

Departamento de Engenharia Civil



POTENCIAL DE BETÃO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS.

ENSAIO DE PAREDES

(Dissertação)

Joana Sofia da Cunha Ferreira Coelho

(A45672 - Licenciada em Engenharia Civil)

Orientadores:

Professor Doutor Jorge Pereira Gomes – Professor Adjunto convidado (ISEL) e Investigador Principal (LNEC)

Professora Doutora Ana Isabel Mera Marques – Investigadora Auxiliar (LNEC)

Doutor João Nuno Pacheco – Investigador (c⁵Lab)

Júri:

Presidente: Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista

Vogais:

Doutor Jorge Manuel Neto Pereira Gomes

Doutor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Setembro de 2023

Ao Carlos pelo apoio e motivação

AGRADECIMENTOS

A Dissertação aqui presente resultou do trabalho desenvolvido pela autora no âmbito do Mestrado em especialização de Estruturas. Este trabalho só foi possível de desenvolver graças a contributos de pessoas e entidades com as quais se expressam os sinceros agradecimentos:

- Ao Professor Jorge Gomes, coorientador no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, pela disponibilidade, paciência e motivação sempre que é necessário, não só ao longo da Dissertação, mas também ao longo da minha vida académica. Obrigado por ter perseguido e constituído uma equipa para desenvolver um tema que suscitava o meu interesse. Espero continuar a ter o prazer de aprender com o Professor.

- Ao Doutor João Pacheco, coorientador do c⁵Lab pela disponibilidade, paciência, partilha de conhecimento e auxílio em todas as fases da atividade experimental e desenvolvimento deste trabalho. Não conseguirei agradecer pelo esforço sentido em cada impressão. Sem o seu contributo não seria possível a realização das impressões e posterior desenvolvimento da Dissertação.

- À Professora Doutora Ana Marques, coorientadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo vasto conhecimento experimental, pela procura de soluções práticas quando o tempo escasseava, pela partilha de conhecimentos e pelo apoio sentido ao longo de todo o percurso.

Aos três coorientadores Bem Hajam.

- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil não só pela disponibilidade de recursos e meios para a realização da Dissertação, mas também pela oportunidade concedida.

- Ao Departamento de Materiais nas pessoas que o compõem e ao Doutor Manuel Vieira por toda a disponibilidade, simpatia e ajuda nas amassaduras das argamassas e impressões 3D.

- Ao Departamento de Estruturas, ao Núcleo de Comportamento de Estruturas, nas pessoas que o compõem, em especial à Doutora Helena Cruz, por toda a disponibilidade, simpatia e auxílio na preparação e ensaios experimentais.

- Ao c⁵Lab, pela cedência de uso da impressora 3D instalada no LNEC com toda a tecnologia e meios que tal acarreta e por todos os recursos disponibilizados. Agradeço também o desenvolvimento da constituição da argamassa, tema sobre o qual esta Dissertação não se desenvolveu, sem a qual não seria viável a realização das impressões.

- Ao Eng.º Tiago Ribeiro pela preciosa ajuda e companheirismo em laboratório, pela paciência e partilha de conhecimentos. Tal como ao Doutor João Pacheco, agradeço também o seu o esforço sentido em cada impressão.

- Aos Técnicos Superiores do Departamento de Materiais, Gil Rosa, Pedro Amaral e Vítor Fialho por toda a disponibilidade, auxílio e partilha de experiência.

- Ao Técnico Superior Jorge Gião e Técnico André Cordeiro do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas do Departamento de Barragens da equipa do Professor Jorge Gomes, pelo precioso auxílio, disponibilidade e dedicação durante as impressões e regularizações.

- Aos Técnicos Superiores do Departamento de Estruturas do LNEC, em especial ao Joaquim Pereira e Paulo Santos pela paciência, partilha de conhecimentos e calma na preparação e ensaios dos Modelos.

- À Técnica Superior Anabela Manteigas do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios, pela paciência, disponibilidade, dedicação e companheirismo ao longo dos ensaios experimentais.

Agradeço igualmente aos amigos e familiares que contribuíram para a realização deste trabalho:

- Ao tio Fernando Coelho, pela presença, motivação e partilha de uma casa que anteriormente foi a sua profissionalmente. Técnico Superior, exerceu funções no departamento de Barragens durante 9 anos, na antiga divisão de dimensionamento experimental e, posteriormente exerceu funções na SIC , na área de eletrotécnia até à sua aposentação. Será sempre um momento que recordarei com especial orgulho. Agradeço igualmente ao meu pai, João Coelho, que durante alguns anos também ele foi funcionário do LNEC. Obrigado, tio. Obrigado, pai.

- Aos familiares, amigos e colegas pelo apoio em todos os momentos de ausência ao longo dos últimos dois anos. Tenciono repor a minha ausência.

Ao meu marido, companheiro e amigo um agradecimento especial pela paciência, apoio e especial motivação quando ela fugia.

Mesmo sentindo que um sincero agradecimento não é suficiente, assim aqui o deixo, muito obrigado a todos.

POTENCIAL DE BETÃO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS.

ENSAIO DE PAREDES

RESUMO

Desde o século XIX até ao presente, o betão é um material largamente conhecido, estudado e utilizado na construção de infraestruturas, habitação e outros. A aplicação deste material implica elementos de cofragem, assim como elevado volume de mão de obra. Tendo em conta fatores como a escassez de mão-de-obra, o maior número de acidentes graves em relação a outras áreas de atividade e a propensão a erros humanos, devido ao recurso a mão de obra pouco qualificada, a automação das atividades da construção civil é um tema premente.

Nesta dissertação de mestrado é apresentada uma análise estrutural de protótipos de parede de betão produzidos por impressão 3D. As dúvidas que se colocam quanto ao comportamento de elementos produzidos com esta tecnologia inovadora são variadas havendo pouca investigação à data. A dissertação avalia, com estes ensaios experimentais, o comportamento estrutural a curto prazo dos protótipos de parede e os resultados alcançados contribuem para o conhecimento do comportamento estrutural de betão produzido por impressão 3D.

Para tal, a argamassa cimentícia utilizada na impressão da parede foi caracterizada por ensaios experimentais de resistência à flexão e à compressão. As paredes modelo foram instrumentadas para registo da relação força-deslocamento segundo a direção de ensaio, realizado à compressão uniaxial e com controlo de deformação até à capacidade resistente da parede.

A força de compressão máxima verificada em ensaio representa entre 15 a 50% da força que seria expectável pela caracterização da argamassa (assumindo que a distribuição de tensões na parede é uniforme, que não há imperfeições e que a resistência da parede é adequadamente deduzida pelas propriedades de provetes normalizados de argamassa). A carga máxima aplicada foi em média 2131 kN com um desvio padrão de 332 kN (coeficiente de variação de 15,5%). Verifica-se que a tensão não é distribuída de forma uniforme pela área da parede e que o módulo de deformabilidade, relativamente ao módulo de deformabilidade previsto da argamassa varia em média de 26% com um desvio padrão de 5%, sendo o seu valor médio de 9,15 GPa com um desvio padrão de 1,85%.

Após as impressões conclui-se que a relação de altura/largura de cada camada não é uma relação constante. A largura de cada camada tem em média 34,5 mm com um desvio padrão de 4,7 mm. A rotura caracterizou-se por formação de fendas verticais que se propagam ao longo da parede. Os modelos impressos apresentam fragilidade devido às imperfeições comuns na tecnologia de impressão 3D, o que acentua a tendência à rotura frágil quando submetidos à compressão.

A impressão 3D de betão carece de investigação futura que permita normalizar os ensaios de caracterização de provetes impressos e de elementos estruturais, assim como de dimensionamento. Na

presente Dissertação surge ainda a necessidade de compreender a razão pela qual a capacidade resistente dos modelos se revelou inferior ao esperado, assim como qual a influência do número de camadas na capacidade resistente e da qualidade da interface entre respectivas camadas. Em adição aos ensaios de resistência à compressão, seria útil o estudo de resistência à compressão diagonal e de tensões de corte, assim como ensaios de comparação com argamassas com incorporação de fibras.

PALAVRAS-CHAVE

Impressão 3D, Extrusão, 3DCP, Fabricação Aditiva, Argamassa cimentícia

POTENTIAL OF 3D PRINTING CONCRETE FOR STRUCTURAL APPLICATIONS. TESTING OF WALLS

ABSTRACT

Since the 19th century, concrete has been a widely known, studied, and utilized material in the construction of infrastructure, housing, and more. The application of this material involves formwork elements and a high volume of labor. Considering factors such as labor shortages, a higher number of serious accidents compared to other fields of activity, and a propensity for human errors due to the use of unskilled labor, the automation of construction activities is a pressing issue.

This master's dissertation presents a structural analysis of concrete wall prototypes produced by 3D printing. There are various uncertainties regarding the behaviour of elements produced with this innovative technology, with limited research available to date. The dissertation evaluates the short-term structural behaviour of the wall prototypes through experimental tests, and the results contribute to the understanding of the structural behaviour of 3D-printed concrete.

To achieve this, the cementitious mortar used in printing the wall was characterized through experimental tests of flexural and compressive strength. Model walls were instrumented to record the force-displacement relationship in the test direction, conducted under uniaxial compression and with deformation control up to the wall's ultimate capacity.

The maximum compression force observed in the test represents between 15 to 50% of the expected force based on the mortar characterization (assuming that stress distribution on the wall is uniform, there are no imperfections, and the wall's strength is adequately derived from standardized mortar specimen properties). The maximum applied load averaged 2131 kN with a standard deviation of 332 kN (coefficient of variation of 15,5). It is observed that the stress is not uniformly distributed across the wall's area, and the modulus of deformability, relative to the predicted modulus of deformability of the mortar varies on average by 26% with a standard deviation of 5%, with its mean value being 9,15 GPa with a standard deviation of 1,85%.

Upon examination, it was concluded that the height-to-width ratio of each layer is not constant. The width of each layer has an average of 34,5 mm with a standard deviation of 4,7 mm. The failure was characterized by the formation of vertical cracks that propagated along the wall. 3D-printed models exhibit fragility due to common imperfections in 3D printing technology, which accentuates the tendency toward brittle failure when subjected to compression, due to imperfections in the model itself.

3D concrete printing requires further research to standardize the characterization tests for printed specimens and structural elements, as well as for design. In this thesis, there is also a need to understand why the load-bearing capacity of the models turned out to be lower than expected, as well as the influence of the number of layers on load-bearing capacity and the quality of the interface between these layers. In

addition to compression strength tests, it would be useful to study diagonal compression strength and shear stresses, as well as conduct comparative tests with fiber-reinforced mortars. There is also a need for the creation of a simulation model for experimental campaign validation.

KEYWORDS

3D Concrete Printing, Extrusion, 3DPC, Additive Manufacturing, Numerical Modelling

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO	1
1.2	EVOLUÇÃO DA IMPRESSÃO 3D.....	2
1.3	MOTIVAÇÃO	5
1.4	OBJETIVO E METODOLOGIA	7
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	9
2	ESTADO DE ARTE	11
2.1	CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE IMPRESSÃO 3D	11
2.1.1	<i>Resistência à Compressão</i>	15
2.1.2	<i>Módulo de elasticidade (E)</i>	18
2.1.3	<i>Modelos Numéricos</i>	20
2.2	EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS EXISTENTES	20
3	IMPRESSÃO 3D DE PAREDE	23
3.1	PROCESSO DE IMPRESSÃO.....	23
3.2	GEOMETRIA	24
3.3	CONSTITUIÇÃO DA ARGAMASSA DE IMPRESSÃO.....	25
3.4	CAMINHO DE IMPRESSÃO.....	25
3.5	CRIAÇÃO DO FICHEIRO G-CODE	27
3.6	EQUIPAMENTO DA IMPRESSORA 3D	28
4	ACTIVIDADE EXPERIMENTAL	31
4.1	INTRODUÇÃO.....	31
4.2	OBJETIVO.....	31
4.3	CRITÉRIOS NORMATIVOS	32
4.4	IDENTIFICAÇÃO DE PAREDES	34
4.5	IMPRESSÃO 3D DOS MODELOS.....	34
4.5.1	<i>Metodologia de impressão</i>	34
4.5.2	<i>Parede modelo 0</i>	35
4.5.3	<i>Parede modelo 1</i>	37
4.5.4	<i>Parede modelo 2</i>	38
4.5.5	<i>Parede modelo 3</i>	39
4.5.6	<i>Considerações finais</i>	40
4.6	MÉTODOS DE ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA.....	41
4.6.1	<i>Objetivo</i>	41
4.6.2	<i>Caracterização das argamassas endurecidas</i>	42
4.7	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DAS PAREDE	44
4.7.1	<i>Regularização dos modelos</i>	44

4.7.2	<i>Preparação dos modelos</i>	46
4.7.3	<i>Instrumentação dos modelos</i>	51
4.7.4	<i>Equipamentos de ensaio</i>	56
5	RESULTADOS E ANÁLISE DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL	59
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS FRESCAS	59
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS	59
5.3	ENSAIO À COMPRESSÃO AXIAL	62
5.3.1	<i>Modelo 0</i>	63
5.3.2	<i>Modelo 1</i>	64
5.3.3	<i>Modelo 2</i>	67
5.3.4	<i>Modelo 3</i>	70
6	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO	79
6.1	CUMPRIMENTOS DOS OBJETIVOS PROPOSTOS	79
6.2	CONCLUSÕES	80
6.3	DESENVOLVIMENTO FUTURO	82
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - IMPRESSÃO SLA(P, 2022)	2
FIGURA 1.2 - CASA IMPRESSA EM BETÃO 3D EM EINDHOVEN (PROJECT MILESTONE)(3DPRINTEDHOUSE, N.D.)	3
FIGURA 1.3 - PERI 3D GANTRY IMPRESSORA 3D (PUZATOVA ET AL., 2022)	4
FIGURA 1.4 - IMPRESSORA 3D GANTRY EM DESIGN HÍBRIDO (BETÃO E MADEIRA) (DEAN, 2022)	4
FIGURA 1.5 - TECLA 3D EDIFÍCIO IMPRESSO WASP (CRANE, 2018)	5
FIGURA 1.6 - ÍNDICE DE CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÃO NOVA (TAXA DE VARIAÇÃO HOMÓLOGA). ENTRE JANEIRO DE 2001 E FEVEREIRO DE 2023 (INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA, 2023)	6
FIGURA 1.7 - NÚMERO DE ACIDENTES DE TRABALHO MORTAIS (“RELATÓRIO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO EM PORTUGAL 2022 – 1º SEMESTRE,” 2022)	7
FIGURA 1.8 - PLANEAMENTO DAS FASES DA DISSERTAÇÃO.....	8
FIGURA 2.1 - PAREDES IMPRESSAS DE 1 E 10 METROS ANTES E DEPOIS DE ROTURA PLÁSTICA (WOLFS ET AL., 2019)	12
FIGURA 2.2 - IMPRESSÃO DE PAREDE COM MISTURA ADICIONADA DE FIBRAS PVA (JO ET AL., 2020)	14
FIGURA 2.3 - DIREÇÃO DE CARGA DE ENSAIO À COMPRESSÃO (RAHUL ET AL., 2019)	15
FIGURA 2.4 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ELEMENTOS IMPRESSOS E EM MOLDE (RAHUL ET AL., 2019)	16
FIGURA 2.5 - PROVETES DURANTE O TESTE (À ESQUERDA) E APÓS O TESTE (À DIREITA) (HOFFMANN ET AL., 2020)	16
FIGURA 2.6 - COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DA MISTURA USADA EM (HOFFMANN ET AL., 2020)	17
FIGURA 2.7 - DIREÇÕES DE ENSAIOS EM (LE ET AL., 2012)	18
FIGURA 2.8 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ELEMENTOS DE BETÃO IMPRESSOS EM COMPARAÇÃO COM ELEMENTOS MOLDADOS (LE ET AL., 2012)	18
FIGURA 2.9 - CASA IMPRESSA PELA EMPRESA PERI EM 2020 (V., 2022)	20
FIGURA 2.10 - CASA SPHERE, MARÇO 2022 (SERENDIX INC, 2022).....	21
FIGURA 2.11 - CASA IMPRESSA POR TWENTE ADDITIVE MANUFACTURING (V., 2022)	21
FIGURA 2.12 - CASA IMPRESSA PELA EMPRESA 3DCP GROUP, DINAMARCA (KATSIKOPOULOU, 2022)	22
FIGURA 3.1 - IMPRESSORA 3D DE BETÃO DO C5LAB	24
FIGURA 3.2 - ESQUEMA PRELIMINAR DE PAREDE PROPOSTA	24
FIGURA 3.3 - CAMINHO DE IMPRESSÃO DA CAMADA ÍMPAR	26
FIGURA 3.4 - CAMINHO DE IMPRESSÃO DA CAMADA PAR	26
FIGURA 3.5 – EXCENTRICIDADES ENTRE CAMADAS PARES E ÍMPARES E PONTO DE TRANSIÇÃO NO MODELO 1.....	27
FIGURA 3.6 - DISTÂNCIA ENTRE AS DIAGONAIS E AS LATERAIS DA PAREDE	28
FIGURA 3.7 - PÓRTICO, MANGUEIRA E SISTEMA DE BOCAL DA IMPRESSORA 3D	29
FIGURA 3.8 - BOMBA, ROTOR, FUNIL E MANGUEIRA DE IMPRESSORA 3D	29
FIGURA 4.1 - CRONOGRAMA DE ATIVIDADE EXPERIMENTAL	32
FIGURA 4.2 - CRITÉRIOS A CONSIDERAR EM PAREDE DE ALVENARIA (CEN, 1998)	33
FIGURA 4.3 - FUNIL COM INSTRUMENTOS DE AJUDA DE ENCAMINHAMENTO DE ARGAMASSA	35
FIGURA 4.4 - ARGAMASSA COLOCADA NO FUNIL.....	35
FIGURA 4.5 - BETONEIRA DE 35 LITROS UTILIZADA NA AMASSADURA DA ARGAMASSA USADA NAS IMPRESSÕES 3D.....	36

FIGURA 4.6 - IMPRESSÃO DE PAREDE MODELO 0.....	36
FIGURA 4.7 - IMPRESSÃO DE PAREDE MODELO 0.....	36
FIGURA 4.8 - PAREDE MODELO 0	36
FIGURA 4.9 - DERRUBAMENTO DE PARTE DA PAREDE MODELO 1.....	37
FIGURA 4.10 - VISTA SUPERIOR DA PAREDE MODELO 1.....	37
FIGURA 4.11 - VISTA LATERAL DA PAREDE MODELO 1.....	37
FIGURA 4.12 - IMPRESSÃO FALHADA NA TENTATIVA DE PRODUÇÃO DA PAREDE MODELO 2	38
FIGURA 4.13 - IMPRESSÃO DE PAREDE MODELO 2	39
FIGURA 4.14 - VISTA LATERAL DA PAREDE MODELO 2.....	39
FIGURA 4.15 - IMPRESSÃO E VISTAS LATERAIS DA PAREDE MODELO 3	40
FIGURA 4.16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MESA DE ESPALHAMENTO (MARQUES, 2020).....	41
FIGURA 4.17 - ENSAIO DE ESPALHAMENTO DE ARGAMASSA CIMENTÍCIA	41
FIGURA 4.18 - EXEMPLO DE PROVETE DA AMASSADURA DA ARGAMASSA DA PAREDE MODELO 3.....	42
FIGURA 4.19 - ENSAIO DE PROVETE À RESISTÊNCIA DE FLEXÃO NO EQUIPAMENTO FORM+TEST SEIDNER.....	43
FIGURA 4.20 - ENSAIO DE PROVETE À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO EQUIPAMENTO FORM+TEST SEIDNER	43
FIGURA 4.21 - METODOLOGIA DE REGULARIZAÇÃO DO MODELO 1	45
FIGURA 4.22 - REGULARIZAÇÃO DO MODELO 1.....	45
FIGURA 4.23 - FENDAS DE RETRAÇÃO NO MODELO 1	45
FIGURA 4.24 - CURA HÚMIDA DO MODELO 1	45
FIGURA 4.25 - METODOLOGIA DE REGULARIZAÇÃO DO MODELO 2	45
FIGURA 4.26 - REGULARIZAÇÃO DO MODELO 2.....	45
FIGURA 4.27 - METODOLOGIA DE REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3	46
FIGURA 4.28 - REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3.....	46
FIGURA 4.29 - ESQUEMA DE MEDIÇÕES DOS MODELOS APÓS REGULARIZAÇÃO	47
FIGURA 4.30 - PESAGEM DO MODELO 1	50
FIGURA 4.31 - PESAGEM DO MODELO 2	50
FIGURA 4.32 - PESAGEM DO MODELO 3	50
FIGURA 4.33 - DESNÍVEL DA REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3	50
FIGURA 4.34 - VERIFICAÇÃO DA REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3.....	50
FIGURA 4.35 - SEGUNDA REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3, VISTA DE FRENTE.....	51
FIGURA 4.36 - SEGUNDA REGULARIZAÇÃO DO MODELO 3, VISTA LATERAL	51
FIGURA 4.37 - TRANSDUTOR MONTADO EM APOIO DE INSTRUMENTAÇÃO	51
FIGURA 4.38 - ESQUEMA DE LOCALIZAÇÃO DE APOIO DE FIOS CONECTORES AOS TRANSDUTORES	52
FIGURA 4.39 - INSTRUMENTAÇÃO DESLOCALIZADA DO MODELO 1	53
FIGURA 4.40 - INSTRUMENTAÇÃO DESLOCALIZADA DO MODELO 1 - VISTA LATERAL	53
FIGURA 4.41 - INSTRUMENTAÇÃO DESLOCALIZADA DO MODELO 2	53
FIGURA 4.42 - INSTRUMENTAÇÃO DESLOCALIZADA DO MODELO 2 - VISTA LATERAL	53
FIGURA 4.43 - TRANSDUTORES LOCALIZADOS NO PRATO SUPERIOR DA PRENSA	54

FIGURA 4.44 - ÁREA DE SECÇÃO DO MODELO 1	55
FIGURA 4.45 - ÁREA DE SECÇÃO DO MODELO 2	55
FIGURA 4.46 - ÁREA DE SECÇÃO DO MODELO 3	55
FIGURA 4.47 - PRENSA MFL UPS 5000V UTILIZADA NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56
FIGURA 4.48 - PRATO INFERIOR DESLIZANTE, NO MOMENTO PROTEGIDO POR PLÁSTICO	57
FIGURA 4.49 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS SPIDER 8	57
FIGURA 4.50 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS SPIDER 8 (MARQUES, 2020)	57
FIGURA 4.51 - INTERFACE FORÇA(kN) VERSUS DESLOCAMENTO (MM)	58
FIGURA 5.1 - COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS ARGAMASSAS	61
FIGURA 5.2 - COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS	62
FIGURA 5.3 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO MODELO 0	63
FIGURA 5.4 - MODELO 0 APÓS ENSAIO E RESPECTIVO MECANISMO DE ROTURA	63
FIGURA 5.5 - MODELO 0 APÓS ENSAIO - PORMENOR	64
FIGURA 5.6 - MODELO 0 APÓS MANUSEAMENTO	64
FIGURA 5.7 - PAREDE MODELO 1 INSTRUMENTADA PREPARADA PARA ENSAIO	65
FIGURA 5.8 - MODELO 1 - FISSURA (E PORMENOR) A MEIO VÃO COM CARGA APLICADA DE CERCA DE 100 kN	65
FIGURA 5.9 - MODELO 1 APÓS ENSAIO	65
FIGURA 5.10 - ESQUEMA DE LARGURA DE CADA CAMADA, COM LINHAS E VALOR DE LARGURA MÉDIA (MM) DO MODELO 1	66
FIGURA 5.11 - CORTE VERTICAL DA PAREDE MODELO 1	66
FIGURA 5.12 - GRÁFICO FORÇA (kN) VERSUS DESLOCAMENTO (MM) DA PAREDE MODELO 1	67
FIGURA 5.13 - MODELO 2 PRÉ ENSAIO	68
FIGURA 5.14 - MODELO 2 APÓS ENSAIO	68
FIGURA 5.15 - MODELO 2 APÓS ENSAIO COM PORMENORES DO MECANISMO DE ROTURA OBTIDO	68
FIGURA 5.16 - ESQUEMA DE LARGURA DE CADA CAMADA, COM LINHAS E VALOR DE LARGURA MÉDIA (MM) DO MODELO 2	69
FIGURA 5.17 - GRÁFICO FORÇA (kN) VERSUS DESLOCAMENTO DOS TRANSDUTORES (MM) DA PAREDE MODELO 2	69
FIGURA 5.18 - MODELO 3 PRÉ ENSAIO	71
FIGURA 5.19 - MODELO 3 APÓS ENSAIO	71
FIGURA 5.20 - MODELO 3 APÓS ENSAIO COM PORMENOR DO MECANISMO DE ROTURA OBTIDO	71
FIGURA 5.21 - GRÁFICO DA FORÇA VERSUS DESLOCAMENTO DOS TRANSDUTORES DA PAREDE MODELO 3	72
FIGURA 5.22 - ÁREA DE OBTENÇÃO DA ENERGIA DE ROTURA	72
FIGURA 5.23 - ESQUEMA DE LARGURA DE CADA CAMADA, COM LINHAS E VALOR DE LARGURA MÉDIA (MM) DO MODELO 3	74
FIGURA 5.24 - DESTACAMENTO DE PARTE DO MODELO 3 PARA LEITURA DE LARGURA DE CAMADAS	74
FIGURA 5.25 - RELAÇÃO ENTRE EXTENSÕES A PARTIR DOS DESLOCAMENTOS DA PRENSA E DOS PROVETES NO INTERVALO DE FORÇAS ENTRE 1000 E 2000 kN	76
FIGURA 5.26 - GRÁFICO TENSÃO (MPa), EXTENSÃO (-) DOS MODELOS 2 E 3	77
FIGURA 6.1 - COMPARAÇÃO DE LARGURA DE CAMADAS DO MODELO 1, 2 E 3, DA E ESQUERDA PARA A DIREITA	81

