemática DSR

A aplicação da DSR, neste contexto, assegura que a solução proposta não se limita a um protótipo experimental, mas se constitui como um contributo científico relevante, com aplicabilidade concreta na construção digital sustentável (Peffer et al., 2012; Dresch & Lacerda, 2016; Herwix et al., 2022).

3.2. Etapas Metodológicas da *Design Science Research*

A aplicação da metodologia DSR nesta investigação desenvolveu-se de forma estruturada ao longo de cinco etapas fundamentais. Cada etapa foi adaptada ao contexto específico do fabrico aditivo com recursos minerais, assegurando simultaneamente rigor científico e relevância prática.

3.2.1. Diagnóstico e Definição do Problema

A fase inicial consistiu na identificação das principais limitações associadas aos extrusores atualmente disponíveis para fabrico aditivo de materiais cimentícios. Entre os obstáculos mais relevantes destacaram-se: (i) a reduzida flexibilidade para processar formulações diversas, (ii) a ausência de mecanismos de mistura ativa em linha e (iii) a dificuldade de integração funcional com plataformas híbridas de fabrico digital (Herwix et al., 2022; Zhang et al., 2019). Com base neste diagnóstico, formulou-se a questão de investigação central: Como conceber e desenvolver um injetor — composto por câmara de mistura e tubo focalizador — capaz de processar eficientemente diferentes materiais cimentícios, garantindo simultaneamente sustentabilidade e integração em plataformas híbridas de fabrico digital?

3.2.2. Definição dos Objetivos

A partir do problema identificado, foram estabelecidos os objetivos que orientaram o desenvolvimento da solução (detalhados no Capítulo 4). Estes objetivos centram-se em três eixos principais:

- Sustentabilidade dos recursos minerais – promover a utilização eficiente de matérias-primas e a valorização de resíduos;
- Flexibilidade reológica e composicional – possibilitar o processamento de formulações mono e multicomponentes;
- Compatibilidade com sistemas digitais híbridos – assegurar integração física e funcional com equipamentos de fabrico aditivo e subtrativo (Gregor & Hevner, 2013; Hevner et al., 2004).

3.2.3. Desenvolvimento do Artefacto

O desenvolvimento centrou-se na conceção e modelação de um artefacto técnico constituído por uma câmara de mistura e um tubo focalizador. O sistema foi projetado com três canais de entrada independentes, geometria interna otimizada para promover mistura eficiente e arquitetura modular para facilitar a integração em diferentes plataformas de fabrico (Ngo et al., 2018). A modelação tridimensional, realizada em *SolidWorks*, incluiu as interfaces externas de montagem e as estruturas internas de mistura, como uma hélice estática ao longo do canal de extrusão (Wangler et al., 2016a). Posteriormente, o modelo foi preparado para análise CFD, incorporando propriedades reológicas não-Newtonianas dos materiais cimentícios (Bos et al., 2016).

3.2.4. Demonstração

A demonstração da solução foi realizada através de simulações numéricas no *SolidWorks Flow Simulation*. Consideraram-se formulações reais de pastas cimentícias modeladas segundo a lei de Herschel–Bulkley, adequada a materiais não-Newtonianos (Mechtcherine et al., 2020a). Foram avaliados diferentes cenários de alimentação nos canais de entrada, analisando campos de velocidade, pressão e tensão de corte, bem como métricas quantitativas como densidade média à saída e estabilidade do fluxo (Tay et al., 2019). Os resultados permitiram comprovar a eficácia do *design* em assegurar mistura homogénea e coerência do escoamento.

3.2.5. Avaliação e Validação

A avaliação baseou-se na comparação entre resultados teóricos e simulações CFD, verificando parâmetros como densidade, pressão e velocidade do fluxo, a fim de aferir a coerência do modelo computacional (Roussel, 2018). Adicionalmente, foram simuladas condições assimétricas de operação, caudais distintos nos canais de entrada, demonstrando a robustez da solução em manter fluxo estável e mistura homogénea (Guamán-Rivera et al., 2022; J. Wang et al., 2024). Por fim, a validação funcional foi realizada num cenário representativo de fabrico híbrido, integrando o artefacto em sistemas Avançados de Múltiplos Eixos interpolados da Cei-Zipor e na extrusora profissional M-Tec Duo-Mix 3DCP, confirmando a sua viabilidade prática e compatibilidade com equipamentos industriais.

3.3. Justificação da Metodologia

A escolha da metodologia DSR como quadro metodológico desta investigação justifica-se pela natureza do problema em estudo e pelos objetivos a alcançar. O desenvolvimento de um artefacto extrusor multifuncional — composto por uma câmara de mistura e um tubo focalizador — para fabrico aditivo de materiais cimentícios sustentáveis exige uma abordagem que combine rigor académico com aplicabilidade prática.

A DSR destaca-se pela sua capacidade de estruturar processos de investigação aplicada, promovendo a criação de soluções inovadoras que respondem a problemas reais e, simultaneamente, contribuem para o avanço do conhecimento científico (Hevner et al., 2004; Gregor & Hevner, 2013). A sua orientação iterativa permite ajustar sucessivamente a conceção do artefacto em função dos resultados obtidos em fases de demonstração e avaliação, assegurando que a solução evolui de forma robusta e fundamentada (vom Brocke et al., 2020).

No contexto específico desta dissertação, a DSR revelou-se especialmente adequada por três razões principais:

- Integração entre teoria e prática: possibilitou articular contributos da literatura sobre fabrico aditivo, reologia de materiais cimentícios e sistemas de mistura com a conceção de uma solução técnica aplicável em cenários industriais.

- Carácter multidisciplinar: permitiu integrar conhecimentos de engenharia mecânica, ciência dos materiais, fabrico digital e sustentabilidade, refletindo a complexidade inerente ao FA com recursos minerais (Dresch & Lacerda, 2016).
- Validação sistemática: proporcionou um enquadramento robusto para a avaliação da solução proposta através de simulações numéricas (CFD) e testes de integração em plataformas de fabrico híbrido, garantindo pertinência técnica e relevância prática (Pefferers et al., 2012; Kanjanabootra, 2016).

Assim, a adoção da DSR assegura que o artefacto desenvolvido não se limita a um protótipo experimental, mas se configura como um contributo cientificamente fundamentado, tecnologicamente inovador e aplicável no contexto real da construção digital sustentável.

4. Revisão de Literatura

A revisão da literatura constitui um elemento central na presente dissertação, fornecendo o enquadramento científico e tecnológico necessário para a fundamentação da solução proposta. O fabrico aditivo com recursos minerais, embora em rápida expansão, permanece marcado por limitações técnicas que condicionam a sua adoção generalizada no setor da construção. A identificação, sistematização e análise crítica dessas limitações são, portanto, determinantes para a definição dos requisitos que orientam o desenvolvimento da câmara de mistura e tubo focalizador concebidos neste trabalho.

Neste capítulo, a literatura é explorada segundo cinco eixos interdependentes. Em primeiro lugar, analisa-se a evolução do fabrico aditivo com recursos minerais, destacando o seu potencial, as aplicações emergentes e os desafios técnicos ainda por superar. Seguidamente, aprofundam-se os fundamentos reológicos dos materiais cimentícios extrudíveis, com ênfase no comportamento não-Newtoniano e nas variáveis que condicionam a extrudabilidade e a estabilidade das camadas depositadas.

Na terceira secção, examina-se o estado atual dos sistemas extrusores e das estratégias de mistura em linha, evidenciando as tipologias predominantes, as suas limitações estruturais e a escassez de soluções modulares adequadas ao processamento multimaterial. A quarta secção dedica-se à integração de extrusores em plataformas de fabrico digital híbrido, analisando os requisitos de compatibilidade geométrica, funcional e de controlo associados à coordenação entre processos aditivos e subtrativos.

Por fim, o capítulo culmina com uma síntese crítica da literatura e a identificação das principais lacunas tecnológicas, estabelecendo a relação direta entre os desafios ainda não resolvidos e os contributos inovadores propostos por esta investigação. Esta abordagem sistemática garante que o desenvolvimento do artefacto extrusor se encontra solidamente ancorado no estado da arte, assegurando a sua relevância científica e aplicabilidade prática.

4.1. Fabrico Aditivo com Recursos Minerais: Potencial e Desafios

O fabrico aditivo, amplamente reconhecido como impressão 3D, tem registado uma expansão significativa em setores de elevada intensidade tecnológica, como a indústria aeroespacial, automóvel e biomédica, pela sua capacidade de produzir componentes complexos com elevada precisão e reduzido desperdício de material (Ngo et al., 2018; Wolfs

et al., 2019). A sua aplicação ao setor da construção civil, e em particular ao processamento de recursos minerais, constitui um dos domínios mais promissores e, simultaneamente, mais desafiantes do fabrico digital.

A utilização de pastas cimentícias, argamassas e compósitos minerais em processos de FA possibilita ganhos expressivos de sustentabilidade, através da redução de até 60% do desperdício de materiais, da eliminação parcial de cofragens e da valorização de resíduos minerais provenientes de operações de corte e polimento de pedra (Bos et al., 2016; Le et al., 2012a; Strohle et al., 2023). Para além dos benefícios ambientais, esta abordagem viabiliza a produção descentralizada, próxima do local de aplicação, contribuindo para a diminuição da pegada de carbono associada ao transporte e para a flexibilização das cadeias logísticas (Nerella & Mechtcherine, 2019).

Contudo, a transposição das potencialidades do FA para o domínio dos RM encontra-se limitada por desafios técnicos relevantes. Entre os mais críticos destacam-se: (i) a elevada variabilidade reológica dos materiais cimentícios, fortemente dependente da composição e das condições ambientais; (ii) a curta janela de trabalhabilidade associada à hidratação rápida do cimento; (iii) a propensão para segregação e instabilidade de fase em misturas multimaterial; e (iv) a forte dependência de aditivos químicos para controlo do escoamento e da presa (Wangler et al., 2019; Wolfs et al., 2018).

A literatura especializada evidencia que a viabilidade do fabrico aditivo com RM depende diretamente da qualidade da mistura e da continuidade do processo de extrusão, parâmetros que influenciam não apenas a integridade geométrica da peça, mas também a sua durabilidade mecânica e funcional (Mechtcherine et al., 2020a; Sergis & Ouellet-Plamondon, 2022). Nesse sentido, projetos europeus de referência, como o N3XTCON, o 3DCONS e o desenvolvimento industrial promovido pela COBOD, têm demonstrado a relevância de soluções específicas para materiais de base mineral, reforçando a urgência em desenvolver sistemas extrusores adaptados a este contexto (Strohle et al., 2023).

Assim, a investigação atual posiciona-se no cruzamento entre a procura de maior sustentabilidade na construção e a necessidade de superar constrangimentos técnicos que ainda limitam a aplicação do FA com RM. Esta convergência define um campo de inovação tecnológica no qual a presente dissertação se insere, ao propor o desenvolvimento de um sistema extrusor multifuncional, concebido para responder de forma eficaz a estas exigências emergentes.

4.2. Reologia de Materiais Cimentícios Extrudíveis

A reologia constitui um dos aspetos centrais para a viabilidade do fabrico aditivo com recursos minerais, uma vez que as propriedades de escoamento e de consolidação dos materiais determinam a qualidade do processo de extrusão e a estabilidade da peça fabricada (Roussel, 2018; Wolfs et al., 2018). No contexto da impressão 3D com pastas cimentícias, três parâmetros fundamentais são tradicionalmente considerados: extrudabilidade, *buildability* e *printability*. O primeiro refere-se à capacidade de o material escoar sob pressão sem entupimentos; o segundo relaciona-se com a estabilidade estrutural da peça após deposição sucessiva de camadas; e o terceiro traduz a aptidão do material em manter a forma pretendida durante o processo construtivo (Nerella & Mechtcherine, 2019; Perrot et al., 2016b).

A maioria das formulações cimentícias utilizadas em FA comporta-se como fluidos não-Newtonianos, geralmente descritos pelo modelo de Herschel–Bulkley, expresso por:

- Eq. 1 – Expressão Matemático Herschel–Bulkley

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Em que:

- τ representa a tensão de corte [Pa];
- τ_0 é a tensão de escoamento [Pa];
- K corresponde ao índice de consistência do fluido [Pa·sⁿ];
- $\dot{\gamma}$ representa a taxa de deformação [s⁻¹];
- n é o índice de comportamento reológico, sendo inferior a 1 no caso de fluidos pseudo-plásticos.

Este modelo descreve adequadamente a resposta típica de pastas cimentícias: presença de uma tensão inicial de escoamento necessária para iniciar o movimento, comportamento pseudo-plástico associado à diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de deformação, e elevada sensibilidade temporal ligada à hidratação progressiva do cimento (Bos et al., 2016).

Para além destes parâmetros fundamentais, outros fenómenos reológicos desempenham papel crítico na impressão 3D:

- Tixotropia, que reflete a capacidade do material recuperar a sua estrutura após cessação da deformação, contribuindo para a estabilidade geométrica entre camadas;

- Cinética de hidratação, fortemente dependente da temperatura e da composição, que influencia a janela de trabalhabilidade;
- Efeito das adições minerais (sílica, cinzas volantes, metacaulino), que alteram a viscosidade, a taxa de presa e a durabilidade da pasta (Duxson & Provis, 2008; Ma et al., 2018).

Estudos recentes demonstram que pequenas variações na tensão de escoamento ou no índice reológico podem comprometer a estabilidade do processo, originando fenómenos indesejados como segregação de fases, entupimentos do bico extrusor ou colapso das camadas depositadas (Bhattacharjee et al., 2021; Benamara et al., 2020).

No âmbito desta investigação, estes aspetos foram considerados na seleção e caracterização das duas pastas de estudo — Pasta A e Pasta B — formuladas com propriedades reológicas contrastantes. Esta abordagem permitiu avaliar o desempenho do sistema extrusor sob condições operacionais distintas, assegurando uma análise representativa da variabilidade típica dos RM processados em FA (Sergis & Ouellet-Plamondon, 2022).

4.3. Sistemas Extrusores e Mistura em Linha: Estado Atual e Limitações

Os sistemas extrusores existentes podem ser classificados em três tipologias principais: (i) monocanal monocomponente, com uma única entrada e geometria cilíndrica ou cónica; (ii) multicanal passivo, com múltiplas entradas, mas sem mecanismos ativos de mistura; e (iii) extrusores de hélice rotativa (tipo Auger), adequados a materiais mais viscosos, mas sem controlo rigoroso da composição em linha (Craveiro et al., 2017; Wolfs et al., 2019).

Apesar da diversidade, subsistem limitações críticas: ausência de modularidade, incapacidade de mistura ativa em tempo real, baixa adaptabilidade a diferentes formulações e reduzida compatibilidade com sistemas híbridos de fabrico digital (Marchment et al., 2019; Zhang et al., 2019).

A literatura relativa a mistura em linha (*in-line mixing*) aponta para soluções como misturadores estáticos helicoidais (Kenics, Sulzer), aplicados com sucesso em indústrias químicas e farmacêuticas, mas raramente transferidos para o fabrico aditivo com cimento (Le et al., 2012a; Nerella & Mechtcherine, 2019). Tais dispositivos oferecem vantagens,

como a promoção de vórtices sucessivos e elevada homogeneização, desde que se minimize a perda de carga e zonas mortas (Kruger et al., 2019; Shen et al., 2024).

A inovação proposta nesta dissertação reside precisamente na incorporação de uma geometria helicoidal estática interna, concebida para operar em regime laminar ($Re < 5$), assegurando mistura eficiente sem necessidade de componentes móveis e potenciando a fiabilidade do processo (Mechtcherine et al., 2020a; Chen et al., 2023).

4.4. Integração de Extrusores em Plataformas de Fabrico Híbrido

O fabrico híbrido combina processos aditivos (extrusão de materiais) e subtrativos (maquinação CNC), integrados numa única célula de produção. Esta abordagem oferece vantagens em termos de precisão geométrica, qualidade superficial e redução do tempo de produção (Tay et al., 2019; Wolfs et al., 2019).

No entanto, a sua implementação envolve desafios como a conceção de cabeças modulares, a coordenação entre *software* de controlo (código G adaptativo, CAM) e a compatibilidade mecânica entre diferentes ferramentas (Singh et al., 2023b; Wangler et al., 2019).

O artefacto desenvolvido nesta investigação foi projetado para integrar plataformas híbridas, incluindo a extrusora M-Tec Duo-Mix 3DCP e Centros Avançado de Múltiplos Eixos interpolados da Cei-Zipor. A compatibilidade com futuras soluções dotadas de sensores e controlo em tempo real reforça a sua adaptabilidade e alinhamento com as exigências da indústria (Bhattacharjee et al., 2021; Dvorkin et al., 2024; Placzek & Schwerdtner, 2023).

4.5. Síntese Crítica da Literatura e Lacunas Tecnológicas

A análise crítica da literatura evidencia um conjunto de lacunas consistentes que comprometem a consolidação do fabrico aditivo com recursos minerais como solução sustentável e tecnologicamente robusta.

No domínio da reologia de materiais cimentícios, verifica-se que muitos estudos privilegiam abordagens estáticas, negligenciando os efeitos transitórios e dinâmicos que ocorrem durante a extrusão. Tal lacuna limita a capacidade de previsão do comportamento real dos materiais e reduz a fiabilidade dos modelos aplicados. A presente dissertação procura colmatar esta limitação através da modelação física e computacional de duas pastas

distintas (A e B), representadas pelo modelo de Herschel–Bulkley, garantindo maior rigor na simulação de condições reais de operação.

Relativamente à mistura em linha de materiais minerais, observa-se a ausência de soluções otimizadas para compósitos cimentícios de elevada viscosidade. A maioria dos sistemas analisados não dispõe de mecanismos capazes de assegurar homogeneização eficiente em regime laminar, o que resulta em extrudados heterogêneos e de desempenho inconsistente. Em contrapartida, o artefacto desenvolvido nesta dissertação integra uma hélice passiva de geometria helicoidal, projetada especificamente para promover mistura contínua e homogênea sem recurso a componentes móveis, favorecendo a fiabilidade e a robustez do sistema.

No que respeita à modularidade e flexibilidade do extrusor, os sistemas existentes mantêm geometrias fixas e entradas únicas, restringindo severamente a adaptabilidade a diferentes formulações e condições de processo. O artefacto proposto nesta investigação supera esta limitação ao incorporar três entradas independentes (A, B e C), possibilitando a alimentação multimaterial e a reconfiguração funcional de acordo com as exigências específicas da aplicação.

Quanto à integração em plataformas híbridas de fabrico digital, persiste uma baixa compatibilidade entre os extrusores atualmente disponíveis no mercado e sistemas CNC ou robotizados. Essa limitação decorre sobretudo da ausência de interfaces universais e de soluções modulares adaptáveis. A presente investigação contribui com um extrusor projetado para interoperar tanto com a M-Tec Duo-Mix 3DCP como com centros CNC industriais, assegurando compatibilidade mecânica, funcional e operacional em cenários híbridos de fabrico.

Por fim, no eixo da sustentabilidade e valorização de recursos minerais, a maioria das soluções descritas na literatura ignora o aproveitamento de resíduos minerais e pastas residuais, mantendo dependência excessiva de matérias-primas convencionais. Em contraste, o sistema aqui desenvolvido foi concebido para processar matérias-primas recicladas e incorporar cargas funcionais, contribuindo ativamente para a economia circular e para a redução do impacto ambiental do setor da construção.

A Tabela 1 sintetiza estas lacunas, colocando em evidência os contributos específicos da presente investigação.

Tabela 1 Lacunas presentes na literatura vs. contributos da presente dissertação

Tópico	Lacuna Identificada	Contributo da Presente Tese
Reologia	Sistemas ignoram comportamento Herschel–Bulkley em regime transiente	Modelo físico e simulado para dois materiais distintos
Mistura	Ausência de sistemas com mistura em linha para compósitos cimentícios	Hélice passiva integrada para mistura eficiente (A+B)
Modularidade	Geometria fixa e entradas únicas	Três entradas independentes (A, B, C) com modularidade funcional
Integração híbrida	Extrusores pouco compatíveis com CNCs e sistemas robotizados	Cabeça adaptável a sistemas híbridos (Duo-Mix + CNC)
Sustentabilidade	Falta de valorização de pasta residual e de RM reciclados	Preparado para RM reciclado e cargas funcionais

A análise crítica da literatura evidencia lacunas consistentes que comprometem a consolidação do fabrico aditivo com recursos minerais como solução sustentável e tecnologicamente robusta.

No domínio da reologia de materiais cimentícios, constata-se que muitos estudos privilegiam abordagens estáticas, negligenciando os efeitos transitórios e dinâmicos que ocorrem durante a extrusão, o que limita a capacidade de previsão do comportamento real dos materiais. A presente dissertação responde a esta limitação por meio da modelação física e computacional de duas pastas distintas (A e B), representadas pelo modelo de Herschel–Bulkley.

Relativamente à mistura em linha de materiais minerais, observa-se a ausência de soluções técnicas otimizadas para compósitos cimentícios de elevada viscosidade. A contribuição desta investigação materializa-se na conceção de uma hélice passiva, integrada na geometria interna do extrusor, capaz de promover mistura homogénea sob regime laminar, dispensando componentes móveis e aumentando a robustez do sistema.

No que se refere à modularidade e flexibilidade do extrusor, os sistemas atuais mantêm geometrias fixas e entradas únicas, restringindo a adaptabilidade a diferentes formulações.

Em contrapartida, o artefacto desenvolvido nesta dissertação apresenta três entradas independentes (A, B e C), o que possibilita a alimentação multimaterial e a reconfiguração funcional conforme as exigências do processo.

Quanto à integração em sistemas híbridos de fabrico digital, persiste uma baixa compatibilidade entre extrusores disponíveis no mercado e plataformas CNC ou sistemas robotizados. A presente investigação contribui com o desenvolvimento de um extrusor adaptável tanto à M-Tec Duo-Mix 3DCP como a centros CNC industriais, assegurando interoperabilidade mecânica e funcional.

Por fim, no eixo da sustentabilidade e valorização de recursos minerais, verifica-se que a maioria das soluções ignora o aproveitamento de resíduos minerais e pastas residuais, limitando-se ao uso de matérias-primas convencionais. O sistema proposto nesta dissertação foi concebido para processar matérias-primas recicladas e permitir a introdução de cargas funcionais, contribuindo assim para a economia circular e para a redução do impacto ambiental do setor da construção.

Em síntese, a revisão da literatura permitiu identificar de forma clara as principais limitações técnicas e científicas que persistem no FA com recursos minerais, nomeadamente no que respeita ao controlo reológico, à ausência de soluções de mistura em linha eficazes, à falta de modularidade nos sistemas extrusores, à reduzida integração com plataformas híbridas e à escassa valorização de materiais reciclados. Estas lacunas configuram não apenas desafios tecnológicos, mas também oportunidades de investigação aplicada. É neste enquadramento que se definem os Objetivos Específicos da presente dissertação, concebidos de modo a orientar o desenvolvimento do artefacto extrusor proposto, garantindo a sua pertinência científica, a sua utilidade prática e o seu contributo para a sustentabilidade no setor da construção.

5. Objetivos Específicos

A análise crítica da literatura e a síntese apresentada no capítulo anterior evidenciaram um conjunto de lacunas tecnológicas e científicas que limitam a consolidação do fabrico aditivo com recursos minerais. Entre os aspetos mais relevantes destacam-se: (i) a ausência de sistemas de mistura em linha eficazes para pastas cimentícias de comportamento não-Newtoniano; (ii) a reduzida modularidade e reconfigurabilidade dos extrusores atualmente disponíveis; (iii) a limitada compatibilidade destes sistemas com plataformas híbridas de fabrico digital; e (iv) a insuficiente valorização de subprodutos minerais e de resíduos de corte, que compromete o alinhamento da tecnologia com princípios de sustentabilidade e economia circular (Bos et al., 2016; Mechtcherine et al., 2020a; Shen et al., 2024).

No quadro metodológico da metodologia DSR, estas limitações identificadas na Etapa 1 (Diagnóstico do Problema) convertem-se agora em metas operacionais na Etapa 2 (Definição dos Objetivos). Assim, os objetivos específicos desta investigação foram delineados de forma a responder, simultaneamente, às exigências técnicas identificadas e às orientações estratégicas de sustentabilidade e inovação presentes no setor da construção digital.

5.1. Sustentabilidade e Eficiência na Utilização de Recursos Minerais

O primeiro objetivo consiste no desenvolvimento de um artefacto extrusor que promova uma utilização mais eficiente e sustentável dos RM. Para tal, propõe-se:

- a integração de misturas com elevada carga mineral, incluindo pasta residual proveniente de processos de corte e outros subprodutos reciclados;
- a redução de desperdícios através de um escoamento controlado e contínuo, eliminando falhas na extrusão;
- a incorporação de um sistema de mistura *in situ*, que permita ajustar as propriedades do material no momento da aplicação, reduzindo a necessidade de pré-misturas e favorecendo a circularidade de recursos.

Este objetivo responde diretamente à lacuna identificada na literatura relativamente à baixa valorização de subprodutos minerais e à ausência de soluções técnicas que promovam uma gestão eficiente da matéria-prima em processos de fabrico digital (Pomponi & Moncaster, 2017; J. Wang et al., 2024).

5.2. Flexibilidade Reológica e Compatibilidade Multimaterial

O segundo objetivo visa garantir a versatilidade do artefacto no processamento de diferentes formulações cimentícias e minerais, abrangendo:

- pastas cimentícias com tensões de escoamento e viscosidades variáveis;
- argamassas aditivadas ou formuladas com ligantes alternativos (geopolímeros, cal hidráulica, ligantes híbridos);
- compósitos reforçados com fibras ou adições funcionais (sílica ativa, fibras naturais e sintéticas, pigmentos, entre outros). Para atingir este objetivo, a câmara de mistura e tubo focalizador foi concebida com três canais de entrada independentes (A, B e C), permitindo modular a composição em tempo real, introduzir reforços localizados e assegurar uma extrusão estável mesmo em condições reológicas críticas.

Desta forma, este objetivo aborda diretamente a lacuna observada na literatura relativamente à incompatibilidade dos sistemas extrusores existentes com materiais de propriedades diversificadas e à ausência de mecanismos de adaptação reológica em linha (Ngo et al., 2018; Grigolato et al., 2022; Zhang et al., 2019).

5.3. Integração em Plataformas de Fabrico Híbrido

O terceiro objetivo específico consiste em assegurar a integração do artefacto em sistemas de fabrico híbrido, capazes de articular operações aditivas e subtrativas. Para tal, propõe-se:

- a conceção de uma interface mecânica modular compatível com a extrusora M-Tec Duo-Mix 3DCP;
- a adaptação do artefacto a cabeças CNC móveis com controlo numérico;
- a capacidade de operar de forma coordenada com processos de maquinação, possibilitando acabamentos de elevada precisão após a deposição do material.

Este objetivo responde à lacuna recorrente na literatura sobre a incompatibilidade dos extrusores convencionais com plataformas híbridas e à ausência de soluções que integrem, de forma fluida, deposição e maquinação no mesmo ciclo de fabrico (Tay et al., 2019; Mechtcherine et al., 2020a; Ahi et al., 2024).

