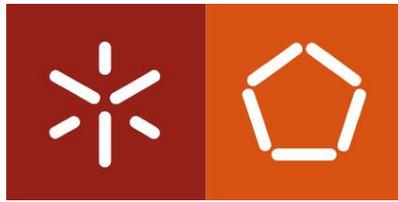


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Marcelo Pires Sepúlveda Correia da
Silva

**Bio-inspiração aplicada a estruturas de
betão: desafios e possibilidades
associados às técnicas de impressão 3D**

Outubro de 2012



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Marcelo Pires Sepúlveda Correia da
Silva

**Bio-inspiração aplicada a estruturas de
betão: desafios e possibilidades
associados às técnicas de impressão 3D**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha

Outubro de 2012

“Viver não é necessário. Necessário é
criar”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Expresso o meu sincero agradecimento ao Professor Miguel Azenha, orientador científico desta dissertação, por toda a disponibilidade evidenciada no acompanhamento deste meu trabalho, pela orientação e supervisão sempre cuidadosa e atenta, indispensáveis à realização do mesmo.

Enalteço todo o préstimo, dedicação e trabalho em equipa, do meu colega e amigo João Pereira que sempre se mostrou disponível, proporcionando a interação necessária para que o trabalho se tornasse uma realidade, assim como um bom aliado nos momentos mais críticos da execução deste trabalho.

Agradecimento ao Professor Caetano Monteiro, orientador do aluno João Pereira, do departamento de Engenharia Mecânica, pela ajuda e colaboração prestada.

Um reconhecido bem-haja aos técnicos de laboratório que comigo colaboraram, em especial aos Engenheiros Carlos Jesus e Carlos Palha, que com dedicação e empenho, desempenharam um importante papel na solução de vários problemas com que me deparei ao longo do trabalho laboratorial. Um reconhecido agradecimento também ao auxílio prestado no laboratório pelo colega Hélder.

Uma nota de apreço a todos os meus amigos e de forma especial e sentida à Cláudia Gonçalves e ao Miguel Diogo que para além do apoio incondicional e dos momentos de boa disposição que me proporcionaram, ajudaram-me na concretização deste trabalho.

Um carinhoso e profundo agradecimento à minha família e em particular aos meus pais e irmã, pelo encorajamento e apoio que desde o início me souberam transmitir.

À Sara, a quem dedico este trabalho, agradecendo-lhe por toda a compreensão demonstrada durante o percurso deste trabalho, revelando-se ser o meu verdadeiro suporte e cuja presença me incutiu de esperança e força de modo a alcançar com sucesso os meus objetivos.

RESUMO

A impressão 3D consiste no recurso a sistemas eletro-mecânicos para criação de objetos reais a partir de modelos computacionais concebidos em tecnologias CAD (Computer Aided Design) e CAM (Computer-aided manufacturing). Estas tecnologias são largamente utilizadas no âmbito da Prototipagem Rápida em Engenharia Mecânica, tendo surgido da necessidade de criação rápida de peças a custo reduzido. Adaptando-se a tecnologia para produção de peças em betão armado (ou betão simples), caem alguns dos paradigmas usualmente associados à conceção estrutural. De facto, a liberdade de formas que já se considera existir nas peças de betão, ganha todo um novo significado com a impressão 3D. Por outro lado, a possibilidade de distribuir o material estrutural de forma diferenciada ao longo da peça traz um conjunto de novos desafios de otimização. Verifica-se que ambas as alterações paradigmáticas mencionadas (liberdade de forma e liberdade de distribuição de material) permitem que a conceção estrutural possa cada vez mais seguir linhas de bio-inspiração, onde é frequentemente referida a capacidade das estruturas da natureza efetuarem otimização de formas e distribuição não uniforme das propriedades mecânicas (rigidez e resistência), melhorando o seu desempenho estrutural. De facto, seria aberta então uma nova frente de investimento científico baseada na interligação entre os conceitos de otimização estrutural e bio-inspiração, viabilizada pelas oportunidades criadas pela impressão 3D.

No presente trabalho apresentam-se estudos de implementação de uma nova metodologia de produção de elementos em argamassa cimentícia com recurso a técnica de impressão 3D, sendo dada especial ênfase a aspetos relacionados com a técnica de deposição do material para permitir liberdade geométrica e possibilidade de combinação de vários tipos de materiais/misturas. Com base nas ideias que acabam de ser expostas, foi despoletada uma iniciativa conjunta entre os Departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, com o objetivo de avaliar a viabilidade de produção de estruturas de betão por métodos de impressão 3D através de um protótipo de impressora. Demonstra-se a viabilidade do protótipo, através da execução de experiências piloto que visam a criação de modelos em argamassa cimentícia, acompanhados da respetiva caracterização mecânica.

Palavras-Chave: Impressão 3D; Processo aditivo; Deposição; Protótipo; Experiências piloto

ABSTRACT

3D printing consists in using electro-mechanical systems to create real objects with basis on computer models designed through CAD (Computer-Aided Design) and CAM (Computer-Aided Manufacturing) technologies. These technologies are widely used for Fast Prototyping in Mechanical Engineering, and they were devised to respond to the need of low-cost solutions for fast creation parts. By adapting the technology to produce pieces in reinforced concrete (or plain concrete), some of the paradigms usually associated to structural design may disappear. In fact, the freedom of shapes that already exists in concrete members gains a whole new meaning with 3D printing. Concomitantly, the possibility to distribute material unevenly along a concrete member brings a new set of optimization challenges. We can see that the two paradigm changes mentioned (freedom of shape and possibility of uneven material distribution) allow the structural conception to increasingly follow bio-inspiration lines, as the capacities of nature's structures to optimize shapes and induce non-uniform distribution of mechanical properties (stiffness and strength) are widely documented. In fact, a new scientific development field would be opened by interconnecting the concepts of structural optimization and bio-inspiration, made viable by the opportunities created by 3D printing.

In this work, the implementation studies of a new methodology for the production of elements in cement mortar using the 3D printing technique are presented. Special emphasis is given to the material deposition to allow geometric freedom and the possibility of combination of various types of materials/mixtures. Based on the ideas exposed above, a joint initiative was started between the Departments of Civil and Mechanical Engineering of the University of Minho, with the purpose of evaluating the viability of production of concrete structures using 3D printing methods through a prototype printer. The viability of such prototype is shown, through the execution of pilot specimens in cement mortar, accompanied by the respective mechanical characterization.