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2.1 - RESUMO DE ALGUNS ENSAIOS DE PROVETES IMPRESSOS SEM RECURSO A COFRAGEM (LE <i>ET AL.</i> , 2012; RAHUL <i>ET AL.</i> , 2019; SKIBICKI <i>ET AL.</i> , 2021)	19
QUADRO 3.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS PAREDES IMPRESSAS	25
QUADRO 3.2 - COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA (KG/M ³).....	25
QUADRO 4.1 - MEDIÇÕES DE PROVETES PEQUENOS DE PAREDES DE ALVENARIA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (CEN, 1998)	33
QUADRO 4.2 - MEDIÇÕES DA PAREDE A ENSAIAR	33
QUADRO 4.3 - CONDIÇÕES A RESPEITAR.....	34
QUADRO 4.4 - DESIGNAÇÃO DAS PAREDES.....	34
QUADRO 4.5 - MEDIÇÕES EM PLANTA MEDIDAS NO TOPO DA PAREDE (CM) E, PESO (KG), DOS MODELOS 1, 2 E 3	48
QUADRO 4.6 - MEDIÇÕES EM ALÇADO EM COMPRIMENTO E ALTURA DO MODELO 1 (CM).....	48
QUADRO 4.7 - MEDIÇÕES EM ALÇADO EM COMPRIMENTO E ALTURA DO MODELO 2 (CM).....	49
QUADRO 4.8 - MEDIÇÕES EM ALÇADO EM COMPRIMENTO E ALTURA DO MODELO 3 (CM).....	49
QUADRO 4.9 - CORRESPONDÊNCIA DE EQUIPAMENTO COM LOCALIZAÇÃO NO MODELO	54
QUADRO 4.10 - ÁREA DE SECÇÃO DE CADA PAREDE MODELO	55
QUADRO 4.11 - CORREÇÃO DA ÁREA DE SECÇÃO TENDO EM CONTA A LARGURA MÉDIA DAS CAMADAS	56
QUADRO 5.1 - AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA ATRAVÉS DO ENSAIO DE ESPALHAMENTO (MM).....	59
QUADRO 5.2 - ARGAMASSAS CARACTERIZADAS	60
QUADRO 5.3 - CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS IMPRESSOS E FORÇA DE COMPRESSÃO MÁXIMA À ROTURA	74
QUADRO 5.4 - COMPARAÇÃO DE FORÇA MÁXIMA À COMPRESSÃO EXPECTÁVEL COM A REAL DE ENSAIO	75
QUADRO 5.5 - COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Alfabeto romano

A_c	Área de seção transversal do provete em contacto com os pratos da prensa
d	Dimensões laterais do provete
DV	Desvio Padrão
E	Módulo de Elasticidade
E_{Prensa}	Módulo de deformabilidade obtido por deslocamentos medidos no prato superior da prensa
$E_{Prensa/Argamassa}$	Relação entre o módulo de deformabilidade e módulo de deformabilidade da argamassa
F	Fator de segurança
f_a	Tensão de compressão admissível
f_c	Resistência à compressão
$F_{compressão_expectável_proвете}$	Força de compressão expectável pela análise do provete
$F_{compressão_máxima_ensaio}$	Força de compressão máxima em ensaio
f_{cf}	Resistência à flexão
F_f	Carga máxima aplicada no provete
f'_m	Resistência à compressão média de ensaio
h_u	Altura da unidade de alvenaria
h_s	Altura do provete
J	Joule
l	distância entre roletes inferiores de apoio
l_s	Largura do provete
l_u	Largura da unidade de alvenaria
rpm	Rotações por minuto
t_u	Espessura do provete
% atingida de Força máxima	Percentagem atingida entre Força de compressão expectável e de ensaio

Alfabeto grego

ε *Extensão*

$\sigma_{c_argamassa}$ *Tensão de compressão da argamassa*

σ_{c_parede} *Tensão de compressão da parede*

Siglas

3DPC	<i>Three Dimensional Printed Concrete – Impressão a Três Dimensões de Betão</i>
c ⁵ Lab	<i>c⁵Lab – Sustainable Construction Materials Association</i>
CC	<i>Contour Crafting – Impressão de Contorno</i>
EN	<i>Norma Europeia</i>
FDM	<i>Fusion Deposition Modelling – Modelação por Deposição de Material Fundido</i>
HPMC	<i>Hydroxypropyl Methylcellulose - Hidroxipropilmetilcelulose</i>
INE	<i>Instituto Nacional de Estatística</i>
IPQ	<i>Instituto Português de Qualidade</i>
LNEC	<i>Laboratório Nacional de Engenharia Civil</i>
LOM	<i>Fusion Laminated Object Manufacturing – Fabricação de Objectos Laminados</i>
LVDT	<i>Transdutor de deslocamento variável linear</i>
NP	<i>Norma Portuguesa</i>
PVA	<i>Polyvinyl Alcohol - Álcool polivinílico</i>
SLA	<i>Stereolithography – Estereolitografia</i>
SLS	<i>Selective Laser Melting – Sintetização Seletiva por Laser (ou Fusão Seletiva por Laser)</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
SP	<i>Superplasticizer – Superplastificante</i>
W20	<i>Transdutor de deslocamento com um campo de medição ± 20 mm</i>
WA50	<i>Transdutor de deslocamento com um campo de medição ± 50 mm</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O tema *Potencial de betão produzido por impressão 3D para aplicações estruturais. Ensaio de Paredes* foi escolhido no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, na área de especialização em Estruturas com coorientação do Professor Jorge Gomes, docente desta instituição, assim como Doutor João Nuno Pacheco e da Doutora Ana Marques.

Tendo em conta fatores como a escassez de mão-de-obra, a tendência a maior número de acidentes graves em relação a outras áreas de atividade e, erros humanos repetidos, faz sentido pensar na construção civil como algo passível de ser automatizado e robotizado. Desta forma, o estudo do que foi investigado até à data permite que se ponha a questão presente neste trabalho: a potencialidade do betão impresso em 3D para a produção de paredes estruturais. Para tal e, em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e com o c⁵Lab, procedeu-se à impressão de paredes de dimensões e geometria definidas previamente, para posterior ensaio de resistência estrutural.

A argamassa usada na impressão 3D foi caracterizada através de ensaios de resistência à flexão e à compressão. De seguida a parede foi sujeita a ensaio de resistência à compressão uniaxial, caracterizando o seu comportamento estrutural.

Após a recolha de dados, realiza-se uma análise e comparação da capacidade resistente estimada com a capacidade observada experimentalmente nos ensaios às paredes.

A Dissertação de Mestrado teve uma duração de 10 meses.

1.2 Evolução da Impressão 3D

A impressão a 3 dimensões, também denominada por fabricação aditiva, surgiu pela primeira vez em 1987 patenteada pela empresa *3D Systems* com a tecnologia de Estereolitografia (SLA), processo que, com recurso a lasers, solidifica finas camadas de polímeros líquidos sensíveis à luz ultra-violeta (Wohlers and Gornet, 2015). Na Figura 1.1 é possível ver a tecnologia de impressão SLA. Em 1991, algumas tecnologias diferentes eram já comercializadas, como exemplos, Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM), por *Stratasys*, Fabricação de objetos laminados por *Helisys* (P, 2022; Wohlers and Gornet, 2015). Em 1992, a tecnologia de Sintetização ou Fusão seletiva por laser (SLS) foi introduzida por DTM, agora parte da *3D Systems*, enquanto que em 1996 começam a ser comercializadas as impressoras de baixo custo (Wohlers and Gornet, 2015). As áreas de aplicação de objetos impressos em 3D são das mais variadas, desde a indústria aero-espacial, à indústria automóvel, à medicina e tantas outras que poderiam ser mencionadas (Lopes, 2016).

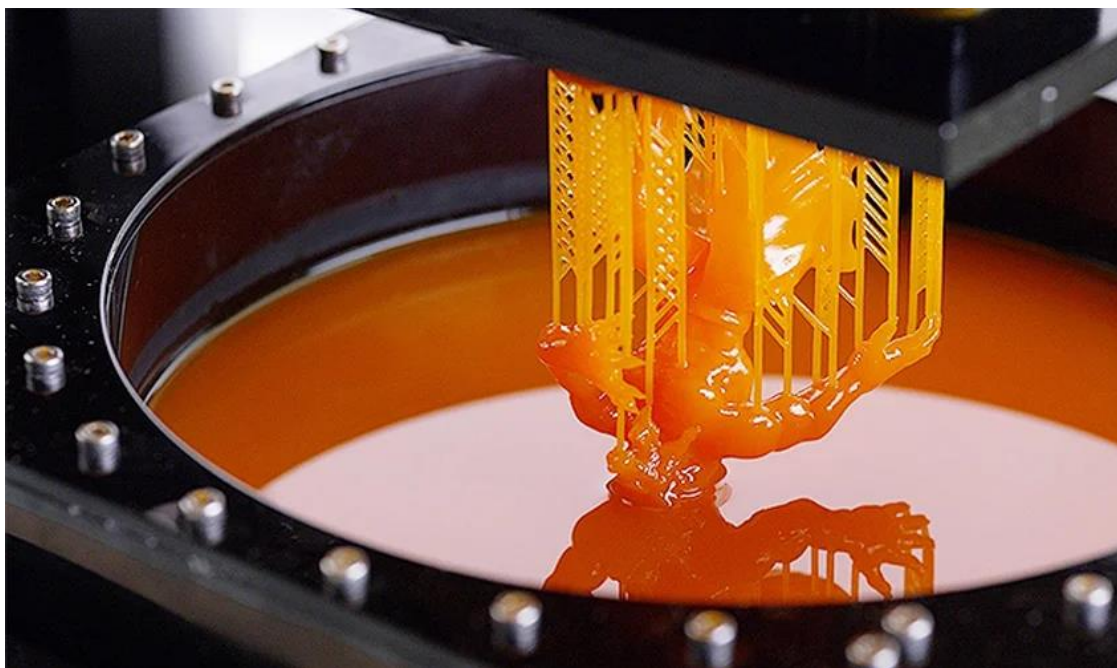


Figura 1.1 - Impressão SLA(P, 2022)

Desde que exista o devido estudo da tecnologia, a aplicação de fabricação aditiva à construção civil é exequível. A evolução digital e tecnológica que vivemos aliada ao elevado custo de mão de obra, assim como a falta da mesma, favorece a adoção da fabricação aditiva pela indústria da construção, nomeadamente para a produção de betão em impressão 3D.

A construção associada à impressão 3D permite, não só a redução de tempo de execução, possivelmente reduzindo custos, como confere liberdade arquitetónica na conceção de elementos

estruturais. A Figura 1.2 mostra a primeira casa produzida em Eindhoven, em abril de 2021, segundo esta tecnologia.



Figura 1.2 - Casa impressa em betão 3D em Eindhoven (Project Milestone)(3dprintedhouse, n.d.)

A técnica de Impressão 3D permite criar superfícies de materiais extrudidos sem necessidade de recurso a cofragem. Esta técnica de fabricação aditiva permite que um pórtico controlado por software adequado extruda betão ou, mais frequentemente, argamassa, por camadas e com um caminho pré definido, ganhando a forma do elemento estrutural inicialmente planeado (Rouhana *et al.*, 2014). Na Figura 1.3, Figura 1.4 e Figura 1.5 mostra-se diferentes braços ou pórticos de impressão 3D de betão.



Figura 1.3 - Peri 3D Gantry Impressora 3D (Puzatova et al., 2022)

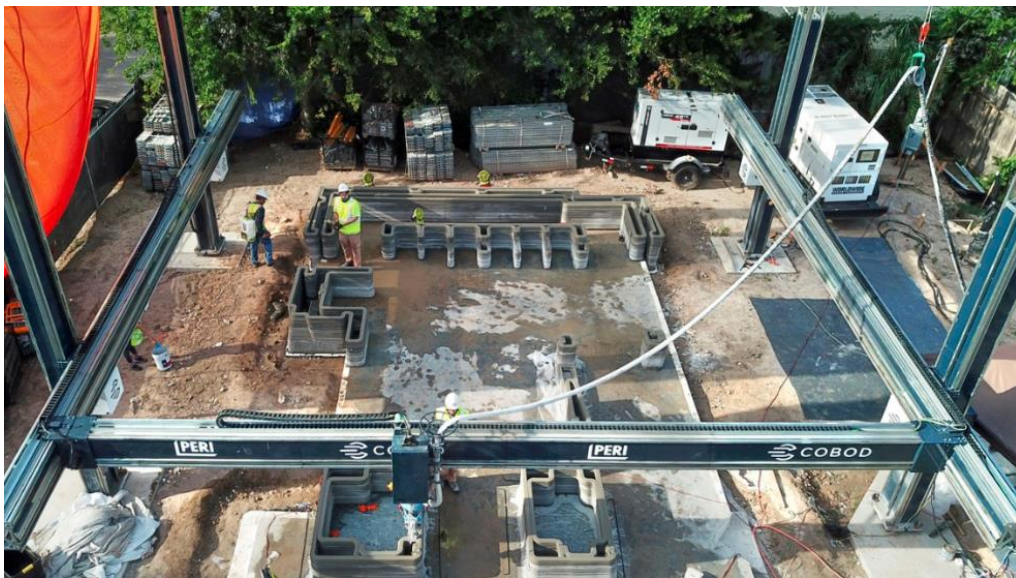


Figura 1.4 - Impressora 3d Gantry em design híbrido (betão e madeira) (Dean, 2022)



Figura 1.5 - Tecla 3D Edifício impresso WASP (Crane, 2018)

A impressão 3D contribui para um desenvolvimento sustentável através da redução do tempo de construção, do consumo de energia, do volume de betão necessário e da geração de resíduos de construção, assim como a redução ou abolição do recurso a cofragens (Karpova *et al.*, 2021). A redução significativa da mão de obra, conduz a uma redução do erro humano e potenciais acidentes de trabalho (Hoffmann *et al.*, 2020).

Relativamente a ensaios térmicos com paredes impressas em 3D, em (Karpova *et al.*, 2021) conclui-se que o uso de paredes impressas em 3D, com mistura que incluiu perlita, permite diminuir a espessura da parede em 100 mm e 50 mm mantendo resistência térmica semelhante a paredes executadas por métodos tradicionais em alvenaria e betão respetivamente.

1.3 Motivação

A construção civil assenta largamente em processos construtivos manuais com necessidade constante de mão de obra especializada. A escassez de mão de obra sentida nos últimos anos induz um aumento do custo da mesma na generalidade da construção. De acordo com o INE, o custo da mão de obra, em variação homóloga, aumentou 8,8% em Fevereiro de 2023 (Instituto Nacional de Estatística, 2023), pelo que a inovação tecnológica aliada à automatização de processos poderá traduzir-se numa redução de necessidade de mão de obra e, possivelmente, numa redução deste custo. Na Figura 1.6,

verifica-se a variação de custos de construção de habitação nova (mão de obra, materiais e total) em taxa de variação homóloga. Torna-se perceptível que o custo de mão de obra aumentou previamente à Guerra da Ucrânia/Rússia e ao período pandémico COVID, enquanto os custos de materiais têm claro aumento após os dois eventos mencionados.

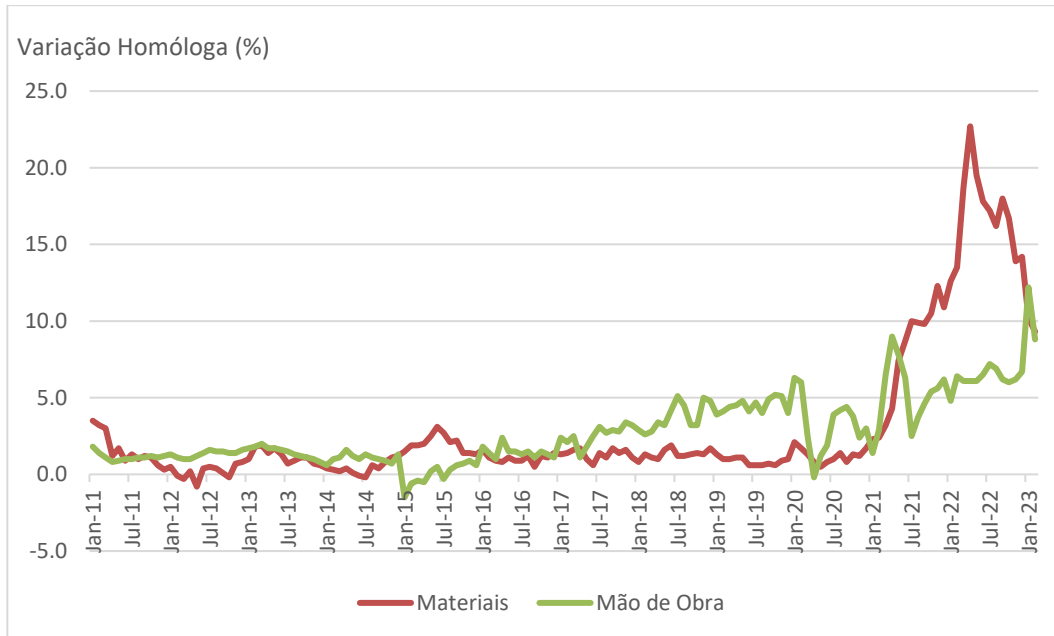


Figura 1.6 - Índice de custos de construção de habitação nova (taxa de variação homóloga). Entre Janeiro de 2011 e Fevereiro de 2023 (Instituto Nacional de Estatística, 2023)

Por outro lado, o uso de mão de obra humana introduz dois fatores aliados, erro humano desde a fase de projeto até à execução, assim como acidentes, que podem estar associados a perdas humanas. Segundo os dados disponibilizados pela Autoridade para as Condições de Trabalho, até 2 de setembro de 2022 das 72 vítimas mortais em acidentes de trabalho, 31 aconteceram no sector da construção (“Relatório do Setor da Construção em Portugal 2022 – 1º Semestre,” 2022). O número de acidentes no sector da construção civil em comparação com a globalidade pode ser consultado na Figura 1.7.

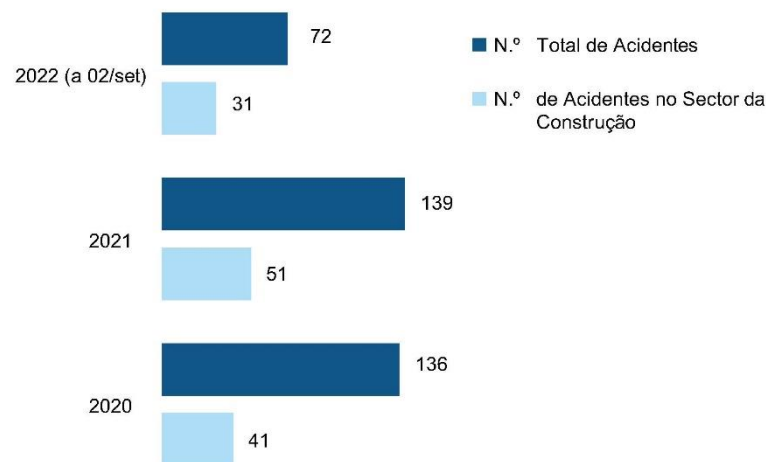


Figura 1.7 - Número de acidentes de trabalho mortais (“Relatório do Setor da Construção em Portugal 2022 – 1º Semestre,” 2022)

Considerando a tendência atual em escassez de mão de obra, a necessidade de alojamento como bem essencial, bem como as necessidades de construção decorrentes da urbanização em países subdesenvolvidos, aliada à acelerada e atual evolução tecnológica, considera-se que a impressão 3D de betão pode vir a ser uma solução futura para o sector da construção. Contudo, sendo este tema emergente, há escassez de estudo referente ao comportamento estrutural deste tipo de material.

1.4 Objetivo e Metodologia

A presente dissertação de mestrado iniciou-se pelo interesse da autora em impressões 3D e na sua aplicabilidade ao sector da construção civil. Para tal, foi feita uma investigação às publicações existentes sobre o tema e necessidades de conhecimento futuro. Nesse sentido, verificou-se que a análise do comportamento estrutural de uma parede de betão impressa em 3D é ainda muito escassa a nível mundial.

Desta forma, em parceria com o LNEC e o c⁵Lab tomou-se como objetivo o ensaio de protótipos de paredes de betão produzida por impressão 3D. Esta parede foi concebida tendo como base o estabelecido na norma EN 1052-1:1999 (CEN, 1998), referente a paredes de alvenaria, por falta de norma que melhor se adegue. Uma vez que a parede impressa é constituída por camada sobre camada, alguns autores comparam estes elementos construtivos com paredes de alvenaria, também estas constituídas por camadas (Rahul *et al.*, 2019). Após a verificação normativa, foram tidos em conta parâmetros práticos e limitações do equipamento disponível, que condicionaram a espessura das camadas.

Na Figura 1.8 esquematiza-se as diferentes fases da Dissertação.

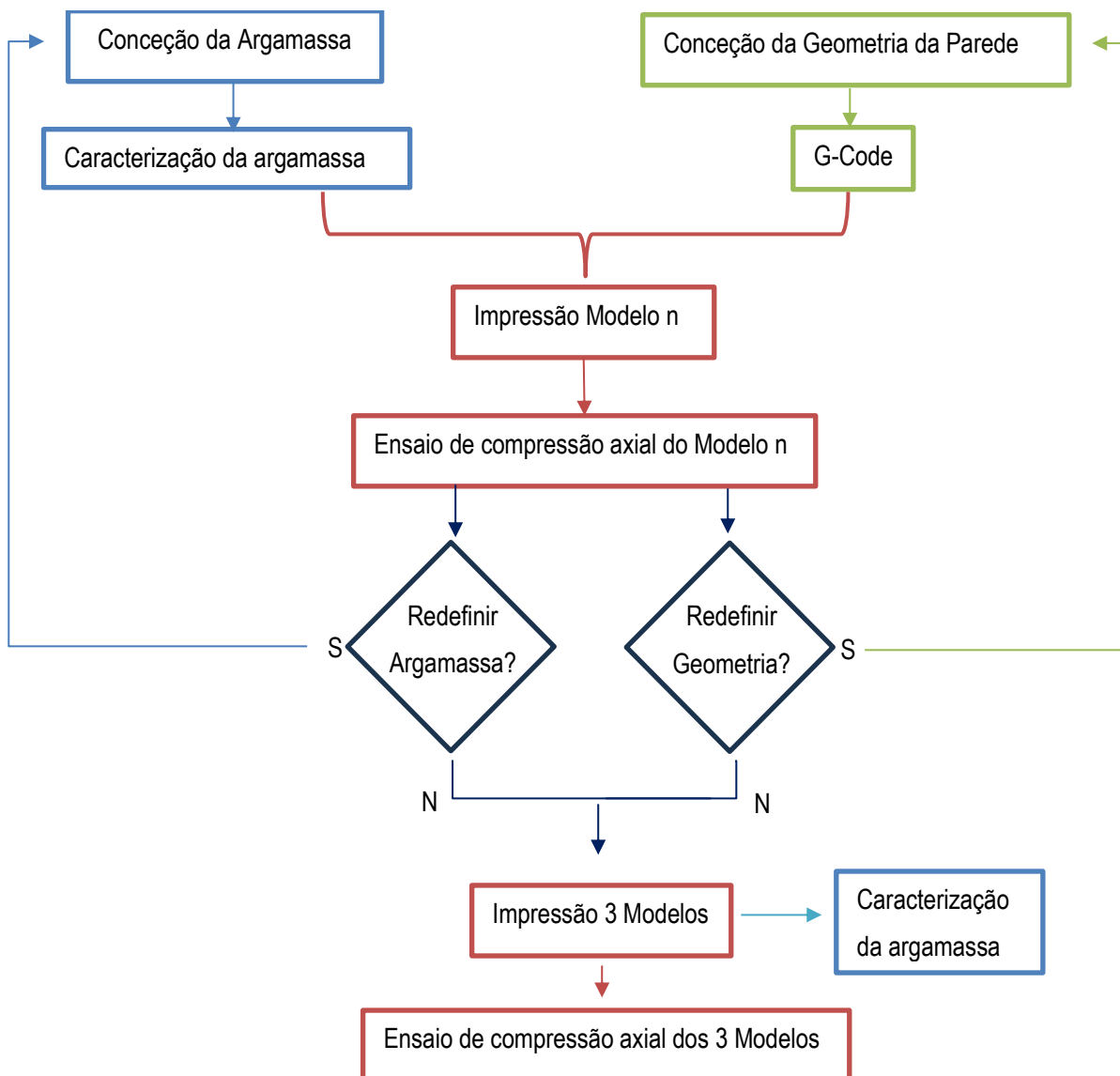


Figura 1.8 - Planeamento das fases da Dissertação

A conceção geométrica foi transposta para G-Code, código elaborado tendo por base as coordenadas relativas do ficheiro DWG, de forma a ser lida pela impressora. Como a geometria idealizada para a parede está condicionada pelas características da impressora e argamassa a utilizar, a geometria idealizada foi adaptada após impressão de uma parede preliminar, designada por Modelo 0.

Assim que o modelo final da parede foi definido, a parede foi impressa de forma a ser testada a sua resistência à compressão axial. Idealmente, preveu-se ensaios de resistência à compressão diagonal e ensaios de flexão, porém, dadas as limitações temporais estes últimos ensaios foram descartados.

Em adição ao ensaio de resistência à compressão axial da parede impressa, foi definido ainda um programa de ensaios para estudar a argamassa com o recurso ao estudo da argamassa em provetes

caracterizadas por ensaios de espalhamento (em argamassa fresca), segundo a norma NP EN 12350-5, (IPQ, 2009a) assim como ensaios de resistência à tração por flexão, segundo a norma NP EN 12390-5, (IPQ, 2009b) e, resistência à compressão segundo a norma NP EN 12390-3, (IPQ, 2009c) (em argamassa endurecida).