6. Fundamentação e Projeto Técnico da Solução

O presente capítulo corresponde à terceira etapa da metodologia DSR, dedicada ao desenvolvimento do artefacto. Neste trabalho, o artefacto concebido consiste numa câmara de mistura e tubo focalizador, especificamente projetado para processos de FA com materiais cimentícios sustentáveis, integrando de forma particular a valorização de RM.

A conceção da solução resultou da análise crítica desenvolvida nos capítulos anteriores e integra tanto os requisitos funcionais identificados na revisão de literatura como os desafios práticos evidenciados em contextos industriais. Entre os principais fatores que motivaram o projeto, destacam-se: a necessidade de compatibilidade com formulações heterogéneas, a possibilidade de realizar mistura ativa e localizada de aditivos durante a extrusão, e a integração eficiente em plataformas híbridas de fabrico digital, assegurando simultaneamente eficiência, modularidade e sustentabilidade do processo (Buswell et al., 2018; Zhang et al., 2019; J. Wang et al., 2024).

O desenvolvimento do artefacto baseou-se numa abordagem multidisciplinar, articulando contributos da reologia de materiais cimentícios, da engenharia mecânica, da ciência dos materiais e do *design* modular orientado para integração digital. A modelação geométrica foi realizada na plataforma *SolidWorks*, apoiada por simulações CFD, assegurando o rigor técnico e a previsibilidade de desempenho do sistema projetado.

Este capítulo estrutura-se em duas vertentes complementares: (i) a fundamentação científica e técnica que justifica as opções de projeto, incluindo aspetos de reologia, estratégias de mistura multimaterial, modularidade e integração digital; e (ii) a descrição detalhada do *design* funcional da solução, desde a arquitetura multimaterial de alimentação até à geometria convergente de extrusão, evidenciando a sua adequação a processos de fabrico aditivo sustentável com incorporação de recursos minerais.

6.1. Fundamentação Científica e Tecnológica

O desenvolvimento da câmara de mistura e tubo focalizador concebido nesta investigação assenta em fundamentos científicos e tecnológicos que estruturam e legitimam as opções de *design* adotadas. Tais fundamentos decorrem da revisão da literatura previamente apresentada, da identificação de lacunas tecnológicas nos sistemas de extrusão

para fabrico aditivo com materiais cimentícios e da necessidade de articular desempenho funcional, sustentabilidade e integração digital.

A conceção da solução responde, assim, a três eixos principais: (i) a reologia dos materiais cimentícios com incorporação de recursos minerais, que impõe requisitos críticos de extrudabilidade, estabilidade e construtibilidade; (ii) a eficiência e flexibilidade dos sistemas de mistura em linha, capazes de lidar com formulações heterogéneas e permitir a adição localizada de aditivos ou reforços; e (iii) a compatibilidade estrutural e digital do artefacto com plataformas híbridas de fabrico, assegurando a sua modularidade, adaptabilidade e integração em contextos robotizados e CNC.

Do ponto de vista científico, a fundamentação baseia-se nos princípios da mecânica dos fluidos não-Newtonianos e da reologia aplicada a pastas cimentícias, bem como nos modelos de mistura estática que operam segundo mecanismos de divisão e recombinação do fluxo. Tecnicamente, o *design* adotado incorpora estratégias consolidadas em sistemas industriais de extrusão polimérica e compósitos, adaptadas às particularidades dos materiais cimentícios com RM, os quais apresentam maior sensibilidade à segregação, à perda de trabalhabilidade e ao entupimento.

Ao integrar estes diferentes domínios — engenharia de materiais, ciência da mistura, modelação reológica e integração digital —, a solução proposta adquire consistência técnica e relevância prática, constituindo um artefacto robusto, inovador e alinhado com os objetivos específicos definidos na Etapa 2 da metodologia.

6.1.1. Reologia de Materiais Cimentícios com Recursos Minerais

A reologia dos materiais cimentícios constitui um fator determinante para o sucesso da extrusão em processos de FA. De forma geral, estes materiais são descritos por o modelo de fluidos Herschel–Bulkley, os quais consideram parâmetros críticos como a tensão de escoamento (τ_0), a viscosidade plástica (μ_p) e o comportamento tixotrópico, fortemente dependente da história de deformação e do tempo de repouso (Roussel, 2018; Si et al., 2025; Wolfs et al., 2018).

A incorporação de recursos minerais — como lamas de corte de pedra, cinzas volantes ou metacaulino — altera significativamente estas propriedades reológicas, afetando a bombeabilidade (*pumpability*), a estabilidade volumétrica (redução de segregação entre fases) e a construtibilidade (*buildability*) após a deposição (Perrot et al., 2016b).

Face a estas exigências, a câmara de mistura e tubo focalizador concebido nesta investigação foi desenhado para garantir uma pressão de extrusão estável, suficiente para iniciar o escoamento sem comprometer a integridade do cordão, promovendo um regime laminar que preserva a microestrutura do material. O *design* adota uma geometria convergente otimizada, alcançando equilíbrio entre pressão hidrodinâmica, velocidade de saída e homogeneidade da mistura, minimizando ainda a formação de zonas mortas suscetíveis de endurecimento prematuro (Bos et al., 2016; Tay et al., 2019; Moghaddam, 2023).

6.1.2. Mistura Multimaterial

A capacidade de processar simultaneamente diferentes materiais constitui uma mais-valia para o fabrico aditivo com RM. Para tal, foram concebidos dois canais de alimentação independentes (A e B), que convergem na câmara de mistura segundo os princípios da mistura em linha (*in-line blending*).

Esta abordagem possibilita a combinação de materiais com propriedades distintas no próprio ponto de extrusão, apoiando-se em conceitos de *Functionally Graded Material* (FGM) e em estratégias de controlo de composição em tempo real já demonstradas em robótica de impressão multimaterial (Tay et al., 2017b; Kazemian et al., 2017b; Le et al., 2012b, Craveiro et al., 2020).

Entre as vantagens destacam-se:

- alternância rápida entre composições estruturais e decorativas;
- indução controlada de reações químicas (ex.: aceleração ou retardo da presa);
- criação de zonas com propriedades térmicas, acústicas ou mecânicas diferenciadas.

Desta forma, o artefacto garante flexibilidade funcional e elevada adaptabilidade, requisitos identificados como críticos na revisão de literatura (Craveiro et al., 2019; Wangler et al., 2016a).

6.1.3. Inserção de Aditivos Localizados

O terceiro canal (C) foi concebido para permitir a injeção controlada de cargas específicas durante a extrusão. Podem ser introduzidas fibras curtas (basalto, vidro, carbono, PVA), pigmentos minerais ou aditivos funcionais como aceleradores, retardadores, agentes fotocatalíticos ou materiais de cura interna (Panda & Tan, 2018; Wolfs et al., 2018).

A inserção tardia destes componentes reduz a sua exposição ao corte, preservando aditivos sensíveis e assegurando distribuição homogénea imediata no ponto de deposição (Malaeb et al., 2015). O sistema é dotado de válvulas de controlo e alimentação volumétrica, facilitando a integração com soluções automatizadas de dosagem e aumentando a sua compatibilidade com plataformas digitais (Marchment et al., 2019; Morales Ubal et al., 2024).

Do ponto de vista de engenharia de processos, trata-se de uma alimentação lateral assistida por geometria helicoidal, solução que maximiza a eficiência de dispersão sem necessidade de elementos móveis, reduzindo falhas operacionais e custos de manutenção.

6.1.4. Mistura Estática

A homogeneização dos fluxos provenientes dos canais A e B é assegurada por um misturador estático helicoidal baseado no princípio de divisão e recombinação (*split-and-recombine*, SAR).

Este tipo de configuração mostrou elevada eficácia na redução de gradientes de concentração e na dispersão uniforme de partículas em suspensões densas, evitando zonas de recirculação e segregação (Li et al., 2019). Estudos indicam que, em pastas cimentícias, menos de seis elementos helicoidais são suficientes para obter eficiência de mistura, mantendo o esforço de corte abaixo do limiar de degradação de fibras incorporadas (Wangler et al., 2016a).

Embora introduza alguma resistência hidráulica adicional, esse efeito é compensado pelo aumento da homogeneidade, fator essencial para a qualidade da extrusão e repetibilidade do processo (Roussel, 2018; Tay et al., 2019).

6.1.5. Geometria Convergente da Câmara de Extrusão

A câmara foi projetada com uma zona de convergência gradual, definida a partir de simulações CFD. O objetivo foi reduzir perdas de carga, mitigar variações abruptas de pressão e prevenir estrangulamentos que comprometam a estabilidade dimensional do cordão extrudido (Roussel, 2018).

Na extremidade, foram previstos bicos terminais modulares e substituíveis (planos, ovais, circulares), adaptáveis às exigências específicas da aplicação. Esta modularidade permite ajustar a deposição a diferentes contextos construtivos — desde peças estruturais a componentes arquitetónicos decorativos (Ngo et al., 2018; Mechtcherine et al., 2020a).

A configuração reduz zonas mortas e refluxos, mitigando o risco de entupimento ou presa localizada, problemas recorrentes em sistemas de extrusão cimentícia (Shen et al., 2024; Tay et al., 2019).

6.1.6. Modularidade e Compatibilidade com Sistemas Digitais Avançados

A solução foi concebida sob o princípio do *design* para integração digital, assegurando compatibilidade com plataformas robóticas, sistemas CNC e cabeçais híbridos de fabrico aditivo-subtrativo (Placzek & Schwerdtner, 2023).

A modularidade abrange desde as entradas de material até os bocais terminais e interfaces de fixação, viabilizando não só a experimentação laboratorial, mas também aplicações industriais em larga escala. O artefacto é ainda compatível com a integração de sensores de pressão, temperatura e atuadores de dosagem, permitindo controlo PID em tempo real e alinhando-se com os requisitos da Indústria 4.0 (Wangler et al., 2019).

Cada decisão de projeto foi fundamentada na literatura científica e em resultados experimentais prévios, o que reforça o carácter multidisciplinar e inovador da solução. Neste sentido, a câmara de mistura e tubo focalizador representa um contributo sólido para o avanço do fabrico aditivo sustentável com RM, articulando desempenho técnico, adaptabilidade e valorização de subprodutos minerais (Bos et al., 2016; Zhang et al., 2019).

6.1.7. Síntese da Fundamentação Científica

A análise desenvolvida ao longo desta secção demonstra que o artefacto proposto resulta de uma articulação coerente entre fundamentos científicos, requisitos tecnológicos e princípios de sustentabilidade. Cada decisão de projeto — da configuração reológica à modularidade digital — responde a desafios identificados na literatura e na prática experimental, assegurando um equilíbrio entre robustez técnica, versatilidade funcional e viabilidade de integração industrial.

Esta fundamentação constitui a base para a etapa seguinte da investigação (secção 6.2), dedicada ao projeto detalhado do *nozzle* para aplicações em fabrico aditivo, onde os aspetos funcionais e geométricos do sistema são apresentados de forma integrada e sistematizada.

6.2. Projeto e Configuração Técnica do Artefacto

O desenvolvimento da câmara de mistura e tubo focalizador constituiu a terceira etapa do processo metodológico DSR, correspondente ao *design* e construção da solução técnica.

O artefacto foi concebido para responder a lacunas tecnológicas identificadas na revisão de literatura (Capítulo 4) e operacionalizadas na definição dos objetivos específicos (Capítulo 5), nomeadamente a ausência de extrusores capazes de processar materiais cimentícios heterogéneos com flexibilidade composicional, sustentabilidade de recursos minerais e integração em sistemas híbridos de fabrico digital.

Neste enquadramento, a configuração proposta assenta em três princípios fundamentais (Figura 2):

- (i) modularidade funcional, permitindo a adaptação do artefacto a diferentes formulações de materiais e plataformas de fabrico;
- (ii) compatibilidade reológica, assegurando que o dispositivo responde às exigências de extrusão de pastas cimentícias com comportamento não-Newtoniano, frequentemente incorporando subprodutos minerais e aditivos funcionais;
- (iii) integração digital, possibilitando a sua utilização em cabeças robotizadas e sistemas CNC, em consonância com os requisitos da Indústria 4.0.

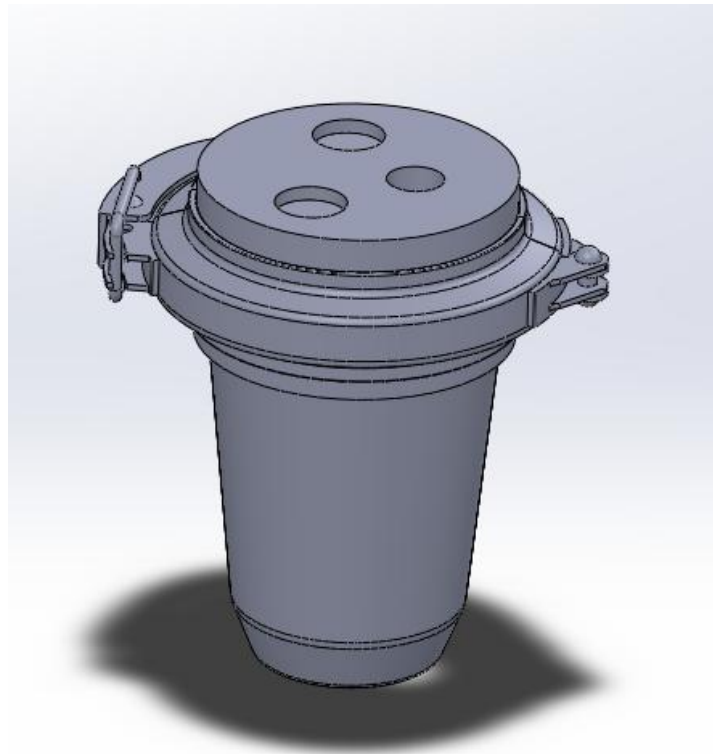


Figura 2 Artefacto - câmara mistura e tubo focalizador

A solução técnica desenvolvida apresenta-se, assim, como um artefacto convergente de extrusão com três entradas independentes, integrando mecanismos estáticos de mistura e uma geometria terminal modular. Esta conceção procura conciliar robustez mecânica,

eficiência de mistura e adaptabilidade funcional, respondendo de forma inovadora aos desafios mapeados na literatura recente sobre fabrico aditivo cimentício com recursos minerais (Roussel, 2018; Mechtcherine et al., 2020a; Placzek & Schwerdtner, 2023; Si et al., 2025).

6.2.1. Estrutura Funcional Tripla: Canais A, B e C

A arquitetura funcional da câmara de mistura e tubo focalizador foi concebida segundo uma lógica tripla de alimentação, composta por dois canais principais (A e B) e um canal secundário (C). Esta configuração responde diretamente às exigências de flexibilidade composicional identificadas na literatura (Kazemian et al., 2017b; Craveiro et al., 2019), permitindo processar formulações monocomponentes, bicomponentes ou enriquecidas com aditivos localizados.

Os canais A e B operam de forma independente ou combinada, possibilitando três modos de funcionamento resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 Modos Operacionais da Câmara de Mistura e Tubo Focalizador

Modo	Operação	Aplicação Típica
Modo Monomaterial A	Apenas canal A ativo	Testes com uma formulação base
Modo Monomaterial B	Apenas canal B ativo	Extrusão de material alternativo
Modo Combinado A+B	Ambos os canais ativos, mistura na junção	Geração de material híbrido com propriedades ajustadas

Esta versatilidade, Figura 3, operacional é particularmente relevante para contextos de FA com recursos minerais reciclados e formulações experimentais, nos quais a variabilidade reológica exige mecanismos adaptativos de mistura (Ngo et al., 2018; Zaid & El Ouni, 2024a).

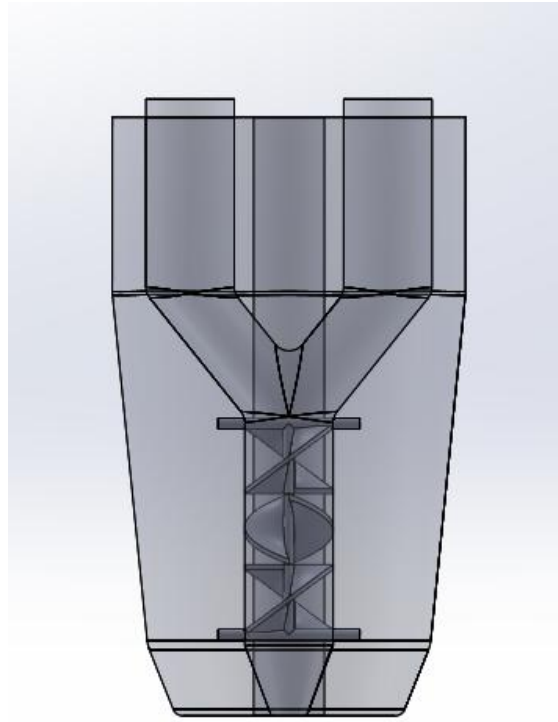


Figura 3 Interior do Artefacto

Complementarmente, o Canal C foi projetado como entrada independente para a injeção localizada de cargas funcionais, incluindo fibras curtas (basalto, PVA, vidro, carbono), pigmentos minerais ou aditivos de ação química (plastificantes, retardadores, aceleradores, agentes de cura interna, entre outros). Esta estratégia, inspirada em processos de alimentação lateral em extrusão polimérica (Marchment et al., 2019; Morales Ubal et al., 2024), assegura que aditivos sensíveis à deformação sejam incorporados apenas no momento final, preservando as suas propriedades funcionais.

O canal extrusão integra ainda válvulas de controlo e transporte de baixa rugosidade, permitindo inserções cíclicas ou sincronizadas com trajetórias de deposição. Tal configuração possibilita a impressão de elementos cimentícios com zonas reforçadas ou funcionalizadas localmente, representando um avanço em relação aos sistemas tradicionais de extrusão contínua (Mawas et al., 2025b; Wangler et al., 2019).

6.2.2. Unidade de Mistura Estática Helicoidal

A câmara central da solução integra um misturador estático helicoidal, concebido para operar segundo o princípio SAR, o qual tem demonstrado elevada eficácia em suspensões cimentícias não-Newtonianas (Roussel, 2018; Wangler et al., 2016a).

Este tipo de dispositivo é composto por elementos helicoidais alternados, dispostos ao longo do eixo de extrusão, que induzem sucessivas deformações do fluxo, promovendo a dispersão de partículas sólidas e a homogeneização de suspensões densas sem a necessidade de componentes móveis (Li et al., 2019; Sasse & Hopmann, 2024).

Entre os principais benefícios da configuração helicoidal adotada destacam-se:

- Homogeneização eficaz dos fluxos provenientes dos canais A e B, mesmo em formulações com diferenças significativas de viscosidade ou densidade.
- Preservação de aditivos sensíveis, como fibras curtas ou agentes encapsulados, dado que o esforço de corte é suficiente para dispersão sem promover degradação mecânica.
- Minimização de segregação e estratificação de fases sólidas e líquidas, problema recorrente em extrusão de pastas cimentícias complexas (Buswell et al., 2018; Zhang et al., 2019).
- Ausência de partes móveis, o que reduz o risco de falhas mecânicas, simplifica a manutenção e garante maior robustez para uso em ambientes industriais.

O dimensionamento do misturador, Figura 4, foi realizado com base em princípios da reologia de fluidos Herschel–Bulkley, contemplando parâmetros como a tensão de escoamento crítica (τ_0) e a viscosidade plástica (μ_p) (Si et al., 2025; Wolfs et al., 2018). Estudos indicam que, em sistemas de pasta cimentícia, menos de seis elementos helicoidais podem assegurar uma eficiência de mistura elevada sem comprometer a pressão interna do sistema (Wangler et al., 2016a).

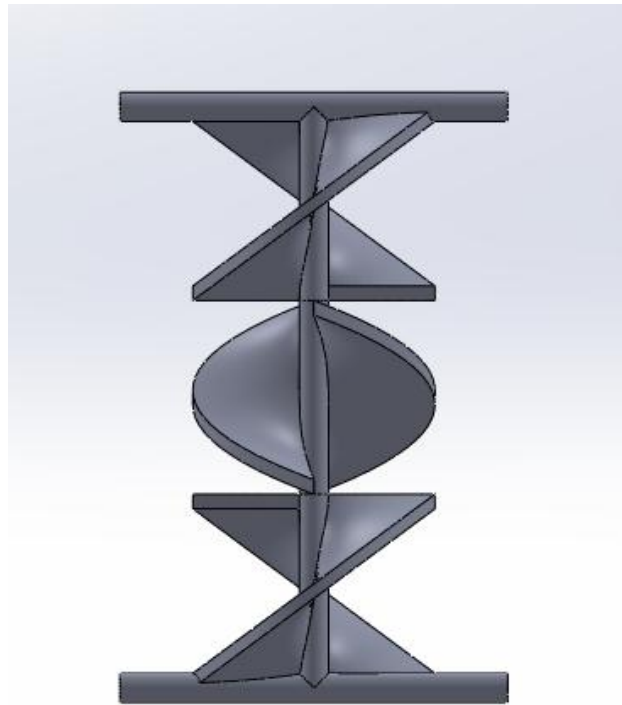


Figura 4 Misturador Helicoidal Estático

A Tabela 3 sintetiza os requisitos técnicos que orientaram o *design* do misturador estático.

Tabela 3 Requisitos técnicos do misturador estático helicoidal

Requisito Técnico	Justificação Científica
3–6 elementos helicoidais alternados	Garantem dispersão homogénea sem aumento excessivo da perda de carga (Wangler et al., 2016a)
Ângulo helicoidal otimizado (90°–120°)	Favorece SAR em pastas densas e reduz zonas de recirculação (Li et al., 2019)
Sem partes móveis	Minimiza falhas, manutenção e contaminação mecânica (Roussel, 2018)
Geometria interna de baixa rugosidade	Reduz risco de entupimento em materiais com partículas sólidas (Zhang et al., 2019)

Em síntese, a unidade de mistura estática helicoidal constitui o núcleo funcional do sistema, garantindo a consistência reológica e a homogeneidade estrutural necessárias para

a produção aditiva com RM, enquanto preserva a eficiência energética e operacional do processo.

6.2.3. Geometria Convergente com Saída Calibrada

A geometria de saída desempenha um papel determinante na qualidade do cordão extrudido, influenciando a estabilidade dimensional, a pressão interna e a homogeneidade do fluxo. No presente artefacto, a secção terminal foi concebida com uma configuração convergente-cilíndrica, resultante de estudos de *Computational Fluid Dynamics*, que permitiram otimizar a transição entre a câmara de mistura e o bico extrusor (Roussel, 2018; Tay et al., 2017b).

Esta configuração apresenta três funções principais:

- Aumento de pressão antes da extrusão, assegurando que o material ultrapassa a tensão de escoamento crítica (τ_0) sem comprometer a integridade do cordão (Mechtcherine et al., 2020a).
- Redução de zonas mortas e refluxos, prevenindo o endurecimento localizado da pasta e o entupimento, problemas recorrentes em materiais cimentícios com partículas sólidas e aditivos reativos (Shen et al., 2024).
- Conformação estável do cordão, favorecendo a deposição controlada e a precisão geométrica da peça construída.

Adicionalmente, o *design* terminal do sistema foi concebido de forma modular, Figura 5, permitindo a substituição de bocais com diferentes geometrias (circulares, planas, ovais ou rotativas), adaptando-se às exigências funcionais de cada aplicação — sejam elas estruturais, decorativas ou experimentais (Bos et al., 2016; Ngo et al., 2018).

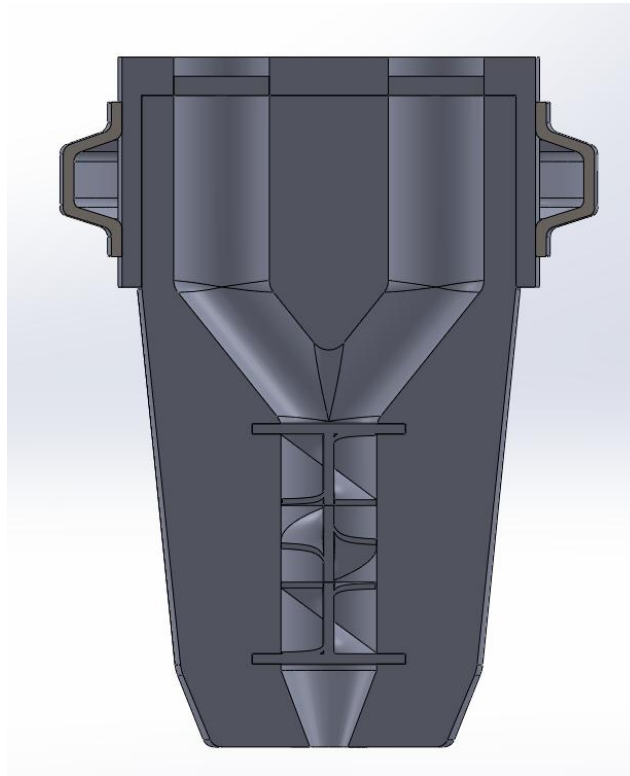


Figura 5 Cut View do Artefacto

Outro aspeto relevante foi a preparação da extremidade do artefacto para a integração de sensores de pressão e temperatura, fundamentais para a monitorização em tempo real das condições de extrusão. Esta solução responde aos requisitos da Indústria 4.0, viabilizando estratégias de controlo dinâmico baseado em *feedback*, essenciais para a reprodutibilidade e fiabilidade do fabrico aditivo com recursos minerais (Chen et al., 2023; Wangler et al., 2019).

A Tabela 4 sintetiza os requisitos técnicos que orientaram o *design* da geometria convergente.

Tabela 4 Requisitos técnicos da geometria convergente

Requisito Técnico	Justificação Científica
Perfil convergente-cilíndrico otimizado	Minimiza perdas de carga e turbulência, assegurando fluxo laminar (Roussel, 2018)
Modularidade de bocais terminais	Permite adaptação a diferentes aplicações e tipologias de deposição (Bos et al., 2016)

Requisito Técnico	Justificação Científica
Redução de zonas mortas	Previne entupimentos e endurecimento localizado (Shen et al., 2024)
Preparação para sensores embutidos	Facilita controlo em tempo real e integração digital (Chen et al., 2023)

Em síntese, a geometria convergente calibrada reforça a adaptabilidade e robustez do artefacto, garantindo a qualidade dimensional, a estabilidade reológica e a compatibilidade digital necessárias para a integração em processos de fabrico híbrido avançado.

6.2.4. Características Técnicas Relevantes

Com base no desenvolvimento do artefacto — uma câmara de mistura e tubo focalizador para fabrico aditivo com recursos minerais — torna-se essencial sistematizar as principais características estruturais e operacionais que definem o seu desempenho técnico. Esta sistematização permite compreender como cada parâmetro de *design* responde às exigências de reologia, mistura em linha e compatibilidade digital, estabelecendo uma ponte direta entre os princípios científicos da revisão de literatura e a materialização prática da solução proposta.

A Tabela 5 coloca em evidência a lógica de *design* do artefacto: cada característica técnica é fundamentada cientificamente e alinhada com lacunas identificadas na literatura.