Key-words: 3D Printing; Additive Process; Deposition; Prototype; Pilot Experiments

ÍNDICE

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XV
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e objetivos da dissertação	1
1.2 Estrutura da dissertação	4
2 Estado da arte: visão integradora.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Impressão 3D e sua aplicação à construção civil.....	7
2.2.1 Definição e métodos de impressão 3D	7
2.2.2 Aplicações no contexto da construção civil	10
2.3 Bio-inspiração	22
2.3.1 Conceito.....	22
2.3.2 Princípios provenientes da natureza potencialmente aplicáveis à Engenharia de Estruturas.....	23
2.4 Otimização estrutural	28
2.4.1 Breve resenha histórica.....	28
2.4.2 Técnicas de otimização.....	29

2.4.3	Possibilidades de otimização estrutural na Engenharia Civil	34
2.5	Conservadorismo e paradigmas na Indústria da Construção Civil.....	39
3	Impressão 3D de argamassas de cimento: metodologia e protótipo	43
3.1	Concetualização geral.....	43
3.2	Idealização da metodologia proposta	44
3.2.1	Conceitos do betão projetado e do betão compactado com cilindros	44
3.2.2	Idealização geral da metodologia proposta	47
3.3	Protótipo: impressora 3D a escala reduzida	51
3.3.1	Visão geral do protótipo.....	51
3.3.2	Sistema de suporte e posicionamento	53
3.3.3	Controlo numérico computadorizado	58
3.3.4	Dispensador de material seco (cimento e areia).....	60
3.3.5	Injetor de água.....	65
3.3.6	Aplicação para comando	69
3.3.7	Procedimento	71
4	Experiências Preliminares	75
4.1	Introdução.....	75
4.2	Materiais.....	75
4.3	Análise das características do equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas de cimento	77
4.3.1	Dispensador de material seco (cimento e areia).....	77
4.3.2	Injetor de água.....	80
4.4	Programa experimental: produção de provetes	85
4.4.1	Ensaio e procedimentos	85
4.4.2	Análise e discussão dos resultados.....	86

5	Conclusões.....	91
5.1	Conclusões gerais	91
5.2	Desenvolvimentos futuros	93
6	Referências bibliográficas.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de relacionamento dos temas patentes na dissertação	3
Figura 2.1 – Esquema sistema CNC (Madison, 1996)	8
Figura 2.2 – Processo de impressão 3D aditivo (Kelly and Hood-Daniel, 2011)	9
Figura 2.3 – Métodos de impressão 3D aditiva: a) SLS; b) FDM (Evans, 2012).	10
Figura 2.4 – Faseamento da técnica “Contour crafting”: a) Fase 1 - criação limites exteriores; e b) Fase 2 - preenchimento do elemento (Khoshnevis, 2004).....	11
Figura 2.5 – “Contour crafting”: componentes da cabeça de deposição (Khoshnevis, 2004) .	12
Figura 2.6 – “Contour crafting”: detalhe da cabeça de deposição (Khoshnevis, 2004).....	12
Figura 2.7 – “Contour crafting” colocação de armadura: a) colocação de armadura; b) resultado final após colocação da armadura (Khoshnevis, 2004).....	13
Figura 2.8 – “Contour crafting” exemplos de objetos criados em laboratório: a) pequena escala; b) média escala (Khoshnevis, 2004)	13
Figura 2.9 – Procedimento de produção D-Shape (Dini, 2009)	15
Figura 2.10 – Peças concebidas através da técnica D-Shape (Dini, 2009).....	16
Figura 2.11 – Técnica “Freeform building”: a) vista geral do equipamento em produção; b) detalhe de extrusão do material em estado fresco (S. Lim, 2012).....	17
Figura 2.12 – Peças construídas a partir da técnica “Freeform building”: a) banco; b) laje (S. Lim, 2012)	19
Figura 2.13 – “Freeform building” - Vazios existentes entre filamentos (Le et al., 2012)	19
Figura 2.14 – Procedimento proposto (Pegna, 1997)	20
Figura 2.15 – Descentralização do ponto de irradiação de material em função do posicionamento dos ramos gerados de momentos fletores (Mattheck, 1998).....	24
Figura 2.16 – Comportamento das árvores face às solicitações a que se encontram expostas, p.ex. ação dos animais e do vento (Mattheck, 1998).....	24
Figura 2.17 – Estudo da ação da tensão de tração numa ligação: a) modelo analisado; b) gráfico da tensão local na zona de ligação (Mattheck, 1998).....	25

Figura 2.18 – Solicitações tipo a) num osso longo que assume funções de suporte e de condicionamento mecânico; b) num osso curto que assume funções de suporte; c) num osso plano quando exerce a função de proteção	26
Figura 2.19 – Trajetórias de tensões no fémur humano (Wolf, 1986).....	27
Figura 2.20 – Trajetórias de tensões nos ossos do pé humano (Wolf, 1986).....	27
Figura 2.21 – Corte frontal no fémur humano (Parker, 1988)	28
Figura 2.22 – Problema exemplo	31
Figura 2.23 – Métodos de otimização: a) Paramétrico; b) Forma; c) Topológico (Haftka, 1995)	31
Figura 2.24 – Exemplo de otimização da forma (Ding, 1986)	32
Figura 2.25 – Procedimento otimização da forma (Ding, 1986)	33
Figura 2.26 – Procedimento da otimização topológica (Haftka, 1995)	34
Figura 2.27 – Exemplo otimização topológica (Haftka, 1995).....	34
Figura 2.28 – Viga-parede: a) descrição do modelo; b) otimização obtida (Querin, 1997)	35
Figura 2.29 – Viga encastrada: a) descrição do modelo; b) otimização obtida (Querin, 1997)	36
Figura 2.30 – Processo iterativo de otimização: viga simplesmente apoiada (Sondergaard, 2009)	36
Figura 2.31 – Viga otimizada construída a escala reduzida (Sondergaard, 2009).....	37
Figura 2.32 – Viga clássica otimizada através do programa FEMAP [®]	37
Figura 2.33 – Ponte otimizada através do programa FEMAP [®]	38
Figura 2.34 – Repartição do tempo e tarefas na construção civil (Mateus, 2004).....	39
Figura 3.1 – Esquema funcional do sistema de via seca para a projeção de betão (ACI, 1995)	45
Figura 3.2 – Esquema genérico do sistema de via húmida para a projeção de betão (ACI, 1995)	45
Figura 3.3 – Aplicação betão compactado por cilindros (BCC) numa barragem (Ribeiro, 2004)	46
Figura 3.4 – Injetor: modelo concetual	48
Figura 3.5 – Processo de produção: vista em planta	48