Os dados resultantes dos ensaios referidos poderão ser comparados com a literatura existente até ao momento.

As questões que se colocam com esta tecnologia inovadora são variadas e existe espaço para estudo extenso sobre o tema. Pretende-se, com estes ensaios, a melhor compreensão do comportamento estrutural a curto prazo de uma parede com função estrutural.

Por último, deu-se a realização dos ensaios, a sua caracterização e análise crítica, assim como a reflexão das suas implicações para estudos futuros. Não se exclui que existiram dificuldades a nível laboratorial pela implicação de gestão de recursos humanos e equipamento pelo c⁵Lab e pelo LNEC e tempo disponível limitado.

1.5 Estrutura do documento

A dissertação de mestrado presente está organizada na totalidade de 7 capítulos, de acordo com os parágrafos seguintes.

O Capítulo 1 descreve o enquadramento da dissertação, os respetivos objetivos e a motivação para a sua realização. Neste capítulo é ainda feito um pequeno enquadramento da evolução da impressão 3D e, termina com a descrição da estrutura do documento.

O estado atual de conhecimento é descrito no Capítulo 2. Neste capítulo procura-se descrever a investigação e ensaios já realizados no âmbito do tema, assim como perceber quais as características mais relevantes neste processo construtivo inovador. Por fim, são dados alguns exemplos de construções já existentes com recurso a impressão 3D de betão.

No Capítulo 3 descreve-se o processo e metodologia necessário desde a conceção geométrica da parede à sua impressão em argamassa cimentícia abordando as dificuldades e diferentes fases até à realização da impressão.

A atividade experimental é descrita no Capítulo 4 abordando os objetivos e critérios normativos, a metodologia de caracterização da argamassa através de métodos de ensaios descritos no mesmo capítulo. As paredes impressas são também identificadas e o ensaio de compressão axial descrito.

No Capítulo 5 são abordados os resultados alcançados com a atividade experimental relativamente à caracterização das argamassas e aos ensaios de compressão axial das paredes

As conclusões da presente dissertação são descritas no Capítulo 6, assim como uma perspetiva futura de investigação decorrente do trabalho desenvolvido.

Por fim, no Capítulo 7, e último, é feita referência à bibliográfica consultada, analisada e referenciada para o desenvolvimento desta dissertação.

O ficheiro G-Code de inserção de dados na impressora disponibilizada está disponível para consulta no Anexo I.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Características e comportamento estrutural de impressão 3D

A mistura de materiais usados na impressão 3D determina fatores importantes como a reologia, capacidade de bombeamento, capacidade de construção e fluidez (Zhang *et al.*, 2021). Para se obter um comportamento reologicamente apropriado, a mistura deverá ter distribuição de partículas finas e, endurecimento lento, para não entupir o sistema de bombagem. O tipo e consistência da superfície exterior depende do bocal usado na extrusão da mistura cimentícia (Karpova *et al.*, 2021). Uma possibilidade para suavizar a superfície de extrusão passa por um mecanismo que inclua uma espátula que suaviza o caminho assim que a mistura é extrudida (Gosselin *et al.*, 2016). Contudo, o sistema bocal/espátula tem desvantagens, como a impossibilidade de impressão de elementos com geometria regular em altura e a necessidade de o bocal da impressora estar dotado de eixo de rotação robotizado que permita o movimento da espátula assim que a mistura é extrudida pelo bocal.

O termo “construtabilidade”, ou capacidade de construção, pode ser definido como a capacidade da argamassa empilhar verticalmente camadas impressas sem perder forma (Ma *et al.*, 2018), sem recurso a molde ou a cofragem, resistindo ao seu peso próprio e ao peso das camadas de impressão seguintes. A fluidez é influenciada por aditivos químicos, como plastificantes ou retardadores de presa, sendo que o primeiro melhora a fluidez. No entanto, plastificante em excesso reduz a construtabilidade; já o retardador de presa melhora a extrusão (Li *et al.*, 2020). Porém, ao diminuir a rigidez no tempo provoca rotura de camadas iniciais pois não têm capacidade resistente para suportar a seguinte. Outra alternativa no controlo da fluidez da mistura é a adição de cinzas volantes ou sílica de fumo.

A perda de construtabilidade pode levar à deformação da peça impressa. Quando a tensão na camada inferior atinge a tensão máxima, a parede impressa pode falhar por rotura plástica, Figura 2.1. Por outro lado, a rotura por encurvadura pode acontecer por esbelteza vertical da parede, por progressivas deformações laterais ou excentricidade entre camadas superiores (Li *et al.*, 2020).

A impressão é feita camada a camada pelo que a capacidade de carga de cada camada entre o momento da extrusão e a impressão final do elemento deve ser suficiente para resistir ao peso próprio de

todas as camadas que a sobrepõem. Por isso, a velocidade de extrusão é determinante para que cada camada tenha resistência suficiente para suportar o peso da camada extrudida imediatamente por cima (Hoffmann *et al.*, 2020; Rahul *et al.*, 2019). Em Hoffmann *et al.*, 2020 sugere-se que misturas com tensões de corte ente 0.3 e 0.9 kPa são adequadas em termos de extrusabilidade e construtabilidade.



Figura 2.1 - Paredes impressas de 1 e 10 metros antes e depois de rotura plástica (Wolfs *et al.*, 2019)

O parâmetro *Open Time* toma especial importância pois permite avaliar a capacidade de construção de determinada argamassa. O termo indica o tempo durante o qual a argamassa tem capacidade de extrusão, mantendo condições de construtabilidade. Em Li *et al.*, 2020, o *Open Time* necessário para uma argamassa é definido como o tempo decorrido entre o contacto de água com os componentes secos da mistura e o instante do tempo até ao qual o elemento pode ser impresso. Guowei (Ma *et al.*, 2018) propõe 70 minutos como tempo máximo alvo em que a mistura mantém capacidade de extrusão, tendo também construtabilidade.

Em resumo, existem parâmetros necessários, mas contraditórios na escolha da mistura ideal. Enquanto a fluidez, a extrusão e a ligação entre camadas beneficiam de *Open Time* maior, a construtabilidade beneficia de *Open Time* menor. Assim, cada mistura deve ser testada, pois verifica-se que é difícil obter uma mistura com *Open Time* adequado mantendo a construtabilidade e evitando roturas plásticas durante a impressão.

Em Le *et al.*, 2012 é assumido que este tipo de estrutura é anisotrópica pelo facto da impressão ser linear o que provoca camadas orientadas apenas numa direção. A argamassa impressa assume-se com resistências diferentes em cada direção, dependendo da direção de impressão. No entanto há estudos

não consensuais como Rahul *et al.*, 2019, em que não foi verificado comportamento anisotrópico quando o elemento foi sujeito a cargas de compressão.

Neste tipo de tecnologia, os reforços tradicionais deixam de fazer sentido, mas, para tal, o problema de resistência à tração da mistura tem de ser estudado. A introdução de fibra de vidro como reforço estrutural foi estudada por Panda (Panda *et al.*, 2017). Em Gebhard *et al.*, 2021 é sugerido o uso de pré-esforço por pós-tensão. No mesmo artigo refere-se que atualmente e na opinião do autor, a melhor solução de armadura neste processo construtivo é através de introdução de armadura em bainhas impressas na direção longitudinal, não sendo necessário reforço na direção transversal. Acrescenta-se ainda que, tal como no caso de betão convencional, dever-se-á conceber o elemento estrutural de forma a não só assegurar rotura por flexão, como também garantir rotura dúctil.

Na generalidade das impressoras 3D de betão, o processo começa por um ficheiro CAD com a definição do elemento estrutural, o correspondente ficheiro G-Code que lê parâmetros cartesianos, assim como a velocidade de extrusão.

O bocal de impressão tem impacto na forma e caminho de impressão e, por isso, deve ser escolhido de acordo com o pretendido.

O sistema de distribuição é parte técnica importante da constituição da impressora uma vez que será este a dispensar a adequada quantidade de betão, como observado em Jo *et al.*, 2020. O mesmo estudo (Jo *et al.*, 2020) refere que um protótipo de parede composta por 9 camadas e altura de 63 mm demorou cerca de 10 minutos a ser impresso. Neste estudo é recomendado que a razão água/cimento seja de 0.30 a 0.32 e o espalhamento entre 190 a 200 mm com camada de impressão de 4 mm de largura.

O uso de fibras pode condicionar a extrusão, por entupimentos, no entanto em Jo *et al.*, 2020 foi conseguido com sucesso a impressão de uma mistura com adição de fibras de álcool polivinílico (PVA) com um espalhamento de 198 mm. Neste caso, uma parede de 633 mm com um total de 96 camadas demorou cerca de 50 minutos a ser impressa, Figura 2.2. Esta impressão foi realizada com velocidade do bocal constante e de 105 mm/s e rotação do parafuso da bomba igual a 9.55 rpm. A altura do bocal face à camada anterior é outro aspeto a ter em consideração, pois muito alto e provoca que o prisma trapezoidal impresso apresente base mais larga com tendência a estreitar no topo (ou em argamassas com aparente falta de construtabilidade); muito baixo comprime e achata o provete.

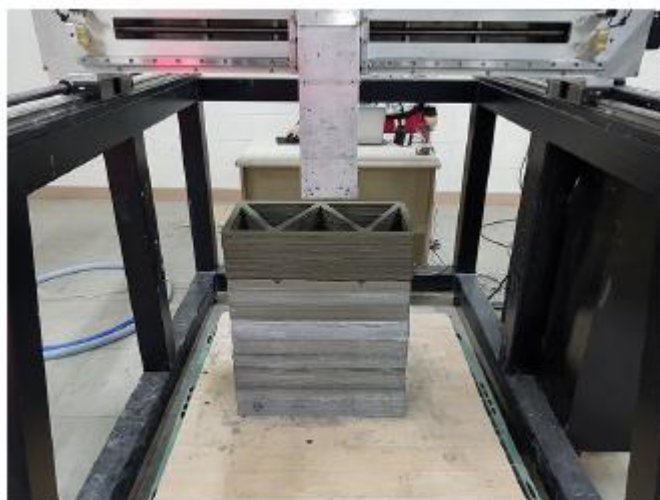


Figura 2.2 - Impressão de parede com mistura adicionada de fibras PVA (Jo *et al.*, 2020)

Em Hoffmann *et al.*, 2020 foi impressa uma parede, com colocação de um lintel sobre abertura de vão, através de garras automáticas. Neste processo a velocidade de extrusão foi prevista em $F=3500$ mm/min, tendo o autor concluído que a velocidade de impressão pode ser melhorada e, até, determinada por processo automático que determina as propriedades da argamassa em tempo real. A mistura obteve resistência à compressão aos 28 dias de 113,7 MPa. Deduz-se no mesmo estudo que as reações de hidratação do betão não só reduzem o espalhamento da argamassa, como resultam em perda de adesão entre as camadas impressas.

Um problema constante na documentação existente é a fendilhação causada por retração da mistura. Como a execução das peças é feita sem recurso a cofragem, a área de superfície em contacto com o ar é “grande”, acelerando a retração por evaporação de humidade (Le *et al.*, 2012). A este facto acresce o elevado volume de cimento nas argamassas utilizadas na impressão 3D de betão. Em Hoffmann *et al.*, 2020, para correção deste problema, é sugerido o uso de aditivos na mistura com capacidade de redução de retração, o uso de agregados saturados ou de fibras adsortivas, ou ainda, uso de membrana plástica na superfície impressa ou aplicação de água (Hoffmann *et al.*, 2020).

A densidade deste tipo de betão é semelhante à de betões e argamassas correntes, indicando (Le *et al.*, 2012) como densidade média do seu estudo o valor de 2350 kg/m³.

De notar que, à data, não existem procedimentos para caracterização do comportamento estrutural de elementos impressos em 3D, sendo que Rahul (Rahul *et al.*, 2019) propõe uma comparação com construção em blocos de betão não reforçados.

Gosselin em Gosselin *et al.*, 2016 propõe o uso deste tipo de tecnologia na reabilitação parcial de uma estrutura danificada, permitindo um modelo estrutural inovador com a utilização de vazios não só para passagem de cabos técnicos, como também para isolamento térmico, permitindo um elemento estrutural termicamente mais resistente, de design inatingível por outra tecnologia de construção.

2.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Rahul em Rahul *et al.*, 2019 analisou cubos de 50x50x50 mm cortados de um elemento de parede e testados quando sujeitos a forças segundo três direções distintas, como se mostra na Figura 2.3.

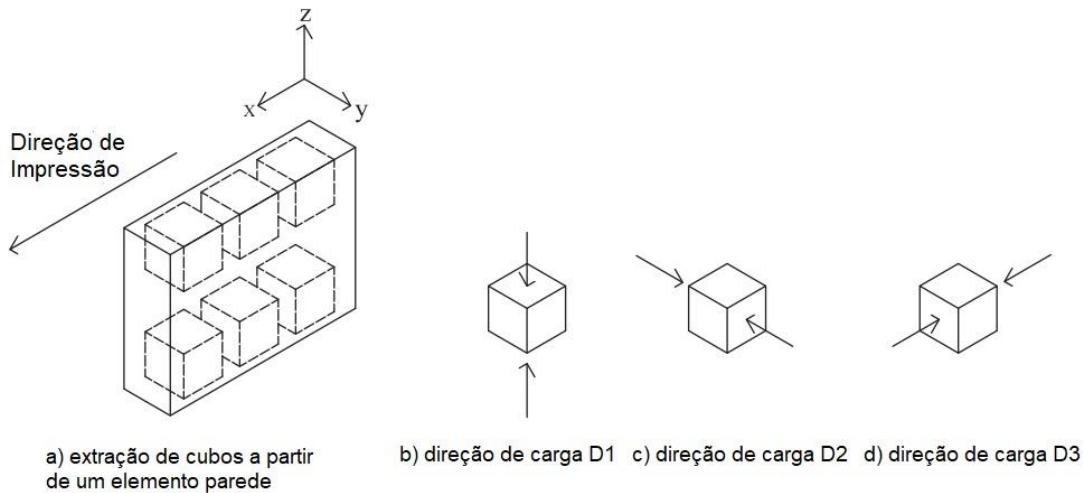


Figura 2.3 - Direção de carga de ensaio à compressão (Rahul *et al.*, 2019)

Os resultados obtidos mostram que as resistências à compressão nas três direções são similares, logo não se verifica um comportamento anisotrópico. Em todo o caso, a resistência de compressão do cubo retirado da parede impressa foi inferior à do provete de betão moldado convencionalmente em 12 a 22%. A resistência à compressão em cubos extraídos da parede variou entre 55 e 60 MPa (Rahul *et al.*, 2019). É ainda proposto que a tensão de compressão admissível seja dada pela equação (2.1).

$$f_a = \frac{\phi f'_m}{F} \quad (2.1)$$

Em que f'_m é a resistência à compressão média de ensaio na direção D1 e F é o fator de segurança. Baseado em documentação normativa relativa à construção em blocos de betão não reforçados, EN1996-1 (CEN, 2005), o parâmetro ϕ tem em conta a diferença entre altura e espessura da parede de onde os cubos foram retirados.

Relativamente à resistência à compressão, as peças impressas variam entre cerca de 55 a 65 MPa, como se verifica na Figura 2.4. As misturas variaram entre o uso de fumo de sílica (SF), argila (NC) e hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) como modificador de viscosidade (VM), em que todas contêm cinzas volantes, assim como fibras em dosagem de 1.8 kg/m³.

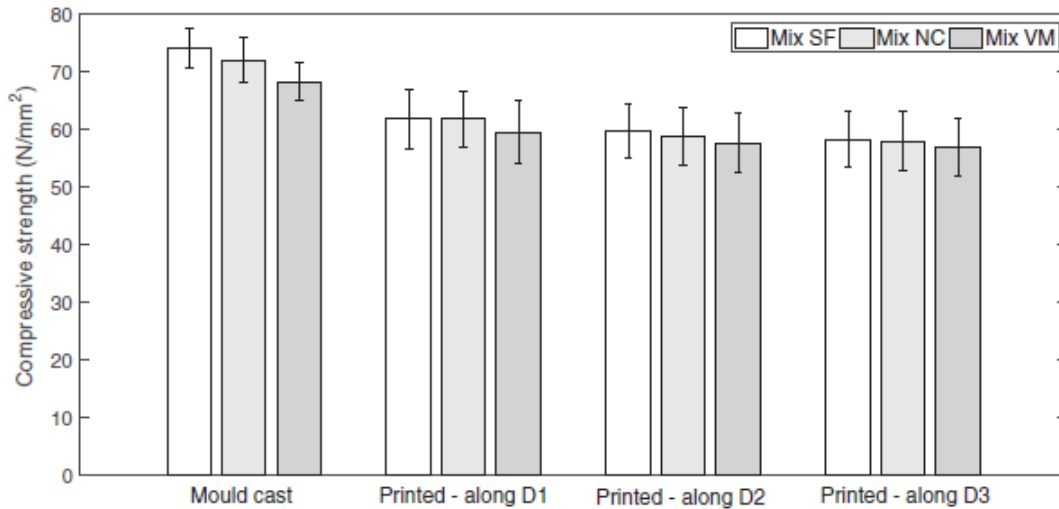


Figura 2.4 - Resistência à compressão de elementos impressos e em molde (Rahul *et al.*, 2019)

Em estudo distinto, (Hoffmann *et al.*, 2020), foram testados provetes de 60 mm de diâmetro e 35 mm de altura entre duas superfícies paralelas com aplicação incremental de carga vertical segundo patamares de carga de 150 g. O teste foi programado para a carga ir incrementando com valor equivalente a uma camada superior sucessiva em intervalos de 10 s, simulando o que acontece em impressão. O deslocamento do prato superior foi medido com recurso a sensores LVDT. Na Figura 2.5 é possível ver os provetes antes e depois do teste. O teste foi realizado 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos após a adição de água. Os resultados são apresentados na Figura 2.6.

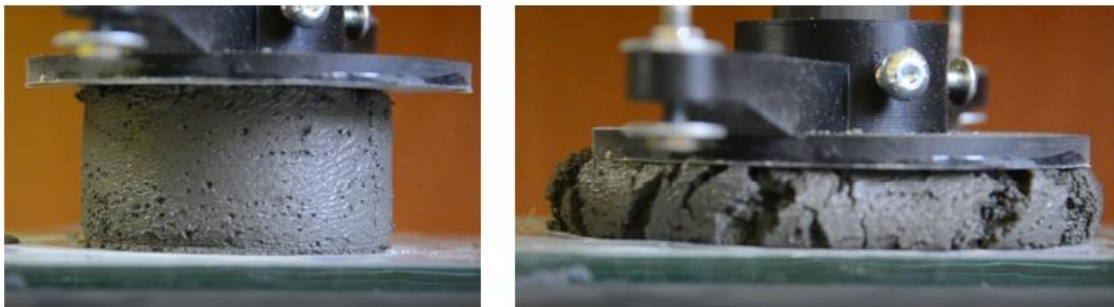


Figura 2.5 - Provetes durante o teste (à esquerda) e após o teste (à direita) (Hoffmann *et al.*, 2020)

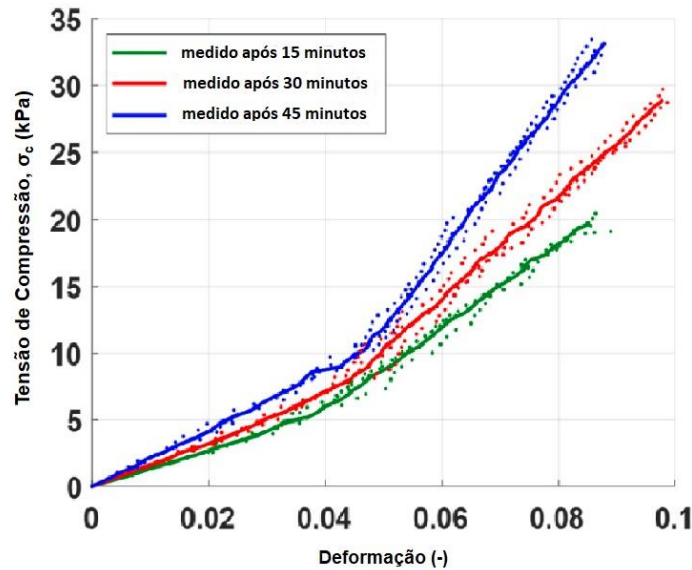


Figura 2.6 - Comportamento experimental da mistura usada em (Hoffmann *et al.*, 2020)

Em Le *et al.*, 2012, a resistência à compressão é estudada em betão de alta resistência para impressão 3D e comparada com a mesma mistura preparada em moldes. O tamanho máximo de agregado usado foi de 2 mm e o diâmetro do bocal foi de 9 mm. A argamassa cimentícia foi composta por cimento CEM I 52.5, cinzas volantes e micro sílica. Os provetes foram cubos de 100 mm. Os cubos moldados estiveram em cura em tanque de água a 20 °C e testados aos 1, 7 e 28 dias. Os elementos impressos, também eles cubos de 100 mm, foram cortados de placas de 350x350x120 mm e de 500x350x120 mm. A cura destas placas foi feita com recurso a envoltória em filme plástico. A resistência à compressão foi testada em 3 direções, na Figura 2.7. Desta forma, os resultados de Le *et al.*, 2012 são apresentados na Figura 2.8, sendo SD os cubos moldados; S3I, S3II e S3III os cubos extraídos de placa de 350x350x120 mm e testados nas três direções; S5I, S5II e S5III os cubos extraídos de placa de 500x350x120 mm e testados nas três direções; Bcy são cilindros de 50x63 mm extraídos de elemento impresso curvilíneo; Bcul, Bcull e Bculll são cubos de 63 mm extraídos de elemento impresso curvilíneo testados nas três direções.

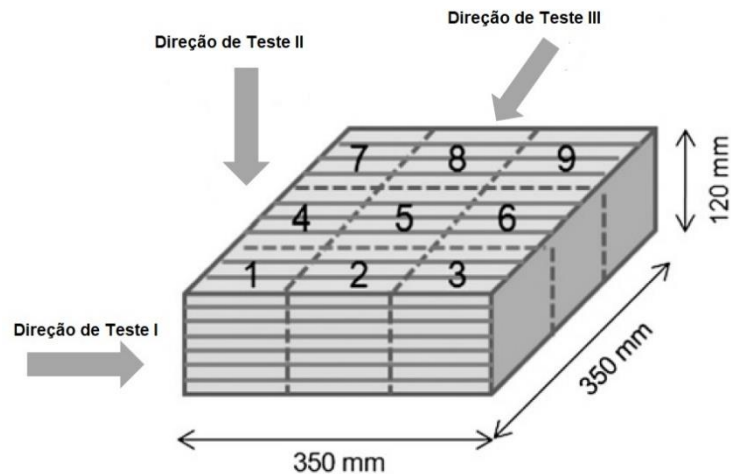


Figura 2.7 - Direções de ensaios em (Le *et al.*, 2012)

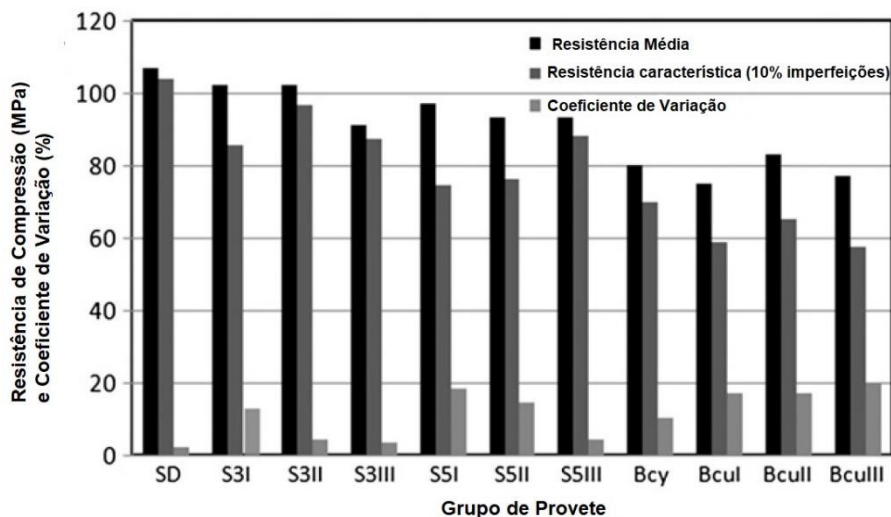


Figura 2.8 - Resistência à compressão de elementos de betão impressos em comparação com elementos moldados (Le *et al.*, 2012)

A resistência à compressão aumenta significativamente em elementos impressos e extraídos em linha reta comparados com os elementos em curva (Le *et al.*, 2012).

2.1.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)

Até ao momento poucos estudos exploram o módulo de elasticidade de elementos fabricados por processos impressos. Em 2021, é realizado um estudo para determinação do módulo de elasticidade (E) em 4 provetes preparados de diferentes formas (Skibicki *et al.*, 2021). De realçar que não existe, à data, qualquer norma para o ensaio de provetes de betão produzido por impressão 3D para este efeito, pelo que os autores de (Skibicki *et al.*, 2021) basearam-se na norma EN 12390-13 (CEN, 2021), referente ao ensaio de provetes de betão. Deste estudo foi possível concluir que existe uma interligação entre o número de camadas de impressão e o valor do módulo de elasticidade. Na realidade, como os elementos impressos

em 3D são realizados sem recurso a cofragem ou moldes, o provete a ensaiar deverá ser o mais próximo da realidade. Desta forma, retira-se como comparação o provete 3DP_F do artigo (Skibicki *et al.*, 2021) com impressão de 20 ± 1 camadas.