Tabela 5 Características técnicas do artefacto e respetiva justificação científica

Característica Técnica	Justificação Científica	Referências
3 entradas independentes (A, B, C)	Flexibilidade total de mistura multimaterial e aditivação em tempo real; suporte a composições híbridas.	(Ngo et al., 2018; J. Wang et al., 2024)
Misturador helicoidal estático	Alta eficiência de homogeneização em suspensões não-Newtonianas; evita peças móveis e falhas mecânicas.	(Roussel, 2018; Wangler et al., 2016a)

Característica Técnica	Justificação Científica	Referências
Modularidade estrutural	Reconfiguração para diferentes cenários experimentais e integração em plataformas híbridas de fabrico digital.	(Placzek & Schwerdtner, 2023; Zaid & El Ouni, 2024a)
Fluxo laminar contínuo	Essencial para preservar microestrutura de pastas tixotrópicas e fibras curtas, evitando cavitação ou segregação.	(Bos et al., 2016; Sasse & Hopmann, 2024)
Geometria convergente calibrada	Incrementa pressão de extrusão, melhora estabilidade dimensional do cordão e reduz zonas mortas.	(Roussel, 2018; Shen et al., 2024)
Bocais de extrusão substituíveis	Personalização da deposição (estrutural, decorativa ou funcional) em diferentes escalas de fabrico.	(Mechtcherine et al., 2020a; Ngo et al., 2018)
Compatibilidade com Centro Avançado de Múltiplos Eixos interpolados	Integração em cabeçais híbridos e sistemas robotizados, viabilizando fabrico aditivo-subtrativo.	(Wangler et al., 2019; Zaid & El Ouni, 2024a)
Preparação para sensores digitais	Monitorização em tempo real (pressão, temperatura, caudal), favorecendo controlo dinâmico baseado em <i>feedback</i> .	(Chen et al., 2023; Wangler et al., 2024)

6.2.5. Compatibilidade com Sistemas Avançados

A relevância prática de um artefacto desenvolvido para fabrico aditivo com recursos minerais não reside apenas no seu desempenho intrínseco de extrusão e mistura, mas também

na sua capacidade de integração em ecossistemas digitais avançados. A compatibilidade com plataformas CNC, robôs industriais de múltiplos eixos e sistemas de fabrico híbrido constitui, portanto, um critério essencial para assegurar a escalabilidade, adaptabilidade e aplicabilidade do dispositivo em contextos laboratoriais e industriais.

Do ponto de vista da integração mecânica, a câmara de mistura e tubo focalizador foi concebida com interfaces modulares compatíveis com cabeçais de máquinas CNC, permitindo a sua utilização em plataformas híbridas que conjugam operações aditivas (extrusão) e subtrativas (maquinação de precisão). Esta abordagem permite alternar entre deposição e acabamento num único ciclo produtivo, aumentando a qualidade dimensional e o valor funcional dos componentes produzidos (Wangler et al., 2016a; Mechtcherine et al., 2020a).

Relativamente à automação robotizada, o sistema apresenta compatibilidade com braços robóticos de seis eixos (ABB, KUKA, Universal Robots), possibilitando deposições complexas em múltiplos planos e orientações, condição indispensável para a produção de geometrias arquitetónicas não convencionais e peças estruturais de elevada personalização (Zaid & El Ouni, 2024a).

No que respeita à instrumentação digital, a arquitetura do artefacto encontra-se preparada para a integração de sensores de pressão, temperatura e caudal, permitindo a recolha contínua de dados operacionais. A incorporação destes elementos viabiliza a implementação de sistemas de controlo PID baseados em *feedback* em tempo real, assegurando maior fiabilidade, repetibilidade e qualidade do processo (Chen et al., 2023; Wangler et al., 2019).

Adicionalmente, o dispositivo foi desenhado para ser compatível com *software* e *firmware* abertos (e.g., Marlin, Klipper), promovendo a adaptabilidade do sistema em ambientes de investigação académica e prototipagem experimental, sem limitar a sua transição futura para contextos industriais. Esta versatilidade operacional permite que a mesma solução seja aplicada tanto em protótipos laboratoriais como em linhas de produção semi-industriais orientadas à construção sustentável.

Em síntese, a compatibilidade com sistemas digitais avançados reforça a vocação híbrida, adaptável e evolutiva do artefacto desenvolvido, alinhando-o com os princípios da Indústria 4.0 e com as necessidades emergentes da construção digital sustentável.

A conceção e configuração técnica da câmara de mistura e tubo focalizador apresentada nesta secção materializa um artefacto modular, versátil e cientificamente fundamentado, capaz de responder às exigências reológicas dos materiais cimentícios, à necessidade de integração multimaterial e à compatibilidade com plataformas de fabrico digital avançado.

A arquitetura proposta — baseada em múltiplos canais de alimentação, mistura estática helicoidal e geometria de saída convergente — traduz-se numa solução inovadora orientada para sustentabilidade, adaptabilidade e escalabilidade, características que a tornam particularmente relevante no contexto do FA o com recursos minerais.

Contudo, a validade e relevância prática de qualquer artefacto desenvolvido no âmbito da metodologia DSR só se consolidam através da demonstração empírica e da validação experimental em cenários operacionais representativos.

Neste sentido, o Capítulo 7 será dedicado à demonstração do artefacto, incluindo a simulação CFD, os ensaios realizados em contexto de fabrico híbrido e a avaliação do desempenho do sistema segundo critérios técnicos previamente estabelecidos.

7. Demonstração da Solução Técnica

A etapa de demonstração constitui um momento crucial no ciclo metodológico DSR, pois é nesta fase que a solução proposta é colocada à prova em condições representativas do problema real que motivou a investigação. O objetivo central não é apenas validar a viabilidade técnica do artefacto concebido, mas também aferir a sua exequibilidade prática, a sua capacidade de integração em processos de fabrico digital e a sua aderência às exigências funcionais e ambientais previamente identificadas (Hevner et al., 2004).

No âmbito deste trabalho, a solução em estudo corresponde a uma câmara de mistura e tubo focalizador projetada especificamente para o FA de materiais cimentícios contendo recursos minerais. A inovação da proposta reside na arquitetura modular do dispositivo, que integra:

- múltiplas entradas independentes para formulações diferenciadas;
- um sistema de mistura estática helicoidal, concebido para promover homogeneização eficiente;
- e um canal adicional destinado à introdução controlada de aditivos ou reforços funcionais.

Considerando as limitações inerentes ao desenvolvimento físico do protótipo numa fase inicial e a elevada complexidade reológica dos materiais envolvidos, a demonstração foi conduzida por via de simulação computacional, recorrendo ao módulo *SolidWorks Flow Simulation*. Esta ferramenta CFD permite modelar o escoamento de fluidos não-Newtonianos em domínios tridimensionais complexos, com elevada resolução espacial e temporal, possibilitando a análise detalhada de parâmetros como perfil de velocidade, gradientes de pressão, homogeneização da mistura e estabilidade do escoamento durante a extrusão (Bos et al., 2016; Roussel, 2018; Wangler et al., 2016a).

Desta forma, a demonstração aqui apresentada constitui não apenas uma validação preliminar do artefacto, mas também um passo essencial para o seu futuro desenvolvimento físico e experimental, fornecendo evidências robustas acerca da eficácia do *design* proposto e da sua conformidade com as exigências do fabrico aditivo sustentável.

7.1. Objetivos da Demonstração Virtual por Simulação CFD

A demonstração virtual por simulação computacional teve como propósito principal avaliar a viabilidade técnica e funcional da câmara de mistura e tubo focalizador concebida no âmbito desta investigação. A utilização da ferramenta *SolidWorks Flow Simulation*, dotada de módulos específicos para o estudo de escoamentos não-Newtonianos, permitiu analisar de forma detalhada o comportamento hidrodinâmico dos materiais cimentícios ao longo das diferentes secções do artefacto, em cenários representativos de operação no fabrico aditivo.

Entre os objetivos específicos da simulação destacam-se:

- Verificar a viabilidade do escoamento de pastas cimentícias com comportamento reológico complexo (modelo Herschel–Bulkley), assegurando a continuidade e estabilidade do fluxo;
- Avaliar a eficácia do misturador estático helicoidal na promoção da homogeneização entre fluxos distintos provenientes dos canais A e B, mesmo perante diferenças significativas de viscosidade e densidade;
- Examinar a resposta da geometria convergente de extrusão, em particular no que respeita ao controlo do perfil de velocidade e à prevenção de zonas mortas, refluxos ou cavitação;
- Confirmar a coerência entre os resultados teóricos e simulados, por meio da comparação de parâmetros hidrodinâmicos como caudal, velocidade média e densidade da mistura, permitindo validar a robustez do modelo proposto.

Este conjunto de objetivos visa fornecer uma base sólida para a validação preliminar do artefacto, demonstrando que a solução concebida possui desempenho compatível com as exigências do fabrico aditivo com materiais cimentícios incorporando recursos minerais, enquanto estabelece as condições para futuras etapas de validação experimental.

7.2. Preparação da Simulação Computacional

A preparação da simulação computacional constituiu uma etapa determinante para garantir a fiabilidade e a representatividade dos resultados obtidos no *SolidWorks Flow Simulation*. Este módulo foi selecionado por integrar algoritmos robustos de análise de escoamentos não-Newtonianos e por permitir a integração direta de geometrias

desenvolvidas em *SolidWorks CAD*, assegurando a consistência entre o modelo concebido e o domínio numérico considerado.

O processo de preparação da simulação incluiu quatro fases principais:

7.2.1. Definição da Geometria e Domínio de Simulação

O modelo CAD tridimensional da câmara de mistura e tubo focalizador, previamente desenvolvido, foi importado diretamente para o ambiente de simulação no formato *.SLDPRT*.

O domínio computacional foi delimitado incluindo todos os componentes críticos do artefacto: entradas A e B (materiais-base), misturador estático helicoidal, canal C (aditivos/funcionais) e a secção de extrusão convergente.

Regiões de confluência de fluxos e zonas em torno do misturador helicoidal foram identificadas como áreas críticas, justificando um refinamento especial da malha.

7.2.2. Caracterização dos Fluidos e Modelo Reológico

O comportamento das pastas cimentícias foi representado através do modelo Herschel–Bulkley, considerado o mais adequado para suspensões cimentícias com elevado grau de complexidade reológica.

Foram atribuídos parâmetros de densidade, tensão de escoamento, índice de consistência e índice de comportamento reológico com base em valores reportados na literatura para formulações cimentícias contendo resíduos minerais.

7.2.3. Condições de Contorno e Cenários de Operação

Foram definidos quatro cenários de operação, variando as condições de ativação das entradas A, B e C, de modo a simular tanto o funcionamento monomaterial como o funcionamento multimaterial com aditivação localizada.

As fronteiras de entrada foram configuradas para regimes de caudal controlado, enquanto a saída foi definida como condição de pressão atmosférica, reproduzindo as condições típicas de extrusão.

7.2.4. Geração da Malha Computacional

A discretização espacial foi realizada através de uma malha híbrida adaptativa, composta por elementos prismáticos e tetraédricos.

O refinamento automático foi aplicado em zonas críticas (junção dos fluxos, região helicoidal, contração final do bico), assegurando a resolução adequada dos gradientes de pressão, velocidade e esforço ao corte.

Esta preparação meticulosa assegurou que a simulação reproduzisse, com elevado grau de realismo, as condições de operação esperadas para o artefacto, fornecendo uma base sólida para a análise subsequente dos resultados e para a validação preliminar da solução proposta.

7.3. Geometria e Domínio da Simulação

A definição do domínio computacional constituiu a primeira etapa da preparação da simulação, assegurando que todas as zonas críticas do artefacto fossem corretamente representadas no ambiente *SolidWorks Flow Simulation*. Para tal, foi adotado o modelo tridimensional desenvolvido em *SolidWorks CAD*, exportado no formato *.SLDPRT*, garantindo consistência entre o desenho da solução e o modelo físico simulado. A geometria considerada inclui as principais componentes funcionais do artefacto:

- Entrada A: canal lateral destinado à alimentação da pasta cimentícia base;
- Entrada B: canal simetricamente oposto à entrada A, concebido para a introdução de uma segunda formulação, por exemplo, materiais cimentícios incorporando resíduos minerais;
- Misturador estático helicoidal: posicionado axialmente no canal principal, cuja função é assegurar a homogeneização dos fluxos provenientes de A e B antes da extrusão;
- Entrada C: canal tangencial de menor diâmetro, localizado a 90° do eixo principal, dedicado à injeção controlada de cargas funcionais, como fibras curtas, pigmentos ou aditivos aceleradores;
- Secção de saída convergente-cónica: concebida para regular o caudal e calibrar a forma final do cordão extrudido, promovendo estabilidade geométrica e construtiva no processo de fabrico aditivo.

A discretização do domínio computacional foi realizada com especial atenção às regiões críticas, nomeadamente:

- A zona de confluência dos fluxos A e B, onde se verificam fortes gradientes de velocidade e pressão;
- A região interna do misturador helicoidal, onde ocorrem fenómenos de sobreposição e deflexão dos fluxos;
- A contração final da saída, determinante para o perfil de velocidade e estabilidade do extrudido.

Para tal, utilizou-se uma malha híbrida composta por elementos prismáticos e tetraédricos, estratégia que permite equilibrar precisão e custo computacional. Os elementos prismáticos foram aplicados junto às paredes do domínio, melhorando a resolução das camadas-limite associadas ao escoamento viscoso, enquanto os elementos tetraédricos foram utilizados em zonas de maior complexidade geométrica. O refinamento local da malha assegurou uma descrição mais detalhada dos gradientes de velocidade, pressão e tensão de corte, aspetos cruciais para avaliar o desempenho do artefacto em condições operacionais.

Desta forma, a modelação do domínio garantiu que a simulação CFD pudesse reproduzir de forma realista o comportamento hidrodinâmico interno da câmara de mistura e tubo focalizador, constituindo a base para a análise detalhada dos resultados a apresentar nas secções seguintes.

7.3.1. Definição do Fluido e Modelo Reológico

A modelação do escoamento interno da câmara de mistura e tubo focalizador requer a consideração do comportamento não-Newtoniano típico das pastas cimentícias utilizadas em processos de fabrico aditivo, sobretudo quando estas incorporam RM. Tais materiais apresentam uma resposta reológica complexa, caracterizada por elevada viscosidade aparente, dependência da taxa de deformação e uma tensão mínima necessária para iniciar o escoamento.

Para representar estas particularidades, foi seleccionado o modelo reológico de Herschel–Bulkley, Eq. 1, amplamente adotado na literatura para suspensões cimentícias (Roussel, 2018; Pan, Guo, et al., 2022). Este modelo é capaz de reproduzir três aspetos essenciais do comportamento destas pastas:

- a tensão de escoamento inicial (τ_0), que corresponde à energia mínima necessária para mobilizar o fluido;

- o carácter pseudoplástico do material ($n < 1$), que traduz a redução da viscosidade com o aumento da taxa de deformação;
- a dependência da viscosidade em relação à taxa de corte, fundamental para compreender os fenómenos de extrusão e mistura.

Com base em valores reportados na literatura para formulações cimentícias contendo RM (Mechtcherine et al., 2020a; Tay et al., 2019), foram adotados os seguintes parâmetros reológicos para as simulações:

- Pasta Cimentícia A: $\tau_0 = 200$ Pa; $K = 50$ Pa·sⁿ; $n = 0,60$; densidade $\rho = 2100$ kg/m³;
- Pasta Cimentícia B: $\tau_0 = 250$ Pa; $K = 65$ Pa·sⁿ; $n = 0,55$; densidade $\rho = 2200$ kg/m³.

Estes valores permitem reproduzir com elevado realismo o comportamento hidrodinâmico dos materiais no interior do artefacto, contemplando fenómenos como:

- a resistência inicial ao escoamento, relevante para o processo de extrusão controlada;
- a variação da viscosidade em função da taxa de corte, crítica na zona do misturador helicoidal;
- a estabilidade do fluxo durante a transição para a secção de saída convergente.

A adoção deste modelo assegura que a simulação CFD seja representativa das condições reais de operação, fornecendo uma base sólida para avaliar a eficácia do *design* do artefacto na homogeneização e extrusão de materiais cimentícios complexos.

7.4. Condições de Fronteira, e Malha Computacional

A definição das condições de contorno e da malha computacional constitui uma etapa crítica para assegurar a representatividade física e a convergência numérica da simulação CFD. No presente trabalho, estas definições foram realizadas de forma a reproduzir o funcionamento real da câmara de mistura e tubo focalizador, bem como a garantir a resolução adequada dos fenómenos hidrodinâmicos internos.

7.4.1. Configuração das Condições de Fronteira e Cenários

As fronteiras foram configuradas no ambiente do *SolidWorks Flow Simulation* da seguinte forma:

- Entradas (A e B): aplicação de condição de caudal mássico constante, com um caudal total de 3,0 L/min, distribuído de acordo com as proporções de material em cada cenário;
- Saída: condição de pressão ambiente (0 Pa manométrico), representando a extrusão para o exterior;
- Paredes internas: modeladas como superfícies com condição de não deslizamento (*no-slip*), reproduzindo a interação típica entre a pasta cimentícia e a parede do canal;
- Temperatura: assumiu-se regime isotérmico (25 °C), uma vez que os efeitos térmicos são desprezáveis na escala considerada.

Com base nestes pressupostos, foram definidos quatro cenários de operação, Tabela 6, representativos das diferentes funcionalidades do artefacto:

Tabela 6 Cenários de Trabalho

Cenário	Entrada A	Entrada B	Entrada C	Finalidade
1	Ativa	Inativa	Inativa	Operação com material único
2	Inativa	Ativa	Inativa	Alternativa de material B
3	Ativa	Ativa	Inativa	Mistura simultânea A+B
4	Ativa	Ativa	Ativa	Operação com reforço/aditivo

Estes cenários abrangem desde condições simples de extrusão (cenários 1 e 2) até ao modo mais complexo de funcionamento (cenário 4), que envolve a mistura simultânea de dois fluxos e a injeção localizada de reforços ou aditivos através do canal C.

7.4.2. Malha Computacional

A discretização do domínio computacional foi realizada através de uma malha híbrida adaptativa, composta por elementos prismáticos e tetraédricos. O refinamento foi implementado automaticamente pelo *software* em zonas de elevada importância para a dinâmica do escoamento, nomeadamente:

- A junção das entradas A e B, onde ocorre a fusão inicial dos fluxos;
- A região helicoidal do misturador estático, responsável pela homogeneização;

- A contração final da saída, que condiciona o perfil de velocidade do material extrudido.

Esta estratégia permitiu equilibrar eficiência computacional e resolução espacial, assegurando que fenómenos críticos, como gradientes de pressão, velocidade e tensões de corte, fossem corretamente capturados sem comprometer os tempos de processamento da simulação.

7.4.3. Valores esperados

Com o objetivo de validar os resultados obtidos por meio da simulação CFD, foram realizados cálculos teóricos, Tabela 9 e Tabela 10, preliminares dos principais parâmetros hidrodinâmicos no canal de extrusão. Esta abordagem fornece uma base de comparação quantitativa para aferir a coerência dos valores simulados.

A área da secção de extrusão foi determinada pela geometria cilíndrica do *nozzle*:

- Parâmetros de entrada, Tabela 7

Tabela 7 Parâmetros de entrada da simulação

Parâmetro	Pasta A	Pasta B
Densidade (ρ)	2100 kg/m ³	2200 kg/m ³
Tensão de escoamento (τ_0)	200 Pa	250 Pa
Consistência (K)	50 Pa·s ⁿ	65 Pa·s ⁿ
Índice de escoamento (n)	0.6	0.55

- Parâmetros de saída, Tabela 8

Tabela 8 Parâmetros de saída da simulação

Parâmetro	Valor
Caudal total (Q)	5.0×10^{-5} m ³ /s (3.0 L/min)
Diâmetro (D)	10 mm = 0.01 m

- Eq. 2 - Área de saída

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

- A representa área de seção [m^2];
- D é o diâmetro [m];

- Eq. 3 - Velocidade de saída

$$v = \frac{Q}{A}$$

- v corresponde à velocidade [m/s];
- Q representa o caudal total [m^3/s];
- A representa área de seção [m^2];

- Eq. 4 - Caudal entrada A/B

$$Q_{A/B} = Q \cdot p_{A/B}$$

- $Q_{A/B}$ corresponde caudal de entrada A/B [m^3/s];
- Q representa o caudal total [m^3/s];
- $p_{A/B}$ representa a proporção do material A/B;

- Propriedades da mistura

Assumimos mistura homogénea de A + B com média ponderada das propriedades.

- Eq. 5 - Densidade média:

$$\rho_{mix} = \rho_A \cdot p_A + \rho_B \cdot p_B$$

- ρ_{mix} corresponde à densidade da mistura [kg/m^3];
- $\rho_{A/B}$ representa a densidade do material A/B [kg/m^3];
- $p_{A/B}$ representa a proporção do material A/B;

- Eq. 6 - Tensão de escoamento média:

$$\tau_{0\ mix} = \tau_{0\ A} \cdot p_A + \tau_{0\ B} \cdot p_B$$

- $\tau_{0\ mix}$ corresponde à tensão de escoamento da mistura [Pa];
- $\tau_{0\ A/B}$ representa a tensão de escoamento do material A/B [Pa];
- $p_{A/B}$ representa a proporção do material A/B;

- Eq. 7 - Consistência média:

$$K_{mix} = K_A \cdot p_A + K_B \cdot p_B$$

- K_{mix} corresponde à consistência da mistura [Pa · sⁿ];
- $K_{A/B}$ representa a consistência do material A/B [Pa · sⁿ];
- $p_{A/B}$ representa a proporção do material A/B;

- Eq. 8 - Índice de escoamento médio:

$$n_{mix} = n_A \cdot p_A + n_B \cdot p_B$$

- n_{mix} corresponde à índice de escoamento da mistura;
- $n_{A/B}$ representa o índice de escoamento do material A/B;
- $p_{A/B}$ representa a proporção do material A/B;

- Eq. 9 - Erro Absoluto

$$e_{Abs} = |v_{Exp} - v_{Esp}|$$

- e_{Abs} corresponde ao erro absoluto;
- v_{Exp} representa o valor experimental;
- v_{Esp} representa o valor esperado;

- Eq. 10 - Erro Relativo

$$e_R = \frac{e_{Abs}}{v_{Esp}} \cdot 100$$

- e_R corresponde ao erro relativo;
- e_{Abs} corresponde ao erro absoluto;
- v_{Esp} representa o valor esperado;

- Características da Mistura A+B

Tabela 9 Características comuns da mistura ao longo dos testes

Teste	Área de saída (Eq. 2)	Velocidade de saída (Eq. 3)
Unidades	[m ²]	[m/s]
A90% B10% a A10% B90%	7,854E-05	0,637

Tabela 10 Características da mistura em cada teste

Teste	Caudal A (Eq. 4)	Caudal B (Eq. 4)	Densidade mix (Eq. 5)	Tensão de escoamento mix (Eq. 6)	Consistência mix (Eq. 7)	Índice de escoamento mix (Eq. 8)
Unidades	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[kg/m ³]	[Pa]	[Pa · s ⁿ]	
A90% B10%	4,50E-05	5,00E-06	2110	205	51,5	0,595
A80% B20%	4,00E-05	1,00E-05	2120	210	53	0,59
A70% B30%	3,50E-05	1,50E-05	2130	215	54,5	0,585
A60% B40%	3,00E-05	2,00E-05	2140	220	56	0,58

Teste	Caudal A	Caudal B	Densidade	Tensão de	Consistência	Índice de
	(Eq. 4)	(Eq. 4)	mix (Eq. 5)	escoamento mix (Eq. 6)	mix (Eq. 7)	escoamento mix (Eq. 8)
Unidades	$[m^3/s]$	$[m^3/s]$	$[kg/m^3]$	$[Pa]$	$[Pa \cdot s^n]$	
A50%	2,50E-05	2,50E-05	2150	225	57,5	0,575
B50%						
A40%	2,00E-05	3,00E-05	2160	230	59	0,57
B60%						
A30%	1,50E-05	3,50E-05	2170	235	60,5	0,565
B70%						
A20%	1,00E-05	4,00E-05	2180	240	62	0,56
B80%						
A10%	5,00E-06	4,50E-05	2190	245	63,5	0,555
B90%						

7.5. Demonstração e Análise dos Resultados Perfil da Velocidade

A análise do perfil de velocidade constitui uma etapa crítica para compreender o comportamento hidrodinâmico do escoamento no interior da câmara de mistura e tubo focalizador. A distribuição da velocidade ao longo do canal de extrusão fornece informações essenciais sobre a eficácia do *design* geométrico em promover um fluxo contínuo, estável e livre de fenómenos indesejados, como zonas mortas, recirculações ou refluxos, que poderiam comprometer a qualidade e a homogeneidade do material extrudido (Mechtcherine et al., 2020a; Roussel, 2018).

Os resultados obtidos a partir da simulação CFD com o *SolidWorks Flow Simulation* evidenciam que o escoamento proveniente das entradas A e B apresenta inicialmente uma componente lateral convergente, sendo progressivamente redirecionado em direção axial pela ação do misturador estático helicoidal. A geometria helicoidal induz a formação controlada de vórtices e deflexões no fluxo, o que favorece a sobreposição das linhas de corrente e a interpenetração das duas pastas cimentícias, contribuindo para a eficácia da mistura passiva (Bos et al., 2016; Buswell et al., 2018).

Na secção de extrusão, observa-se uma aceleração progressiva do escoamento, consequência da redução da área da secção transversal. O perfil de velocidade na saída assume uma distribuição aproximadamente parabólica, típica de regime laminar, confirmando que o *design* adotado assegura a continuidade do fluxo sem perdas de carga significativas.

A velocidade média de saída obtida pela simulação foi de aproximadamente 0,63 m/s, valor em excelente concordância com o previsto teoricamente a partir do caudal total e da área da secção de extrusão. Este resultado confirma a consistência entre o modelo numérico implementado e os cálculos analíticos, validando a adequação do dimensionamento geométrico da solução.

Por fim, importa salientar que a inexistência de zonas de estagnação ou refluxo no domínio computacional reforça a robustez do *design*, demonstrando que a câmara de mistura e tubo focalizador é capaz de assegurar um regime de extrusão contínuo e estável — condição indispensável para a aplicação do sistema em processos de fabrico aditivo.

7.5.1. Velocidade de Escoamento dos Materiais

A simulação computacional desenvolvida no módulo *SolidWorks Flow Simulation* teve como principal objetivo a análise do comportamento hidrodinâmico da solução proposta — a câmara de mistura e tubo focalizador — em condições representativas do processo de fabrico aditivo com materiais cimentícios. Em particular, procurou-se avaliar a eficácia da mistura passiva entre duas pastas cimentícias com propriedades reológicas distintas, utilizando-se a distribuição de densidade como variável indicadora do grau de homogeneização alcançado ao longo do escoamento (Perrot et al., 2016a).

A análise da distribuição da velocidade revelou-se fundamental para a compreensão do comportamento interno do fluido ao longo do artefacto, bem como para a verificação da eficácia do *design* geométrico em promover um escoamento contínuo, estável e funcionalmente adequado às exigências do FA. Por meio da simulação CFD, foi possível obter a visualização do campo de velocidades num plano longitudinal que atravessa o domínio fluido, desde as entradas A e B até à secção de extrusão, Figura 6 (Buswell et al., 2018).