Figura 3.6 – Processo de produção: corte AA' (Figura 3.5) após compactação	49
Figura 3.7 – Aplicação de armaduras (em planos horizontais) e fibras (macrofibras transversais por injeção)	50
Figura 3.8 – Representação esquemática dos elementos constituintes do equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas de cimento	51
Figura 3.9 – Foto protótipo: a) vista de frente; b) vista de trás	52
Figura 3.10 – Representação esquemática das componentes dos sistemas de suporte e posicionamento	53
Figura 3.11 – Modelo motor de passo utilizado no protótipo: PM55L-048-HPA7 (NMB, 2010)	54
Figura 3.12 – Esquema representativo do funcionamento do processo de movimentação dos elementos sobre os eixos	55
Figura 3.13 – Fotografia da junta de ligação varão roscado/motor flexível.....	55
Figura 3.14 – Sistemas de suporte e posicionamento concebidos.....	56
Figura 3.15 – Representação esquemática do processo de funcionamento do controlo numérico desenvolvido.....	58
Figura 3.16 – Fotografia do controlo numérico desenvolvido	60
Figura 3.17 – Dispensador de material seco: idealização com base no betão projetado por via seca	61
Figura 3.18 – Central de betão: destaque para o transporte dos componentes através do parafuso de Arquimedes (Sousa Coutinho, 1966)	62
Figura 3.19 – Dispensador protótipo de material seco: a) vista geral; b) parafuso de Arquimedes utilizado.....	63
Figura 3.20 – Dispensador material seco construído para o equipamento protótipo de impressão 3D	64
Figura 3.21 – Sistema que permite controlo automático do dispensador: a) esquema; b) foto - vista de frente; c) foto - vista de trás.....	65
Figura 3.22 – Sistema injeção de água: baseado no betão projetado por via seca	66
Figura 3.23 – Sistema injeção de água: pistola de projeção	67

Figura 3.24 – Sistema que permite controlo automático do injetor de água: a) esquema; b) foto-vista de frente; c) foto-vista de trás	68
Figura 3.25 – Janela de comandos disponibilizada pelo programa de comando	69
Figura 3.26 – Procedimento de ligação: a) placas de controlo dos motores; b) fonte de alimentação	71
Figura 3.27 – Procedimento de aplicação do método de produção concebido	74
Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia utilizada	76
Figura 4.2 – Deposição de uma camada de mistura seca sobre peça de apoio	78
Figura 4.3 – Largura de espalhamento da mistura depositada	79
Figura 4.4 – Elemento constituído por favos quer permite a análise da dispersão da água.....	82
Figura 4.5 – Numeração dos favos.....	83
Figura 4.6 – Análise da dispersão do injetor de água: a) análise numérica; b) análise gráfica	84
Figura 4.7 – Resultados provetes P1, P2 e P3 (compactação 25 kg – ensaio segundo plano perpendicular aos planos de deposição).....	87
Figura 4.8 – Resultados provetes P4, P5 e P6 (compactação 50 kg – ensaio segundo plano perpendicular aos planos de deposição).....	87
Figura 4.9 – Resultados provetes P7, P8 e P9 (compactação 50 kg – ensaio segundo plano paralelo aos planos de deposição).	88
Figura 4.10 – Resultados médios: massa volúmica e resistência à compressão	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição da mistura utilizada pela técnica “Freeform building” (Le et al., 2012).....	18
Tabela 2.2 – Síntese dos métodos de impressão 3D aditiva existentes (S. Lim, 2012)	21
Tabela 3.1 – Material utilizado para a construção do sistema de posicionamento.....	56
Tabela 3.2 – Material utilizado para a construção do sistema de suporte	57
Tabela 4.1 – Composição química e propriedades físicas do cimento utilizado.....	76
Tabela 4.2 – Análise comportamento dispensador material seco.....	78
Tabela 4.3 – Análise do comportamento do injetor de água	81
Tabela 4.4 – Análise da dispersão do injetor de água	83
Tabela 4.5 – Resumo das massas volúmicas e valores da resistência à compressão dos provetes P1 a P12.....	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e objetivos da dissertação

Durante o século XX, o uso da tecnologia informática e da automação revolucionaram variados aspetos da vida humana, especialmente ao nível da produção industrial. Contudo, no sector da construção, verificou-se que o uso da tecnologia de automação teve um progresso lento, sobretudo devido aos seguintes condicionalismos: i) conservadorismo e resistência à inovação por parte dos intervenientes no setor; ii) necessidade de colocação de equipamentos sensíveis *in-situ*; iii) escala a que indústria de construção trabalha; iv) custos de desenvolvimento e de implementação elevados, envolvendo risco de investimento (Mateus, 2004).

Um dos processos industriais referidos no anterior parágrafo é a impressão 3D, que consiste num meio mecânico capaz de reproduzir objetos reais a partir modelos concebidos em CAD (Computer Aided Design). Esta tecnologia é largamente utilizada no ramo da Engenharia Mecânica, pois surgiu a necessidade de criação de peças, a custo reduzido, para a reparação de equipamentos, cujo fabrico ocorre em série (Madison, 1996). No setor da construção, a pré-fabricação constitui a área que mais recorre a processos de automação. No entanto, esta automação é pouco eficiente em termos de custos, particularmente quando se pretende customizar o produto a níveis que ultrapassam a tecnologia disponível (p.ex. alterações de geometria que não possam ser garantidas pelos moldes disponíveis). A possível implementação da impressão 3D nesta área da construção, poderá representar vantagens bastante significativas.