O módulo de elasticidade da argamassa cimentícia de (Skibicki *et al.*, 2021) varia entre 263 e 359.32 kPa aos 15 e 30 minutos após impressão respetivamente, sendo a sua resistência à compressão de 16.15 kPa e 21.03 kPa respetivamente. Em comparação, um estudo realizado em argamassa cimentícia impressa em molde (Casagrande *et al.*, 2020) mostra resultados de módulo de elasticidade de 252 kPa e 430 kPa aos 15 e 30 minutos após impressão respetivamente, sendo a sua resistência à compressão de 11.64 kPa e 14 kPa respetivamente. Comparações similares podem ser efetuadas com recurso aos estudos realizados em (Ding *et al.*, 2020; Wolfs *et al.*, 2019). De Skibicki *et al.* (2021) conclui-se que quanto maior o número de camadas de impressão, menor é o valor do módulo de elasticidade do provete impresso. Quanto maior for o número de camadas impressas, mais interfaces existem. As interfaces são zonas de menor resistência, área e rigidez, o que conduz a uma diminuição do módulo de elasticidade. No Quadro 2.1 resume-se alguns ensaios existentes até à data.

Quadro 2.1 - Resumo de alguns ensaios de provetes impressos sem recurso a cofragem (Le *et al.*, 2012; Rahul *et al.*, 2019; Skibicki *et al.*, 2021)

Autor	Tipo de Provete	Idade do Provete	Resistência à Compressão (MPa) (média)	Módulo de Elasticidade, E (GPa) (média)	Normas
Rahul (Rahul <i>et al.</i> , 2019)	Cubos de 50 mm cortados de bloco de diferentes argamassas (SF, NC, VM)	28 dias	± 60 (direção D1) ± 58 (direção D2) ± 56 (direção D3)*	-	ASTMC109/C109M
Skibicki (Skibicki <i>et al.</i> , 2021)	φ15cmx30cm (3DP_F)	27 dias	48.77	32.01	EN 12390-3 EN 12390-13 EN 12390-13:2014-02
Skibicki (Skibicki <i>et al.</i> , 2021)	φ15cmx30cm (3DP_C_144) cortados de bloco	27 dias	60.18	32.44	
Le (Le <i>et al.</i> , 2012)	Cubos de 100mm extraídos de placas de 350x350x120 mm (S3I, S3II, S3III)	28 dias	102 (direção I e II) 91 (direção III)**	-	BS EN 12390-3:2009
Le (Le <i>et al.</i> , 2012)	Cubos de 100mm extraídos de placas de 500x350x120 mm (S5I, S5II, S5III)	28 dias	97 (direção I) 93 (direção I e II)**	-	
Le (Le <i>et al.</i> , 2012)	Cilindros de 58x63mm e Cubos de 63mm, extraídos de blocos curvilíneos (Bcy e Bcul, Bcull, Bculll)	28 dias	75 a 83 (com variação mais elevada)	-	

* Figura 2.3

**Figura 2.7

2.1.3 MODELOS NUMÉRICOS

A criação de um modelo numérico de uma estrutura impressa em 3D não é algo linear, passível de ser definida pelos parâmetros dos materiais e geometria, pois ao contrário de estrutura tradicional de betão, esta é composta por camadas e alinhada segundo direções perfeitamente definidas. Para além das condicionantes externas, as interações entre camadas têm de ser tidas em conta. Durante a execução, o peso próprio é carga única a considerar, no entanto, as propriedades do material impresso são desenvolvidas ao longo da impressão (Ooms *et al.*, 2021). No mesmo artigo, sugere-se a automatização do ficheiro de desenho *CAD* como input com todas as informações necessárias ao software de elementos finitos. Mas desta forma, as malhas do modelo de elementos finitos necessárias para o elemento como um todo seriam divididas camada a camada e segmento a segmento. Apresenta-se ainda a questão de qual segmento da camada corresponde a uma interface entre camadas. A criação de um modelo numérico de impressão 3D por camadas torna-se morosa quando não automatizada. Dever-se-á considerar não só a dificuldade em modelar as propriedades da interface, como também a anisotropia na modelação numérica.

Em (Wolfs *et al.*, 2019) o software de elementos finitos, *Abaqus* é utilizado recorrendo-se a um script python customizado, considerando elementos tetraédricos de 4 nós. No entanto, neste artigo conclui-se que existe uma diferença demasiado acentuada entre os ensaios experimentais e o modelo numérico, apontando como principais causas a rigidez do material e a falta de consideração do dado temperatura inicial uma vez que em fase experimental houve aumento de temperatura do sistema de impressão.

2.2 Exemplos de edifícios existentes

Construída em 2020 pela empresa *Peri*, a casa unifamiliar de dois andares com 160 m² pode ser vista em Rhineland, Alemanha, na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Casa impressa pela empresa Peri em 2020 (V., 2022)

Potencial de betão produzido por impressão 3D para aplicações estruturais. Ensaio de Paredes

Em março de 2022 a empresa *Serendix* termina uma habitação de 10 m² em Komaki, Japão, tentando responder à necessidade de habitação urgente, na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Casa Sphere, Março 2022 (Serendix Inc, 2022)

Twente Additive Manufacturing imprimiu a primeira casa listada no *Airbnb* em Proctor, Canada, na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Casa impressa por Twente Additive Manufacturing (V., 2022)

A *House 1.0* foi impressa pela empresa *3DCP Group*, com 37 m² e localizada em Holstebro, Dinamarca, na Figura 2.12.



Figura 2.12 - Casa impressa pela empresa 3DCP Group, Dinamarca (Katsikopoulou, 2022)

3 IMPRESSÃO 3D DE PAREDE

3.1 Processo de Impressão

O processo de impressão é composto essencialmente por três fases (Jo *et al.*, 2020): preparação da impressão, preparação do material e impressão. Na fase da preparação da impressão o modelo 3D deve estar preparado em *CAD* e ser convertido em *Standard Tessellation Language* (STL) ou gerado o correspondente ficheiro G-Code (Marlin, 2023). De seguida inicia-se a fase de preparação do material, em que uma misturadora com volume apropriado é usada, passando a mistura para o dispensador da impressora 3D.

As paredes foram impressas com bomba e robot cartesiano do c⁵Lab, Figura 3.1. Este trabalho laboratorial constitui o primeiro projeto realizado nesta impressora. Na fase inicial da Dissertação a impressora encontrava-se ainda em implementação e testes por várias equipas. Tratando-se de um equipamento novo houve algumas questões a solucionar, tais como, posicionamento das várias componentes, interface de software, manuseamento do equipamento, entre outros. A procura de soluções dos problemas inerentes a um equipamento novo permitiu inclusivamente a melhoria do equipamento, em destaque o aumento das dimensões geométricas em altura da impressão.



Figura 3.1 - Impressora 3D de betão do c⁵Lab

3.2 Geometria

A geometria da parede em estudo é condicionada pelo caminho de extrusão do bocal, não permitindo passagens duplas no mesmo ponto cartesiano, nem a paragem da extrusão no decorrer do processo de impressão. A decisão do caminho de extrusão pode ser comparada a desenhar a parede no papel sem levantar a caneta. Desta forma, a geometria da Figura 3.2 foi adotada. A parede impressa pode ser consultada no Capítulo 4.

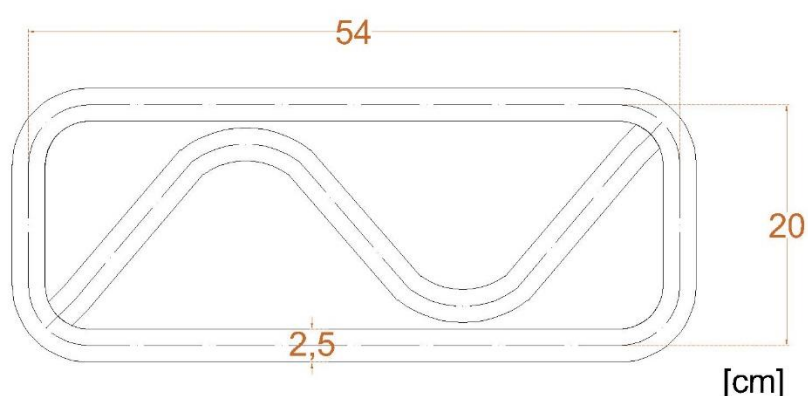


Figura 3.2 - Esquema preliminar de parede proposta

Inicialmente tomou-se como proposta que as paredes seriam impressas com altura de 60 cm de forma a cumprir a norma EN 1052-1:1999, (CEN, 1998) como explicado no Capítulo 4.3, porém condicionalismos experimentais explicados no Capítulo 4.5 não permitiram a proposta inicial. A área da secção dependerá sempre da largura de impressão de cada camada. Uma vez que a largura da camada de impressão não é uniforme, a área de secção não é a mesma em camadas de cotas diferentes. Em último caso, será possível ter uma área de secção diferente para cada camada de impressão. Relativamente à altura de cada camada, em média foi de 1,50 cm.

Após o ensaio determinou-se a área determinada na base de apoio de cada Modelo (Capítulo 5.3).

Desta forma, as características geométricas das paredes, caso todas as camadas impressas apresentem a área de secção medida na base, são discriminadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características geométricas das paredes impressas

Parede	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volume (cm ³)
Modelo 0	567	43	24385
Modelo 1	803	45	36155
Modelo 2	724	46	33309
Modelo 3	565	49	27689

3.3 Constituição da argamassa de impressão

Os materiais constituintes da mistura cimentícia não foram abordados no tema da presente dissertação, tendo-se recorrido a uma argamassa desenvolvida pelo c⁵Lab com a composição discriminada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Composição da argamassa (kg/m³)

Areia 0/2	CEM II AL 42,5R	Filler calcário	Sílica de fumo	Superplastificante	Água
1075	775	145	80	13,25	200

Para garantir construtabilidade é necessário utilizar uma mistura de argamassa com características específicas, como elevada fluidez e estabilidade, que permitam a acumulação de camadas sem deformações ou irregularidades. A extrudabilidade, por sua vez, refere-se à capacidade de extrusão do betão através do rotor. De forma a garantir que o sistema rotor/estator não seja obstruído, é necessário ter em conta a quantidade de SP e ligante, bem como a dimensão do agregado. É necessário recorrer a betões com quantidades elevadas de Superplastificante (SP), ligantes e reduzida dimensão do agregado para que os requisitos de construtabilidade e extrudabilidade sejam simultaneamente cumpridos.

3.4 Caminho de impressão

A escolha do caminho de impressão é determinante, pois é necessário precaver que não exista sobreposição de camadas à mesma cota. Devido à particularidade da impressão 3D indicada no Capítulo 3.2, que invalida que o caminho de impressão sobreponha passagens no mesmo ponto cartesiano, foi necessário definir um percurso de forma a que o ponto de mudança de cota alterne entre dois pares de coordenada (x,y) diferentes, conduzindo a um caminho para as camadas ímpares (Figura 3.3) e um caminho para as camadas pares (Figura 3.4).

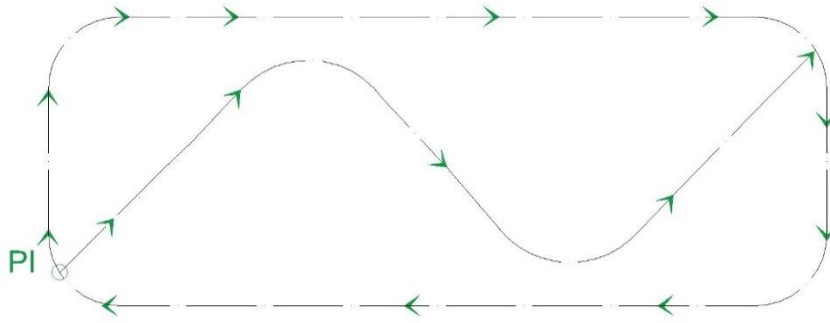


Figura 3.3 - Caminho de impressão da camada ímpar

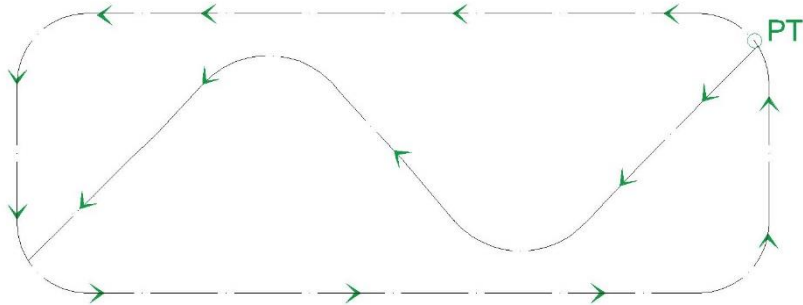


Figura 3.4 - Caminho de Impressão da Camada par

O caminho mostrado tem um ponto inicial (PI), assim como um ponto de transição (PT) onde ocorre mudança de sentido de direção da impressão. Verifica-se que esta inversão de sentido de impressão conduz a imperfeições na impressão e mesmo excentricidades entre camadas (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Excentricidades entre camadas pares e ímpares e ponto de transição no Modelo 1

Uma possível solução para o caminho de impressão não sofrer mudanças de direção seria a paragem de extrusão nos momentos de mudança de cota (para evitar sobreposições), alternativa inviável em tecnologias de impressão 3D, pois pode conduzir a entupimentos da mangueira e bocal por cura da argamassa. Outra solução seria o desperdício de material no caminho para retorno ao ponto inicial (PI) s, uma solução indesejável por não representar aplicações futuras desta tecnologia (que visa minimizar o desperdício material através da eficiência geométrica).

Este momento foi o ponto de partida para a criação de um ficheiro em G-Code para a impressão da parede Modelo 0.

3.5 Criação do ficheiro G-Code

Uma vez definida a geometria da parede, preparou-se o ficheiro G-Code, que permite que a impressora percorra o caminho definido. Este ficheiro tem em conta os seguintes parâmetros:

- As coordenadas são definidas em mm;
- A cota inicial de extrusão é de 10 mm, o equivalente a dois terços da altura estimada para cada camada (15 mm);
- As diagonais da parede bissectam os ângulos;
- Os pontos de inflexão das diagonais, assinalados na Figura 3.6, encontram-se afastados do contorno exterior de forma a evitar sobreposições entre o filamento da diagonal e o filamento exterior da parede. Os eixos das diagonais não se unem com a espessura

exterior para contabilização do assentamento do betão, presumivelmente de 15 mm em cada troço. Após impressão ambos os elementos, diagonais e contorno encontram-se ligados sem se verificar uma saliência externa pela diagonal “empurrar” a contorno.

- A subida entre camada, no final do troço, é feita de forma gradual, ao longo de uma extensão de 50 mm;
- A altura de cada camada foi definida como 15 mm;
- A velocidade de extrusão foi de 2100 mm/min.

Neste processo recorreu-se à utilização de dois simuladores de impressão em (Luciano, 2018) e (Nraynaud, 2020) de forma a testar o código e encontrar e, conseqüentemente, solucionar erros. Os simuladores permitiram a confirmação redundante que o G-Code definido correspondia à geometria definida.

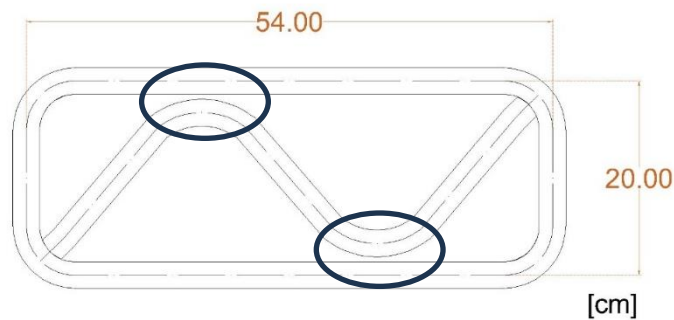


Figura 3.6 - Distância entre as diagonais e as laterais da parede

O Ficheiro G-Code é apresentado no Anexo I.

3.6 Equipamento da Impressora 3D

A impressora customizada é constituída por bomba de alimentação, funil, sistema rotor/estator, mangueira e bocal. A mangueira e o bocal estão ligados ao robot cartesiano, que é controlado por computador (Figura 3.7 e Figura 3.8).



Figura 3.7 - Pórtico, mangueira e sistema de bocal da impressora 3D



Figura 3.8 - Bomba, rotor, funil e mangueira de impressora 3D

O bocal de extrusão utilizado é circular e tem 20 mm de diâmetro. Os bocais circulares são adequados para a impressão de elementos que incluem várias direções de impressão, como é o caso. O diâmetro do bocal foi escolhido em função da largura da camada pretendida para a parede, de cerca de 25 mm.

4 ATIVIDADE EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Os ensaios realizados têm como objetivo a caracterização mecânica da argamassa cimentícia utilizada na impressão das paredes, assim como a caracterização estrutural da parede.

Como mencionado no Capítulo 1.3 e 1.4, uma vez que o conhecimento atual sobre a matéria é escasso, existe necessidade da caracterização da argamassa impressa, assim como a determinação da resistência à compressão.

Esta campanha laboratorial divide-se em três fases:

1. Impressão das paredes Modelo 0, 1, 2 e 3;
2. Caracterização das argamassas;
3. Ensaio de resistência à compressão uniaxial das paredes Modelo 0, 1, 2 e 3.

4.2 Objetivo

A presente campanha experimental teve como objetivos, na primeira fase, a impressão das paredes Modelo e, na segunda fase, a caracterização da argamassa impressa, assim como a caracterização da resistência à compressão das Paredes Modelo 0, 1, 2 e 3.

A duração do período de impressão das paredes foi de 4 meses, enquanto a duração dos ensaios laboratoriais foi de cerca de 2 semanas, Figura 4.1.

A campanha laboratorial realizou-se em duas unidades do LNEC, sendo que a primeira fase decorreu no laboratório afeto ao Núcleo de Betões do Departamento de Materiais, onde o c⁵Lab instalou os seus equipamentos de impressão 3D, e a segunda fase decorreu no laboratório afeto ao Núcleo de Comportamento de Estruturas no Departamento de Estruturas.

Dada a especificidade de cada ensaio, os mesmos foram realizados em espaços diferentes do LNEC (Marques, 2020).

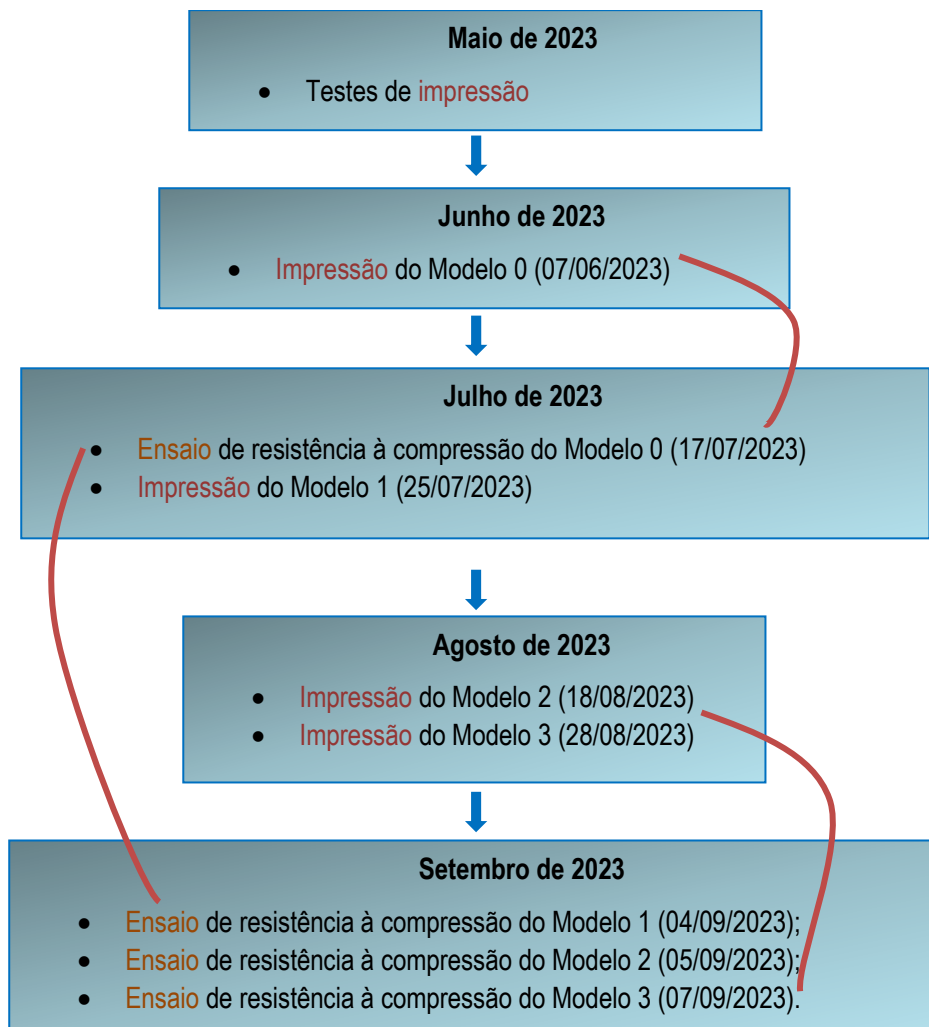


Figura 4.1 - Cronograma de Atividade experimental

4.3 Critérios Normativos

Uma vez que as paredes impressas são constituídas por camada sobre camada, alguns autores comparam estes elementos construtivos com paredes de alvenaria, também estes constituídos por camadas. Em Rahul *et al.*, 2019 verifica-se que as interfaces entre as camadas são mais porosas e menos resistentes, comparando a impressão 3D de betão a um elemento de alvenaria tradicional. No entanto, tal pode nem sempre se verificar, pois, caso a ligação entre camadas seja eficaz, poder-se-á considerar o elemento como monolítico.

Desta forma, a norma EN 1052-1:1999 (CEN, 1998) idealmente seria considerada, cumprindo os critérios da Figura 4.2 e Quadro 4.1..

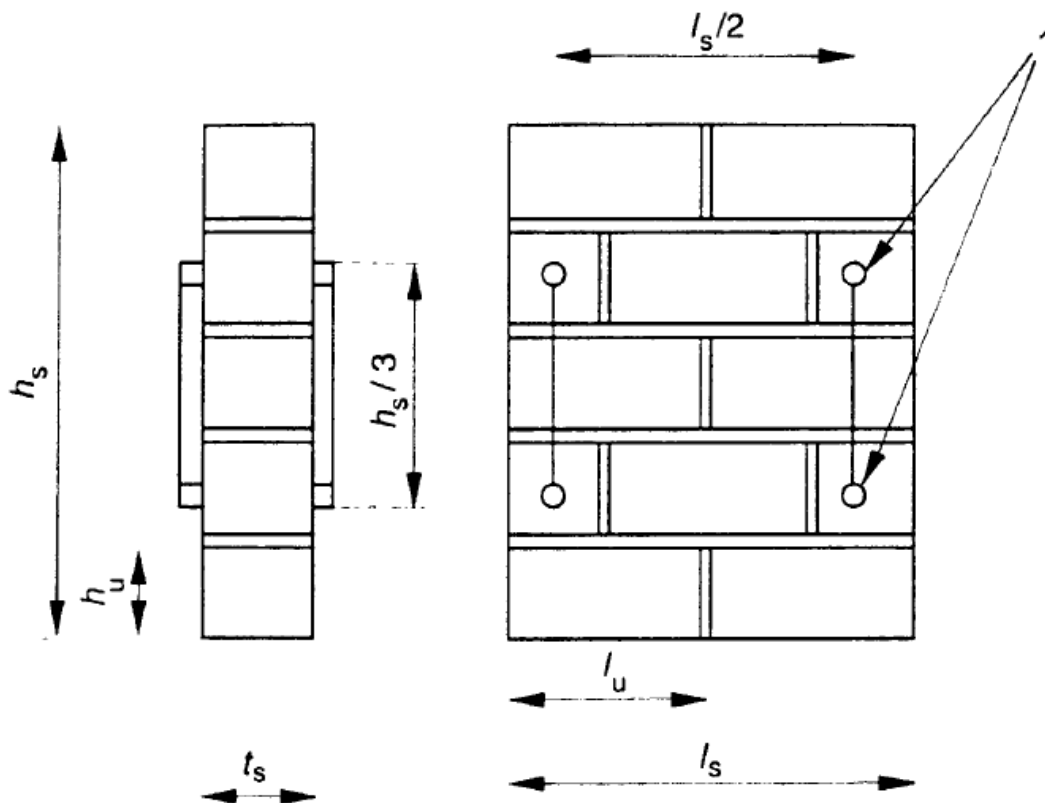


Figura 4.2 - Critérios a considerar em Parede de Alvenaria (CEN, 1998)

Quadro 4.1 - Dimensões de provetes pequenos de paredes de alvenaria para ensaio de resistência à compressão axial (CEN, 1998)

Dimensão em face		Provete de alvenaria			
l_u (mm)	h_u (mm)	Comprimento l_s	Altura h_s		Espessura t_s
≤ 300	≤ 150	$\geq (2 \times l_u)$	$\geq 5h_u$	$\geq 3t_s$ and $\leq 15t_s$ and $\geq l_s$	$\geq t_u$
	> 150		$\geq 3h_u$		
> 300	≤ 150	$\geq (1,5 \times l_u)$	$\geq 5h_u$	$\geq l_s$	
	> 150		$\geq 3h_u$		

Aplicando a Norma referida, as dimensões, inicialmente previstas, a considerar da parede a imprimir são apresentadas nos Quadro 4.2 e Quadro 4.3.