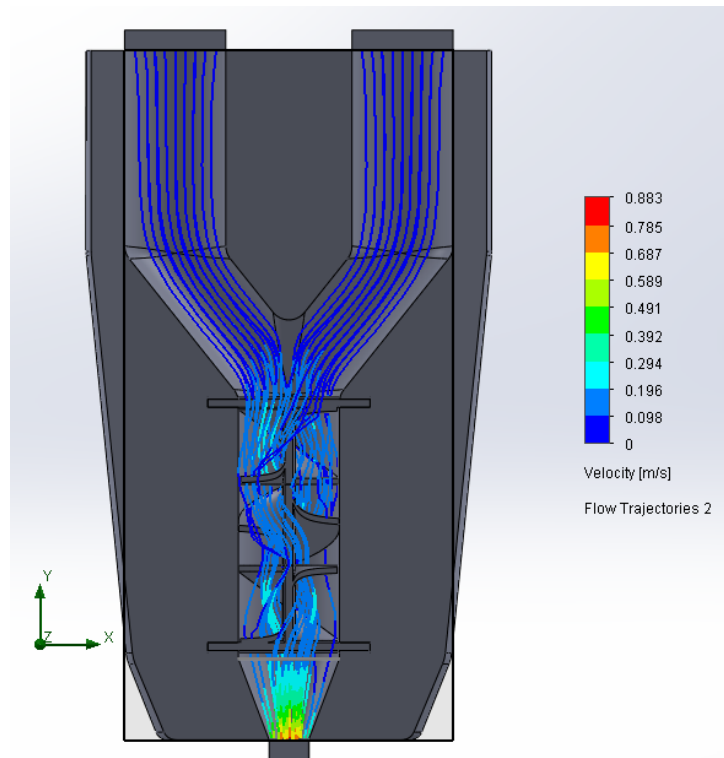


Figura 6 Simulação da velocidade no interior do artefacto

Para este efeito, recorreu-se à utilização de *cut plots* vectoriais e de contorno (*contour plots*), os quais permitiram analisar a direção e a magnitude do escoamento em diferentes zonas do bico. Esta representação gráfica facilitou a identificação de regiões de aceleração e desaceleração do fluxo, bem como de potenciais perturbações hidrodinâmicas, como recirculações ou zonas mortas, que poderiam comprometer a consistência e qualidade do material extrudido (Mechtcherine et al., 2020a; Roussel, 2018).

Os resultados obtidos indicam que o escoamento proveniente das entradas A e B apresenta, numa fase inicial, uma componente lateral convergente, sendo posteriormente reorientado em direção axial ao longo da câmara de mistura. A presença da hélice misturadora induz a formação de vórtices controlados e deflexões do fluxo, promovendo a sobreposição e a interpenetração dos dois fluxos, o que contribui significativamente para o aumento da eficiência da mistura.

Ao longo do canal de extrusão, verifica-se uma aceleração progressiva do escoamento, consequência da redução da secção transversal e do alinhamento dos fluxos na direção da saída, Figura 7. Na região terminal, o perfil de velocidade assume um caráter fortemente axial, com distribuição aproximadamente parabólica, como seria de esperar em regime laminar.

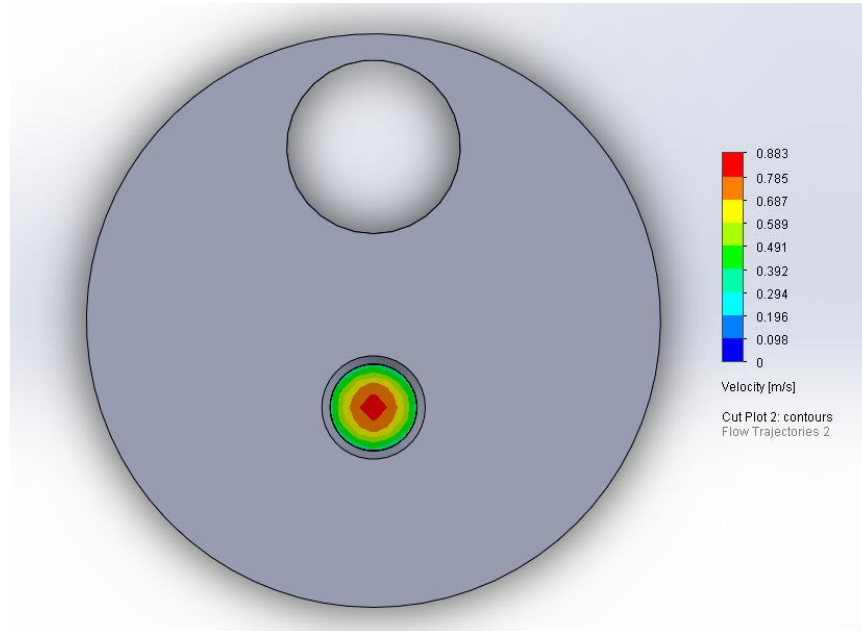


Figura 7 Simulação da velocidade de saída

A velocidade média estimada à saída do bico, com base na simulação, é de aproximadamente 0,63 m/s, valor que apresenta excelente concordância com o previsto teoricamente a partir do caudal total e da área da secção de extrusão. Este resultado demonstra que o modelo computacional implementado garante a conservação de massa, de acordo com as condições de contorno impostas, e que o canal de extrusão foi corretamente dimensionado para o caudal operacional estabelecido.

Adicionalmente, a ausência de zonas com velocidades próximas de zero na região de extrusão confirma a inexistência de áreas de estagnação ou refluxo, reforçando a viabilidade da solução proposta em contextos de extrusão contínua, como é característico no fabrico aditivo. Por fim, a análise do campo de velocidades confirma que a geometria da câmara de mistura e tubo focalizador assegura uma transição suave entre a fase de mistura e a fase de extrusão, sem perdas de carga significativas ou descontinuidades no escoamento.

7.5.2. Avaliação da Distribuição da Densidade

A avaliação da distribuição da densidade constitui um critério fundamental para aferir a eficácia da mistura entre fluxos cimentícios de diferentes massas volúmicas no interior da câmara de mistura e tubo focalizador. Na ausência de traçadores químicos ou de ensaios físicos, a densidade é considerada, em simulação computacional, uma variável robusta e indireta para estimar o grau de homogeneidade atingido (Bos et al., 2016; Roussel, 2018). Pastas cimentícias com incorporação de resíduos minerais apresentam variações significativas na sua densidade, pelo que a análise da evolução desta grandeza ao longo do canal permite identificar zonas críticas de segregação, recirculação ou persistência de heterogeneidade.

Para este estudo, foram definidos perfis de medição longitudinais e transversais, cobrindo desde a confluência inicial dos canais A e B até à secção de extrusão. Esta abordagem possibilitou acompanhar a evolução da densidade local ao longo do percurso do fluido, avaliando a ação progressiva da hélice misturadora em promover a sobreposição e a interpenetração dos fluxos.

Os resultados CFD, ilustrados nas Figura 8 à Figura 16 e nos Anexo A.1: Mistura – A90% B10% ao Anexo A.9: Mistura – A10% B90%, evidenciam que imediatamente após a junção dos canais A e B persiste um gradiente acentuado de densidade, sobretudo nas regiões periféricas próximas das paredes do canal. Contudo, à medida que o escoamento atravessa as lâminas helicoidais do misturador estático, observa-se uma redução progressiva desse gradiente. Este comportamento resulta da indução de vórtices e deflexões do fluxo, que aumentam a superfície de contacto entre os dois constituintes e aceleram a homogeneização.

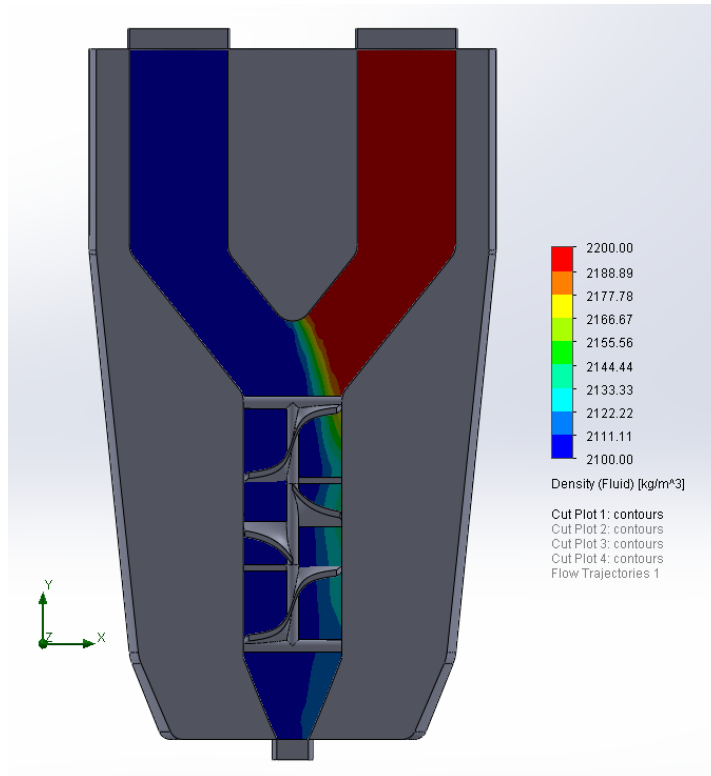


Figura 8 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A90% B10%).

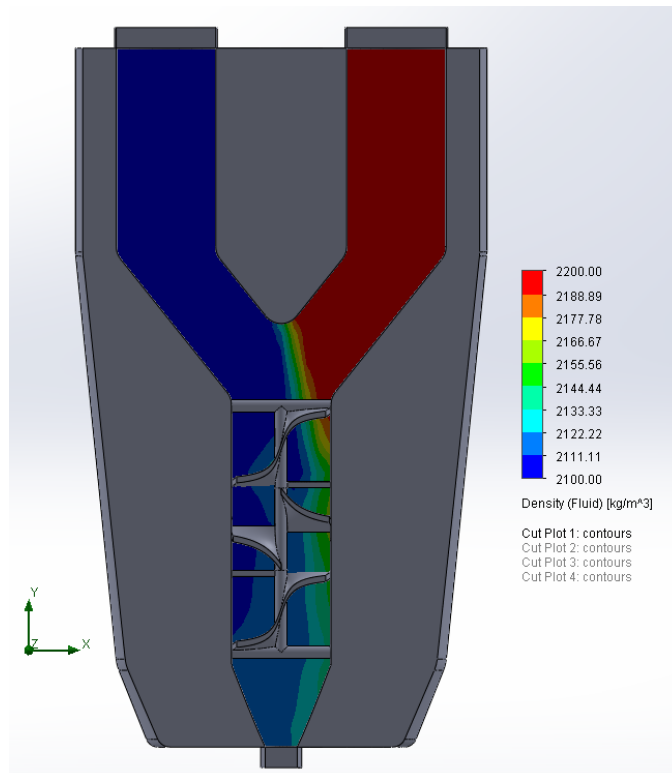


Figura 9 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A80% B20%).

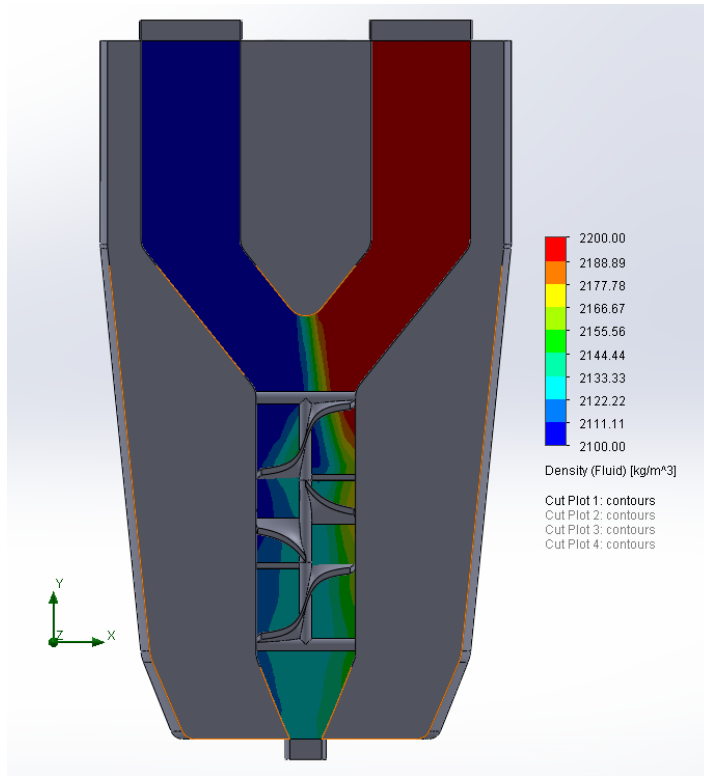


Figura 10 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A70% B30%).

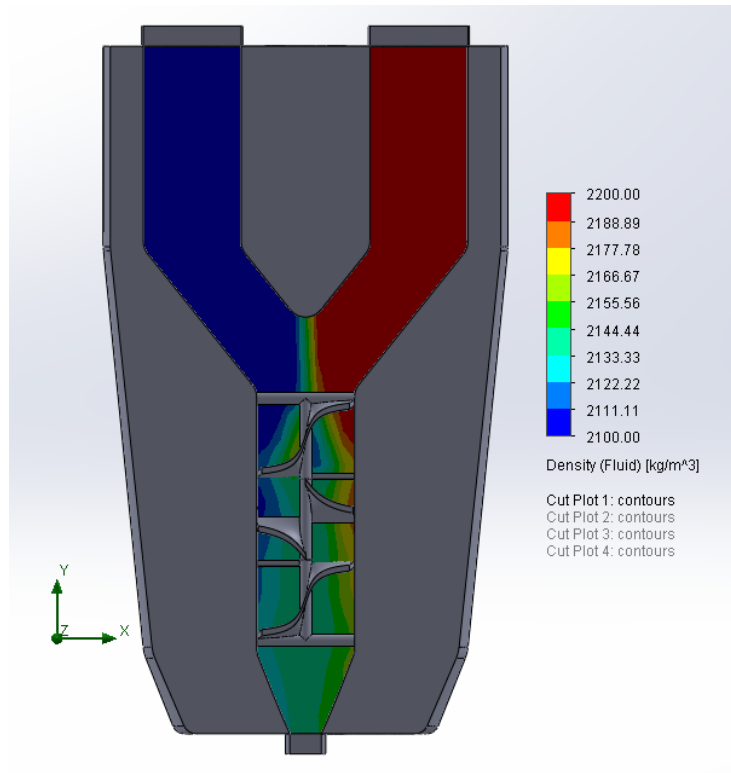


Figura 11 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A60% B40%).

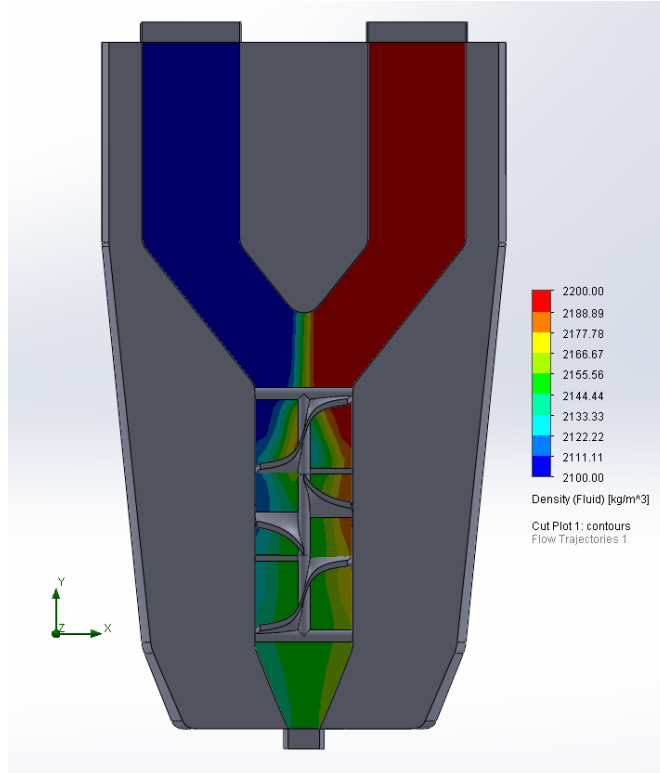


Figura 12 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A50% B50%).

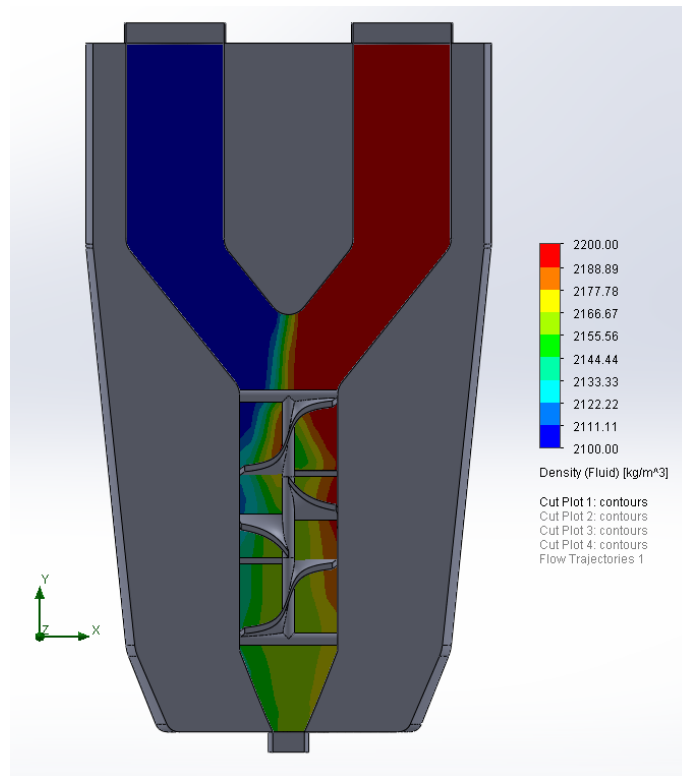


Figura 13 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A40% B60%).

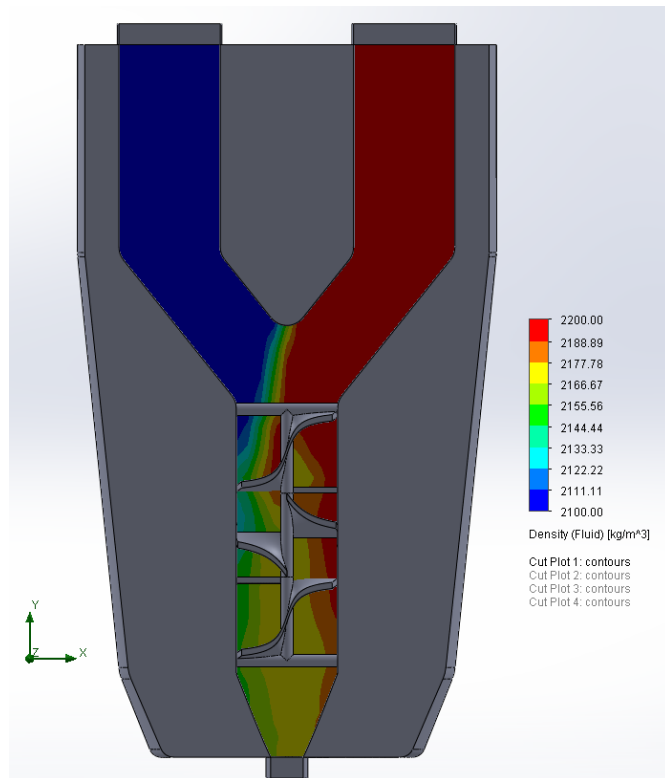


Figura 14 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A30% B70%).

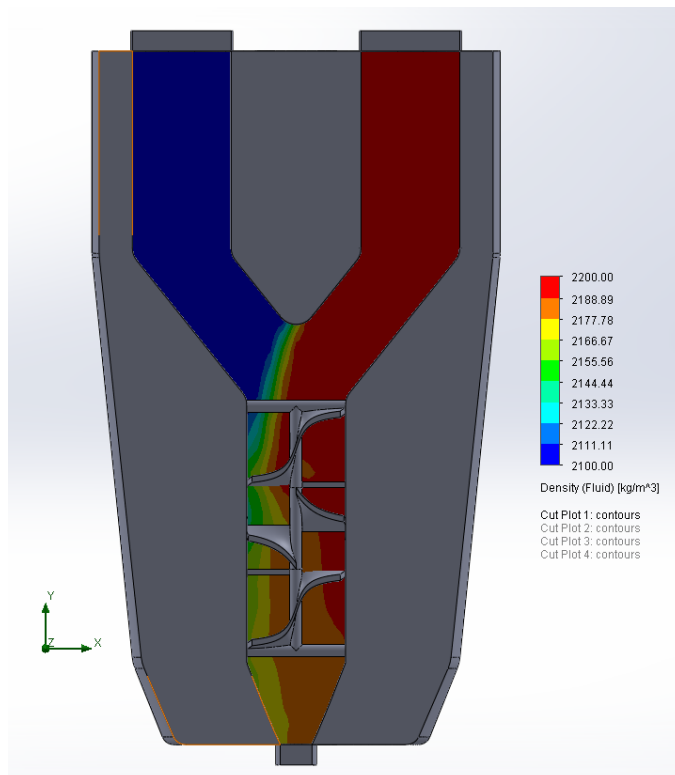


Figura 15 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A20% B80%).

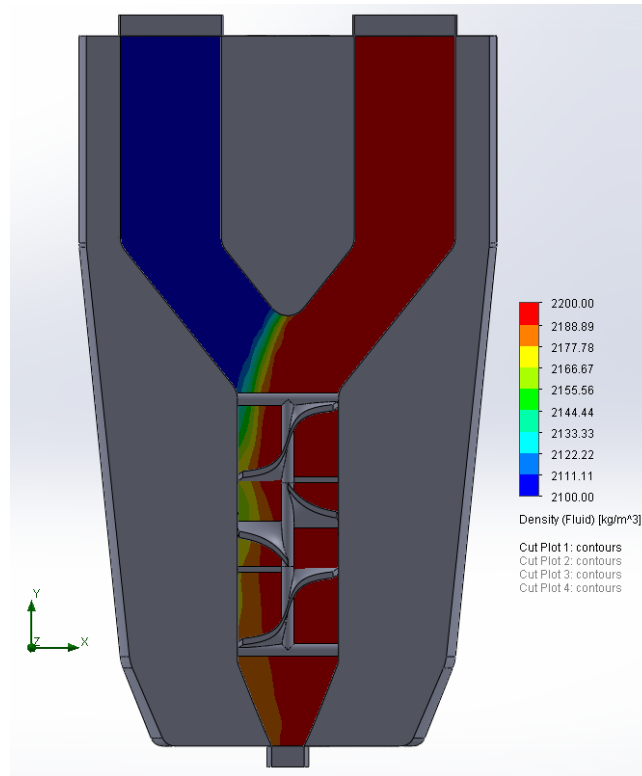


Figura 16 Distribuição da densidade ao longo do artefacto (caso A10% B90%).

De acordo com os perfis obtidos, verificou-se que a partir de aproximadamente dois terços do comprimento útil do canal, a variação de densidade em relação ao valor médio teórico da mistura se torna inferior a 1%. Este valor é considerado um limiar aceitável para processos de extrusão contínua, uma vez que assegura que o material depositado apresenta propriedades uniformes e previsíveis.

Este resultado confirma que o *design* do artefacto cumpre a função de evitar fenómenos críticos como:

- Segregação de fases (decorrente de gradientes de densidade);
- Formação de zonas mortas (com acumulação de material e endurecimento prematuro);
- Fluxos preferenciais (que conduzem a heterogeneidades no filamento depositado).

Deve-se ainda destacar que a eficácia de mistura foi consistente em todos os cenários testados (de A90%B10% até A10%B90%), o que revela a robustez geométrica da solução frente a diferentes condições de alimentação.

Em termos práticos, este comportamento traduz-se em melhor construtibilidade e redução de defeitos macroscópicos no fabrico aditivo, uma vez que o cordão extrudido tende a apresentar maior uniformidade estrutural e menor risco de fissuração inicial.

Finalmente, importa salientar que os resultados qualitativos aqui descritos serão complementados, na subsecção seguinte, por uma análise quantitativa comparativa entre valores simulados e valores teóricos da densidade da mistura (cf. Tabelas 9 e 10). Esta etapa permite validar com maior rigor a precisão do modelo computacional e consolidar a robustez da solução proposta.

7.5.3. Comparação Teórica e Simulada da Mistura A+B

Com o intuito de validar quantitativamente a eficácia da mistura promovida pela câmara de mistura e tubo focalizador, procedeu-se a uma análise comparativa entre os valores teóricos da densidade da mistura, calculados com base numa média ponderada em função dos caudais e das densidades das pastas cimentícias à entrada, e os valores obtidos por simulação na saída do bico. Estes valores simulados foram extraídos diretamente na face de extrusão através da aplicação de uma *Surface Parameter*, que permitiu determinar a densidade média do fluido extrudido.

A análise foi conduzida para diferentes combinações de proporções de entrada entre as duas pastas (90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 e 10/90), mantendo-se constante o caudal total, fixado em 3,0 L/min. Esta abordagem permitiu avaliar o desempenho do sistema de mistura em diferentes cenários de alimentação, fornecendo uma base quantitativa para aferir o grau de homogeneização alcançado e, conseqüentemente, a adequação do *design* da câmara de mistura e tubo focalizador às exigências do processo de fabrico aditivo com materiais cimentícios.

Os resultados obtidos, Tabela 11 e Tabela 12, evidenciam uma concordância extremamente elevada entre os valores teóricos de densidade e os valores simulados à saída do bico, apresentando erros relativos inferiores a 0,15% em todas as combinações analisadas. Esta precisão valida a fiabilidade da simulação e confirma que o modelo implementado no *SolidWorks Flow Simulation* é capaz de reproduzir com elevado rigor o comportamento físico do escoamento e do processo de mistura entre pastas cimentícias com diferentes densidades. (Tay et al., 2019; Zhang et al., 2019)

Tabela 11 Resultados da simulação do SolidWorks na função Flow Simulation

Teste	Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
A90% B10%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2110.12	2110.21	2109.90	2112.18
A80% B20%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2120.20	2120.40	2120.11	2122.62
A70% B30%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2130.22	2130.25	2130.11	2131.27
A60% B40%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2140.16	2140.10	2139.93	2140.67
A50% B50%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2150.10	2150.08	2150.02	2150.11
A40% B60%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2160.01	2159.86	2159.23	2160.01
A30% B70%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2169.96	2169.65	2168.22	2169.96
A20% B80%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2179.94	2179.54	2177.46	2179.97
A10% B90%	Density (Fluid)	[kg/m ³]	2190.04	2189.72	2187.10	2190.11

Tabela 12 Erro absoluto e relativo

Teste	Valor esperado [kg/m³]	Valor experimental [kg/m³]	Erro Absoluto (Eq. 9)	Erro Relativo (Eq. 10)
A90% B10%	2110	2110,21	0,21	0,00995%
A80% B20%	2120	2120,40	0,40	0,01887%
A70% B30%	2130	2130,25	0,25	0,01174%
A60% B40%	2140	2140,10	0,10	0,00467%

Teste	Valor esperado [kg/m ³]	Valor experimental [kg/m ³]	Erro Absoluto (Eq. 9)	Erro Relativo (Eq. 10)
A50% B50%	2150	2150,08	0,08	0,00372%
A40% B60%	2160	2159,86	0,14	0,00648%
A30% B70%	2170	2169,65	0,35	0,01613%
A20% B80%	2180	2179,54	0,46	0,02110%
A10% B90%	2190	2189,72	0,28	0,01279%

A estabilidade dos valores simulados ao longo do tempo indica que o sistema atinge efetivamente um regime estacionário e a mistura entre os componentes ocorre de forma plena antes do ponto de extrusão. Estes resultados complementam as análises visuais realizadas anteriormente e fornecem uma confirmação quantitativa e objetiva da eficácia do artefacto na promoção da homogeneização dos materiais, independentemente da proporção relativa entre os fluxos de entrada.