Os métodos existentes de impressão 3D podem agrupar-se em dois grandes grupos: i) consideração de um bloco sólido que através de processos de desgaste vai sendo sucessivamente esculpido até se alcançar a forma pretendida, designado por processo de subtração; ii) criação do objeto através de impressão de sucessivas camadas de material, designado por processo aditivo.

No contexto da Engenharia Civil, existem já algumas propostas de metodologias de impressão 3D para a produção de estruturas ou elementos estruturais. Do autor Behrokn Khoshnevis surgiu o projeto “Contour crafting” (Khoshnevis, 2004), que consiste numa técnica de impressão 3D processada através da extrusão de argamassa cimentícia por sucessivas camadas, de forma a criar a superfície de contorno que contempla a estrutura que se pretende obter. Na prática, esta é uma metodologia de impressão 3D de cofragens para betão a colocar *in-situ*. É também destacado o projeto “Freeform building” (S. Lim, 2012), do projetista Richard Buswell, cujo método de impressão é semelhante ao Contour crafting, diferindo deste na medida em que transcende a mera execução dos contornos, e permite o preenchimento interior do elemento a imprimir. Do autor Enrico Dini pode-se referenciar o projeto “D-Shape” (Contu, 2010), que apresenta um funcionamento distinto, em que, para uma determinada camada de impressão, é inicialmente depositado um material constituído por uma mistura granular de agregados, fibras e óxidos metálicos e, na segunda fase, através de injetores, procede-se à aplicação de resinas epóxi que aglomeram o referido material depositado nos pontos da camada, que ao nível global da estrutura a irão constituir.

Apesar das inovações trazidas pelas metodologias de impressão 3D mencionadas, nenhum dos autores em questão persegue as possibilidades dadas pela tecnologia de impressão 3D, no que diz respeito à integração de abordagens com geometria e distribuição de material arbitrária, o que seria algo de verdadeiramente inovador.

De facto, a liberdade de forma proporcionada pela tecnologia de impressão 3D, viabiliza a evolução do dimensionamento com base na otimização estrutural, particularmente por permitir geometria arbitrária, o que nem sempre é conseguido com estruturas betonadas *in-situ* (problemas com cofragens e exequibilidade de processos construtivos). No entanto, talvez mais importante do que a geometria arbitrária poderá ser a possibilidade de distribuição diferenciada do material estrutural, permitindo que a otimização estrutural atinja níveis não explorados até ao presente, o que constituiria uma verdadeira alteração de paradigmas de dimensionamento estrutural. Como inspiração para estes novos paradigmas de dimensionamento pode-se recorrer aos conhecimentos de biomimetismo estrutural, dado que a otimização de forma e distribuição de material é já algo bem documentado na natureza, mas não tentado na construção civil. Deste modo seria aberta então uma nova frente de desenvolvimento técnico-científico baseada na interligação entre os conceitos de otimização

estrutural e bio-inspiração, viabilizada pelas oportunidades criadas pela impressão 3D, culminando no trinómio sinérgico representado esquematicamente na Figura 1.1.

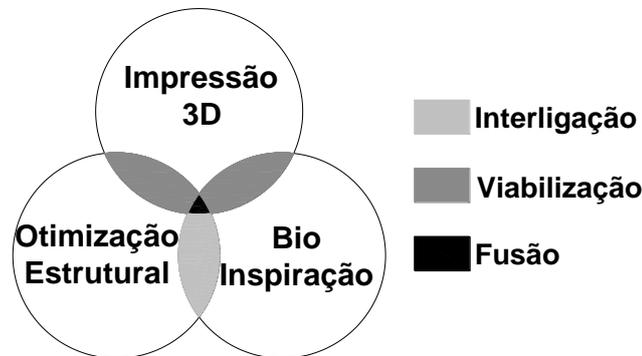


Figura 1.1 – Esquema de relacionamento dos temas patentes na dissertação

Como referências bibliográficas no estudo e implementação de princípios estruturais naturais no seio da Engenharia Civil, pode-se salientar os avanços alcançados pelo autor Petra Gruber (2011), no livro intitulado *Biomimética em Arquitetura: Arquitetura da Vida e Edifícios*. A autora Neri Oxman (2010b), que tem vindo nos últimos anos a apresentar um conjunto de estudos onde se observa a integração de conceitos e metodologias biológicas na concetualização de um novo conjunto de formas estruturas, com o intuito de obter uma maximização do material utilizado, assim como, mais a um nível arquitetónico poder inculcar liberdade no que concerne ao desenho estrutural. Claus Mattheck (1998) apresenta um conjunto de estudos sobre o modo como árvores adornam os ramos, tendo efetuado importantes descobertas nos mecanismos biológicos que este tipo de elemento possuiu para conferir adequado desempenho estrutural.

Com base nas ideias que acabam de ser expostas, foi recentemente despoletada uma iniciativa conjunta entre os Departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, com o objetivo de avaliar a viabilidade de produção de estruturas de betão por métodos de impressão 3D. Na fase inicial do desenvolvimento, foi desenvolvido um protótipo em laboratório para impressão de provetes em argamassa, demonstrando a viabilidade do conceito. Neste trabalho será efetuada uma descrição sumária do referido protótipo de impressão 3D, procurando evidenciar os pontos críticos de adaptação necessários para integração no setor da construção da nova metodologia de produção.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo o primeiro dos quais constituídos pela presente introdução. O capítulo seguinte, dedicado ao estado de arte e visão integradora (Capítulo 2) é iniciado com uma revisão bibliográfica sobre os vários métodos existentes de impressão 3D de elementos estruturais utilizando materiais correntes no seio da indústria da construção civil. Outro tema em pesquisa, resultante das vantagens que a impressão 3D representa na construção civil, diz respeito a metodologias e formas estruturais presentes na natureza. Ainda no segundo capítulo da dissertação são apresentados de forma simples os princípios subjacentes à otimização estrutural. Salienta-se que a otimização da distribuição de rigidez do material no seio duma estrutura é atualmente uma via de otimização inexistente na medida em que as metodologias tradicionais de construção limitam tal possibilidade (que no entanto é relativamente simples com recurso à impressão 3D). No final do capítulo, é feita uma discussão crítica em torno do estado de desenvolvimento das técnicas e métodos de construção atuais, e as possibilidades que a integração dos temas em estudo poderá trazer em termos de inovações futuras, que para além da indústria da própria construção, poderão alcançar os métodos de dimensionamento estrutural.