Quadro 4.2 - Medições da Parede a ensaiar

h_u (mm)	h_s (mm)	$h_s/3$ (mm)	l_u (mm)	l_s (mm)	$l_s/2$ (mm)	t_s (mm)
17	600	200	570	570	285	230

Quadro 4.3 - Condições a respeitar

Face		Provete da parede			
l_u (mm)	h_u (mm)	l_s (mm)	h_s (mm)		t_s (mm)
570 (>300)	17 (≤ 150)	570 ($\geq 2l_u$) Falso 570 ($\geq 1.5l_u$) Falso (com $l_s=570$ mm e $l_u=570$ mm)	$600 \geq 5h_u$ $600 \geq 3h_u$	$600 \geq 3t_s \geq 675$ Falso $600 \leq 15t_s \leq 3375$ $600 \geq l_s \geq 570$ (com $l_s=570$ mm e $t_s=225$ mm)	$\geq t_u$

Pelo Quadro 4.3 verifica-se que as dimensões inicialmente previstas não cumpriam todos os critérios impostos. No entanto, como se explica nos subcapítulos seguintes, não foi possível cumprir o inicialmente previsto relativo às dimensões das paredes, tornando a aplicação da norma inviável.

4.4 Identificação de Paredes

Como previsto, foram impressas quatro paredes, sendo que o Modelo 0 serviu de teste para possíveis ajustes e determinação da localização da instrumentação da parede para ensaios futuros. A designação de cada parede pode ser consultada no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Designação das Paredes

Nome	Designação
Modelo 0	Primeira parede impressa para teste e ajustes
Modelo 1	Parede impressa 1
Modelo 2	Parede impressa 2
Modelo 3	Parede impressa 3

4.5 Impressão 3D dos Modelos

4.5.1 METODOLOGIA DE IMPRESSÃO

A colocação da argamassa no funil que alimenta a mangueira é feita de forma manual, não sendo este processo automatizado. Para além da alimentação de argamassa no funil, é necessário o

encaminhamento constante da argamassa para o orifício que conduz a argamassa à mangueira de forma a evitar a formação de vazios na impressão, Figura 4.3 e Figura 4.4.



Figura 4.3 - Funil com instrumentos de ajuda de encaminhamento de argamassa



Figura 4.4 - Argamassa colocada no funil

O processo de impressão requer mão de obra contínua durante a impressão quer para alimentação do funil, quer para encaminhamento do material para a mangueira, quer para vigilância da impressão para paragem abrupta em possíveis erros ou acidentes que aconteçam.

4.5.2 PAREDE MODELO 0

A impressão da parede Modelo 0 decorreu no dia 7 de junho de 2023. Foram definidos parâmetros iniciais, como a velocidade de impressão, potência da bomba e altura inicial do bocal, que foram iterativamente alterados em testes preliminares. Estes parâmetros mantiveram-se nas paredes Modelo 1, 2 e 3. Após a realização de testes de impressão foi definido que, de forma a assegurar a correta colocação das camadas de argamassa umas sobre as outras, a altura do bocal deveria ser diminuída de forma que a camada superior adjacente tomasse uma forma mais achatada em vez de arredondada. Tal assegura que as camadas de argamassa em impressão não sejam apoiadas em camadas curvas (já depositadas).

As amassaduras da argamassa foram realizadas na misturadora de 35 litros do laboratório de betões do LNEC (Figura 4.5), para todas as impressões de paredes Modelo. Foram realizadas duas amassaduras por parede.

A impressão do Modelo 0 é apresentada nas Figura 4.6 a Figura 4.8.



Figura 4.5 - Betoneira de 35 Litros utilizada na amassadura da argamassa usada nas impressões 3D



Figura 4.6 - Impressão de Parede Modelo 0



Figura 4.7 - Impressão de Parede Modelo 0



Figura 4.8 - Parede Modelo 0

Como é visível na Figura 4.8 existe diferença de impressão nas camadas ímpares e pares verificando-se excentricidade entre as mesmas, como referido em 3.4 e comum neste tipo de método de impressão.

De referir que, no ensaio da parede Modelo 0, foi notória a falta de regularização da base de impressão. Este facto levou a que as impressões seguintes fossem realizadas sobre uma base rígida metálica a suportar o painel de madeira inferior. Esta base rígida metálica apresentava a mesma altura da base do pórtico onde assenta o painel de madeira da impressora.

4.5.3 PAREDE MODELO 1

A impressão da parede Modelo 1, decorreu no dia 25 de julho de 2023. Inicialmente prevista com 60 cm de altura, por dificuldades técnicas foi convertida em cerca de 45 cm de altura. Na última linha de código G-Code, quando a impressão finalizava, o braço da impressora derrubou as últimas camadas impressas do Modelo 1. Desta forma, a solução encontrada, sem desperdício de materiais e recursos foi a reconversão de altura do Modelo 1. Na Figura 4.9 é possível visualizar o derrubamento da parede por parte do conjunto bocal, mangueira e pórtico. Nas Figura 4.10 e Figura 4.11 é possível visualizar o registo fotográfico da impressão da parede Modelo 1. A face superior da parede foi regularizada antes do ensaio à compressão axial, como explicado no Capítulo 4.7.1



Figura 4.9 - Derrubamento de parte da Parede Modelo 1



Figura 4.10 - Vista superior da parede Modelo 1



Figura 4.11 - Vista lateral da parede Modelo 1

4.5.4 PAREDE MODELO 2

A impressão da parede Modelo 2 decorreu no dia 18 de agosto de 2023.

A impressão das paredes Modelo 2 e 3 ocorreu com diferentes características da impressão dos Modelos 0 e 1. As argamassas dos Modelos 0 e 1 tiveram na sua constituição superplastificante de lote existente no LNEC que terminou. No dia 19 de julho de 2023 houve uma tentativa de impressão do Modelo 2, porém falhada. Nesta tentativa a argamassa tinha sido mantida com as mesmas características dos Modelo 0 e 1, tendo a única diferença sido os recursos humanos na amassadura. A argamassa não teve construtabilidade aceitável, atingindo apenas 13 camadas, com irregularidades visíveis entre as camadas pares e ímpares resultando na interrupção da impressão, Figura 4.12.

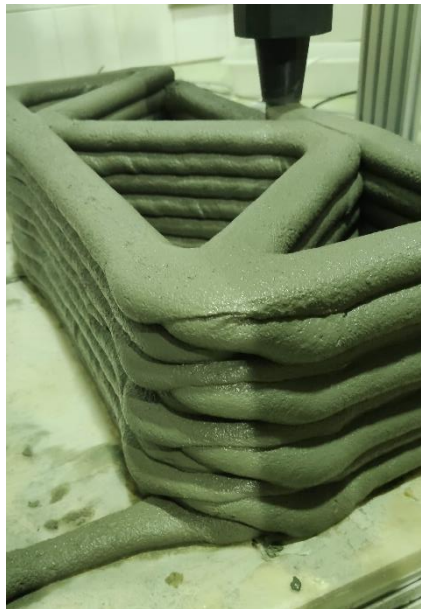


Figura 4.12 - Impressão falhada na tentativa de produção da parede Modelo 2

Assim, a constituição da argamassa para a impressão dos Modelos 2 e 3 foi ajustada de forma a ser possível a sua impressão, denominada por Argamassa com SP2, em que o superplastificante aumentou de $13,25 \text{ kg/m}^3$ para $14,60 \text{ kg/m}^3$. O aumento do teor de superplastificante deveu-se à falta de construtabilidade da argamassa denotada em alguns ensaios de impressão.

Apesar da impossibilidade de manter a altura prevista de impressão de 60 cm no Modelo 1, no Modelo 2, a impressão previa a altura de 60 cm. No entanto, a altura sofreu alteração de plano por erro de colocação da base rígida na parte inferior da cama da impressora. A base rígida colocada sob a cama da impressora tinha uma altura ligeiramente superior aos apoios da cama de madeira da impressora o que provocou um efeito de baloiço na parede quando atingiu 30 camadas. Quando este fenómeno ocorreu, a camada imediatamente superior sofreu deslocamento de posição. Assim, foi tomada a decisão de parar a impressão de forma a não desperdiçar recursos e materiais, e manter a parede Modelo 2 com a altura

atingida de cerca de 46 cm (Figura 4.13 e Figura 4.14). A face superior da parede foi regularizada antes do ensaio à compressão axial, como explicado no Capítulo 4.7.1.

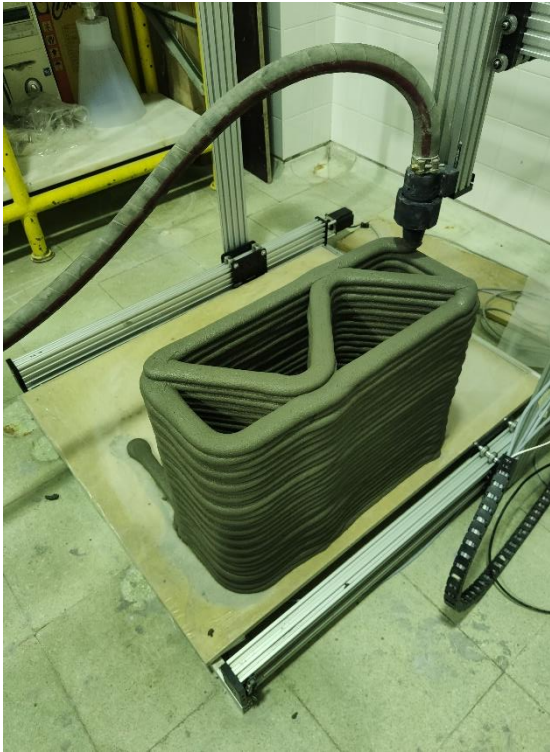


Figura 4.13 - Impressão de parede Modelo 2



Figura 4.14 - Vista lateral da parede Modelo 2

4.5.5 PAREDE MODELO 3

A impressão da parede Modelo 3 decorreu no dia 28 de agosto de 2023.

Após a impressão da parede Modelo 2 que sofreu ajuste na altura, foi tomada a decisão de manter a altura na impressão do último Modelo, de forma a ser relacionável com as anteriores, sendo a sua altura final cerca de 49 cm.

A impressão desta parede foi a experiência mais consistente e sem imprevistos relativamente às experiências passadas de impressão, Figura 4.15. A face superior da parede foi regularizada antes do ensaio à compressão axial, como explicado no Capítulo 4.7.1

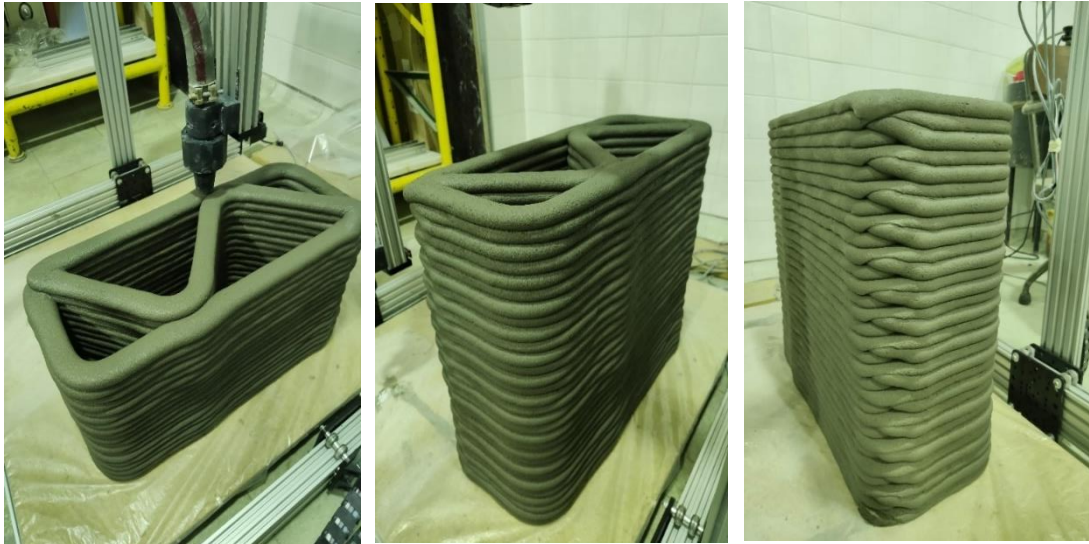


Figura 4.15 - Impressão e vistas laterais da parede Modelo 3

4.5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A impressão de paredes sofreu um extensivo planeamento, com construção de G-Code personalizado. Previamente à impressão das paredes foram realizados testes de impressão em provetes cilíndricos para compatibilização da argamassa com parâmetros essenciais para a construtabilidade, tais como velocidade de impressão e altura do bocal, de modo a não haver abatimento por gravidade, nem esmagamento da camada.

Apesar dos cuidados e planeamento mencionados, existem parâmetros não previstos que devem ser tidos em conta. Por exemplo, a influência do operador da mistura de argamassa é um factor relevante, pois a reduzida dimensão do agregado obriga a paragens da misturadora e a misturas manuais da argamassa durante o processo de mistura. O check-list inicial de tarefas a cumprir pré-impressão é de extrema importância, tendo faltado, na parede Modelo 2, a confirmação do sucesso destas tarefas. Deverão ser acautelados erros de impressão causados pelo código não previstos inicialmente.

Por último, a limpeza, lavagem e secagem de todo o material após uso é de máxima importância pois quando tal não acontece podem ocorrer entupimentos, mais difíceis de solucionar. Como exemplo, houve uma tentativa falhada de impressão da parede Modelo 2 no dia 28 de julho de 2023 por entupimento da mangueira. O material tinha sido usado no dia anterior, porém a sua limpeza não foi suficiente levando a que a argamassa secasse na mangueira e causasse entupimento.

Assim, cada impressão levou a aprendizagem de algo novo, o que permitiu aperfeiçoar a impressão do Modelo 3.

4.6 Métodos de ensaios da caracterização da argamassa

4.6.1 OBJETIVO

De forma a prever a força de compressão à rotura dos Modelos 0 a 3, assim como a sua trabalhabilidade, as amassaduras de cada argamassa foram caracterizadas por ensaios de espalhamento (em argamassa fresca), segundo a norma NP EN 12350-5, (IPQ, 2009a) assim como ensaios de resistência à tração por flexão, segundo a norma NP EN 12390-5, (IPQ, 2009b) e, resistência à compressão segundo a norma NP EN 12390-3, (IPQ, 2009c) (em argamassa endurecida).

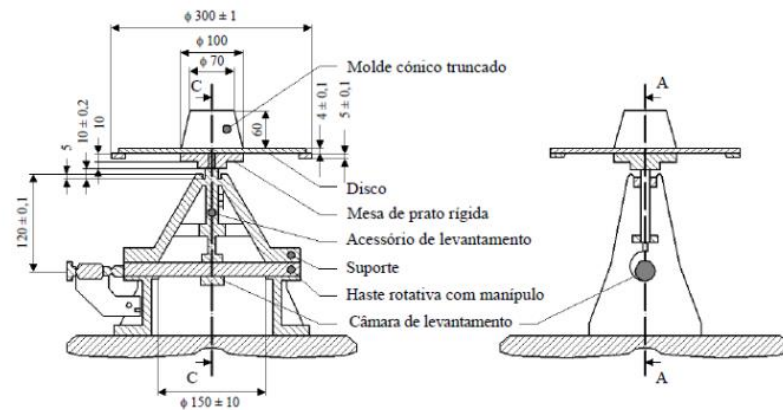


Figura 4.16 - Representação esquemática da mesa de espalhamento (Marques, 2020)



Figura 4.17 - Ensaio de espalhamento de argamassa cimentícia

4.6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS

Foram produzidos provetes normalizados com as argamassas resultantes das amassaduras para impressão 3D, com as dimensões 40 x 40 x 160 mm³, (Marques, 2020).

De referir que alguns provetes foram realizados após impressão, ou seja, já algum tempo decorrido da sua amassadura. Por condicionantes experimentais, não foram produzidos provetes referentes à parede Modelo 1, tendo, no entanto, a argamassa de constituição igual sido moldada e ensaiada. Por falta de material sobranete para provetes, nem sempre se realizou os ensaios em 3 provetes.



Figura 4.18 - Exemplo de provete da amassadura da argamassa da parede Modelo 3

Ensaio de resistência à flexão e resistência à compressão

O ensaio de resistência à tração por flexão, realizado de acordo com a norma NP EN 12390-5, (IPQ, 2009b), tem por objetivo determinar a força última à tração por flexão da argamassa. Neste ensaio, é aplicada uma força a meio vão de um provete e é registada a força de rotura do provete (Marques, 2020). Os ensaios foram realizados no equipamento Form+Test Seidner (Figura 4.19). A resistência à tração por flexão calcula-se recorrendo à equação (4.1).

$$f_{cf} = \frac{F_f \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad (4.1)$$

Em que,

- f_{tf} resistência à tração por flexão, [MPa];
- F_f força máxima aplicada no provete [N];
- I distância entre roletes inferiores de apoio [mm];
- d dimensões da seção do provete [mm].



Figura 4.19 - Ensaio de provete à resistência de flexão no equipamento Form+Test Seidner

Após o ensaio de determinação de resistência à flexão, obtém-se dois semi-prismas que são sujeitos ao ensaio de determinação de resistência à compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3, (IPQ, 2009c). Cada provete é centrado nos pratos da prensa e sujeito a uma força gradual (Marques, 2020), sendo registada a força máxima suportada pelo provete, Figura 4.20. Este ensaio foi realizado no mesmo equipamento do ensaio à flexão. A resistência à compressão calcula-se recorrendo à equação (4.2).



Figura 4.20 - Ensaio de provete à resistência à compressão no equipamento Form+Test Seidner

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (4.2)$$

Em que,

f_c resistência à compressão, [MPa];

F_c carga máxima à rotura aplicada no provete [N];

A_c área da seção transversal do provete em contacto com os pratos da prensa [mm²].

4.7 Ensaio de Compressão Axial das Paredes

4.7.1 *REGULARIZAÇÃO DOS MODELOS*

Depois da impressão das paredes Modelo 0, 1, 2 e 3 e, após cura do betão impresso, as paredes foram armazenadas no laboratório de impressão.

De forma a serem testados na prensa de ensaio à compressão, os modelos foram regularizados na face superior com o propósito de não haver forças concentradas e mal distribuídas quando a prensa encosta na parede. Esta regularização foi efetuada com recurso a argamassa com resistência superior à da argamassa utilizada na impressão. A argamassa foi moldada em provetes de forma a ser ensaiada em ensaios de tração à flexão e compressão.

A regularização, fase crucial para o ensaio de compressão axial das paredes, foi um processo demorado pela dificuldade em moldar a argamassa de forma nivelada. Para tal, foram utilizados cartões nivelados em forma de cofragem com recurso a fixação com filme transparente (Figura 4.21). Após enchimento e vibração do espaço livre “cofrado” e cura inicial, os cartões foram removidos e a superfície superior nivelada, Figura 4.22.

Uma vez que na primeira regularização se verificaram algumas fendas por retração (Figura 4.23), nas regularizações seguintes colocou-se um pano húmido na superfície superior regularizada após adquirir resistência superficial, obtendo-se uma cura mais húmida, Figura 4.24.

Da Figura 4.21 à Figura 4.24 apresenta-se o processo de regularização do Modelo1; da Figura 4.25 à Figura 4.26 do Modelo 2; da Figura 4.27 à Figura 4.28 do Modelo 3.



Figura 4.21 - Metodologia de Regularização do Modelo 1



Figura 4.22 - Regularização do Modelo 1



Figura 4.23 - Fendas de retração no Modelo 1



Figura 4.24 - Cura húmida do Modelo 1



Figura 4.25 - Metodologia de regularização do Modelo 2



Figura 4.26 - Regularização do Modelo 2



Figura 4.27 - Metodologia de regularização do Modelo 3



Figura 4.28 - Regularização do Modelo 3

4.7.2 PREPARAÇÃO DOS MODELOS

Finalizada a regularização dos modelos e respetiva cura, foi necessário verificar as dimensões das paredes. As medições são esquematizadas na Figura 4.29 e apresentadas no Quadro 4.5, Quadro 4.6, Quadro 4.7 e Quadro 4.8

De seguida procedeu-se à pesagem (Figura 4.30 a Figura 4.32), a centrar o Modelo no prato inferior da prensa e, instrumentá-lo previamente ao ensaio. Esta preparação foi efetuada no laboratório de comportamento de estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

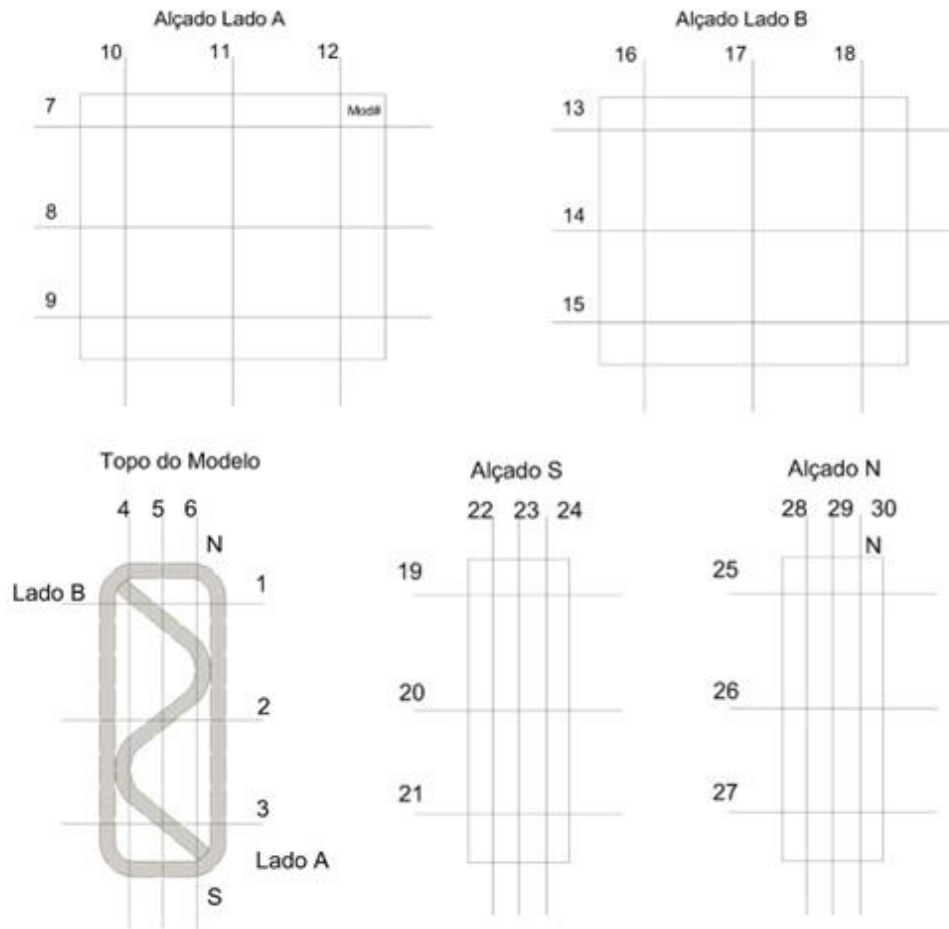


Figura 4.29 - Esquema de medições dos Modelos após regularização

Como se verifica no Quadro 4.5, em planta (medições realizadas no topo da parede), verificam-se diferenças máximas entre comprimento de 0,90 cm, sendo mais comprida no meio da área da seção e de 1,50 cm em largura, tendo o aumento de largura se verificado de 1 para 3, do Modelo 1; no Modelo 2 as diferenças máximas situam-se em 2,00 cm em comprimento, mantendo-se a zona mais comprida a meio da área de seção, e 0,70 cm em largura, sendo que neste caso, a zona mais larga é a 2, a meio da área de seção, estreitando no caminho para as extremidades; no Modelo 3 as diferenças máximas situam-se em 1,50 cm em comprimento, mantendo-se a zona mais comprida a meio da área de seção e, em 1,10 cm em largura, que, tal como no Modelo 2, a zona mais larga é a 2, a meio da área de seção, estreitando no caminho para as extremidades.

Quadro 4.5 - Medições em planta medidas no topo da parede (cm) e, peso (kg), dos Modelos 1, 2 e 3

Medição	Modelo 1 (cm)	Modelo 2 (cm)	Modelo 3 (cm)
1	21,9	24,1	22,9
2	22,6	24,4	24,0
3	23,4	23,7	23,4
4	55,2	56,7	56,3
5	56,1	58,7	57,8
6	55,5	57,4	56,9
Peso (kg)	58,0	76,0	76,0

Como se verifica no Quadro 4.6, o Modelo 1 apresenta algumas diferenças de comprimento e largura consoante a localização da medição, sendo a sua altura mantida em 45 cm com diferença de apenas 0,10 cm numa medição. A medição de altura constante é consequência de regularização feita com sucesso.

Quadro 4.6 - Medições em alçado em comprimento e altura do Modelo 1 (cm)

Medição	Modelo 1	Medição	Modelo 1
7	55,1	13	55,2
8	56,0	14	55,1
9	56,5	15	57,1
10	44,7	16	45,0
11	44,9	17	45,0
12	44,7	18	45,1
19	20,9	25	22,3
20	22,1	26	22,2
21	23,3	27	22,9
22	45,0	30	45,0
23	45,0	29	45,0
24	45,0	28	44,9

Tal como no Modelo anterior, o Modelo 2, Quadro 4.7, apresenta algumas diferenças de comprimento e largura consoante a localização da medição, sendo a sua altura mantida em 46 cm com diferença de 0,30 cm numa única medição.

Quadro 4.7 - Medições em alçado em comprimento e altura do Modelo 2 (cm)

Medição	Modelo 2	Medição	Modelo 2
7	56,5	13	57,4
8	56,5	14	59,7
9	58,7	15	58,6
10	46,7	16	46,4
11	46,6	17	46,4
12	46,6	18	46,6
19	22,3	25	22,6
20	25,1	26	22,2
21	24,2	27	23,7
22	46,4	30	46,6
23	46,4	29	46,6
24	46,3	28	46,6

No Modelo 3, Quadro 4.8, verificam-se algumas diferenças de comprimento consoante a localização da medição, a largura tornou-se mais constante relativamente aos Modelo 1 e 2, ao contrário da altura que apresentou diferença de 0,60 cm. Conclui-se que a regularização do Modelo 3 não foi bem-sucedida, possivelmente pela parede impressa ainda se encontrar no robot cartesiano da impressora 3D, dificultando o procedimento.