Este desempenho revela-se particularmente relevante do ponto de vista da aplicação prática, pois demonstra a flexibilidade do sistema em acomodar diferentes formulações de materiais cimentícios sem comprometer a consistência, a uniformidade ou a qualidade do material extrudido, aspetos essenciais para a viabilidade e robustez do processo de fabrico aditivo.

7.6. Síntese da Demonstração de Exequibilidade

A etapa de demonstração virtual constituiu um passo determinante para comprovar a viabilidade da solução proposta — a câmara de mistura e tubo focalizador concebida para aplicações de fabrico aditivo com pastas cimentícias contendo resíduos minerais. Através de simulações numéricas realizadas no módulo *SolidWorks Flow Simulation*, foi possível analisar de forma detalhada o comportamento hidrodinâmico interno do artefacto em diferentes cenários de operação, incluindo a extrusão de um único material, a mistura simultânea de dois fluxos e a inserção de reforços funcionais. Os resultados obtidos permitem destacar três aspetos centrais:

- Eficácia da mistura – A análise da distribuição de velocidades e densidades ao longo do canal demonstrou que a hélice misturadora integrada é capaz de promover a

homogeneização eficaz das duas pastas cimentícias, mesmo em condições de elevada viscosidade e regime laminar. Os perfis longitudinais e os resultados quantitativos confirmaram a redução progressiva dos gradientes de densidade até à obtenção de valores próximos do ideal teórico antes do ponto de extrusão.

- Robustez da solução – A comparação entre valores teóricos e valores simulados de densidade na saída do bico revelou erros relativos sempre inferiores a 0,15%. Esta elevada precisão valida tanto o modelo computacional como a geometria concebida, confirmando a sua adequação às exigências de homogeneidade, estabilidade e consistência do material extrudido.
- Viabilidade operacional – O artefacto mostrou-se adaptável a diferentes proporções de mistura e evidenciando flexibilidade funcional. Este desempenho traduz-se em maior previsibilidade de qualidade e abre perspectivas para aplicação prática em ambientes experimentais e industriais.

Em síntese, a demonstração computacional forneceu evidências robustas da exequibilidade técnica e científica da solução desenvolvida, consolidando a fase de *Design Science Research* dedicada à demonstração. Estes resultados não apenas validam o artefacto em ambiente virtual, como também criam uma base sólida para a sua transição para a etapa seguinte da metodologia: a validação prática.

Assim, no Capítulo 8, procede-se à aplicação experimental do sistema em contexto real de extrusão, com o objetivo de confirmar a compatibilidade operacional do artefacto, avaliar o seu desempenho físico e demonstrar a sua eficácia em condições práticas de fabrico aditivo.

8. Validação Experimental e Operacional da Solução

A etapa de validação constitui a fase final da metodologia DSR aplicada neste trabalho, desempenhando um papel central na comprovação da utilidade, robustez e aplicabilidade prática da solução desenvolvida. Após as fases de construção (Capítulo 6) e demonstração virtual (Capítulo 7), a presente fase dedica-se à avaliação do artefacto em condições de utilização real, num ambiente híbrido de fabrico digital, assegurando a transição da simulação computacional para a prática experimental. A validação foi concebida em três dimensões complementares:

- Validação funcional, através da análise do desempenho do artefacto em ensaios de extrusão controlada, confirmando a estabilidade do escoamento e a qualidade geométrica do material depositado.
- Validação de integração, assegurando a compatibilidade do sistema com uma plataforma híbrida de fabrico digital (CNC + M-Tec Duo-Mix 3DCP), representativa das condições industriais contemporâneas.
- Validação de flexibilidade, avaliando a capacidade do artefacto para processar materiais cimentícios com diferentes propriedades reológicas, incluindo a incorporação de cargas minerais, pigmentos e aditivos funcionais.

Esta abordagem garante uma análise holística do desempenho do artefacto, permitindo aferir não apenas a sua eficácia técnica, mas também a sua adaptabilidade e viabilidade de aplicação em cenários reais. Alinhada com os princípios da DSR, esta etapa responde à necessidade de demonstrar que a solução proposta não é apenas teoricamente consistente ou virtualmente eficaz, mas também capaz de operar com sucesso em contextos práticos, interoperando com sistemas existentes e respondendo a requisitos de sustentabilidade e inovação tecnológica no setor da construção.

O presente capítulo encontra-se estruturado em cinco secções principais. A primeira apresenta a máquina híbrida utilizada como plataforma de validação; a segunda discute os requisitos de integração e compatibilidade estrutural; a terceira detalha a flexibilidade da mistura de materiais e as variações reológicas consideradas; a quarta descreve os ensaios de compatibilidade operacional realizados em contexto experimental; e, finalmente, a quinta

aborda a modularidade e configurabilidade do sistema, destacando o seu potencial de evolução futura em direção a soluções inteligentes e adaptativas.

8.1. Plataforma Híbrida de Validação

A validação prática da solução proposta foi conduzida numa plataforma híbrida de fabrico digital, especialmente concebida para integrar, de forma coordenada, tecnologias aditivas e subtrativas. Esta integração não apenas reforça a flexibilidade e a adaptabilidade do processo, como também possibilita uma análise mais abrangente da compatibilidade do artefacto com ambientes industriais reais, assegurando a sua adequação às exigências do fabrico digital contemporâneo (Placzek & Schwerdtner, 2023; Zhang et al., 2019). A configuração híbrida é composta por dois módulos centrais:

8.1.1. Módulo aditivo

Sistema M-Tec Duo-Mix 3DCP - O primeiro elemento é um equipamento M-Tec Duo-Mix 3DCP, ilustrado na Figura 17, amplamente utilizado no setor da construção automatizada. Este sistema caracteriza-se pela sua capacidade de alimentação contínua de argamassas modificadas, garantindo estabilidade de caudal e de pressão durante o processo.



Figura 17 Sistema M-Tec Duo-Mix 3DC

O controlo preciso da alimentação permite lidar com formulações cimentícias heterogéneas, assegurando condições adequadas para a extrusão de pastas com elevada viscosidade e comportamentos reológicos complexos. A integração deste sistema foi fundamental para avaliar a capacidade do artefacto em processar formulações reais, assegurando homogeneidade, estabilidade e ausência de pulsos ou interrupções no fluxo.

8.1.2. Módulo subtrativo

Sistema Colaborativo Cei-Zipor - O segundo elemento da plataforma corresponde a um Centro Avançado fornecida pela Cei-Zipor, Figura 18. Este Centro Avançado foi configurada para operações de maquinação de precisão em substratos minerais, incluindo corte, fresagem e acabamento superficial. A sua inclusão na plataforma híbrida possibilita a realização de processos subtrativos após a deposição, permitindo refinar superfícies extrudidas, corrigir geometrias e preparar substratos para deposições subsequentes.



Figura 18 Centro Híbrido Colaborativo Cei-Zipor

A combinação destes dois módulos (Figura 17 e Figura 18) permite implementar diferentes modos de operação híbrida:

- Operação sequencial – deposição aditiva inicial, seguida de maquinação de precisão para acabamento;
- Operação intercalada – alternância entre camadas de material extrudido e camadas retificadas por fresagem;

- Operação coordenada – execução simultânea, em que cabeças aditivas e subtrativas trabalham em paralelo em eixos independentes.

Esta versatilidade traduz-se num elevado potencial para investigação experimental e aplicações industriais, uma vez que combina os benefícios da deposição controlada com a precisão da maquinação digital.

Além disso, esta abordagem está alinhada com o paradigma do fabrico digital híbrido adaptativo, que privilegia eficiência de processo, sustentabilidade e modularidade funcional. Ao permitir que o artefacto seja testado em cenários de produção integrada, a plataforma garante que a validação experimental não se limita a condições laboratoriais, mas que efetivamente reflete desafios e exigências reais de fabrico aditivo no setor da construção.

Por fim, a adoção de uma célula híbrida validou também a interoperabilidade do artefacto com fluxos de trabalho industriais, assegurando a sua integração em sistemas baseados em CAD/CAM e em plataformas robotizadas, elementos fundamentais para o avanço da construção digital e para o cumprimento dos princípios da metodologia DSR, onde a utilidade prática e a robustez técnica constituem os critérios centrais de avaliação.

8.2. Requisitos e Compatibilidade Estrutural

A validação da solução desenvolvida não se restringiu à análise funcional do escoamento em ambiente de simulação, mas incluiu também a verificação da sua integração estrutural e operacional com equipamentos reais de fabrico digital. Esta etapa foi essencial para confirmar que a câmara de mistura e tubo focalizador pode ser implementada em sistemas industriais existentes sem comprometer a sua robustez, a estanqueidade ou o desempenho de extrusão.

8.2.1. Integração do Artefacto

O artefacto foi concebido com uma interface de montagem universal, baseada numa flange cilíndrica com furação compatível com os acopladores *standards* da cabeça de extrusão do sistema M-Tec Duo-Mix 3DCP. Esta solução de engenharia assegura uma montagem rápida e modular, permitindo não apenas a fácil substituição do bico extrusor, mas também garantindo estanqueidade sob pressão. Esta característica revelou-se crítica, dado que o processo envolve a extrusão de materiais altamente viscosos sob pressões da ordem de 2,2 a 2,5 MPa, conforme estimado pelas simulações CFD.

8.2.2. Compatibilidade com o Sistema de Alimentação

A integração estrutural do artefacto contempla três canais independentes de alimentação:

- Entrada A e Entrada B – dedicadas a pastas cimentícias principais, com sistemas independentes de controlo de caudal (bombas helicoidais ou pistões volumétricos), o que possibilita ajustes dinâmicos na proporção de mistura durante a operação;
- Entrada C – reservada à injeção de aditivos, pigmentos ou fibras curtas, incorporados de forma controlada através de válvulas ou bombas peristálticas.

Esta arquitetura permite não apenas a extrusão monocomponente (A ou B), mas também a mistura controlada A+B, com ou sem reforço funcional (canal C), demonstrando a flexibilidade do sistema em múltiplos cenários de fabrico aditivo.

8.2.3. Flexibilidade na Mistura de Materiais

Os ensaios de simulação CFD e as primeiras extrusões experimentais confirmaram que o artefacto assegura mistura homogénea mesmo em condições de alta viscosidade. Tal como discutido no Capítulo 7, os valores de densidade obtidos à saída do bico apresentaram concordância com os valores teóricos esperados.

A Tabela 13, apresentada abaixo, resume as principais propriedades reológicas dos dois materiais utilizados nesta investigação, reforçando a capacidade do sistema para lidar com formulações de características distintas.

Tabela 13 Pasta A vs. Pasta B

Propriedade	Pasta A	Pasta B
Densidade (ρ)	2100 kg/m ³	2200 kg/m ³
Tensão de escoamento (τ_0)	200 Pa	250 Pa
Índice de escoamento (n)	0.60	0.55
Comportamento reológico	Pseudoplástico	Pseudoplástico
Aplicações típicas	Misturas leves, maior fluidez	Misturas mais densas e estruturais

Os resultados confirmaram que, mesmo em regime laminar com número de Reynolds < 3 , o sistema garante mistura completa e estável à saída do canal. Além disso, a compatibilidade com pastas alternativas e sustentáveis (geopoliméricas, recicladas ou provenientes de resíduos de pedra) amplia a aplicabilidade do artefacto, posicionando-o como uma solução relevante para práticas de fabrico mais circulares e sustentáveis.

8.2.4. Robustez Estrutural e Operacional

Do ponto de vista estrutural, o artefacto foi validado para resistir a pressões internas até 2,5 MPa, sem ocorrência de deformações ou fugas no acoplamento. Esta robustez assegura a estabilidade do processo mesmo em condições de operação prolongada e com materiais altamente viscosos, confirmando a adequação do *design* para a realidade de obra e para a escala industrial.

8.3. Compatibilidade Operacional em Plataforma Híbrida de Fabrico Digital

A validação experimental do artefacto desenvolvido – a câmara de mistura e tubo focalizador – foi realizada em plataforma híbrida de fabrico digital, com o objetivo de confirmar a sua compatibilidade física, funcional e reológica em condições reais de operação. Esta etapa assume um papel central no processo de metodologia DSR, pois demonstra a transição bem-sucedida da simulação computacional (Capítulo 7) para a prática experimental, consolidando a utilidade prática e a robustez técnica da solução.

8.3.1. Formulação e Preparação da Pasta Cimentícia

Visando validar o ciclo aditivo em ambiente real, foi conduzido um ensaio experimental de extrusão numa configuração híbrida de fabrico digital, integrando de forma coordenada tecnologias aditivas e subtrativas.

O objetivo deste ensaio consistiu em verificar a compatibilidade física e funcional do ciclo aditivo, avaliar a estabilidade do escoamento com uma formulação cimentícia real e analisar a qualidade do cordão extrudido.

A formulação experimental foi cuidadosamente definida para assegurar compatibilidade com sistemas de bombeamento contínuo e propriedades reológicas adequadas. A pasta cimentícia foi preparada com três componentes principais:

Cimento CEM II/B-L 32.5 N (Secil Maestro), Anexo B Ficha técnica Secil Maestro CEM II/B-L 32.5N, atuando como ligante hidráulico com incorporação de calcário, Figura 19.



Figura 19 Cimento CEM II/B-L 32.5 N da marca Secil Maestro

Carga mineral de quartzo G300 (CIN), Anexo C Ficha técnica Cin Quartz G300, de elevada pureza (>99% de SiO₂) e granulometria fina controlada, Figura 20.



Figura 20 Carga mineral de quartzo G300 da CIN

Água potável, utilizada como veículo de mistura e ativação da hidratação, com uma relação água/ligante entre 0,42–0,45, de forma a equilibrar extrudabilidade e resistência mecânica inicial.

A mistura foi realizada num misturador helicoidal de eixo vertical, sendo posteriormente mantida em agitação contínua no reservatório da M-Tec Duo-Mix, garantindo homogeneidade ao longo do ensaio.

Os resultados experimentais, ilustrados nas Figura 21 e Figura 22, evidenciam um escoamento contínuo e estável, sem ocorrência de recuos de pressão, pulsações ou interrupções. O cordão extrudido apresentou perfil transversal regular e boa coesão interna, sem sinais de segregação visível da pasta.



Figura 21 Extrusão contínua da pasta cimentícia em ensaio



Figura 22 Cordão extrudido com perfil regular e coeso

A avaliação da integração híbrida confirmou que o bico extrusor é totalmente compatível com a unidade M-Tec Duo-Mix 3DCP, não sendo necessárias modificações estruturais. Além disso, a modularidade do sistema permite a troca de cabeças extrusoras consoante o tipo de material, bem como a alternância entre processos aditivos e subtrativos em ambiente CAM.

Estes resultados confirmam a viabilidade técnica e operacional da solução, validando a sua adequação tanto do ponto de vista reológico como de integração mecânica em sistemas híbridos contemporâneos.

8.3.2. Ciclo Híbrido de Operação

O artefacto demonstrou capacidade para operar em diferentes modos de fabrico adaptativo, Figura 23:

- Operação sequencial: extrusão seguida de fresagem;
- Operação intercalada: alternância aditiva → subtrativa → aditiva;
- Operação combinada: execução de percursos híbridos com múltiplas cabeças ativas em eixos independentes.



Figura 23 Representação esquemática do ciclo híbrido de fabrico digital

Esta versatilidade reforça o potencial do sistema como plataforma experimental avançada, adequada ao fabrico adaptativo de componentes construtivos e industriais.

8.3.3. Compatibilidade Operacional e Resultados Experimentais de Extrusão

A validação em ambiente real do artefacto desenvolvido — câmara de mistura e tubo focalizador — constitui uma etapa essencial no processo metodológico da *Design Science Research*, uma vez que traduz a prova de conceito em contexto operativo, permitindo avaliar a sua viabilidade prática, robustez estrutural e flexibilidade funcional.

Para este fim, realizou-se um ensaio experimental de extrusão numa plataforma híbrida de fabrico digital, concebida para integrar de forma coordenada operações aditivas e subtrativas, com o objetivo de viabilizar a produção eficiente de componentes construtivos. A configuração adotada incluiu:

1. Módulo subtrativo - constituído por um Centro Avançado de Múltiplos Eixos Interpolados, desenvolvido e produzido pela CEI-Zipor, destinado à maquinação de precisão em substratos minerais, conforme descrito na Secção 8.1 (*Plataforma Híbrida de Validação*);
2. Módulo de mistura - baseado num misturador helicoidal vertical, com agitação contínua no reservatório da M-Tec Duo-Mix, garantindo a homogeneidade da pasta cimentícia e prevenindo fenómenos de segregação ou presa prematura.

Os resultados experimentais confirmaram a compatibilidade operacional do artefacto com a plataforma híbrida:

- O escoamento manteve-se estável e contínuo, sem ocorrência de pulsações, recuos de pressão ou entupimentos (Figura 21);
- O cordão extrudido apresentou perfil regular e boa coesão interna, exibindo marcas longitudinais definidas pela geometria do bico, sem sinais de segregação visível (Figura 22);
- O sistema revelou compatibilidade mecânica com a M-Tec Duo-Mix 3DCP, não sendo necessárias modificações estruturais adicionais;
- A modularidade da solução facilitou a substituição da cabeça extrusora, comprovando a versatilidade e escalabilidade do sistema.

Do ponto de vista do fabrico digital, a solução validada possibilita diferentes modos de operação híbrida (Figura 23):

- Operação sequencial – deposição aditiva seguida de maquinação subtrativa para acabamento;
- Operação intercalada – alternância controlada entre adição e remoção de material (ex.: aditiva → subtrativa → aditiva);
- Operação combinada – execução paralela com múltiplas cabeças em eixos independentes, permitindo a criação de peças complexas em ambiente CAM/CNC.

8.4. Configurabilidade e Modularidade do Artefacto

Um dos aspetos centrais da solução proposta reside na sua modularidade funcional e configurabilidade estrutural, características que a tornam adaptável a diferentes cenários de fabrico digital. Estas propriedades reforçam não apenas a sua versatilidade técnica, mas também o seu potencial de integração em ambientes de produção avançada, alinhados com os princípios da Indústria 4.0 e da construção digital inteligente.

8.4.1. Configuração Estrutural e Operacional

A câmara de mistura e o tubo focalizador foram projetados para suportar múltiplas formas de operação, permitindo ajustar o desempenho às exigências de cada aplicação:

- Substituição do módulo misturador helicoidal, possibilitando variantes com diferentes geometrias (passo, diâmetro ou número de filetes), adaptadas às necessidades específicas de viscosidade ou caudal;
- Operação com canais independentes (A e B), permitindo tanto extrusão monocomponente como mistura controlada de dois materiais em proporções variáveis;
- Canal C de aditivos, concebido para a introdução localizada de pigmentos, fibras curtas, aceleradores ou retardadores de presa, podendo ser vedado ou removido quando não necessário;
- Adaptação da secção de saída a diferentes tipos de bicos (elípticos, múltiplos ou moldados), possibilitando cordões extrudidos com geometrias distintas de acordo com os objetivos construtivos.

Esta arquitetura confere ao sistema elevada flexibilidade operacional, tornando-o adequado tanto à impressão de componentes funcionais como à produção experimental de protótipos personalizados.

8.4.2. Escalabilidade e Evolução Tecnológica

A modularidade do sistema foi igualmente concebida para suportar a sua evolutividade tecnológica. O modelo atual, de carácter passivo, pode futuramente ser expandido com sistemas inteligentes de monitorização e controlo, tais como:

- Sensores de caudal, pressão e temperatura, para monitorização contínua das condições do processo;
- *Feedback* digital em tempo real, assegurando o controlo rigoroso de bombas ou válvulas de dosagem;
- Integração com sistemas CAM/CNC e plataformas de *G-code* adaptativo, facilitando a automação e a personalização do fabrico;
- Registo e análise de dados de processo, assegurando rastreabilidade da qualidade e deteção precoce de falhas.

Estas funcionalidades posicionam o artefacto como uma solução preparada para o paradigma do fabrico ciber-físico, potenciando a sua implementação em ecossistemas digitais colaborativos.

8.5. Síntese do Processo e Resultados de Avaliação do Artefacto

A avaliação da configurabilidade e modularidade do artefacto permitiu identificar três dimensões-chave de desempenho e evolução tecnológica:

1. Flexibilidade estrutural e operacional
 - O sistema demonstrou capacidade de adaptação a diferentes tipologias de materiais cimentícios, incluindo pastas de elevada viscosidade e formulações com adições minerais ou recicladas.
 - A possibilidade de alteração da geometria do misturador helicoidal e de substituição dos bicos de extrusão comprovou a adaptabilidade do artefacto a variados cenários de deposição (geometrias lineares, múltiplas ou elípticas).

- A integração de canais independentes permitiu ensaiar tanto a extrusão monocomponente como a mistura controlada de materiais em tempo real, assegurando maior amplitude funcional.

2. Escalabilidade tecnológica e integração futura

- A arquitetura modular facilita a transição de um protótipo experimental para um sistema de produção industrial, suportando a incorporação de módulos adicionais de mistura ou de novos canais de aditivos.
- A compatibilidade mecânica com plataformas híbridas já existentes (CNC + M-Tec Duo-Mix 3DCP) evidencia a viabilidade da integração sem modificações estruturais complexas, reduzindo custos de implementação.
- O desenho prevê a futura integração de sensores inteligentes (caudal, pressão, temperatura) e *feedback* digital em tempo real, permitindo evoluir para sistemas de fabrico ciber-físico com controlo adaptativo.

3. Contributos para sustentabilidade e inovação

- O artefacto mostrou potencial para otimizar o uso de recursos minerais e reciclados, assegurando homogeneidade e prevenindo desperdícios durante a extrusão.
- A sua modularidade operacional suporta práticas de fabrico mais circulares, uma vez que possibilita reutilização e substituição seletiva de componentes.
- A configurabilidade permite a produção de protótipos personalizados e componentes funcionais, alinhando-se com o paradigma da construção digital inteligente e personalizada.

Em síntese, os resultados confirmam que a modularidade do artefacto constitui não apenas uma vantagem técnica imediata — ao assegurar desempenho estável e adaptável — mas também um ativo estratégico para a sua viabilidade industrial a longo prazo, posicionando-o como uma solução inovadora, escalável e preparada para integração em ecossistemas digitais colaborativos no âmbito do fabrico digital híbrido.

9. Conclusão

A presente investigação teve como propósito o desenvolvimento de um artefacto inovador para fabrico aditivo com materiais cimentícios e incorporação de recursos minerais, procurando responder a um problema concreto do setor da construção: a necessidade de soluções mais sustentáveis, adaptáveis e compatíveis com plataformas híbridas de fabrico digital. O artefacto concebido — uma câmara de mistura integrada num tubo focalizador — foi pensado de forma modular, capaz de processar formulações multimaterial em regime contínuo e de se adaptar a diferentes contextos operacionais.

Os objetivos específicos delineados foram integralmente cumpridos. No que se refere à valorização de recursos minerais, o sistema demonstrou capacidade para processar formulações cimentícias com resíduos, contribuindo para práticas alinhadas com a economia circular. Quanto à flexibilidade reológica, a arquitetura de entradas múltiplas e o misturador helicoidal garantiram adaptabilidade a diferentes combinações de materiais e propriedades, assegurando homogeneidade e estabilidade no escoamento. No plano da integração tecnológica, verificou-se a plena compatibilidade com o sistema M-Tec Duo-Mix 3DCP e com o Centro Avançado Multieixos Cei-Zipor, confirmando a sua interoperabilidade em plataformas híbridas de fabrico digital. Finalmente, a validação funcional, realizada através de simulações CFD e de ensaios em contexto experimental, confirmou a robustez do escoamento e a qualidade do cordão extrudido, demonstrando a viabilidade do artefacto e do ciclo híbrido.

Com isso, foi possível encontrar uma resposta efetiva para o problema inicialmente identificado, propondo-se uma solução que alia inovação tecnológica, sustentabilidade material e integração industrial. Esta concretização não teria sido possível sem a aplicação sistemática da metodologia DSR, que estruturou todo o percurso da investigação. O carácter iterativo da DSR, assente na definição do problema, conceção do artefacto, demonstração e validação, permitiu conjugar rigor científico e aplicabilidade prática, enquanto reforçou a robustez dos resultados obtidos. A integração de ferramentas CAD/CAE, nomeadamente *SolidWorks* e *Flow Simulation*, num processo orientado pela DSR, constituiu ainda um modelo metodológico replicável para futuros desenvolvimentos nesta área.

Do ponto de vista dos contributos, a investigação trouxe avanços relevantes para a teoria, a prática e a metodologia. No plano teórico, expandiu-se o conhecimento sobre mecanismos de mistura passiva em regime laminar para fluidos não-Newtonianos do tipo

Herschel–Bulkley, com recurso a simulação computacional em extrusão contínua. Introduziu-se também a análise da densidade como proxy para avaliar a homogeneização da mistura, substituindo métodos convencionais. No plano prático, apresentou-se um artefacto escalável e adaptável a diferentes formulações cimentícias, compatível com plataformas híbridas, e com potencial aplicação em prototipagem, pré-fabricação e produção modular. Já no plano metodológico, a investigação demonstrou a utilidade da DSR em projetos multidisciplinares de engenharia, integrando ferramentas digitais e validação experimental num processo rigoroso e orientado para a resolução de problemas concretos.

Apesar dos resultados promissores, importa reconhecer limitações. Embora o artefacto tenha sido construído e experimentado com sucesso em plataforma híbrida de fabrico digital, a validação ainda não incluiu ensaios em ambiente industrial de larga escala. Adicionalmente, o canal C não foi testado com partículas discretas, como fibras ou pigmentos, restringindo a análise ao escoamento contínuo. As condições de contorno assumidas nas simulações foram idealizadas e não contemplaram fenómenos reais como pulsações, sedimentação ou presa acelerada, e as propriedades reológicas foram tratadas como constantes, sem considerar a evolução da hidratação ao longo do tempo. Por fim, embora tenha sido demonstrada a compatibilidade técnica com sistemas híbridos, não foi ainda realizado um ciclo híbrido automático completo em escala industrial.

Estas limitações abrem caminho para trabalhos futuros apesar de o artefacto ter sido construído e experimentado com sucesso em plataforma híbrida de fabrico digital, torna-se prioritário avançar para ensaios em ambiente industrial, com diferentes formulações cimentícias, incluindo resíduos, ligantes alternativos e geopolímeros. Recomenda-se também explorar o canal C para incorporação de partículas discretas, recorrendo a modelação CFD-DEM, bem como a integração de sensores de caudal, pressão e temperatura, associados a algoritmos de controlo adaptativo. Será igualmente necessário avaliar a resistência mecânica e a durabilidade dos cordões extrudidos, assim como o impacto energético e ambiental do processo em comparação com métodos convencionais. A médio prazo, antecipa-se ainda a integração de sistemas inteligentes baseados em inteligência artificial, capazes de ajustar dinamicamente as propriedades do extrudado em função da geometria, das condições ambientais e dos requisitos funcionais, conduzindo a um fabrico digital cada vez mais autónomo e adaptativo.