No terceiro capítulo é apresentado em detalhe o desenvolvimento da metodologia e protótipo de impressão 3D em argamassas de cimento efetuado no âmbito deste trabalho. Relativamente à metodologia a propor, dar-se-á ênfase aos aspetos diferenciadores relativamente aos sistemas existentes. Por sua vez, na descrição do equipamento protótipo será dada especial atenção; i) aos mecanismos que procedem ao posicionamento do sistema de deposição; ii) ao sistema de deposição de argamassa de cimento; e iii) e ao software e equipamento de controlo.

No Capítulo 4 é reportado um conjunto de experiências preliminares que visam a análise e a avaliação da metodologia e do equipamento protótipo apresentados no capítulo anterior. Na parte inicial são descritos os materiais utilizados, bem como os provetes a produzir. Posteriormente são apresentados e comentados todos os resultados provenientes de uma série de estudos incidentes sobre as capacidades do equipamento, nomeadamente ao nível do sistema dispensador de material seco e injetor de água. Por fim são apresentados e analisados todos os resultados dos vários provetes produzidos (massa volúmica e resistência à compressão).

Finalmente, no Capítulo 5 é apresentada uma síntese do trabalho realizado, salientando-se as conclusões mais importantes. São também sugeridos desenvolvimentos futuros em relação aos trabalhos desenvolvidos no contexto da presente dissertação.

2 ESTADO DA ARTE: VISÃO INTEGRADORA

2.1 Introdução

O presente capítulo refere-se à revisão bibliográfica e análise crítica do estado atual do conhecimento em relação aos três pontos principais de convergência já identificados na introdução deste documento: a impressão 3D; a bio-inspiração na conceção estrutural; e a otimização estrutural no contexto da Engenharia Civil. No final do capítulo e após a revisão bibliográfica dos temas em análise serão discutidos alguns paradigmas existentes na indústria da construção que têm constituído entraves à introdução de novas técnicas e metodologias no correspondente mercado.

2.2 Impressão 3D e sua aplicação à construção civil

Na presente secção, apresenta-se inicialmente os conceitos inerentes à tecnologia de impressão 3D com especial ênfase para as principais aplicações e métodos de produção. Seguidamente apresenta-se uma descrição geral das estratégias já implementadas e idealizadas para aplicação de técnicas de impressão 3D à construção civil.

2.2.1 Definição e métodos de impressão 3D

Impressão 3D consiste num processo de produção de objetos tridimensionais sólidos a partir de modelos digitais (Roebuck, 2011). Na origem do processo de impressão 3D encontra-se o método subtrativo que consiste na criação do objeto pretendido através da remoção de material, por perfuração ou por corte, de uma peça base cujos limites físicos são envolventes do objeto que se pretende obter. O método subtrativo não permite a obtenção de determinados tipos de modelos digitais (p.ex. não é capaz de criar uma esfera oca). Em meados dos anos 80 surgiu o método aditivo, que permite a produção de objetos através do estabelecimento de sucessivas camadas (Kelly and Hood-Daniel, 2011).

Independentemente do processo de construção do objeto ser aditivo ou subtrativo, uma das peças fundamentais para o funcionamento é o sistema que permitem o controlo automatizado de todo o procedimento de fabricação e o posicionamento de todo o equipamento: a tecnologia de Controlo Numérico Computorizado (CNC).

A técnica CNC traduz-se num processo assistido por computador para o controle de uma determinada máquina. A tecnologia CNC interpreta a informação fornecida pelo utilizador através da unidade do computador convertendo-a em sinais elétricos que permitem a operação de mecanismos servomotores em cada eixo da máquina que deste modo providencia a movimentação controlada pretendida (Madison, 1996). Na Figura 1.1 está representado o esquema dum sistema CNC. Associadas ao sistema CNC para produção de objetos, existem funções secundárias para a produção de objetos para ativação/desativação de sistemas que podem ser de corte ou de perfuração no caso dos processos subtrativos ou de deposição no caso dos processos aditivos (Madison, 1996). Dada a evolução ao nível da robótica e dos materiais, a tecnologia CNC passou a ser também aplicada para outras finalidades, nomeadamente na medicina, desenho industrial e engenharia (Valentino and Goldenberg, 1993).

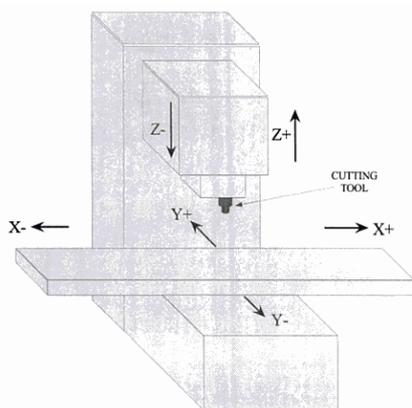


Figura 2.1 – Esquema sistema CNC (Madison, 1996)

No que diz respeito aos processos de impressão 3D já distinguidos - o aditivo e o subtrativo - e tendo em conta que a presente dissertação se debruça sobre um processo de impressão 3D aditivo, limita-se a descrição detalhada a este tipo de processo, uma vez que, o método subtrativo não permite uma total liberdade de forma por parte dos elementos a produzir, limita-se a descrição detalhada a este tipo de processo. A produção aditiva apresenta o seguinte princípio de funcionamento, (Kelly and Hood-Daniel, 2011):

1. Uso de aplicação informática capaz de transformar projetos virtuais em camadas transversais horizontais sucessivas, totalizando a globalidade do objeto a produzir;
2. Capacidade do equipamento de produção em ler os dados provenientes da aplicação informática e proceder à execução do procedimento que passa, numa primeira fase por deposição de uma camada de pó (tipo folha) ou liquido e numa segunda fase por injeção de um material ligante nos pontos que definem o objeto, repetindo-se este processo camada por camada até o objeto se encontrar finalizado. Na Figura 2.2 pode-se observar um esquema que melhor traduz o faseamento descrito;
3. No final remove-se o material em excesso, ou seja, o material que não constitui o objeto. Contudo este material dispensado, que pode ser reutilizado, desempenha um papel fundamental na medida em que providencia suporte ao material que será parte integrante do objeto.