Quadro 4.8 - Medições em alçado em comprimento e altura do Modelo 3 (cm)

Medição	Modelo 3	Medição	Modelo 3
7	57,4	13	55,7
8	55,9	14	55,6
9	56,1	15	55,8
10	48,9	16	48,9
11	48,6	17	48,7
12	48,9	18	48,5
19	21,9	25	21,2
20	22,2	26	22,2
21	22,4	27	22,9
22	49,0	30	48,6
23	49,1	29	48,5
24	48,5	28	48,6



Figura 4.30 - Pesagem do Modelo 1



Figura 4.31 - Pesagem do Modelo 2



Figura 4.32 - Pesagem do Modelo 3

Após medição do Modelo 3, como mencionado anteriormente, tornou-se óbvia a falha da regularização impossibilitando o seu ensaio no estado em que se encontrava (diferença máxima de cerca de 6 mm entre lados, medições 23 e 29 do Quadro 4.8), Figura 4.33 e Figura 4.34. A diferença de altura entre lados foi corrigida como explicado no parágrafo seguinte.



Figura 4.33 - Desnível da regularização do Modelo 3



Figura 4.34 - Verificação da Regularização do Modelo 3

A solução encontrada foi uma segunda regularização feita com recurso a gesso, homogeneizada com encosto da prensa de ensaio onde secou sob carga, Figura 4.35 e Figura 4.36.



Figura 4.35 - Segunda Regularização do Modelo 3, vista de frente

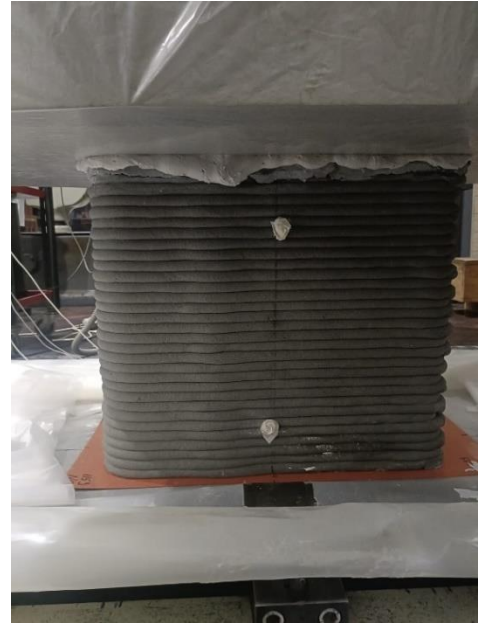


Figura 4.36 - Segunda Regularização do Modelo 3, vista lateral

4.7.3 INSTRUMENTAÇÃO DOS MODELOS

Os Modelos foram instrumentados com transdutores de deslocamento do tipo W20 (com um campo de medição de ± 20 mm), com os quais foi possível obter deslocamentos verticais em 4 pontos da parede. O transdutor é apresentado na Figura 4.37 após montagem no apoio de instrumentação usado para o ensaio.



Figura 4.37 - Transdutor montado em apoio de instrumentação



Figura 4.39 - Instrumentação deslocalizada do Modelo 1



Figura 4.40 - Instrumentação deslocalizada do Modelo 1 -
vista lateral



Figura 4.41 - Instrumentação deslocalizada do Modelo 2



Figura 4.42 - Instrumentação deslocalizada do Modelo 2 -
vista lateral

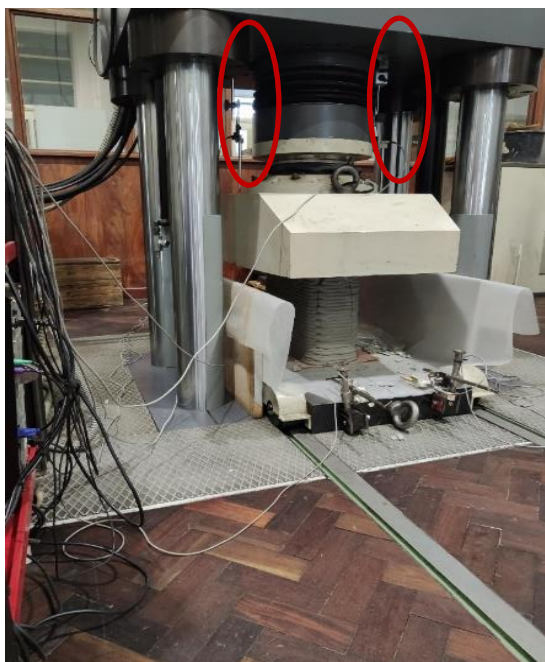


Figura 4.43 - Transdutores localizados no prato superior da prensa

Quadro 4.9 - Correspondência de equipamento com localização no Modelo

Designação	Equipamento	Correspondência
Prensa Lado A	Transdutor com campo de medição ± 50 mm WA50 EQ41	Prato Superior da Prensa
Prensa Lado B	Transdutor com campo de medição ± 50 mm WA50 EQ39	Prato Superior da Prensa
Base Lado A	Transdutor com campo de medição ± 20 mm W20 12941 (NE)	Lado A, Figura 4.38
Base Lado B	Transdutor com campo de medição ± 20 mm W20 1159 (NO)	Lado B, Figura 4.38
Topo Lado A	Transdutor com campo de medição ± 20 mm W20 297 (SE)	Lado A, Figura 4.38
Topo Lado B	Transdutor com campo de medição ± 20 mm W20 12939 (SO)	Lado B, Figura 4.38

Previamente ao ensaio delimitou-se o Modelo em desenho no cartão inferior, para que após o ensaio fosse possível determinar a área da secção. Nas Figura 4.44 a Figura 4.46 apresentam-se as áreas de secção do Modelo 1, 2 e 3 respetivamente.



Figura 4.44 - Área de secção do Modelo 1



Figura 4.45 - Área de secção do Modelo 2



Figura 4.46 - Área de secção do Modelo 3

No Quadro 4.10 apresentam-se as áreas de secção de cada Modelo obtidas pela delimitação em cartão. Partindo da geometria inicial de área 567,10 cm², observa-se considerável diferença entre a área proposta e a área de cada Modelo. Como se explica nos parágrafos seguintes, a área de secção considerada foi revista.

Quadro 4.10 - Área de secção de cada parede Modelo

Paredes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Área de secção (cm ²)	894	995	741

Após a rotura de cada parede foi efetuada a medição real da largura de cada camada, verificando-se como seria de esperar que a camada inferior é mais larga do que as restantes devido ao processo construtivo. Assim, optou-se por corrigir a área real medida na base dos modelos tendo em conta a relação entre a largura da camada inferior e a largura média de todas as camadas. No Quadro 4.11 apresenta-se a correção da área da secção de cada parede.

Quadro 4.11 - Correção da área de secção tendo em conta a largura média das camadas

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Largura média (cm)	34,00	38,78	30,36
Largura da camada base (cm)	37,84	53,30	39,82
fator corretivo	0,90	0,73	0,76
Área em planta na base (cm ²)	894	995	741
Área média da secção (cm ²)	803	724	565

4.7.4 EQUIPAMENTOS DE ENSAIO

O equipamento utilizado para o ensaio à compressão axial das paredes foi a Prensa MFL UPS 5000 V, Figura 4.47.

Este equipamento, do fabricante ROELL+KORTHAUS, é uma máquina servohidráulica funcionando em regime estático com capacidade de carga máxima à compressão de 5000 kN (Marques, 2020).



Figura 4.47 -Prensa MFL UPS 5000V utilizada no ensaio de resistência à compressão

Potencial de betão produzido por impressão 3D para aplicações estruturais. Ensaio de Paredes

O prato inferior desta prensa é deslizante, sobre dois perfis metálicos embutidos no pavimento, permitindo a preparação e instrumentação dos Modelos mais comodamente fora da área da prensa (Figura 4.48). Após a preparação, a plataforma desliza até à zona da prensa onde é travada e o ensaio realizado.



Figura 4.48 - Prato inferior deslizante, no momento protegido por plástico

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Spider 8 (Figura 4.49 e Figura 4.50), (Marques, 2020) com interface definida pelo utilizador. No caso, a interface escolhida foi o diagrama Força (kN) versus Deslocamento (mm), Figura 4.51.

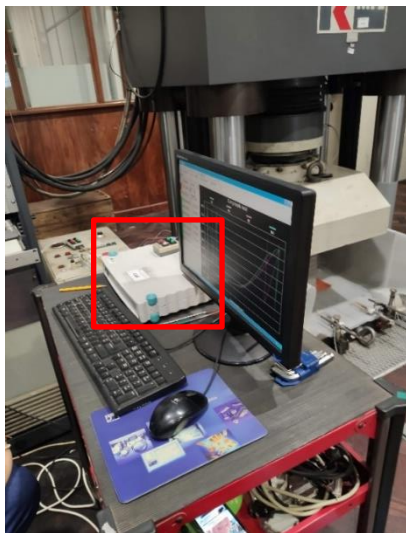


Figura 4.49 - Sistema de aquisição de dados Spider 8



Figura 4.50 - Sistema de aquisição de dados Spider 8 (Marques, 2020)

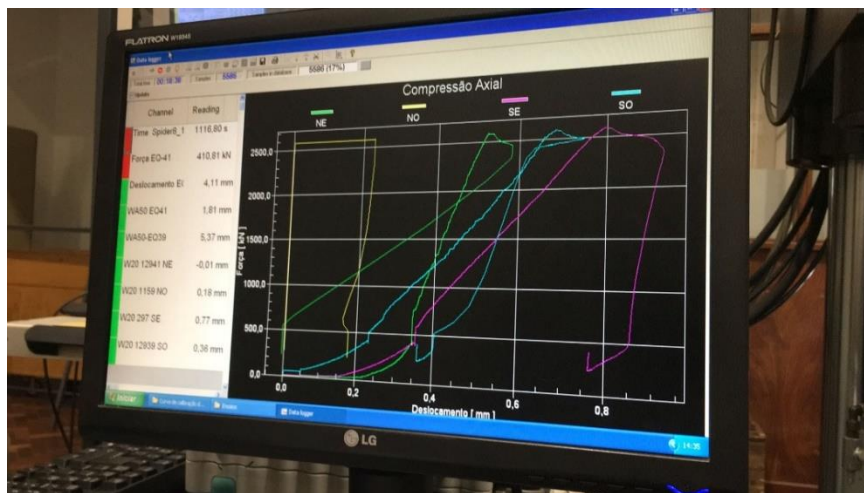


Figura 4.51 - Interface Força(kN) versus Deslocamento (mm)

Para além da instrumentação já mencionada, o ensaio foi acompanhado por câmara instalada perto da prensa para observação dos mecanismos de rotura durante o ensaio.

5 RESULTADOS E ANÁLISE DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

5.1 Caracterização das Argamassas Frescas

Os resultados do ensaio de espalhamento relativos aos Modelos 2 e 3, mencionado no Capítulo 4.6 apresentam-se no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Avaliação da consistência através do ensaio de espalhamento (mm)

Modelos		Espalhamento (mm)				Espalhamento médio (mm)	Desvio Padrão (mm)
Modelo 2	Argamassa 1 (20 L)	153	155	150	147	151	3,0
	Argamassa 2 (20 L)	143	143	143	140	142	1,3
Modelo 3	Argamassa 1 (20 L)	142	142	138	140	141	1,7
	Argamassa 2 (20 L)	146	148	149	150	148	1,5

Contrariamente ao recomendado por Jo *et al* (Jo *et al.*, 2020), de espalhamento entre 190 a 200mm, a impressão 3D de betão foi bem sucedida com espalhamento entre 141 mm com um desvio padrão de 1,7 mm e 151 mm com um desvio padrão de 3,0 mm.

5.2 Caracterização das Argamassas Endurecidas

As argamassas produzidas foram ensaiadas segundo os procedimentos descritos no Capítulo 4.6.2.

De forma a ser perceptível a leitura do gráfico da Figura 5.1 e da Figura 5.2, enumeram-se as argamassas no Quadro 5.2, que foram caracterizadas relativamente à sua resistência à compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (IPQ, 2009b). A constituição da argamassa consulta-se em Quadro 3.2 e no capítulo 4.5.4.

Quadro 5.2 - Argamassas caracterizadas

Nome	Composição	Impressão de Modelo ou Provetes	Superplastificante	Descrição
Amassadura v1 SP1 sem Modelo	Quadro 3.2	Sem Modelo ou provete impresso	SP1	Amassadura de argamassa versão 1, com recurso ao lote de superplastificante existente em laboratório (SP1)
Amassadura v2 SP1 sem Modelo	Quadro 3.2	Sem Modelo ou provete impresso	SP1	Amassadura de argamassa versão 2, com recurso ao lote de SP1
Amassadura SP2 sem Modelo	Quadro 3.2 e 4.5.4	Sem Modelo ou provete impresso	SP2	Amassadura com recurso a novo lote de superplastificante (SP2) e, conseqüente alteração da constituição da argamassa
Modelo 0 SP1	Quadro 3.2	Modelo 0	SP1	Amassadura com recurso a SP1
Modelo 2 SP2	Quadro 3.2 e 4.5.4	Modelo 2	SP2	Amassadura com recurso a SP2 e conseqüente alteração da constituição da argamassa
Modelo 3 SP2	Quadro 3.2 e 4.5.4	Modelo 3	SP2	Amassadura com recurso a SP2 e conseqüente alteração da constituição da argamassa

O gráfico da Figura 5.1 compara a resistência à flexão das várias argamassas enunciadas.

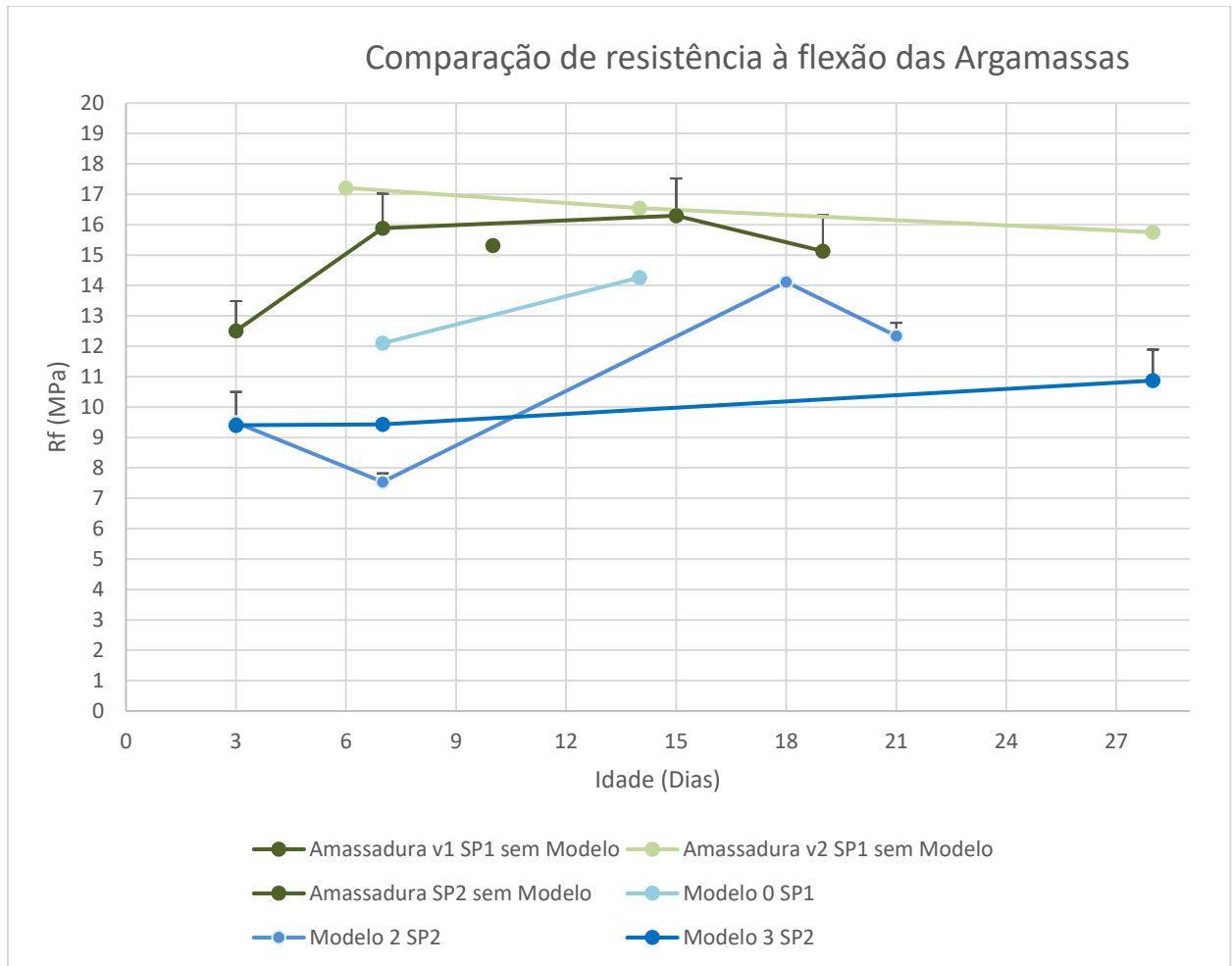


Figura 5.1 - Comparação da resistência à flexão das argamassas

Em relação à resistência à flexão não existem diferenças acentuadas entre a argamassa com SP1 e SP2, sendo a maior diferença entre o Modelo 2 SP2 e Modelo 0 SP1 de 4,56 MPa aos 7 dias de idade. A tendência de aumento de resistência ao longo da idade verifica-se de forma mais acentuada na argamassa do Modelo 2 SP2, tendo, no entanto, uma diminuição não esperada aos 21 dias de idade. O mesmo acontece na Amassadura SP2 sem Modelo entre os 15 e os 19 dias de idade. Na Amassadura v2 SP1 sem Modelo verifica-se uma diminuição não acentuada de resistência à flexão com a idade dos provetes.

Na Figura 5.2 apresenta-se o gráfico de comparação de resistência à compressão das argamassas.

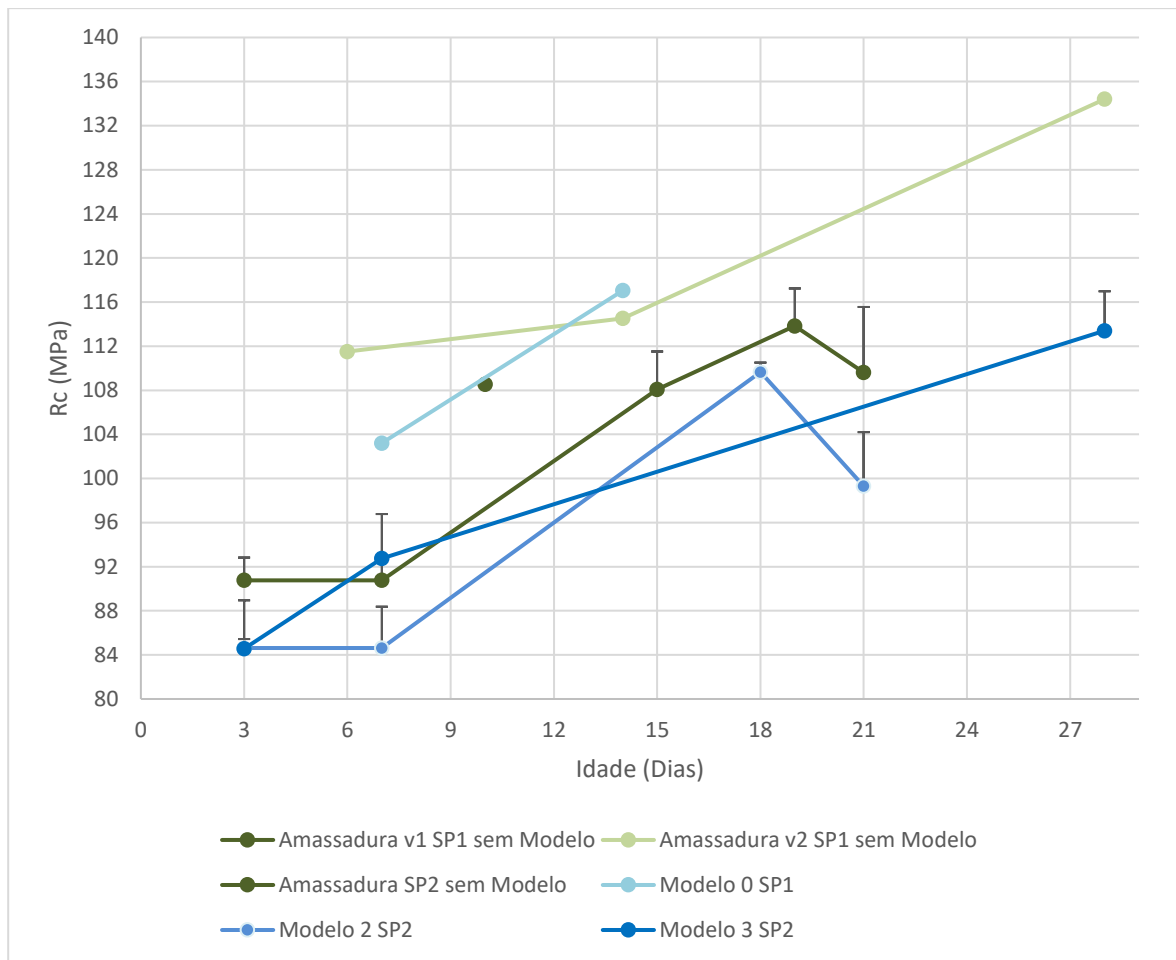


Figura 5.2 - Comparação da resistência à compressão das argamassas

A resistência à compressão da argamassa de SP1 é superior à da argamassa SP2 em 10 a 19 MPa e de 26 MPa aos 7 e 14/15 dias de idade respectivamente. A tendência de aumento de resistência ao longo da idade verifica-se mais acentuada na argamassa do Modelo 0 SP1 relativamente à Amassadura v2 SP1 sem Modelo. Em contrapartida, a mesma tendência foi mais acentuada na argamassa dos Modelo 2 e 3 SP2 relativamente à amassadura v2 SP1 sem Modelo.

A gama de resistências obtidas é expectável e comum em impressão 3D. O provete de argamassa da mesma composição do Modelo 1 ensaiado aos 28 dias com tensão de compressão de 134,4 MPa é comparável com o resultado obtido por Hoffmann em que a mistura alcança tensão de compressão de 113,7 MPa à mesma idade (Hoffmann *et al.*, 2020).

5.3 Ensaio à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial realizaram-se com uma velocidade de ensaio de 0,0037 mm/s com base no verificado no ensaio do Modelo 0 e tendo em conta uma duração de ensaio

inferior a 30 minutos. Os resultados laboratoriais do transdutor do ponto Base Lado B (W20 1159 NO) foram desconsiderados pois o equipamento não traduziu resultados fiáveis presumivelmente pelo fio ter prendido na roldana ou pela falta de movimento da mesma. De forma a calcular deformações e extensões no Alçado B, seria necessário o par de dados Base e Topo Lado B. Assim, sem dados do ponto Base Lado B, o par de resultados do Lado B dos Modelos não foi considerado. No entanto, foi possível comparar os Topos Lado A e Lado B.

5.3.1 *MODELO 0*

O Modelo 0, com 28 camadas, ensaiou-se aos 40 dias de idade, sem qualquer instrumentação, Figura 5.3. Verificou-se que a força máxima atingida foi de 2082 kN. A argamassa do Modelo 0 foi ensaiada à compressão, conforme descrito no Capítulo 5.2, e apresenta uma resistência à compressão de 117,04 MPa aos 14 dias de idade. Presumindo a área de secção indicada no Capítulo 3.2 de 567,10 cm² (a área de secção do Modelo 0 não foi medida após o ensaio) seria expectável que a força máxima atingida fosse (Equação (4.2)) cerca de 6600 kN. Verifica-se assim que a resistência do Modelo 0 foi de apenas 31% relativamente à argamassa ensaiada em provete. O Modelo 0 permitiu perceber que a localização de rotura não é previsível, não sendo possível garantir um posicionamento seguro para a instrumentação por forma a proteger o equipamento, Figura 5.4 a Figura 5.6.

Após o ensaio foi perceptível que a argamassa saliente (nas ondulações das camadas) se destacou da parede, Figura 5.4 e Figura 5.5. Nas zonas das maiores fissuras, após manuseamento, a parede desfez-se em partes, Figura 5.6.



Figura 5.3 - Ensaio de resistência à compressão do Modelo 0



Figura 5.4 - Modelo 0 após ensaio e respetivo mecanismo de rotura



Figura 5.5 - Modelo 0 após ensaio - pormenor



Figura 5.6 - Modelo 0 após manuseamento

5.3.2 MODELO 1

O Modelo 1 foi ensaiado aos 41 dias de idade com 27 camadas e 58 kg, conforme se ilustra na Figura 5.7. Durante o ensaio, quando a força exercida pela prensa era cerca de 100 kN verificou-se uma fenda a meio vão na lateral do lado A, perto da instalação da instrumentação Topo Lado A (W20 297 SE), conforme se ilustra na Figura 5.8. O Modelo 1 estabilizou tendo sido possível continuar o ensaio.

A força máxima atingida foi de 1662 kN. A argamassa deste Modelo não foi testada em provetes, no entanto uma argamassa de composição igual foi ensaiada em provetes aos 28 dias com resistência à compressão de 134,40 MPa. Seria expectável que a força máxima atingida, caso a parede se considerasse monolítica constituída pela mesma argamassa, fosse de 10798 kN, tendo em conta que a área calculada no Capítulo 4.7.2 é de 803,45 cm². Verifica-se assim que, a resistência do Modelo 1 foi de apenas cerca de 15% relativamente à argamassa ensaiada em provete. A diminuição de percentagem de resistência real em ensaio em relação ao Modelo 0 poder-se-á explicar pelo ensaio de caracterização da argamassa não ter sido feito na mesma argamassa utilizada na impressão. De referir que, em todos os Modelos, a área crítica não será a área da base, uma vez que esta está comprimida com o peso próprio de todas as camadas sobrejacentes. A área crítica corresponderá à camada de menor área, que é de difícil obtenção. Por esta razão foi considerada a área de secção média corrigida, conforme explicado em 4.7.3.