Em síntese, este trabalho não só cumpriu os objetivos propostos como também abriu novas linhas de investigação e de aplicação prática. Para a ciência, contribuiu para

aprofundar o conhecimento sobre mistura passiva de materiais cimentícios; para a prática, disponibilizou uma solução com elevado potencial de transferência tecnológica; e para a metodologia, demonstrou a eficácia da DSR como guia para projetos de engenharia aplicada. Assim, conclui-se que o artefacto desenvolvido representa um avanço significativo no caminho para uma construção digital mais sustentável, flexível e inteligente, e constitui uma base sólida para investigações futuras que consolidem a sua aplicação em contextos industriais reais.

Bibliografia

- Ahi, O., Ertunç, Ö., Bundur, Z. B., & Bebek, Ö. (2024). Automated flow rate control of extrusion for 3D concrete printing incorporating rheological parameters. *Automation in Construction*, *160*, 105319. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105319>
- Alami, A. H., Olabi, A. G., Ayoub, M., Aljaghoub, H., Alasad, S., & Abdelkareem, M. A. (2023). 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. In *Buildings* (Vol. 13, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040924>
- Baskerville, R., Pries-Heje, J., & Venable, J. (2009). Soft design science methodology. *Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology, DESRIST '09*. <https://doi.org/10.1145/1555619.1555631>
- Benamara, A., Pierre, A., Kaci, A., & Melinge, Y. (2020). 3D Printing of a Cement-Based Mortar in a Complex Fluid Suspension: Analytical Modeling and Experimental Tests. In *RILEM Bookseries* (Vol. 28). https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_76
- Bhattacharjee, S., Basavaraj, A. S., Rahul, A. V., Santhanam, M., Gettu, R., Panda, B., Schlangen, E., Chen, Y., Copuroglu, O., Ma, G., Wang, L., Basit Beigh, M. A., & Mechtcherine, V. (2021). Sustainable materials for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, *122*, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104156>
- Boddepalli, U., Panda, B., & Ranjani Gandhi, I. S. (2023). Rheology and printability of Portland cement based materials: a review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *12*(7), 789–807. <https://doi.org/10.1080/21650373.2022.2119620>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, *11*(3). <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 112). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>

- Chen, H., Zhang, D., Chen, P., Li, N., & Perrot, A. (2023). A Review of the Extruder System Design for Large-Scale Extrusion-Based 3D Concrete Printing. *Materials*, 16(7), 2661. <https://doi.org/10.3390/ma16072661>
- Craveiro, F., Bártolo, H., Duarte, J. P., & Bártolo, P. J. (2019). A multi-material extrusion nozzle for functionally graded concrete printing. *Industry 4.0 - Shaping The Future of The Digital World - Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Smart Manufacturing, S2M 2019*. <https://doi.org/10.1201/9780367823085-24>
- Craveiro, F., Bartolo, H. M., Gale, A., Duarte, J. P., & Bartolo, P. J. (2017). A design tool for resource-efficient fabrication of 3d-graded structural building components using additive manufacturing. *Automation in Construction*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.05.006>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. In *Automation in Construction* (Vol. 103). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- Craveiro, F., Nazarian, S., Bartolo, H., Bartolo, P. J., & Pinto Duarte, J. (2020). An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials. *Additive Manufacturing*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101146>
- Dresch, A., & Lacerda, D. P. (2016). Design Science e Design Science Research: Método de Pesquisa para o avanço da Ciência e da Tecnologia. In *Gmap | Unisino*.
- Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing precursors for geopolymers cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12). <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x>
- Dvorkin, L., Marchuk, V., Mróz, K., Maroszek, M., & Hager, I. (2024). Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies. *Applied Sciences*, 14(7), 3038. <https://doi.org/10.3390/app14073038>
- Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, 398, 132496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
- Gamage, K., Fawzia, S., Zahra, T., Teixeira, M. B. F., & Ramli Sulong, N. H. (2024). Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials,

- Challenges, and Current Progress in Australia. In *Buildings* (Vol. 14, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/buildings14020494>
- Gamil, Y., & Cwirzen, A. (2022). Digital Transformation of Concrete Technology—A Review. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.835236>
- Gregor, S., & Hevner, A. R. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. In *MIS Quarterly: Management Information Systems* (Vol. 37, Issue 2). <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.01>
- Grigolato, L., Rosso, S., Meneghello, R., Concheri, G., & Savio, G. (2022). Design and manufacturing of graded density components by material extrusion technologies. *Additive Manufacturing*, 57, 102950. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102950>
- Guamán-Rivera, R., Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Muñoz-Sanguinetti, C., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2022). Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. In *Buildings* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/buildings12020229>
- Herwix, A., Haj-Bolouri, A., Rossi, M., Tremblay, M. C., Puroo, S., & Gregor, S. (2022). Ethics in Information Systems and Design Science Research: Five Perspectives. *Communications of the Association for Information Systems*, 50(1). <https://doi.org/10.17705/1CAIS.05028>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 28(1). <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hopmann, C., Schön, M., Reul, M. M., & Facklam, M. (2020). A Method for the Validation of Simulated Mixing Characteristics of Two Dynamic Mixers in Single-Screw Extrusion. *Polymers*, 12(10), 2234. <https://doi.org/10.3390/polym12102234>
- Hossain, M. U., & Ng, S. T. (2018). Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.120>
- Jayathilakage, R., Rajeev, P., & Sanjayan, J. (2021). Extrusion rheometer for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104075>

- Kanjanabootra, S. (2016). Design Science method and theory in a construction and engineering context: “a phronetic tale of research.” *Engineering Project Organization Journal*, 6(2–4). <https://doi.org/10.1080/21573727.2016.1260549>
- Kaszyńska, M., Skibicki, S., & Hoffmann, M. (2020). 3d concrete printing for sustainable construction. *Energies*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/en13236351>
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017a). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017b). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Kruger, J., Zeranka, S., & van Zijl, G. (2019). 3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification. *Automation in Construction*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102904>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012a). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(8). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012b). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Li, Y., Zhang, X., Wang, R., & Lei, Y. (2019). Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 227). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116691>
- Liravi, F., Darleux, R., & Toyserkani, E. (2017). Additive manufacturing of 3D structures with non-Newtonian highly viscous fluids: Finite element modeling and experimental validation. *Additive Manufacturing*, 13, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.008>

- Ma, G., Li, Z., & Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6(April).
- Marchment, T., Sanjayan, J., & Xia, M. (2019). Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. *Materials and Design*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107684>
- Mardani Bursa Uludağ Üni, A., Gizem, H. S., & Mardani, A. (2022). SUSTAINABLE 3D PRINTING CONCRETE MIXTURES, LITERATURE REVIEW. In *Journal of Modern Technology and Engineering* (Vol. 7, Issue 1).
- Maryam, H., Shadi, N., Jose P., D., Aleksandra, R., Negar, A., Flávio, C., & Sven, B. (2018). 3D Printing of Concrete: a Continuous Exploration of Mix Design and Printing Process. *42nd IAHS WORLD CONGRESS The Housing for the Dignity of Mankind, May*.
- Mawas, K., Maboudi, M., & Gerke, M. (2025a). *A Review on Geometry and Surface Inspection in 3D Concrete Printing*. <http://arxiv.org/abs/2503.07472>
- Mawas, K., Maboudi, M., & Gerke, M. (2025b). *A Review on Geometry and Surface Inspection in 3D Concrete Printing*. <http://arxiv.org/abs/2503.07472>
- Mechtcherine, V., Bos, F. P., Perrot, A., da Silva, W. R. L., Nerella, V. N., Fataei, S., Wolfs, R. J. M., Sonebi, M., & Roussel, N. (2020a). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 132). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
- Mechtcherine, V., Bos, F. P., Perrot, A., da Silva, W. R. L., Nerella, V. N., Fataei, S., Wolfs, R. J. M., Sonebi, M., & Roussel, N. (2020b). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>

- Moghaddam, S. (2023). Effect of Non-Newtonian Fluid on Mixing Quality and Pressure Drop in Several Static Mixers: A Numerical Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 47(4), 1585–1597. <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00621-5>
- Morales Ubal, C., Beishuizen, N., Kusch, L., & van Oijen, J. (2024). Adjoint-based design optimization of a Kenics static mixer. *Results in Engineering*, 21, 101856. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101856>
- Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). In *3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 143). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Pan, T., Guo, R., Jiang, Y., Ji, X., & Qi, R. (2022). Flow and deformation behaviors of cementitious materials through nozzles with different geometric parameters: Experimental and numerical approaches. *Construction and Building Materials*, 360, 129605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129605>
- Pan, T., Teng, H., Liao, H., Jiang, Y., Qian, C., & Wang, Y. (2022). Effect of shaping plate apparatus on mechanical properties of 3D printed cement-based materials: Experimental and numerical studies. *Cement and Concrete Research*, 155, 106785. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106785>
- Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, 44(9). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>
- Peffer, K., Rothenberger, M., Tuunanen, T., & Vaezi, R. (2012). Design science research evaluation. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7286 LNCS, 398–410. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29863-9_29

- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016a). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, *49*(4), 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016b). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *49*(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016c). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, *49*(4), 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Placzek, G., & Schwerdtner, P. (2023). Concrete Additive Manufacturing in Construction: Integration Based on Component-Related Fabrication Strategies. In *Buildings* (Vol. 13, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071769>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, *143*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Rahman, M. A., Saleh, T., Jahan, M. P., McGarry, C., Chaudhari, A., Huang, R., Tauhiduzzaman, M., Ahmed, A., Mahmud, A. Al, Bhuiyan, Md. S., Khan, M. F., Alam, Md. S., & Shakur, M. S. (2023). Review of Intelligence for Additive and Subtractive Manufacturing: Current Status and Future Prospects. *Micromachines*, *14*(3), 508. <https://doi.org/10.3390/mi14030508>
- Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 112). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- Sasse, J., & Hopmann, C. (2024). Static mixers producible by additive manufacturing: Operating point specific geometries through automatic optimisation. *AIP Conference Proceedings*, *3158*(1), 110016. <https://doi.org/10.1063/5.0204554>
- Sasse, J., Schön, M., & Hopmann, C. (2022). Static Mixers Producibile by Additive Manufacturing: Novel Rapid Automatic Optimisation and Practical Evaluation. *Polymers*, *14*(21), 4646. <https://doi.org/10.3390/polym14214646>
- Sergis, V., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2022). Automating mix design for 3D concrete printing using optimization methods. *Digital Discovery*, *1*(5), 645–657. <https://doi.org/10.1039/D2DD00040G>

- Shen, J., Li, Y., Zhang, X., Li, Y., Huang, C., & Luo, W. (2024). Three-Dimensional Printable Concrete by an Ultra-Thin Nozzle and Fully Sealed Extrusion. *Buildings*, *14*(7), 1958. <https://doi.org/10.3390/buildings14071958>
- Si, W., Khan, M., & McNally, C. (2025). A Comprehensive Review of Rheological Dynamics and Process Parameters in 3D Concrete Printing. In *Journal of Composites Science* (Vol. 9, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcs9060299>
- Singh, N., Colangelo, F., & Farina, I. (2023a). Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 13). <https://doi.org/10.3390/su151310121>
- Singh, N., Colangelo, F., & Farina, I. (2023b). Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review. *Sustainability*, *15*(13), 10121. <https://doi.org/10.3390/su151310121>
- Strohle, M., Sadique, M., Dulaimi, A., & Kadhim, M. A. (2023). Prospect and barrier of 3D concrete: a systematic review. *Innovative Infrastructure Solutions*, *8*(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00975-w>
- Sukontasukkul, P., Komkham, S., Jamnam, S., Zhang, H., Fujikake, K., Puttiwongrak, A., & Hansapinyo, C. (2024). Eco-friendly 3D Printing Mortar with Low Cement Content: Investigation on Printability and Mechanical Properties. *Civil Engineering Journal*, *10*(3), 808–823. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-03-010>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017a). 3D printing trends in building and construction industry: a review. In *Virtual and Physical Prototyping* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017b). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, *12*(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, *174*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968>

- van den Heever, M., Bester, F., Kruger, J., & van Zijl, G. (2021). Mechanical characterisation for numerical simulation of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, *44*, 102944. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102944>
- vom Brocke, J., Hevner, A., & Maedche, A. (2020). *Introduction to Design Science Research*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1
- Wang, J., Liu, Z., Hou, J., & Ge, M. (2024). Research Progress and Trend Analysis of Concrete 3D Printing Technology Based on CiteSpace. *Buildings*, *14*(4). <https://doi.org/10.3390/buildings14040989>
- Wang, L., Lin, W., Wan, Q., Li, Z., & Bai, G. (2024). Manufacturing accuracy improvement of concrete product by hybrid additive-subtractive method based on the time-dependent characteristics of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *453*, 139135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139135>
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., & Flatt, R. (2016a). Digital concrete: Opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, *1*. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., & Flatt, R. (2016b). Digital concrete: Opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, *1*, 67–75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
- Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A. M., & Flatt, R. J. (2019). Digital Concrete: A Review. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 123). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, *106*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, *119*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>

- Zaid, O., & El Ouni, M. H. (2024a). Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments. In *Construction and Building Materials* (Vol. 427). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136254>
- Zaid, O., & El Ouni, M. H. (2024b). Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments. *Construction and Building Materials*, 427, 136254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136254>
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 125). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>
- Zhong, H., & Zhang, M. (2022). 3D printing geopolymers: A review. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 128). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104455>
- Zou, S., Xiao, J., Duan, Z., Ding, T., & Hou, S. (2021). On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125312>
- Zuo, Z., De Corte, W., Huang, Y., Chen, X., Zhang, Y., Li, J., Zhang, L., Xiao, J., Yuan, Y., Zhang, K., Zhang, L., & Mechtcherine, V. (2024). Strategies towards large-scale 3D printing without size constraints. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2346821>

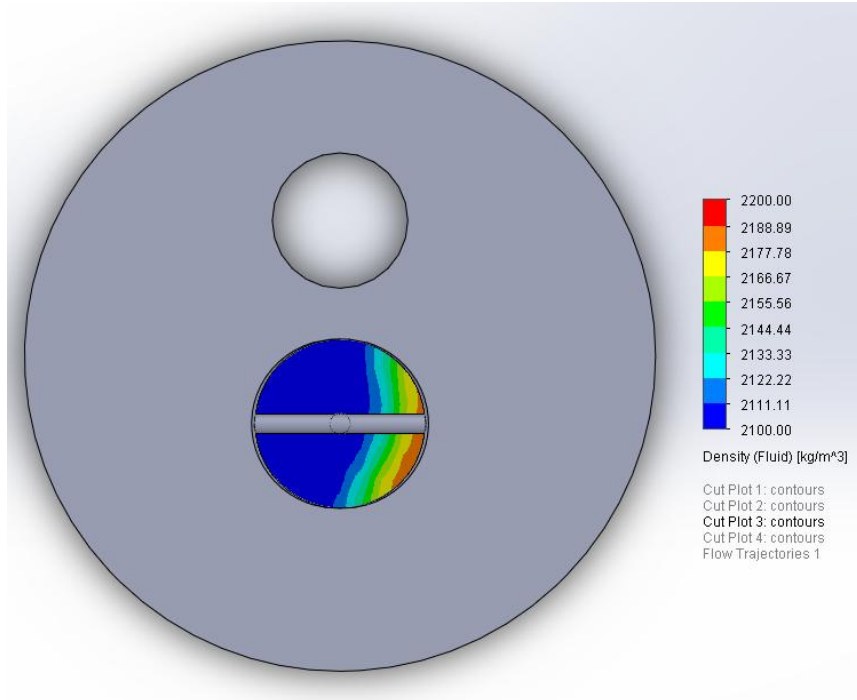
Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

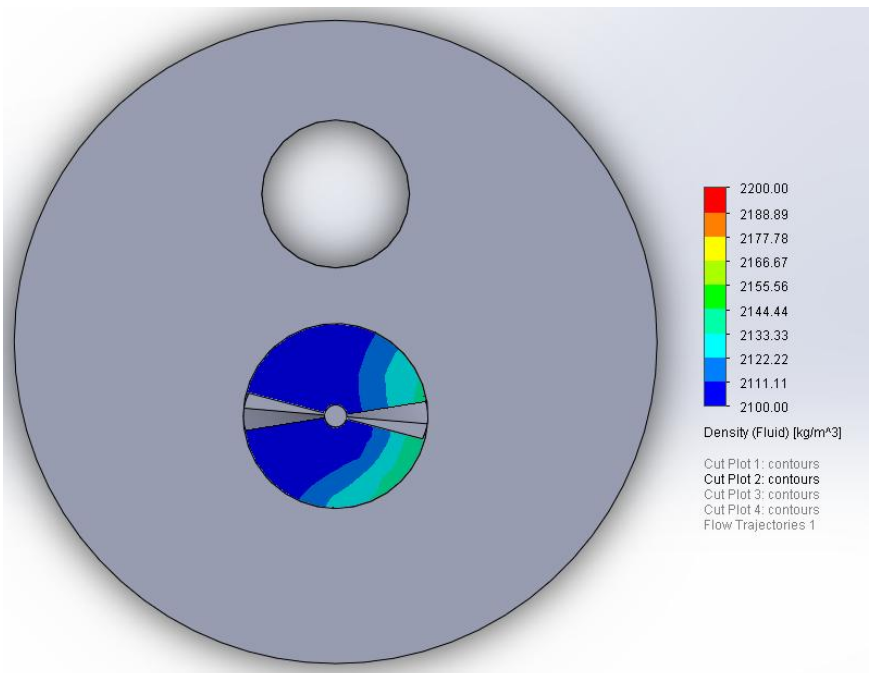
Anexo A

Anexo A.1: Mistura – A90% B10%

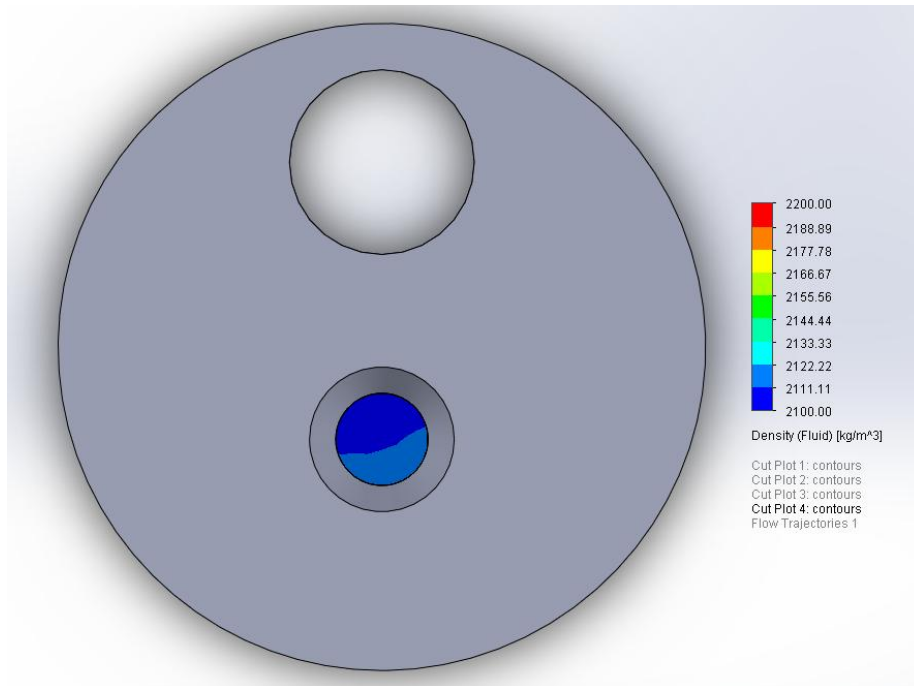
Início do misturador:



Meio do misturador:

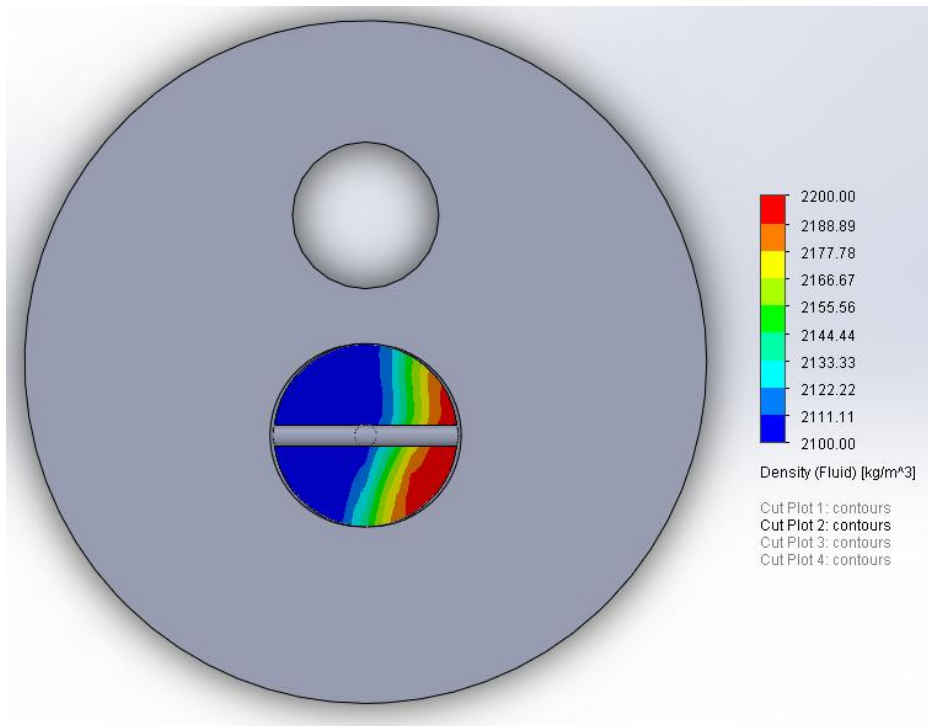


Na saída:

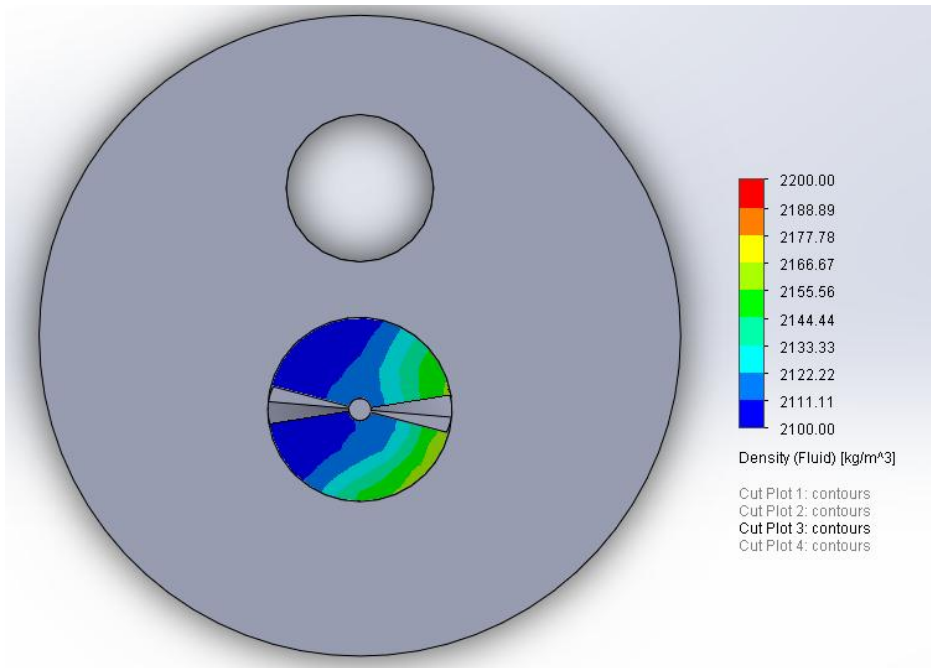


Anexo A.2: Mistura – A80% B20%

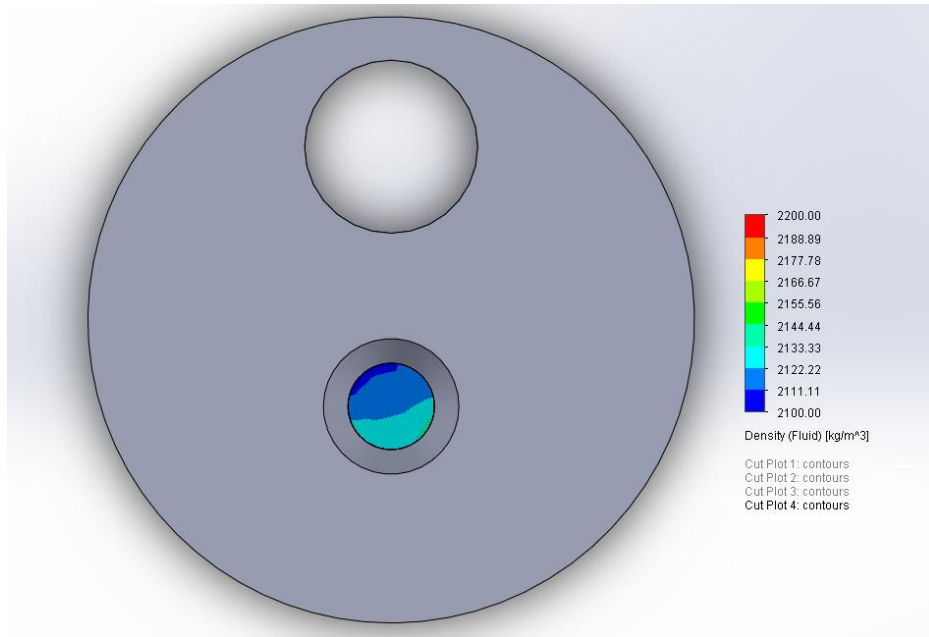
Início do misturador:



Meio do misturador:

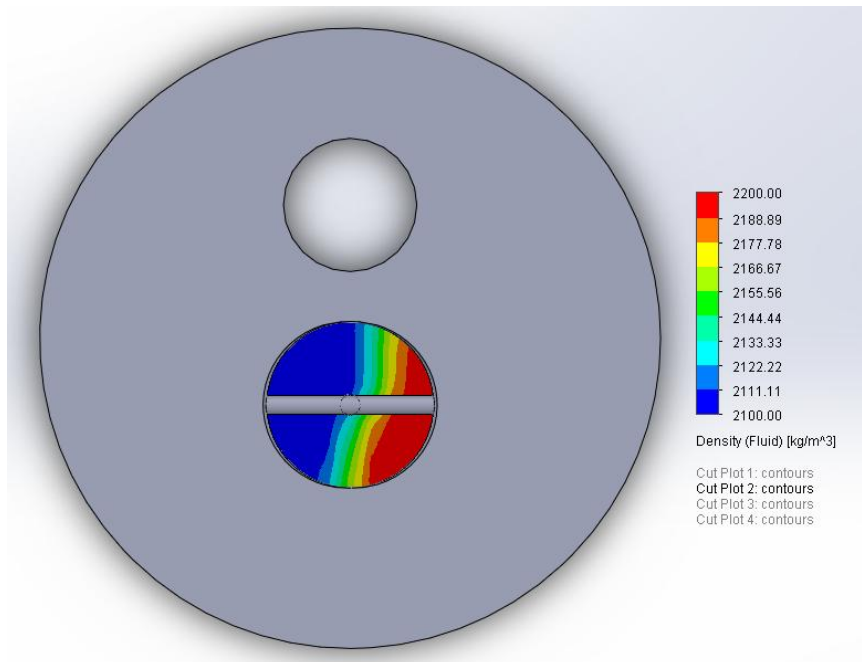


Na saída:

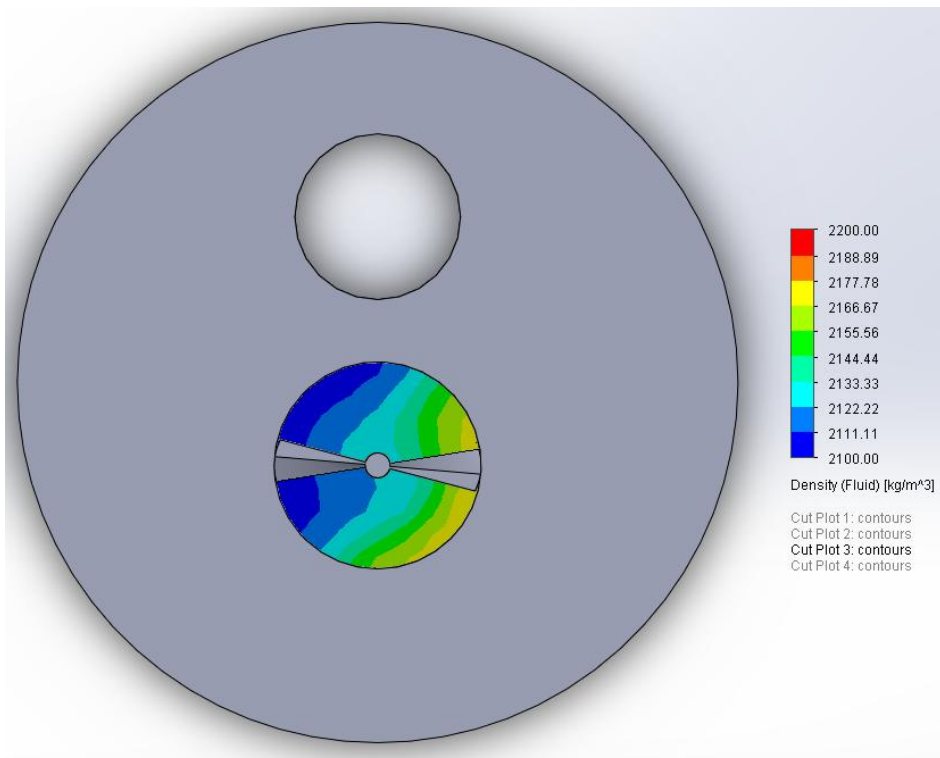


Anexo A.3: Mistura – A70% B30%

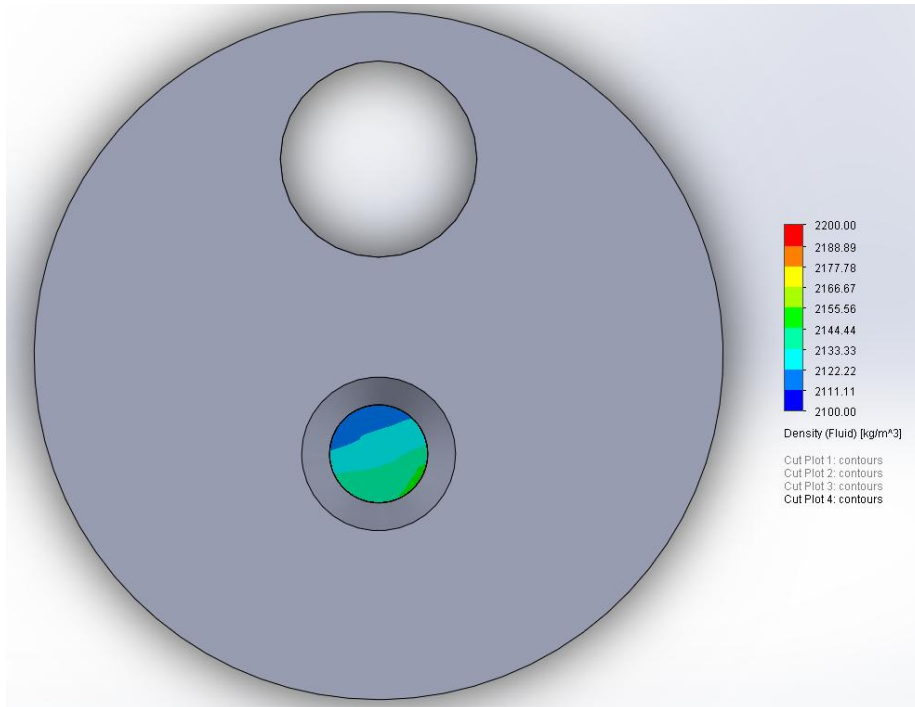
Início do misturador:



Meio do misturador:

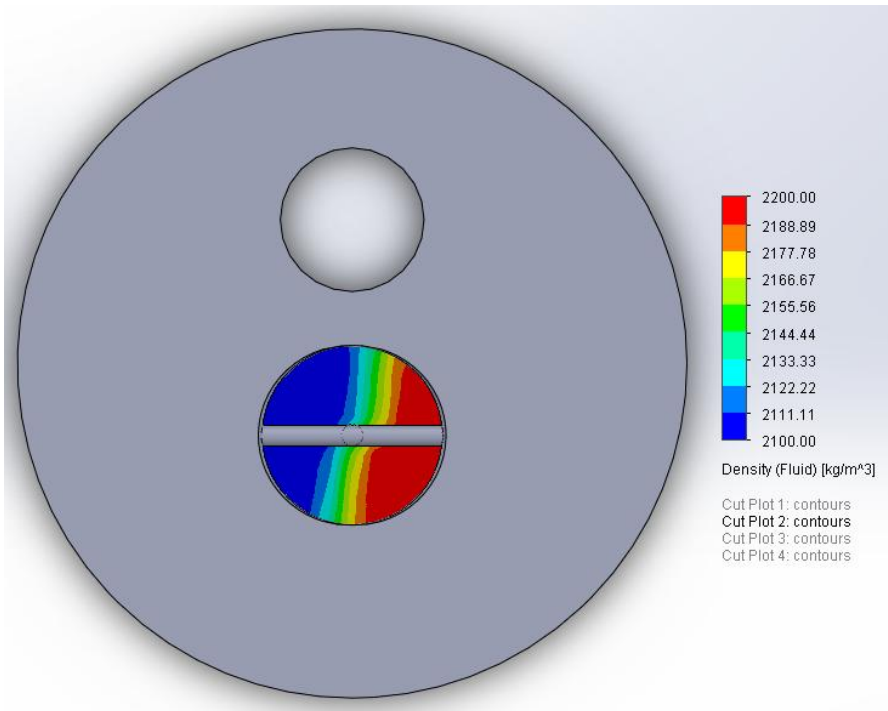


Na saída:

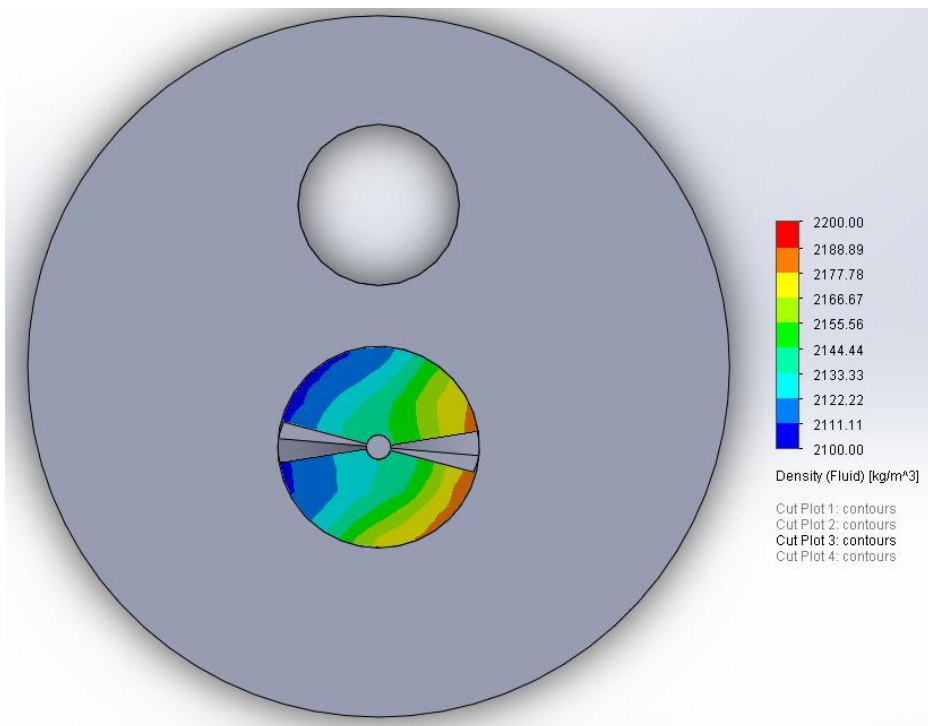


Anexo A.4: Mistura – A60% B40%

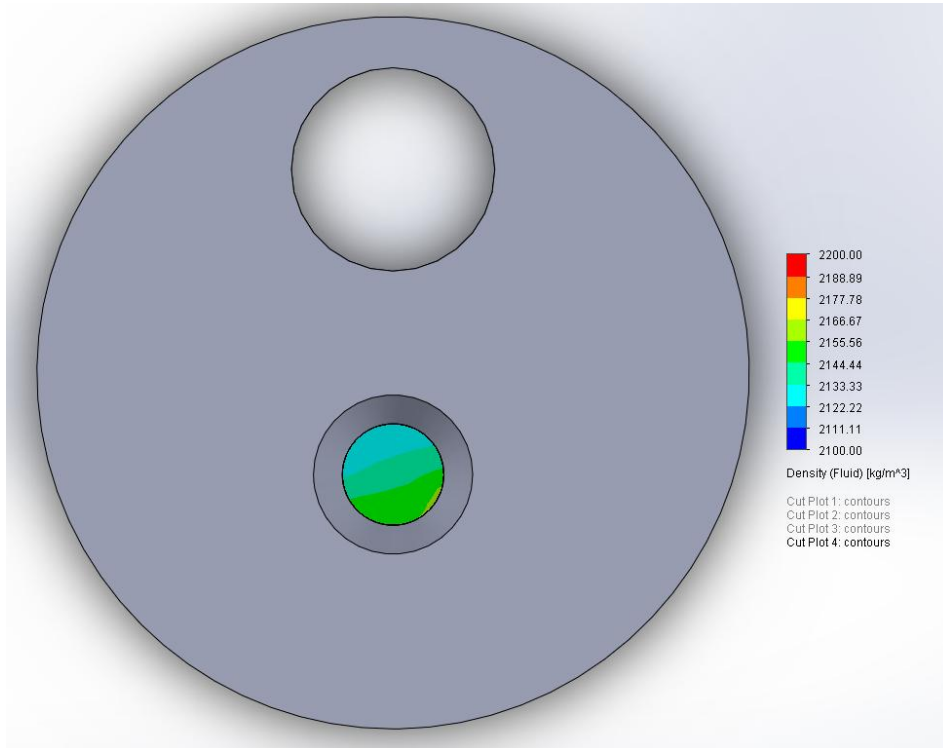
Início do misturador:



Meio do misturador:

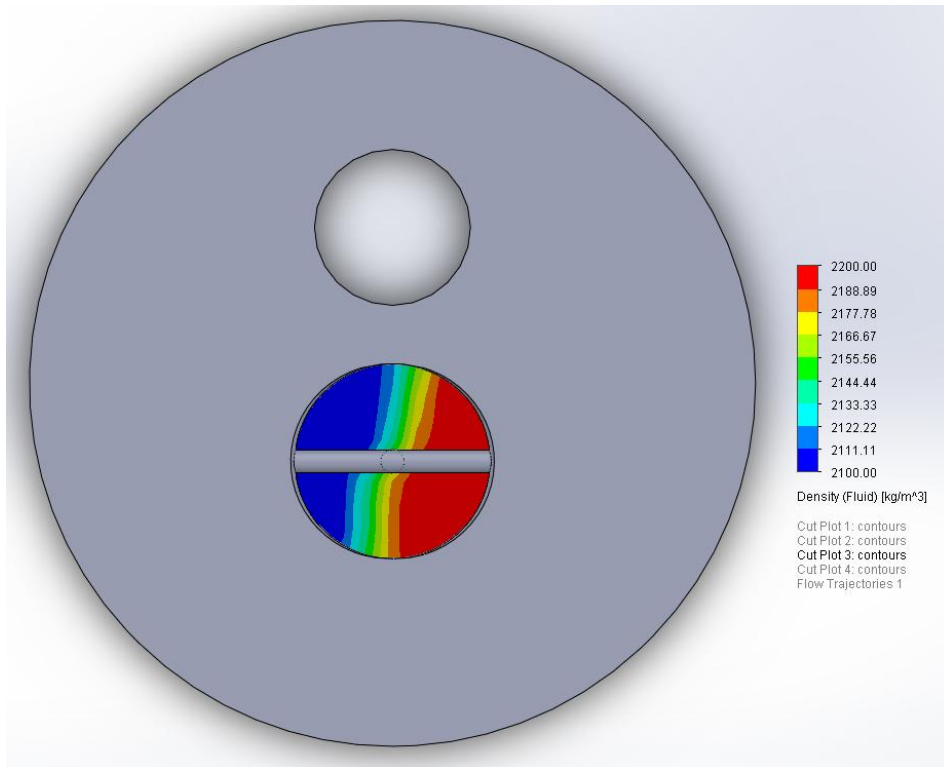


Na saída:

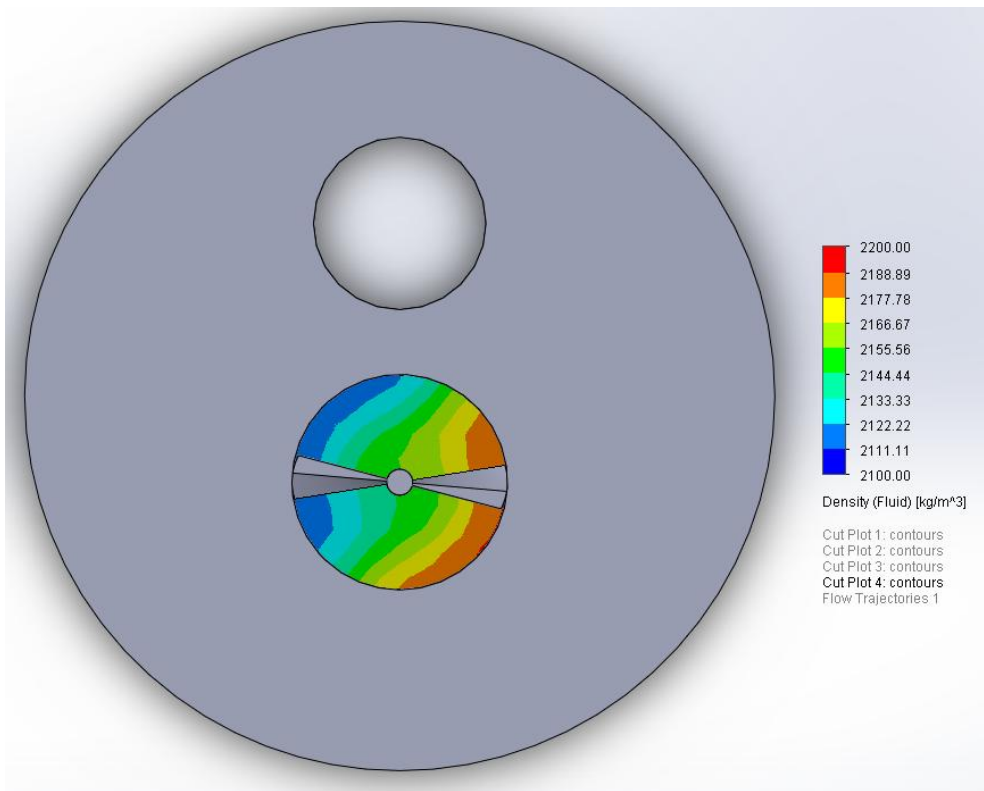


Anexo A.5: Mistura – A50% B50%

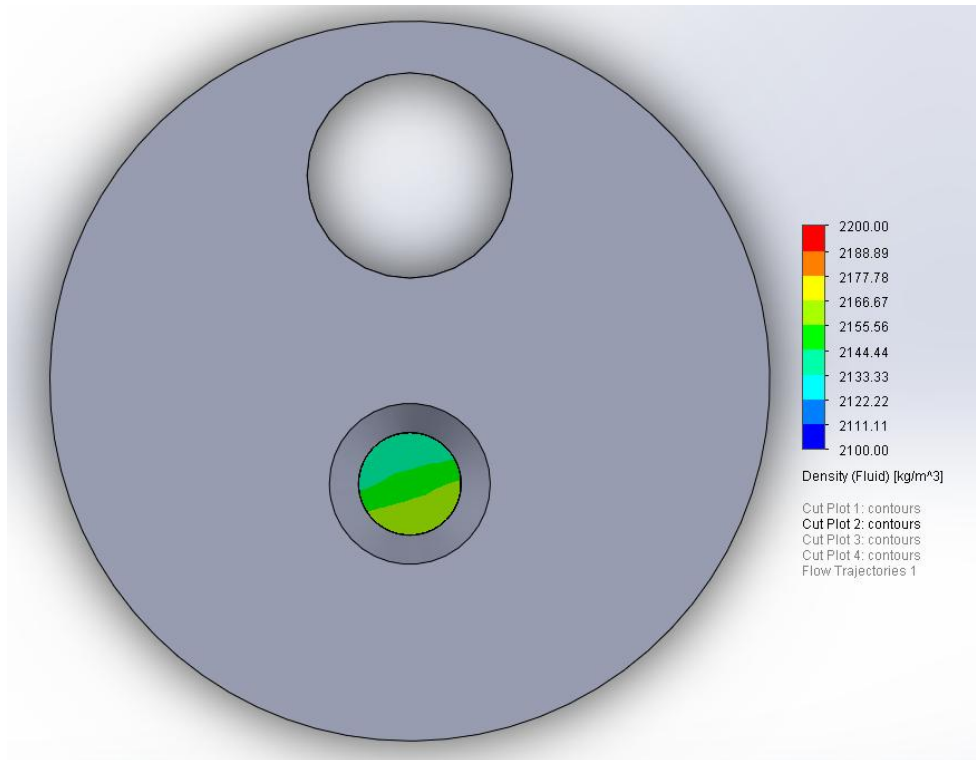
Início do misturador:



Meio do misturador:

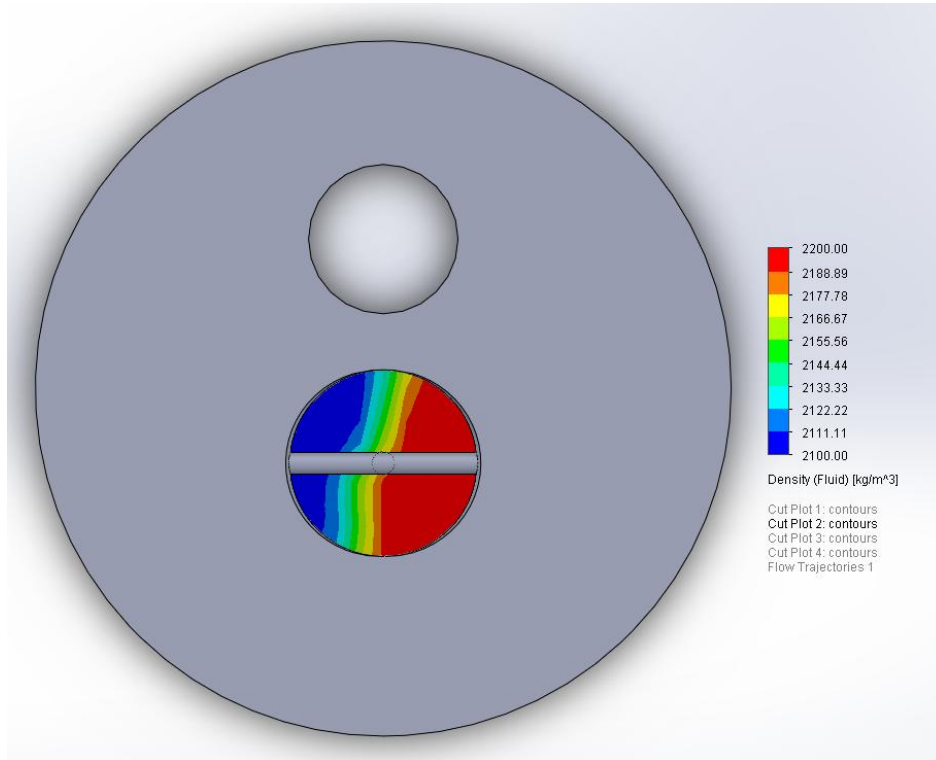


Na saída:

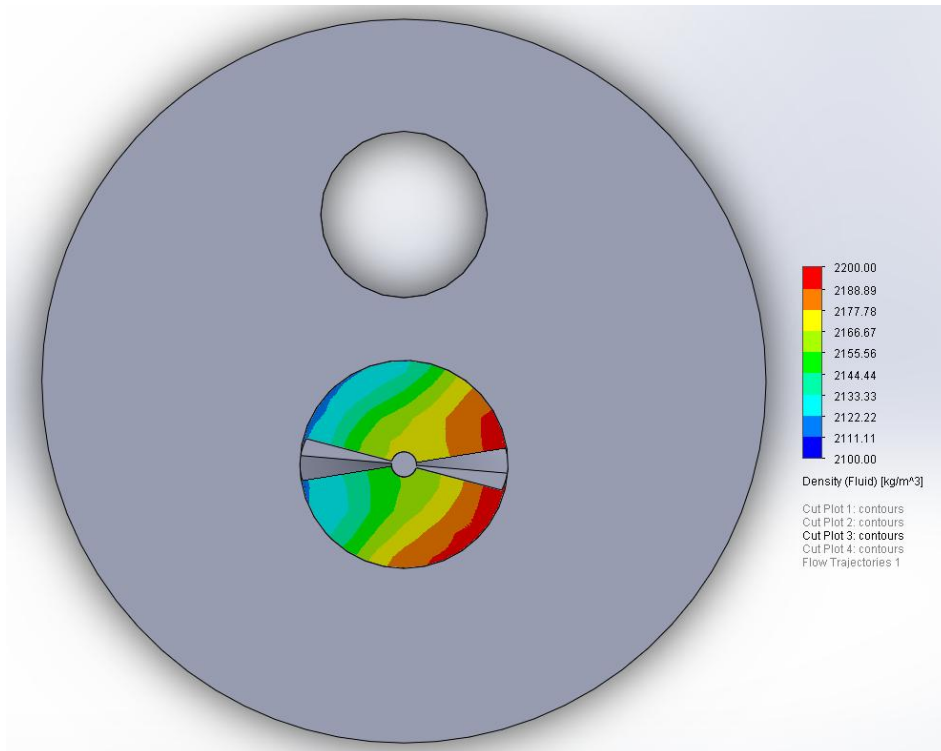


Anexo A.6: Mistura – A40% B60%

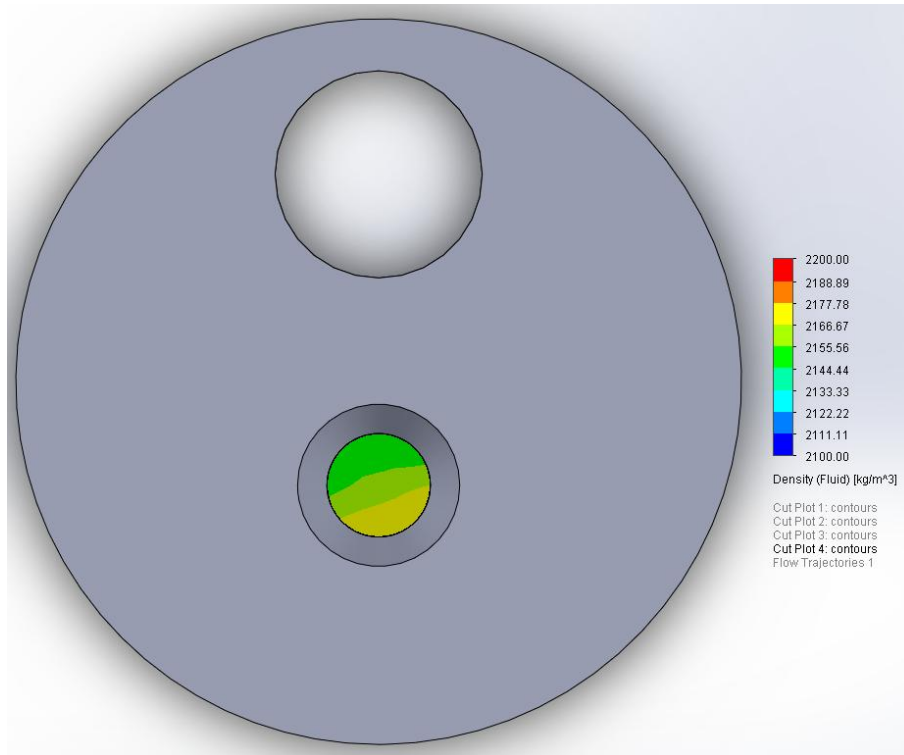
Início do misturador:



Meio do misturador:

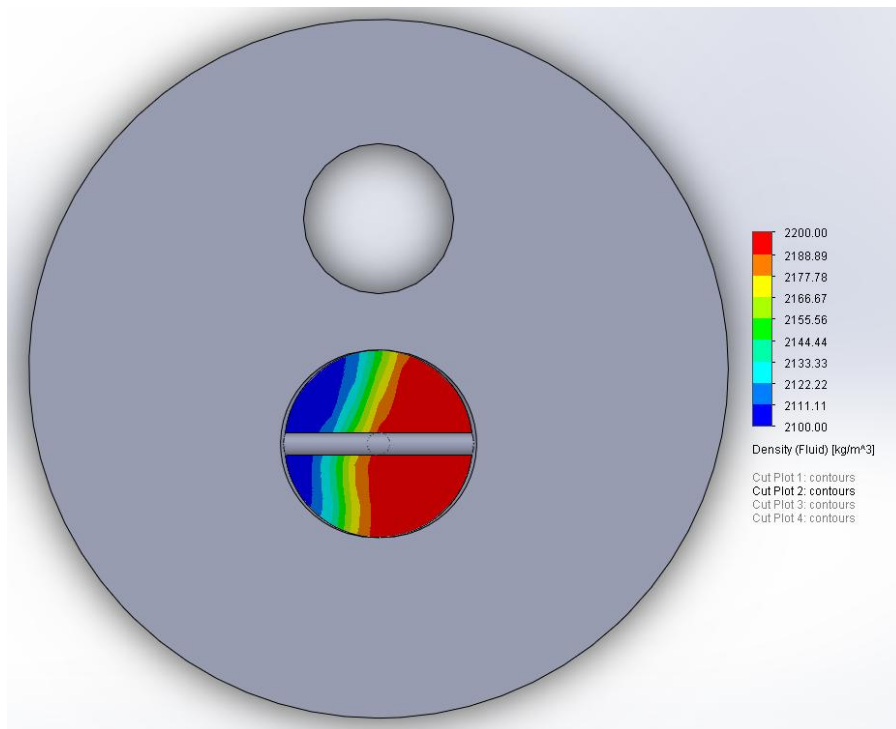


Na saída:

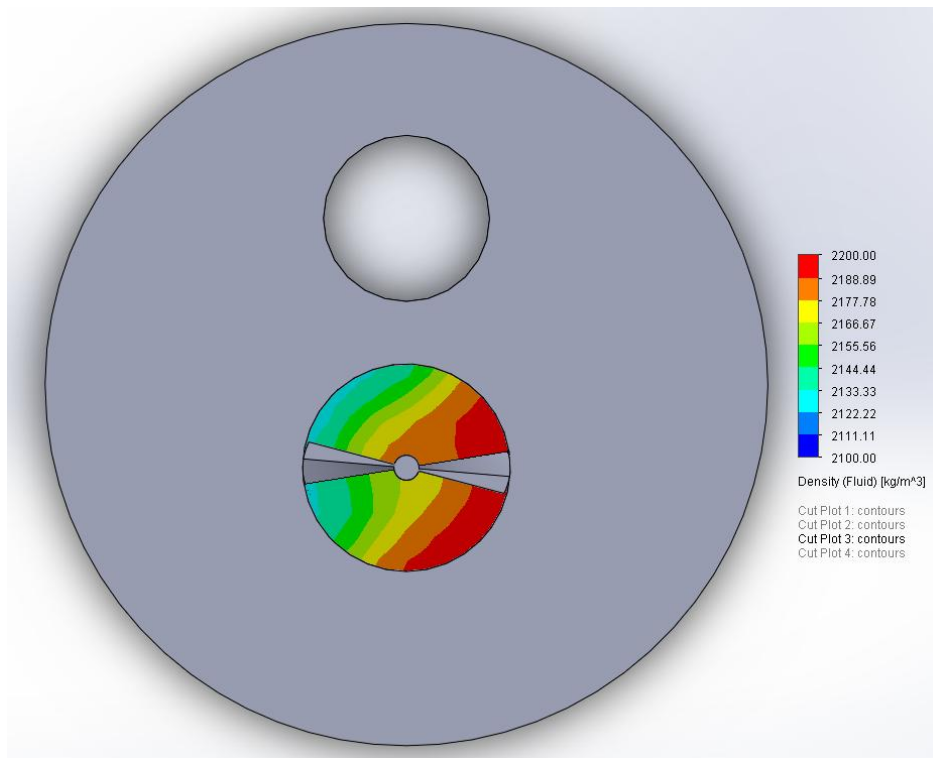


Anexo A.7: Mistura – A30% B70%

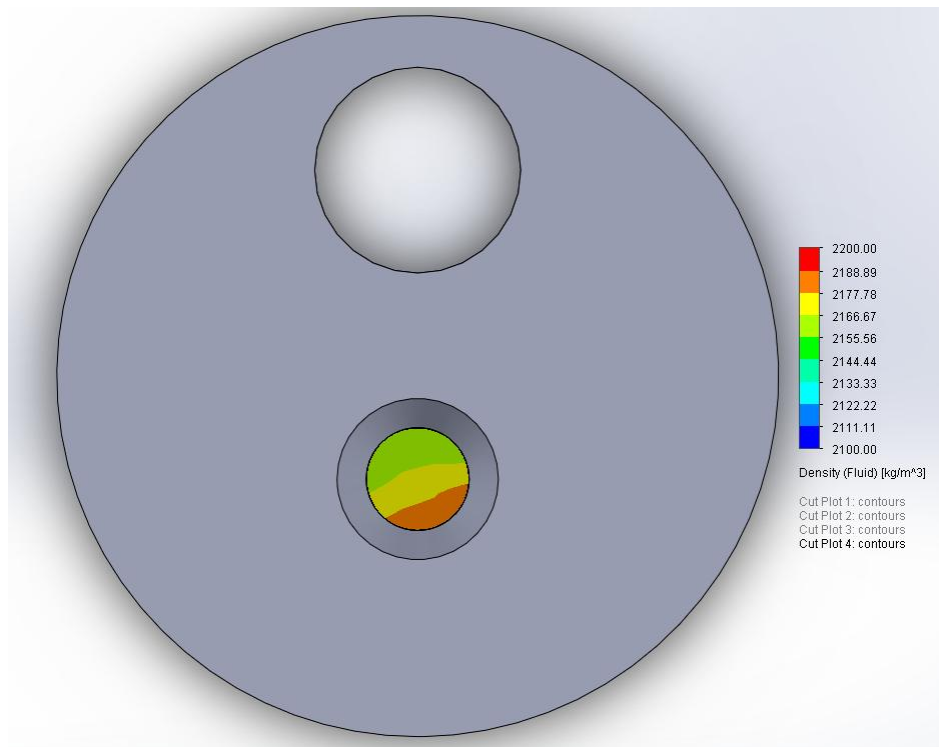
Início do misturador:



Meio do misturador:

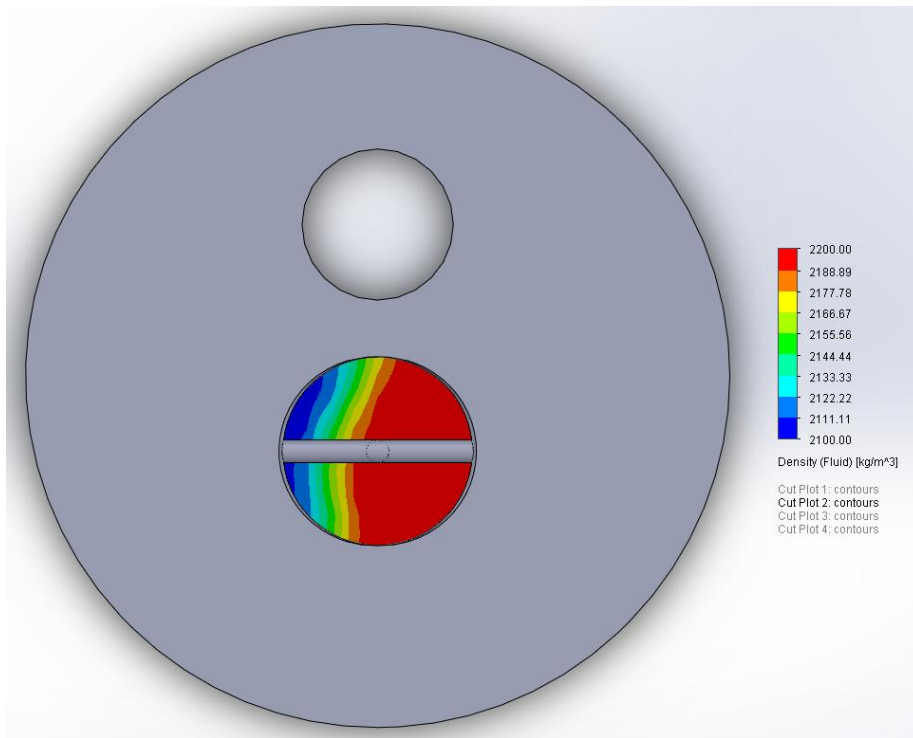


Na saída:

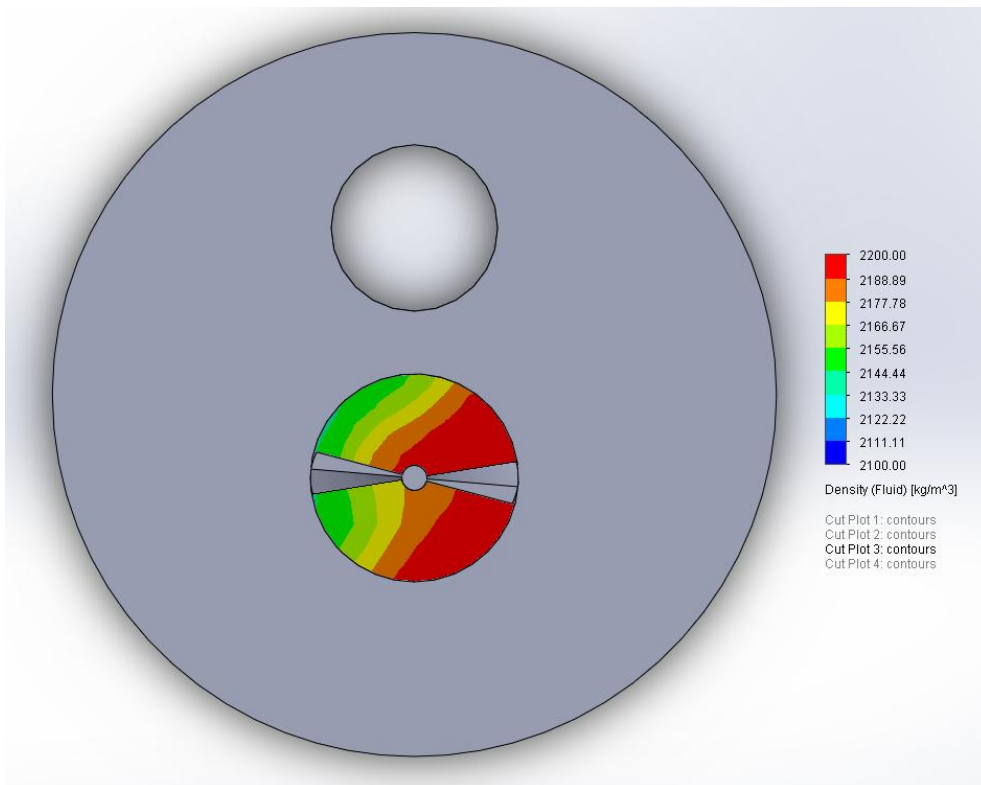


Anexo A.8: Mistura – A20% B80%

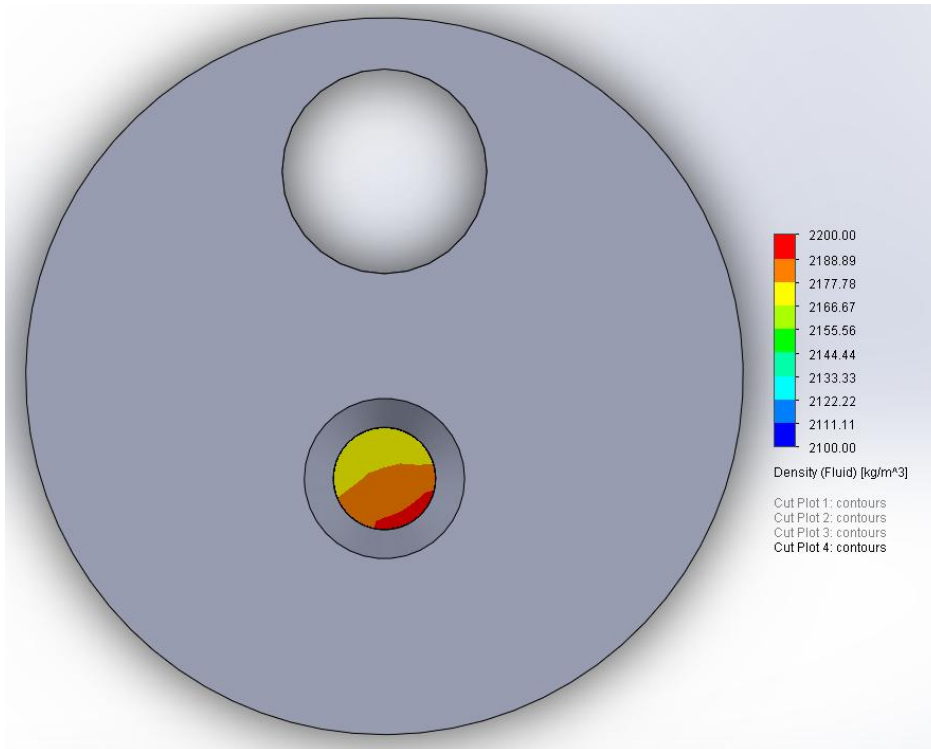
Início do misturador:



Meio do misturador:

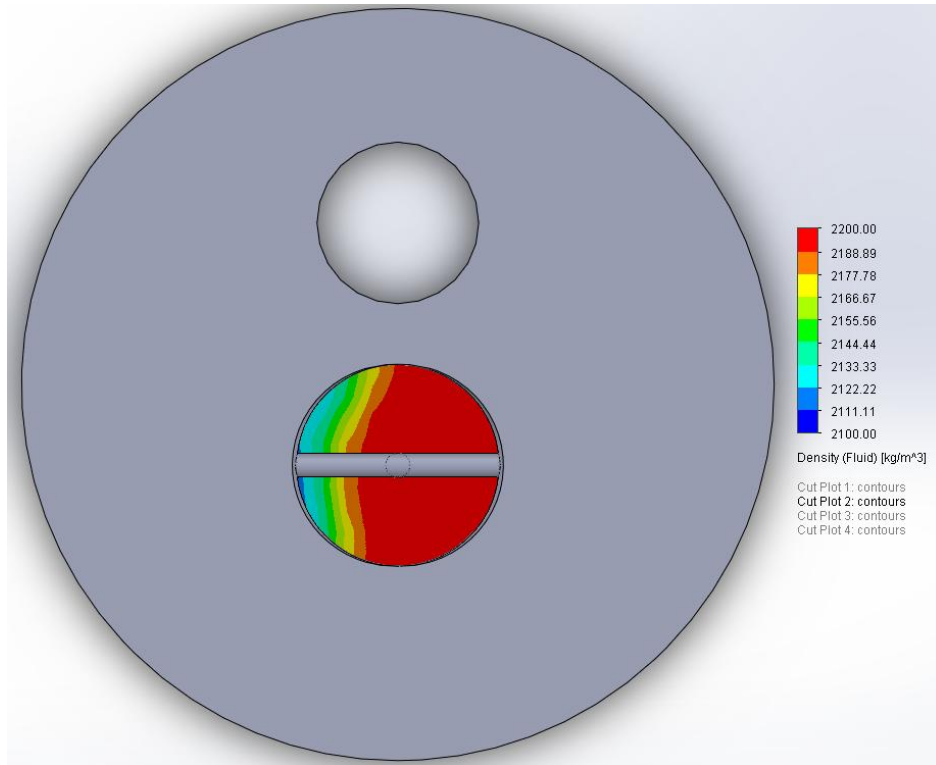


Na saída:

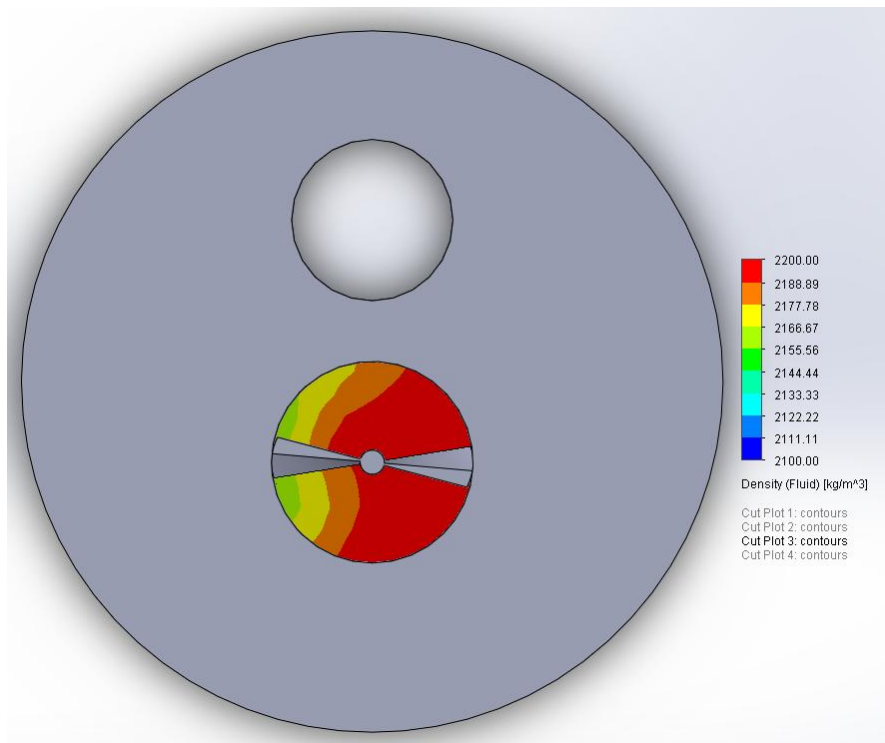


Anexo A.9: Mistura – A10% B90%

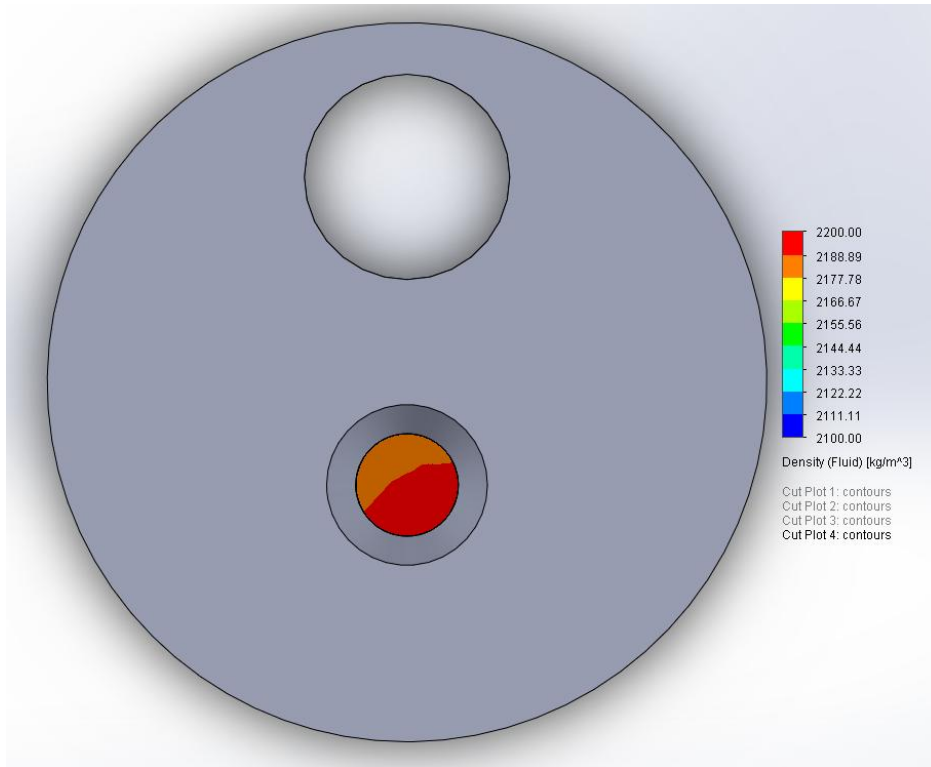
Início do misturador:



Meio do misturador:



Na saída:



Anexo B Ficha técnica Secil Maestro CEM II/B-L 32.5N



CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	NP EN 196-2	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referentes à massa de cimento.

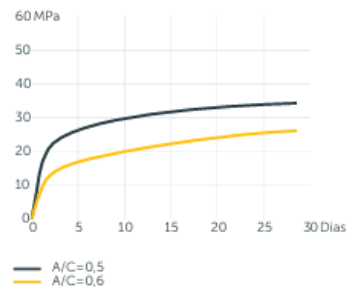
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m³ de cimento CEM II/B-L 32.5N



SERVIÇO A CLIENTES

CIAC – Centro de Informação e Atendimento a Clientes
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^º
 1070-100 Lisboa
 Tel. 808 202 996
 apoiocliente@secil.pt

Direção Nacional de Vendas
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^º
 1070-100 Lisboa
 Tel. 217 927 100

Vendas Revenda
 Rua da Estrada - Crestins
 4470-592 Moreira - Maia
 Tel. 226 078 410
 vendas.revenda@secil.pt

Vendas Indústria
 Apartado 28
 2406-909 Maceira - Leiria
 Tel. 244 779 500
 vendas.industria@secil.pt

Vendas Grande Distribuição
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^º
 1070-100 Lisboa
 Tel. 217 927 100

Última atualização: maio 2025 - Versão B



CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	NP EN 196-2	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referentes à massa de cimento.

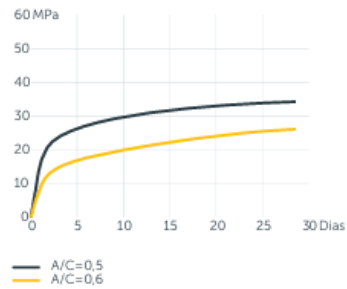
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m³ de cimento CEM II/B-L 32,5N



SERVIÇO A CLIENTES

CIAC – Centro de Informação e Atendimento a Clientes
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^ª
 1070-100 Lisboa
 Tel. 808 202 996
 apoiocliente@secil.pt

Direção Nacional de Vendas
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^ª
 1070-100 Lisboa
 Tel. 217 927 100

Vendas Revenda
 Rua da Estrada - Crestins
 4470-592 Moreira - Maia
 Tel. 226 078 410
 vendas.revenda@secil.pt

Vendas Indústria
 Apartado 28
 2406-909 Maceira - Leiria
 Tel. 244 779 500
 vendas.industria@secil.pt

Vendas Grande Distribuição
 Av. Eng. Duarte Pacheco, 19, 7^ª
 1070-100 Lisboa
 Tel. 217 927 100

Última atualização: maio 2025 - Versão B

Anexo C Ficha técnica Cin Quartz G300



BOLETIM TÉCNICO

QUARTZ G300

7S-360

Sílica para pavimentos

Revisão: Abril 2022

DESCRIÇÃO	Quartz G300 é uma sílica utilizada como aditivo em esquemas de pintura para pavimentos.	
APLICAÇÕES PRINCIPAIS	Sílica a ser usada em esquemas de pintura para pavimentos. Pode ser usada pelo método de polvilhamento para realização de pavimentos antiderrapantes, para a reparação de argamassas de regularização e enchimento e argamassas autonivelantes. Pode ainda ser combinada com a sílica Quartz G800 AGS ou Quartz G450, de maior granulometria, para preparação de argamassas de enchimento.	
PROPRIEDADES	Cor	Branco natural
	Diâmetro médio (D50)	0,25 mm
	Densidade aparente	1,580 ± 0,05 g/mL
	Densidade específica	2,620 ± 0,05 g/mL
	Rendimento prático	Ver esquemas de pintura
ESQUEMAS DE PINTURA	<p>Processo de aplicação: Polvilhamento e para preparação de argamassas.</p> <p>Esquemas de pintura: Ver esquemas de pintura nos boletins técnicos dos produtos C-Floor.</p> <p>A mistura de Quartz G300 nos produtos C-Floor deverá ser feita com equipamento adequado para garantir uma perfeita homogeneização.</p>	
INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR	Forma de fornecimento	
	Produto	25 kg
	Estabilidade	5 anos, quando armazenado nas embalagens de origem, sem abrir, em interior.
SEGURANÇA, SAÚDE E AMBIENTE	<p>Em geral, evite o contacto com os olhos e a pele, use luvas, óculos de protecção e vestuário apropriado. Manter fora do alcance das crianças.</p> <p>Utilizar somente em locais bem ventilados. Não deitar os resíduos no esgoto. Conserve a embalagem bem fechada e em local apropriado. Assegure o transporte adequado do produto; previna qualquer acidente ou incidente que possa ocorrer durante o transporte nomeadamente a ruptura ou deterioração da embalagem. Mantenha a embalagem em local seguro e em posição correcta. Não utilize nem armazene o produto em condições extremas de temperatura. Deverá ter sempre em conta a legislação em vigor relativa a Ambiente, Higiene, Saúde e Segurança no trabalho para mais informações, a leitura do rótulo da embalagem e da ficha de segurança deste produto, dos seus componentes e de todos os produtos complementares, referidos neste Boletim Técnico, é fundamental.</p>	

1 / 1

É aconselhável verificar periodicamente o estado de actualização do presente Boletim Técnico. A CIN assegura a conformidade dos seus produtos com as especificações constantes dos respectivos boletins técnicos. Os conselhos técnicos prestados pela CIN, antes ou depois da entrega dos produtos, são meramente indicativos, dados de boa-fé e constituem o seu melhor conhecimento, atento o estado actual da técnica, não podendo, em caso algum, responsabilizá-la. As reclamações apenas serão aceites relativamente a defeitos de fabrico ou não conformidades com a nota de encomenda. A única obrigação que incumbe à CIN será, respectivamente, a substituição ou devolução do preço já pago da mercadoria reconhecidamente defeituosa ou de reposição da encomenda, não aceitando outras responsabilidades por quaisquer outras perdas ou danos. Todas as nossas vendas estão sujeitas às nossas condições gerais de venda, cuja leitura aconselhamos.

CIN - Corporação Industrial do Norte, S.A. - Av. do Dom Mendo, nº 831 (ant. EN13 km8) - 4474-009 Maia - Portugal - T +351 229 405 000 - customerservice@cin.com - Capital Social € 25.000.000 - C.R.C. da Maia I NIPC 500 076 006
 CIN Industrial Castings, S.A. - Av. do Dom Mendo, nº 230 - 4474-009 Maia - Portugal - T +351 229 405 000 - customerservice@cin.com - Capital Social € 2.250.000 - E. R. C. da Maia I NIPC 504 100 383
 Tintas Cin Angola, S.A. - R. Pedro Álvares Cabral, nº 21 - Cx Postal 788 - Benguela - Angola - T +244 222 397 527 - tcin@cinangola.co.ao - Cap.Soc. 10.000.000,00 Kz - Contrib. 5402016425 - C.R.C. Benguela nº 4.001, It. 02, Lxº E-22
 Tintas Cin de Moçambique, S.A. - Av. das Indústrias, 2507 - Machava - Moçambique - T +258 21 748 012 - geral@cin.co.mz - Cap. Soc. 2.000.000,00 MT - N.I.F.T. 400000987 - C.R.C. Maputo nº 5.162, It. 11, Lxº C-14
 CIN Valente, S.A.U. - P. I. Can Mians - Rúa Seca, 1 - 08110 Montcada i Reixac - España - T +34 93 516 86 00 - customerservice.asia@cin.com - C. Soc. € 10.000.000 - CIF A-61266713 - Reg. M. Barcelona, T. 44576, F. 11, H. B-160705, I. 29º
 Pinturas CIN Canarias, S.A.U. - P. I. Güimar, Manzana 13, Parcela 2 - 38550 Güimar - Tenerife - T +34 922 422 426 - clientes@cincanarias.com - C. Soc. € 1.004.000 - CIF A33453317 - Reg. M. San Cristóbal de Tenerife, T. 1463, F. 166, H. 11-15033
 CIN Cellulose, S.A. - Chemin de la Varselle - BP 58 - 69492 Pierre Benite Cedex - France - T +33 (0) 4 72 39 77 77 - customerservice.fr@cin.com - C. Soc. € 2.215.150 - TVA FR07775843916 - RCS de Lyon B 375 643 976