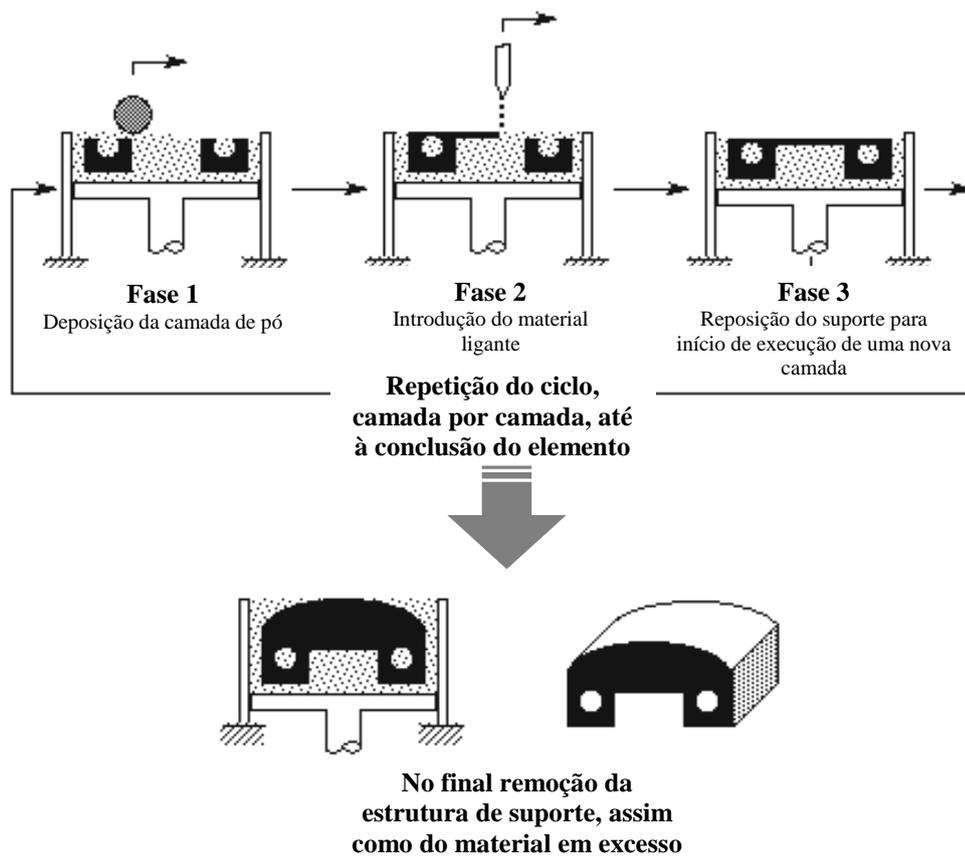


Figura 2.2 – Processo de impressão 3D aditivo (Kelly and Hood-Daniel, 2011)

O processo de impressão 3D aditivo compreende um conjunto de métodos que se distinguem na forma como as camadas são construídas para criar peças e os materiais utilizados. Alguns métodos utilizam fusão ou amolecimento de material para a produção das camadas, como por

exemplo a sinterização seletiva por laser (SLS) - ver Figura 2.3 a) - e a modelagem por fusão e deposição (FDM), representada na Figura 2.3 b) (Evans, 2012).

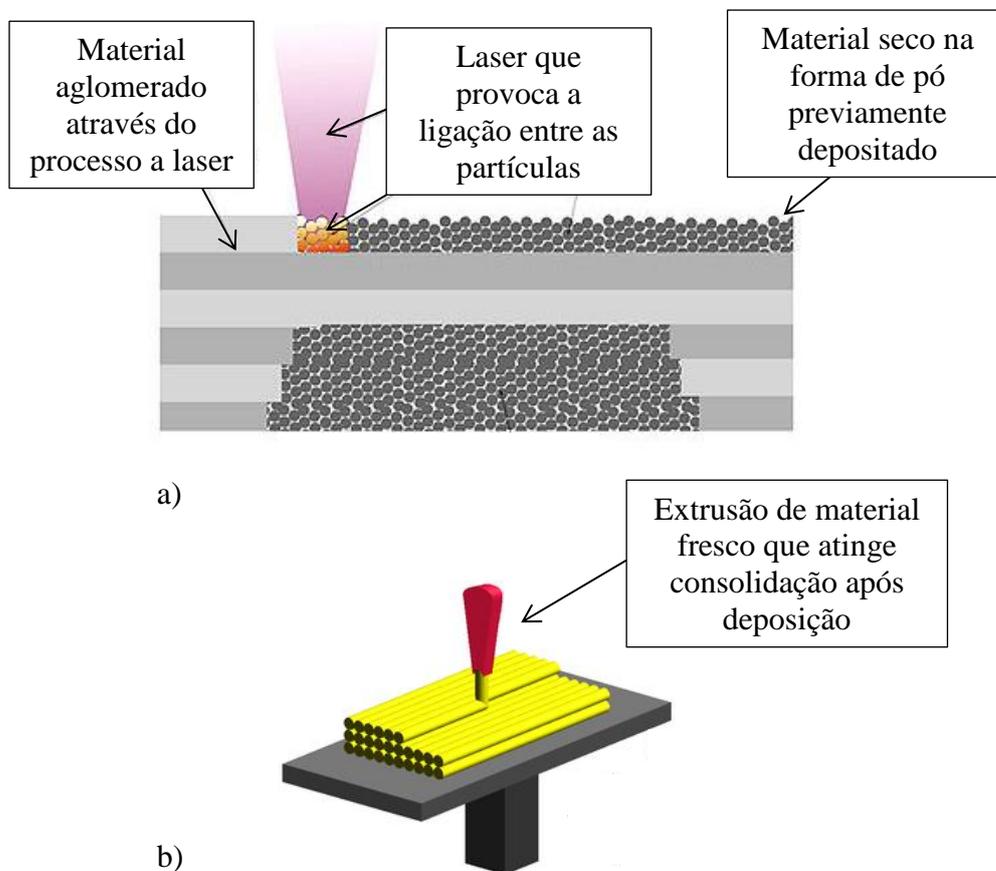


Figura 2.3 – Métodos de impressão 3D aditiva: a) SLS; b) FDM (Evans, 2012).