Tal como no Modelo 0, após o ensaio foi perceptível que a argamassa saliente (nas ondulações das camadas) se destacou da parede. Neste modelo, as fissuras mais evidentes não se limitaram à secção em comprimento, mas também em largura da parede, conforme se apresenta na Figura 5.9.



Figura 5.7 - Parede Modelo 1 instrumentada preparada para ensaio

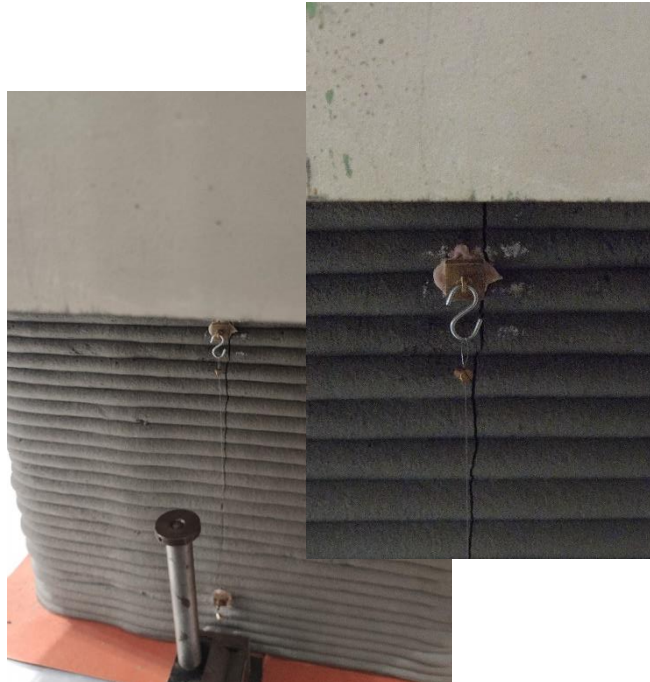


Figura 5.8 - Modelo 1 - fissura (e pormenor) a meio vão com carga aplicada de cerca de 100 kN



Figura 5.9 - Modelo 1 após ensaio

Na Figura 5.10 esquematiza-se a largura da cada camada em corte vertical da parede, assim como a largura média das camadas. A camada superior onde a regularização foi efetuada não foi considerada. De considerar que a largura de cada camada para além de variar por camada varia também ao longo do seu comprimento. Na Figura 5.11 apresenta-se uma vista de um corte vertical da parede Modelo 1 após ensaio.



Figura 5.10 - Esquema de largura de cada camada, com linhas e valor de largura média (mm) do Modelo 1.



Figura 5.11 - Corte vertical da parede Modelo 1

O gráfico de força (kN) *versus* o deslocamento dos transdutores (mm) é apresentado na Figura 5.12.

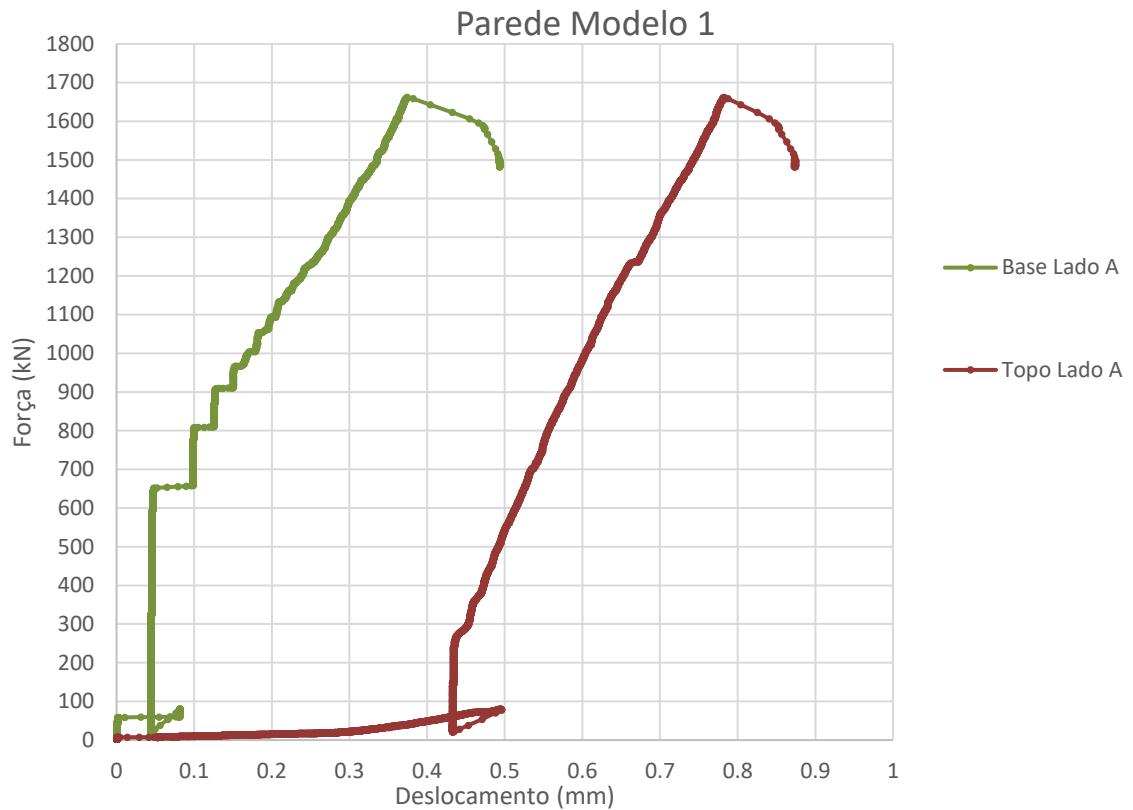


Figura 5.12 - Gráfico Força (kN) versus Deslocamento (mm) da parede Modelo 1

5.3.3 MODELO 2

O Modelo 2 ensaiou-se aos 18 dias de idade, conforme se ilustra na Figura 5.13. Os Modelos não foram ensaiados todos com a mesma idade por constrangimentos técnicos relacionados com a impressão das paredes e disponibilidade do equipamento de ensaio.

A força máxima atingida foi de 2190 kN. A argamassa do Modelo 2, após realização do ensaio para determinação da resistência à compressão, conforme descrito no Capítulo 5.2, apresenta um valor de 109,66 MPa à mesma idade da realização do ensaio da parede (18 dias). Seria expectável que a força máxima atingida, caso a parede se considerasse monolítica, constituída pela argamassa caracterizada, fosse de 7940 kN, tendo em conta que a área calculada no Capítulo 4.7.3 de 724,11 cm². Verifica-se assim que a resistência do Modelo 2 foi de cerca de 28% relativamente à argamassa ensaiada no provete.

Tal como nos modelos anteriores, após o ensaio, foi perceptível que a argamassa saliente (nas ondulações das camadas) se destacou da parede, Figura 5.14 e Figura 5.15. Neste modelo as fissuras mais evidentes não se limitaram à secção em comprimento, mas também em largura da parede.



Figura 5.13 - Modelo 2 pré ensaio



Figura 5.14 - Modelo 2 após ensaio



Figura 5.15 - Modelo 2 após ensaio com pormenores do mecanismo de rotura obtido

Na Figura 5.16 esquematiza-se a largura da cada camada em corte da parede, assim como a largura média das camadas. A camada superior onde a regularização foi efetuada não foi considerada.



Figura 5.16 - Esquema de largura de cada camada, com linhas e valor de largura média (mm) do Modelo 2.

O gráfico da força (kN) versus os deslocamentos (mm) dos transdutores é apresentado na Figura 5.17.

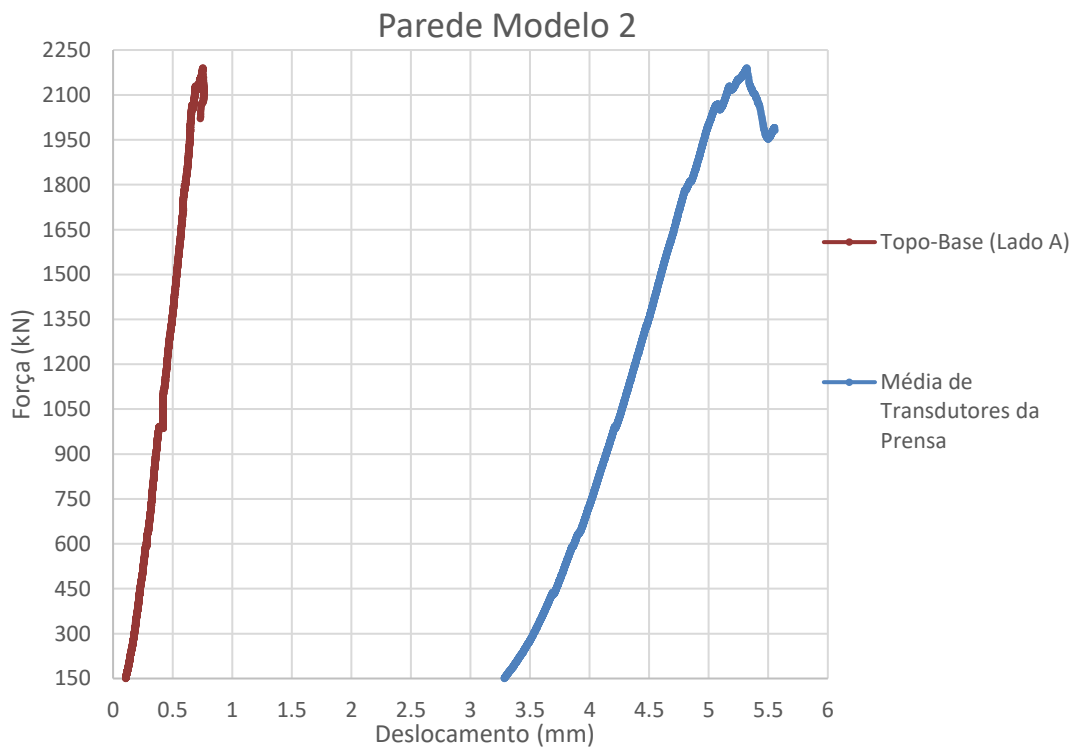


Figura 5.17 - Gráfico Força (kN) versus Deslocamento dos transdutores (mm) da parede Modelo 2

Através do Gráfico da Figura 5.17, Topo-Base (Lado A) determina-se a energia de rotura ou, o trabalho durante o processo de rotura do Modelo 2, procurando-se perceber a capacidade do modelo em absorver a energia antes da rotura. Para tal, determina-se numericamente somando as áreas de elementos trapezoidais sob a curva de força *versus* deslocamento.

A energia de rotura da parede Modelo 2 determinou-se em 1085,56 J.

Na Figura 5.18 comparam-se os deslocamentos no Topo Lado A e Topo Lado B. Verifica-se alguma semelhança de comportamento numa fase inicial de ensaio, com algum distanciamento ao longo do aumento da carga de ensaio aplicada. Verifica-se a possibilidade de se tratar de flexão no Modelo, não se descurando que a regularização também poderá influenciar o resultado.

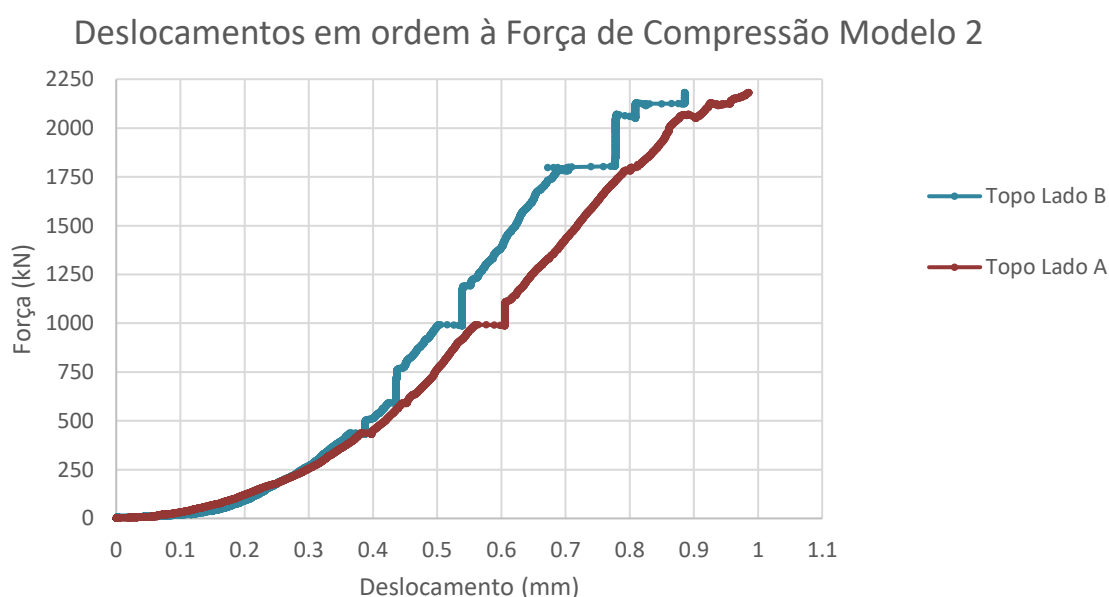


Figura 5.18 - Gráfico de comparação de deslocamentos (mm) versus Força (kN) nos topos do Lado A e B

5.3.4 MODELO 3

O Modelo 3 ensaiou-se aos 10 dias de idade, conforme se ilustra na Figura 5.19, fotografia retirada de câmara instalada na prensa para observação dos mecanismos de rotura durante o ensaio.

A força máxima atingida foi de 2594 kN. A argamassa do Modelo 3, após realização do ensaio para determinação da resistência à compressão, conforme descrito no Capítulo 5.2, apresenta um valor de 92,73 MPa aos 7 dias de idade. Seria expectável que a força máxima atingida, caso a parede se considerasse monolítica, constituída pela argamassa caracterizada, fosse de 5240 kN, tendo em conta que a área calculada no Capítulo 4.7.3 de 565,07 cm². Verifica-se assim que a resistência do Modelo 3 foi de cerca de 50% relativamente à argamassa ensaiada em provete.

Potencial de betão produzido por impressão 3D para aplicações estruturais. Ensaio de Paredes

Tal como nos modelos anteriores, após o ensaio foi perceptível que a argamassa saliente (nas ondulações das camadas) se destacou da Parede, Figura 5.20. Neste modelo as fissuras mais evidentes apresentaram-se em largura da parede, conforme se ilustra na Figura 5.21.

O gráfico da força (kN) *versus* deslocamentos (mm) dos transdutores é apresentado na Figura 5.22.



Figura 5.19 - Modelo 3 pré ensaio



Figura 5.20 - Modelo 3 após ensaio



Figura 5.21 - Modelo 3 após ensaio com pormenor do mecanismo de rotura obtido

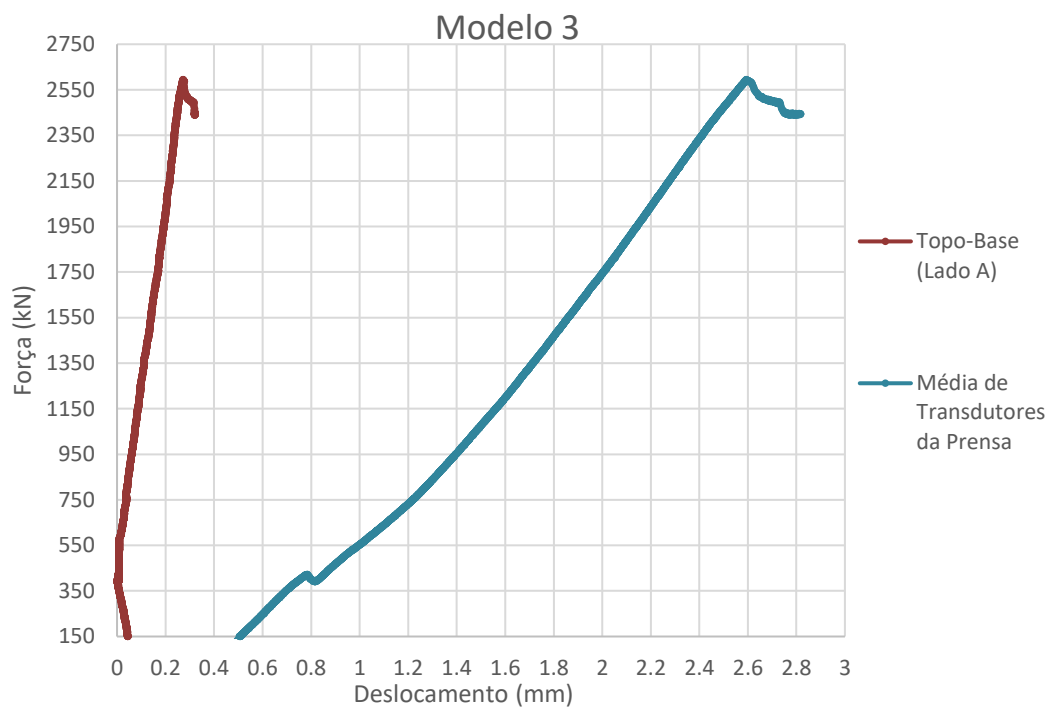


Figura 5.22 - Gráfico da força versus deslocamento dos transdutores da parede Modelo 3

A energia de rotura foi obtida através da área do gráfico da força versus deslocamento dos transdutores Topo-Base (Lado A), conforme se ilustra na Figura 5.23, traduzindo-se num valor de 760,94 J.

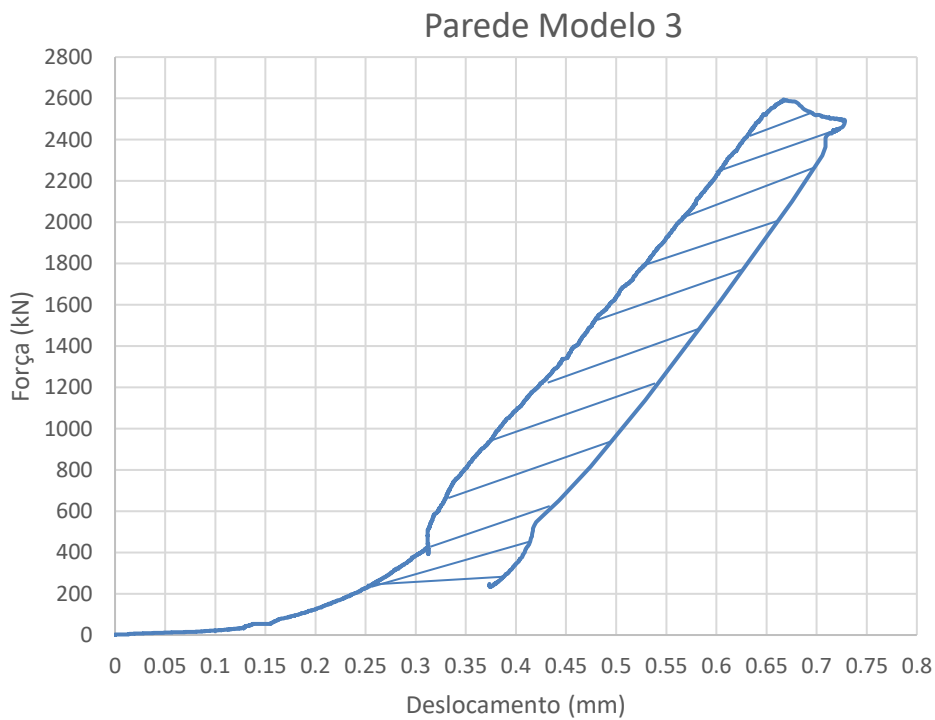


Figura 5.23 - Área de obtenção da energia de rotura

Na Figura 5.24 comparam-se os deslocamentos no Topo Lado A e Topo Lado B. Desde o início do ensaio que se verifica algum distanciamento ao longo do aumento da carga de ensaio aplicada. Verifica-se a possibilidade de se tratar de flexão no Modelo, não se descurando que a regularização também poderá influenciar o resultado.

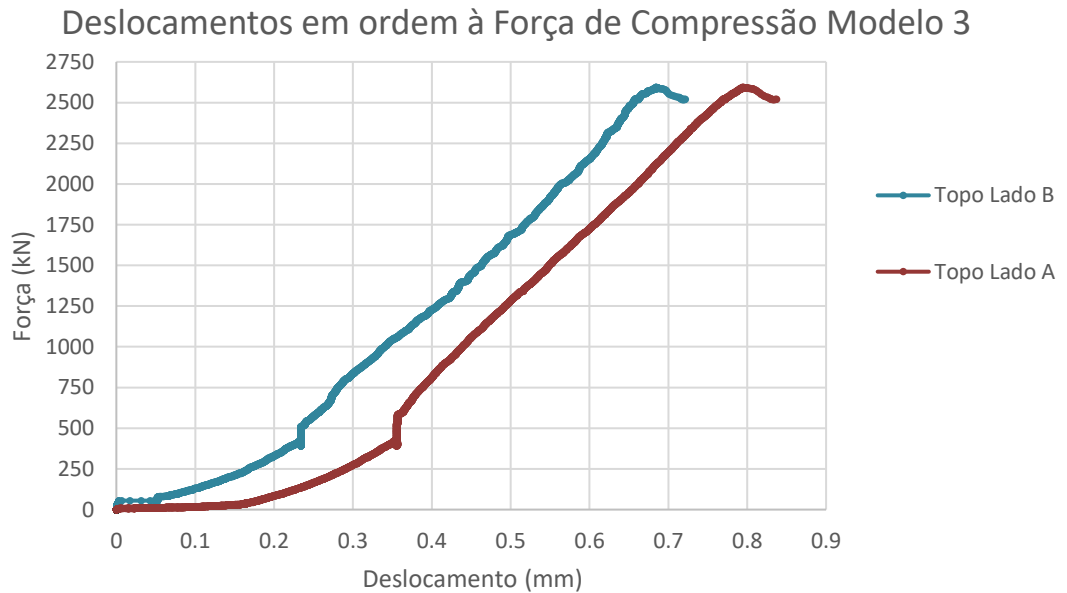


Figura 5.24 - Gráfico de comparação de deslocamentos (mm) versus Força (kN) nos topos do Lado A e B

Na Figura 5.25 esquematiza-se a largura da cada camada em corte da parede com medições obtidas pelo destacamento da Figura 5.26, assim como a largura média das camadas. As três camadas superiores foram desconsideradas por impossibilidade de leitura.



Figura 5.25 - Esquema de largura de cada camada, com linhas e valor de largura média (mm) do Modelo 3



Figura 5.26 - Destacamento de parte do modelo 3 para leitura de largura de camadas

No Quadro 5.3 resume-se algumas características dos modelos na data de ensaio. O número de camadas varia apenas em máximo de 3, pelo que este fator não foi tido em consideração na análise dos resultados. A área em planta de cada Modelo, analisada no Capítulo 4.7.3, tem alguma variação apesar da impressão ter sido realizada com o mesmo ficheiro G-Code e mesma geometria de parede. Considera-se que estas alterações se devem a irregularidades de impressão, pequenas diferenças na argamassa, tal como tempo decorrido desde a amassadura à sua impressão assim como diferenças de temperatura ambiente durante as impressões.

Verifica-se que os Modelos 2 e 3 apesar de apresentarem a mesma massa, 76 kg, apresentam área de secção transversal diferente (variação de 159,04 cm²). O mesmo se verifica com o Modelo 1, que apesar de apresentar área maior do que o Modelo 3, a sua massa é inferior. Como mencionado anteriormente, tal pode ser justificado pela área considerada, que apesar de corrigida, pode não ser a mais correta de aferir.

A força máxima aplicada variou entre 1662 e 2595 kN, sendo o Modelo 3 o que apresenta maior força máxima resistente, como demonstrado no

Quadro 5.3. Esta força foi em média igual a 2132 kN, com um desvio padrão de 332 kN.

Quadro 5.3 - Características dos Modelos impressos e Força de compressão máxima à rotura

Característica	Modelo 0	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Idade do modelo no dia do ensaio (dias)	40	41	18	10
Número de Camadas	28	27	29	30
Área da secção (cm ²)	-	803	724	565
Massa (kg)	-	58	76	76
F _{compressão_máxima} (kN)	2082	1662	2190	2595
R _{c_argamassa} (MPa)	117,04*	134,4**	109,66***	92,73****

*Provete da mesma argamassa impressa ensaiado aos 14 dias

**Provete de argamassa da mesma composição ensaiado aos 28 dias

***Provete da mesma argamassa impressa ensaiado aos 18 dias (mesma idade da Parede Modelo 2)

****Provete da mesma argamassa impressa ensaiado aos 7 dias

No Quadro 5.4 apresenta-se uma comparação entre a força máxima de compressão em ensaio e a expectável pela caracterização do betão em provetes sujeitos a ensaio à compressão descritos no Capítulo 4.6.2.