Desde o início da década de 1980 que a impressão 3D aditiva tem sido amplamente utilizada na prototipagem e fabrico rápido de elementos ao nível industrial. Os materiais utilizados são sobretudo o alumínio, o plástico, os cerâmicos, o aço, a prata e o vidro (Evans, 2012). Atualmente, com o aparecimento de sistemas comerciais de impressão 3D, já várias empresas permitem ao utilizador doméstico imprimir os seus objetos, ou encomendar a preços relativamente reduzidos a produção de objetos a partir de representações 3D em CAD (exemplo: www.shapeways.com).

2.2.2 Aplicações no contexto da construção civil

Na revisão bibliográfica efetuada foram encontradas três estratégias principais validadas para aplicação da impressão 3D ao mercado da construção civil. Apresenta-se de seguida uma descrição das mesmas, englobando a sua origem, definição, procedimento proposto, tipologia

de materiais e as respetivas propriedades mecânicas, exemplos de objetos produzidos por cada uma das estratégias e as limitações que lhes são inerentes face ao objetivo que se pretende alcançar na presente dissertação.

Contour crafting

A técnica denominada por “Contour crafting” encontra-se em desenvolvimento desde 1990, impulsionada pelos estudos do autor Behrokn Khoshnevis, tendo como objetivo a conceção de ferramentas inteligentes que possam conduzir de forma automática os trabalhos na área da construção atualmente realizados pelos seres humanos (Khoshnevis, 2004).

“Contour crafting” consiste numa técnica de fabrico por camadas, controlada por computador, para a criação de objetivos de diversas dimensões, cujas superfícies lisas podem ter geometria arbitrária em planta. O processo de produção utilizado por esta técnica implica a combinação de dois processos: numa primeira fase faz-se a extrusão de argamassa cimentícia para a criação da geometria exterior do elemento e no final da criação dos contornos exteriores, efetua-se o preenchimento do interior com uma argamassa de maior resistência – ver fotografias exemplificativas na Figura 2.4 (Khoshnevis, 2004). Importa salientar que relativamente aos componentes utilizados na argamassa os autores envolvidos no projeto não apresentam os detalhes da composição.



Figura 2.4 – Faseamento da técnica “Contour crafting”: a) Fase 1 - criação limites exteriores; e b) Fase 2 - preenchimento do elemento (Khoshnevis, 2004)

As principais vantagens desta técnica estão relacionadas com a boa qualidade das superfícies realizadas e com a velocidade de fabricação. A característica chave para as vantagens apresentadas reside na cabeça de deposição, representada na Figura 2.5, que apresenta um conjunto de espátulas dispostas perpendicularmente entre si e na forma de “L” invertido que

fazem com que a pasta em estado fresco seja extrudada de forma a tornar as superfícies lisas e precisas - ver Figura 2.6 (Khoshnevis, 2004).

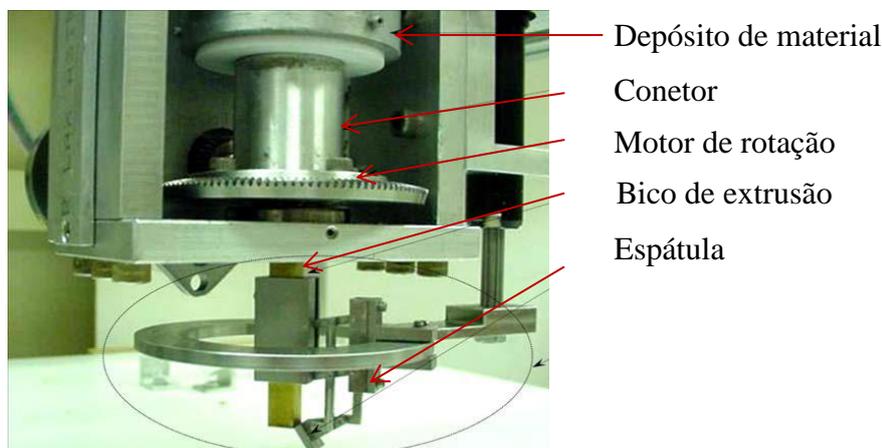


Figura 2.5 – “Contour crafting”: componentes da cabeça de deposição (Khoshnevis, 2004)

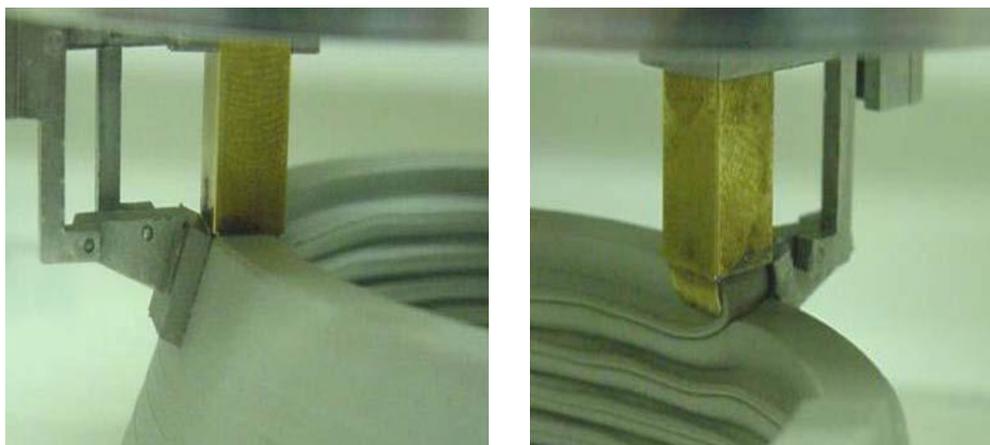


Figura 2.6 – “Contour crafting”: detalhe da cabeça de deposição (Khoshnevis, 2004)

A técnica encontra-se focalizada para a conjugação, num processo único, de vários elementos construtivos: armaduras, tubagens, cablagens e até canais de serviço. Na Figura 2.7 pode-se visualizar a integração de armadura no elemento a produzir através da cabeça de deposição que agrega em si um sistema capaz de colocar este tipo de material nas zonas pretendidas. A armadura introduzida apresenta um diâmetro 2 mm e apresenta o objetivo de melhorar a aderência entre as camadas (Khoshnevis, 2004).