Quadro 5.4 - Comparação de força máxima à compressão expectável com a real de ensaio

Característica	Modelo 0	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
R _{c_argamassa} (MPa)	117,04	134,40	109,66	92,73
Área (cm ²)	567*	803	724	565
F _{compressão_expetável_provete} (kN)	6637	10798	7941	5240
F _{compressão_máxima_ensaio} (kN)	2082	1662	2190	2595
% atingida de força máxima	31.37%	15.39%	27.58%	49.51%
σ _{c_parede} (MPa)	36.71	20.68	30.25	45.91

* Área não medida após ensaio, não corrigida

Como mencionado nos Capítulos 5.3.2 a 5.3.4, a força de compressão máxima verificada em ensaio representa entre 15 a 50% da força que seria expectável pela caracterização da argamassa. Estes resultados estão em linha com o verificado em (Han *et al.*, 2022), onde o provete resistiu a cerca de 37% da carga máxima que a caracterização do betão indicava. Será importante referir que a área da secção do provete considerada não foi a mais correta, pois a área crítica é representada pela área de seção menor. Neste tipo de provetes, a área crítica não é facilmente determinada pois apenas seria possível a sua determinação pela medição de área de todas as camadas de impressão. Para a mesma força aplicada, quanto maior for a área de seção menor será a tensão de compressão. Considerando a força máxima do ensaio, quanto maior a área considerada do Modelo, menor será a sua tensão resistente à compressão. A tensão de compressão máxima dos Modelos situa-se entre cerca de 20 a 46 MPa, verificando-se maior resistência nos Modelos 0 e 3. O seu valor médio é de 33,39 MPa com um desvio padrão de 9,21 MPa

Como seria expectável, os deslocamentos são maiores nos transdutores de Topo (Lado A e B) uma vez que estes se localizaram em cota superior. No Modelo 1 e 2 o deslocamento em Topo Lado B foi superior ao verificado no Topo Lado A verificando-se o contrário no Modelo 3.

Os transdutores colocados no prato superior da prensa, Prensa Lado A e B registaram deslocamentos superiores que podem ser justificados por deslocamentos não contabilizados nas superfícies de contacto, como as irregularidades da regularização feita, com os pratos da prensa e pelo encosto do prato superior da prensa numa fase inicial de ensaio.

Considerando um intervalo de forças entre 1000 a 2000 kN (pela uniformidade de comportamento de ambos os Modelos, após encosto inicial da prensa que corrige eventuais irregularidades da face de topo e, prévio à rotura) na análise entre extensões medidas nos provetes e no prato superior da prensa verifica-se uma relação de 1,8 no Modelo 2 e de 3,2 no Modelo 3, Figura 5.27. O Modelo 1 não foi considerado para esta análise devido à formação de uma fissura no início de ensaio, muito próxima do transdutor Topo Lado A, como demonstrado em 5.3.2.

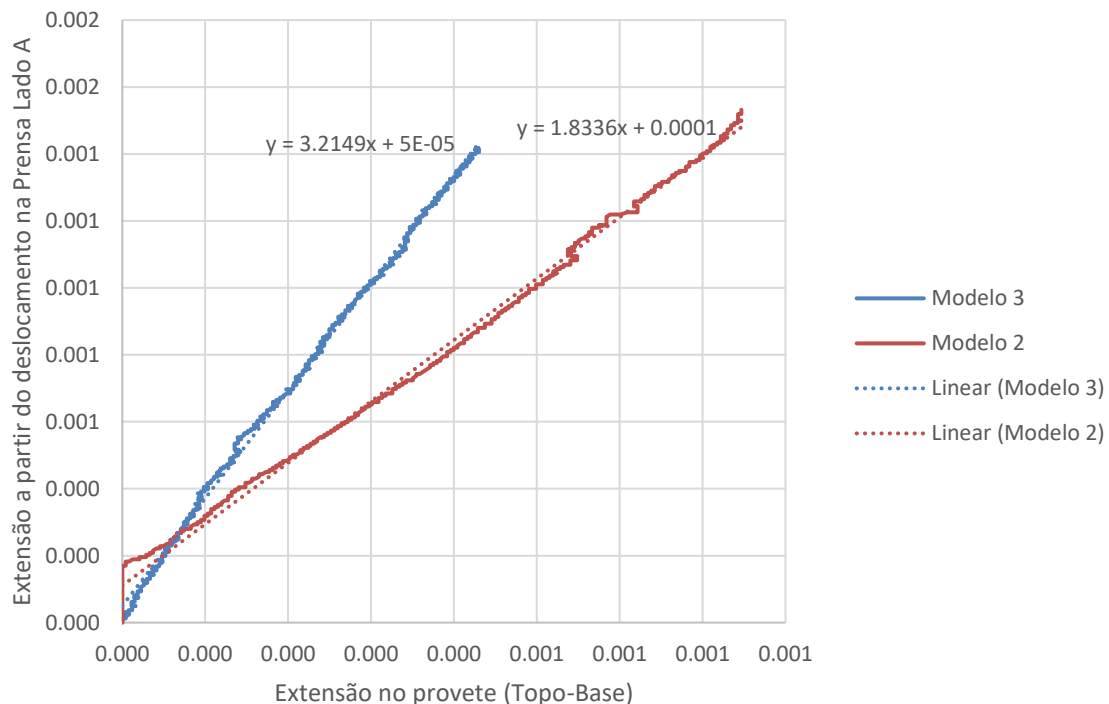


Figura 5.27 - Relação entre extensões a partir dos deslocamentos da prensa e dos provetes no intervalo de Forças entre 1000 e 2000 kN

Analisando os Modelos 2 e 3 no gráfico de Tensão (MPa) versus Extensão verifica-se que o módulo de deformabilidade dos Modelos foi em média 9,15 GPa quando a extensão foi obtida considerando as deformações medidas no prato da prensa, conforme se demonstra na Figura 5.28. Tendo em conta as propriedades da argamassa e a sua resistência estima-se que o módulo de deformabilidade da argamassa se situa entre 30 a 40 GPa.

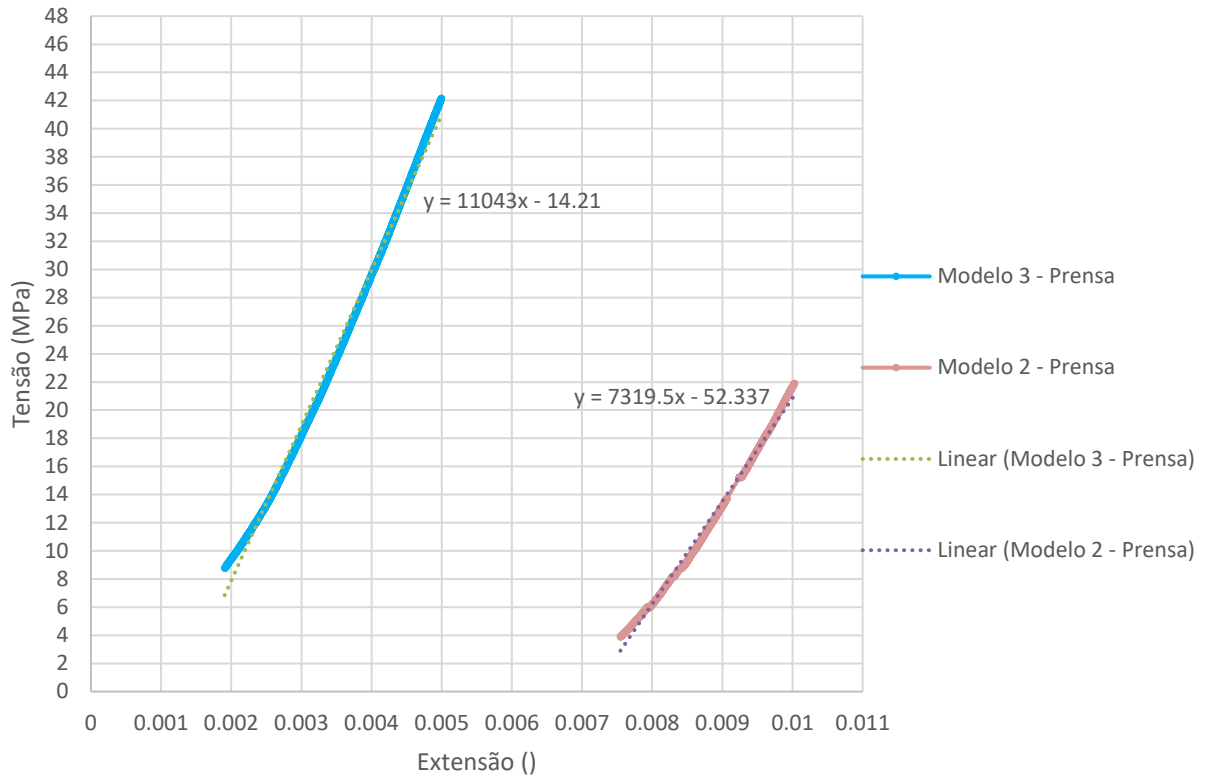


Figura 5.28 - Gráfico Tensão (MPa), Extensão (-) dos Modelos 2 e 3

Tal como verificado na relação entre a tensão de rotura nos provetes de argamassa e na tensão de rotura dos modelos expressas em percentagem relacionável, o mesmo poderá ser afirmado relativamente ao módulo de deformabilidade calculado, ou seja, a tensão não é distribuída de forma uniforme pela área da parede. No Modelo 2 verifica-se que o módulo de deformabilidade é 21% do módulo de deformabilidade previsto da argamassa (média de 35 GPa). Relativamente ao Modelo 3 esta relação é de 31%, conforme apresentado no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 - Comparação de características dos Modelos

Parâmetros	Modelo 0	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
$R_{c_argamassa}$ (MPa)	117.04	134.40	109.66	92.73
Área (cm ²)	567*	803	724	565
Altura (cm)	-	44.98	46.48	48.72
$F_{compressão_expetável_provete}$ (kN)	6637	10798	7941	5240
$F_{compressão_máxima_ensaio}$ (kN)	2082	1662	2190	2595
% atingida de Força máxima	31.37%	15.39%	27.58%	49.51%
σ_{c_parede} (MPa)	36.71	20.68	30.25	45.91
E_{prensa} (GPa)	-	-	7.30	11.00
% $E_{prensa}/Argamassa$	-	-	21%	31%

* Área não medida após ensaio, não corrigida

Em suma, os Modelos apresentam comportamento similar, destacando-se o Modelo 3 pela maior força de compressão em ensaio, assim como maior percentagem de força máxima atingida. Tal facto poder-se-á dever à aquisição de experiência ao longo da campanha experimental quer em impressão, quer em ensaios tornando o processo mais sistemático.

6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Cumprimentos dos objetivos propostos

Como mencionado no Capítulo 1.4, o trabalho final de mestrado apresentado propôs-se cumprir alguns objetivos, dos quais:

1. Impressão de paredes com geometria que cumprisse o estabelecido na norma EN 1052-1:1999 (CEN, 1998)

Selecionou-se esta norma por falta de norma que melhor se adequasse, uma vez que ainda não existem critérios normativos relativamente a ensaios de resistência à compressão em provetes de betão impressos em 3D. Alguns parâmetros desta norma não foram cumpridos, tais como a altura do provete, pelo menos igual à sua largura, por dificuldades técnicas de impressão explicadas no Capítulo 4.5. Outro parâmetro relacionado com a largura de tijolo de alvenaria não é possível aplicar pois a camada de impressão é contínua.

2. Conceção geométrica da parede em G-Code

A geometria da parede modelo foi apresentada no Capítulo 3.2 e a mesma foi transposta para um ficheiro G-Code (Anexo I) de forma a ser lida pelo *software* do robot da impressora 3D. As condicionantes que alteraram esta geometria foram apenas de altura, como mencionado no Capítulo 4.5.

3. Ensaio de resistência à compressão axial das paredes impressas

Os ensaios de resistência à compressão axial foram cumpridos com sucesso tendo sido possível a análise dos resultados.

4. Caracterização das argamassas utilizadas para impressão 3D dos Modelos

Os ensaios propostos quer em argamassa fresca, quer em argamassa endurecida foram cumpridos, tendo sido possível a caracterização das argamassas. De referir que apenas a argamassa utilizada na impressão do Modelo 1 não foi ensaiada em provetes normalizados por dificuldades técnicas laboratoriais relacionadas com recursos disponíveis. No entanto, este modelo foi impresso com argamassa de igual composição já caracterizada no Modelo 0.

5. Comparação de resultados com a literatura existente até ao momento

Como já mencionado anteriormente não existe, até ao momento, muita informação sobre este tema / área de investigação. No entanto foi possível a comparação de resultados com outros autores com trabalhos de investigação relacionados com o presente trabalho, tais como Han *et al.*, 2022; Hoffmann *et al.*, 2020; Jo *et al.*, 2020. Han *et al* ensaiou à compressão axial protótipos de paredes impressas com e sem reforço de armadura (Han *et al.*, 2022). Hoffmann *et al* procura analisar a capacidade de transferência de cargas na argamassa de impressão através da impressão de uma parede com colocação automática de lintel em abertura de porta (Hoffmann *et al.*, 2020). Jo *et al* ensaiou igualmente protótipos de parede com diferentes misturas de argamassa, testando parâmetros como *open time*, entupimento da mangueira devido à adição de fibras e resistência à compressão da argamassa (Jo *et al.*, 2020).

6. Melhor compreensão do comportamento estrutural a curto prazo de uma parede com função estrutural.

Por último, será seguro afirmar que este estudo e campanha experimental contribuiu para a melhor compreensão do comportamento estrutural a curto prazo de uma parede com função estrutural uma vez que foi possível analisar o mecanismo de rotura dos Modelos, assim como documentar a resistência à compressão e deslocamentos sofridos durante o seu carregamento. Para além disso foi possível não só compreender as limitações do estado de arte, como também realizar um levantamento de necessidades de investigação tendo em conta as dificuldades associadas ao processo de impressão.

6.2 Conclusões

A impressão 3D de betão representa uma inovação significativa na indústria da construção civil. Essa tecnologia permite a criação de estruturas complexas e personalizadas de forma mais eficiente e rápida do que os métodos tradicionais de construção. Este método inovador de construção pode reduzir significativamente o desperdício de materiais de construção, tornando-a uma opção mais sustentável que a construção convencional. Além disso, a automação nesse processo pode economizar energia e recursos,

potenciando a redução de custos a longo prazo devido a redução de mão de obra e tempo de construção. Por outro lado, a construção com recurso a impressão 3D pode potenciar aplicações futuras como construção de habitação a baixo custo ou ainda construção em ambientes hostis.

Ao longo da campanha experimental algumas dificuldades foram sentidas como situações imprevistas na impressão que devem ser contabilizadas. O equilíbrio entre construtabilidade e extrusabilidade é crucial pelo que a análise da constituição do betão ou argamassa a imprimir deve ser um parâmetro a ter em conta em cada caso. O recurso a betões com quantidades elevadas de SP e reduzida dimensão do agregado traduz-se numa solução para que seja garantido que o sistema rotor/estator não seja obstruído para além da construtabilidade da argamassa e manutenção da sua trabalhabilidade. Conclui-se também que a relação de altura/largura de cada camada de argamassa não é uma relação constante, mas sim que varia em altura e, ao longo dos Modelos, conforme se exemplifica na Figura 6.1. Uma característica constante é que a primeira camada, de base, é a camada mais larga, sendo expectável uma vez que a altura da primeira camada é também definida pelo posicionamento de altura do bocal no início da impressão (parâmetro definido e mantido constante ao longo dos Modelos). Para além do último aspeto referido esta camada suporta o peso de todas as camadas superiores. ,

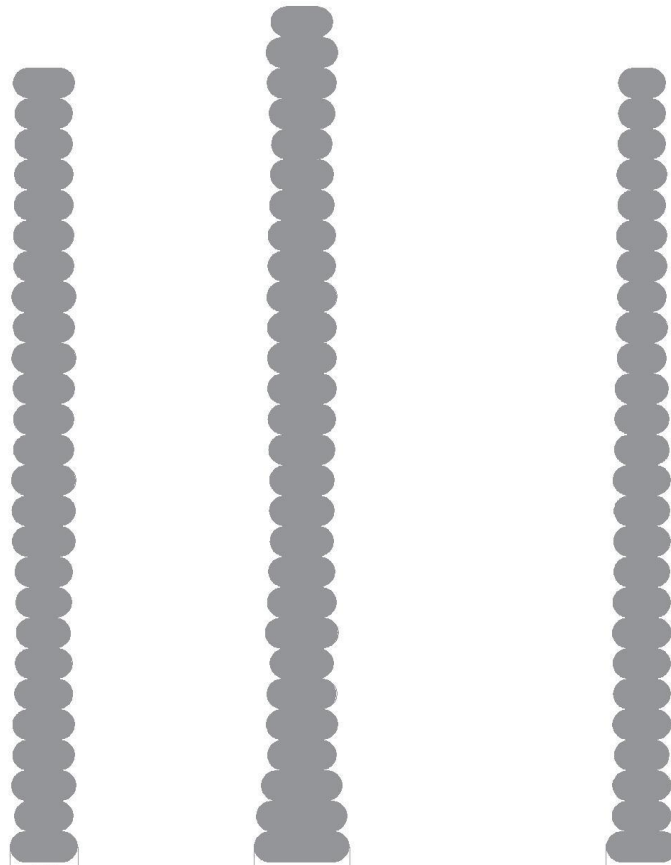


Figura 6.1 - Comparação de largura de camadas do Modelo 1, 2 e 3, da esquerda para a direita

Os ensaios de resistência à compressão axial revelaram que o mecanismo de rotura não é replicado e por isso não permite prever uma localização segura para colocação dos transdutores de deslocamento, pelo que é necessária a colocação da instrumentação deslocalizada do Modelo, permitindo o acompanhamento até ao colapso, evitando-se danos nos transdutores em caso de rotura súbita.

Em relação à capacidade de resistência à compressão, os modelos apresentaram comportamento expectável, tendo em conta outros trabalhos de investigação semelhantes (Han *et al.*, 2022; Hoffmann *et al.*, 2020; Jo *et al.*, 2020), apresentando uma relação de força máxima de ensaio/força considerando a resistência da argamassa registada em média de 31% com um desvio padrão de 12%. A carga máxima registada verificou-se em média de 2132 kN com um desvio padrão de 332 kN. A rotura caracterizou-se por formação de fissuras verticais que se propagam ao longo da parede. O deslocamento máximo registado por transdutor deslocalizado da parede Modelo 2, no Topo do Lado A, foi de cerca de 1 mm.

Os Modelos impressos são elementos frágeis realizados com tecnologia com propensão a imperfeições, o que conduz a que a rotura à compressão seja uma rotura frágil devido a imperfeições no Modelo.

6.3 Desenvolvimento futuro

O desenrolar deste trabalho permitiu a perceção da necessidade extensiva de desenvolvimentos futuros desta tecnologia, enumerados de seguida:

- A caracterização da argamassa foi realizada recorrendo a provetes prismáticos normalizados, no entanto, seria mais realista os ensaios serem complementados com recurso a provetes impressos. Estes ensaios carecem de uniformização e normalização, conclusão alcançada também por Hoffmann *et al.* (Hoffmann *et al.*, 2020);
- Os ensaios de compressão permitem entender a capacidade de carga máxima de uma estrutura específica que pode variar consoante a argamassa de impressão, a geometria do modelo e as condições de impressão. No futuro seria relevante uniformizar os parâmetros mencionados e verificar a influência da dimensão em planta dos modelos na resistência à compressão das paredes.
- As paredes são constituídas por camadas e, a interface entre as camadas pode afetar não só a resistência das paredes como também a sua anisotropia. O estudo da anisotropia da peça impressa é necessário de forma a perceber se a sua resistência varia em função da direção de carga aplicada.
- Tal como a interface entre camadas pode afetar a anisotropia, pode afetar também a resistência à compressão, pelo que ensaios que permitam determinar a coesão entre camadas e existência de delaminação sob carga seriam úteis.

- Pesquisa e análise de reforços estruturais aos Modelos, tais como inserção de fibras no betão.
- Análise e realização de ensaios de corte e compressão diagonal em Modelos de forma a ser possível a determinação da resistência ao corte da parede e das características de ligação das camadas.
- Necessidade de criação de modelo de simulação numérica para validação da campanha experimental. Os modelos numéricos até à data foram realizados por camada sobre camada. Seria útil a uniformização de modelo numérico em estruturas impressas em 3D de forma a permitir simular o comportamento de elementos impressos com vários materiais de reforço. Nesse sentido, existe a necessidade de solução de modelação da interface entre camadas com vista a uniformizar o modelo numérico.
- Pesquisa e desenvolvimento de materiais específicos adequados para impressão 3D que tenham em conta requisitos de resistência, durabilidade e sustentabilidade.
- Necessidade de pesquisa sobre a durabilidade deste tipo de estruturas de forma a garantir padrões de segurança exigidos.
- Com o desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D de betão é importante estabelecer normas e regulamentações adequadas para garantir a segurança e conformidade das construções impressas em 3D.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3dprintedhouse, n.d. 3dprintedhouse: Project - Project Milestone [WWW Document]. 3dprintedhouse. URL <https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone> (consultado em 4.17.23).
- Casagrande, L., Esposito, L., Menna, C., Asprone, D., Auricchio, F., 2020. Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete. *Construction and Building Materials* 245, 118286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118286>
- CEN, 2021. BS EN 12390-13:2021 Testing Hardened concrete: Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- CEN, 2005. EN 1996-1-1:2005 Eurocode 6: Design of masonry structures.
- CEN, 1998. Methods of test for masonry. Part 1, Determination of compressive strength.
- Crane, W., 2018. Tecla 3D printed house WASP [WWW Document]. URL <https://www.3dwasp.com/wp-content/uploads/2019/10/Tecla-3D-printed-house-WASP-img2.jpg> (consultado em 4.17.23).
- Dean, J., 2022. First of its kind 3D printed home blends concrete, wood [WWW Document]. Cornell Chronicle. URL <https://news.cornell.edu/stories/2022/09/first-its-kind-3d-printed-home-blends-concrete-wood> (consultado em 4.17.23).
- Ding, T., Xiao, J., Qin, F., Duan, Z., 2020. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. *Construction and Building Materials* 248, 118654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118654>
- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., Kaufmann, W., 2021. Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures* 240, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112380>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, Ph., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., Morel, Ph., 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* 100, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- Han, X., Yan, J., Liu, M., Huo, L., Li, J., 2022. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. *Automation in Construction* 133, 103993. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103993>

- Hoffmann, M., Skibicki, S., Pankratow, P., Zieliński, A., Pajor, M., Techman, M., 2020. Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper. *Materials* 13, 1800. <https://doi.org/10.3390/ma13081800>
- Instituto Nacional de Estatística, 2023. Índice de custos de construção de habitação nova, Índice de custos de construção de habitação nova. INE.
- IPQ, 2009a. NP EN 12350-5 - Ensaio de betão fresco. Parte 5: ensaio de mesa de espalhamento.
- IPQ, 2009b. NP EN 12390-5 - Ensaio do Betão Endurecido. Parte 3: Resistência à flexão dos provetes.
- IPQ, 2009c. NP EN 12390-3 - Ensaio do Betão Endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes.
- Jo, J.H., Jo, B.W., Cho, W., Kim, J.-H., 2020. Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *Int J Concr Struct Mater* 14, 13. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>
- Karpova, E., Skripkiunas, G., Sedova, A., Tsimbalyuk, Y., 2021. Additive manufacturing of concrete wall structures. *E3S Web Conf.* 281, 03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128103007>
- Katsikopoulou, M., 2022. Danish startup builds first 3D printed concrete tiny house in europe [WWW Document]. *designboom | architecture & design magazine*. URL <https://www.designboom.com/architecture/first-3d-printed-tiny-house-europe-3dcp-05-30-2022/> (consultado em 4.21.23).
- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Law, R., Gibb, A.G.F., Thorpe, T., 2012. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 42, 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- Li, Z., Hojati, M., Wu, Z., Piasente, J., Ashrafi, N., Duarte, J.P., Nazarian, S., Bilén, S.G., Memari, A.M., Radlińska, A., 2020. Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. *Sustainability* 12, 5628. <https://doi.org/10.3390/su12145628>
- Lopes, G., 2016. "Exploração das possibilidades da impressão 3D na construção" (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Luciano, X., 2018. NC Viewer // GCode Viewer and Machine Simulator [WWW Document]. URL <https://ncviewer.com/> (consultado em 4.21.23).
- 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, 613–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- Marlin, 2023. G0-G1 - Linear Move [WWW Document]. Marlin Firmware. URL <https://marlinfw.org/docs/gcode/G000-G001.html> (consultado em 2.23.23).

- Marques, A.I., 2020. Reabilitação de edifícios antigos: redução da vulnerabilidade sísmica através do reforço de paredes. Universidade de Lisboa, IST.
- Nraynaud, 2020. G-code simulator [WWW Document]. URL <https://nraynaud.github.io/webgcode/> (consultado em 4.21.23).
- Ooms, T., Vantghem, G., Van Coile, R., De Corte, W., 2021. A parametric modelling strategy for the numerical simulation of 3D concrete printing with complex geometries. *Additive Manufacturing* 38, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101743>
- P, Alexandra, 2022. The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing [WWW Document]. 3Dnatives. URL <https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174/> (consultado em 4.17.23).
- Panda, B., Chandra Paul, S., Jen Tan, M., 2017. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* 209, 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- Puzatova, A., Shakor, P., Laghi, V., Dmitrieva, M., 2022. Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings* 12, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings12112023>
- Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., Ghani, Z., 2019. Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials* 227, 116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
- Relatório do Setor da Construção em Portugal 2022 – 1o Semestre, 2022.
- Rouhana, C., Aoun, M., Faek, F., Jazzar, M.E., Farook Hamzeh, 2014. The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1718.4646/1>
- Serendix Inc, 2022. Serendix sphere [WWW Document]. URL <https://cloudsao.com/SERENDIX-SPHERE> (consultado em 4.21.23).
- Skibicki, S., Techman, M., Federowicz, K., Olczyk, N., Hoffmann, M., 2021. Experimental Study of Hardened Young's Modulus for 3D Printed Mortar. *Materials* 14, 7643. <https://doi.org/10.3390/ma14247643>
- V., C., 2022. 3D Printed Houses: A Closer Look at Completed Projects from Around the World [WWW Document]. 3Dnatives. URL <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-houses-market-250220204/> (consultado em 4.21.23).
- Wohlers, T., Gornet, T., 2015. History of additive manufacturing.
- Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., 2019. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites* 104, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103344>

Zhang, C., Nerella, V.N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., Banthia, N., 2021. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 122, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>



Obrigado Jio! Foi um prazer!