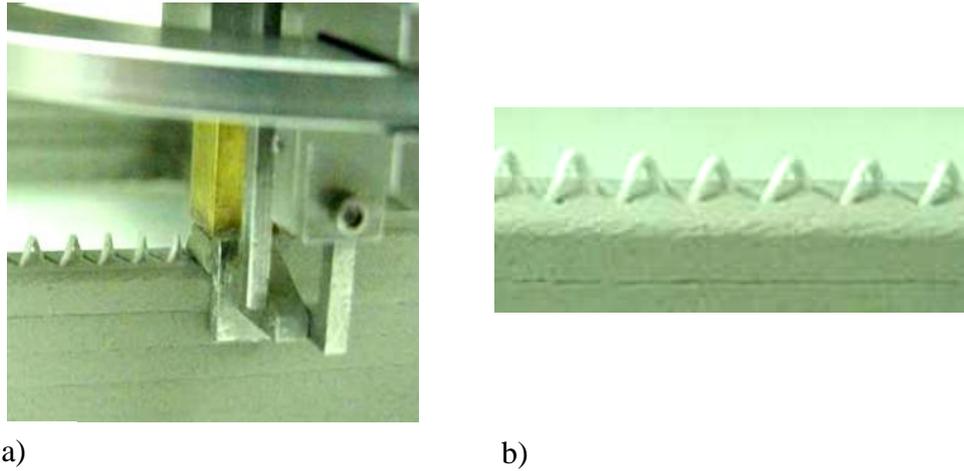


Figura 2.7 – “Contour crafting” colocação de armadura: a) colocação de armadura; b) resultado final após colocação da armadura (Khoshnevis, 2004)

Na Figura 2.8 podem-se observar três objetos criados em laboratório através do equipamento protótipo desenvolvido pelo projeto, destacando-se, na Figura 2.8 b) a dimensão significativa que já se consegue atingir nos objetos produzidos.

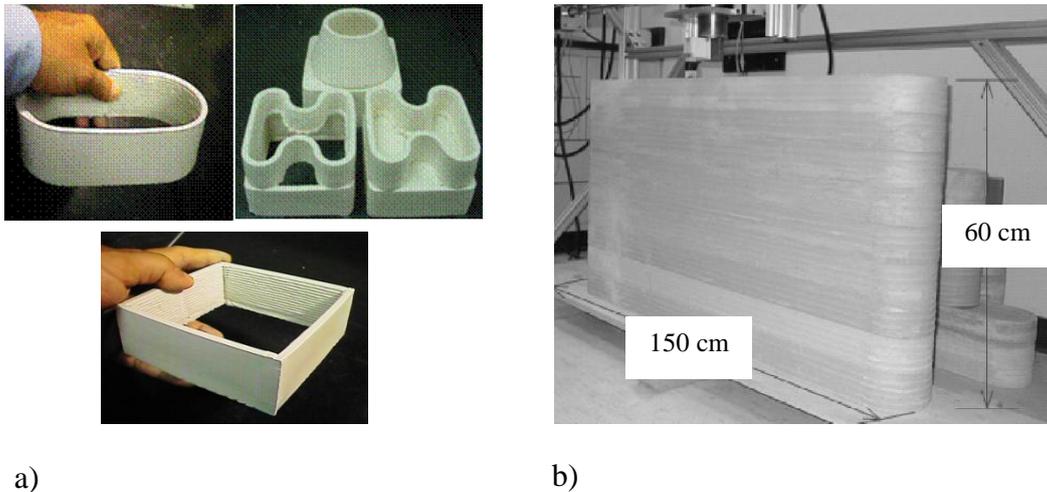


Figura 2.8 – “Contour crafting” exemplos de objetos criados em laboratório: a) pequena escala; b) média escala (Khoshnevis, 2004)

Todavia, pode-se constatar que a técnica “Contour crafting” apresenta limitações ao nível da geometria das peças que podem ser produzidas dado que a produção é feita partir de pastas/argamassas frescas, com risco de desagregação no caso de geometrias desfavoráveis. A título exemplificativo, refira-se que esta técnica não permite a impressão de peças com configuração semelhante a um funil, dada a necessidade duma nova camada de impressão se apoiar em algo pré-existente. Verificam-se também problemas na aderência entre camadas,

dados que existem na junção de material com idades distintas, não apresentando soluções de compactação e/ou vibração do próprio material que poderiam de certa forma mitigar o problema (Khoshnevis, 2004).

D-Shape

A técnica denominada por “D-Shape” encontra-se em desenvolvimento desde 2000, impulsionada pelos estudos do autor Enrico Dini, baseando-se no princípio de construção de impressão tridimensional que utiliza o sistema de adição, permitindo realizar rapidamente, de forma automática e sem a necessidade de moldes ou cofragens, estruturas de qualquer forma e tamanhos, que seriam quase impossíveis de alcançar com as técnicas de construção tradicionais (Dini, 2009).

O procedimento de produção utilizado por esta técnica pode resumir-se através dos seguintes pontos:

1. Deposição de uma camada de pó seco de forma automática e controlada criando um plano homogéneo - ver Figura 2.9 a). O material utilizado nesta primeira deposição é composto por uma mistura de agregados, fibras e óxidos metálicos;
2. Compactação da capa de material seco por via da passagem de um conjunto de rolos, assegurando a compressão das partículas - ver Figura 2.9 b);
3. Endurecimento seletivo nos pontos que constituem a peça que se pretende obter, através da injeção de aglutinante à base de resinas epóxi por via de 300 pequenos injetores instalados ao longo do equipamento - ver Figura 2.9 c);
4. Os pontos anteriores repetem-se até que o elemento a produzir esteja completo;
5. Por fim, procede-se à remoção do material não aglutinado, através de um sistema de filtros colocado na zona inferior da área de trabalho - ver Figura 2.9 d).

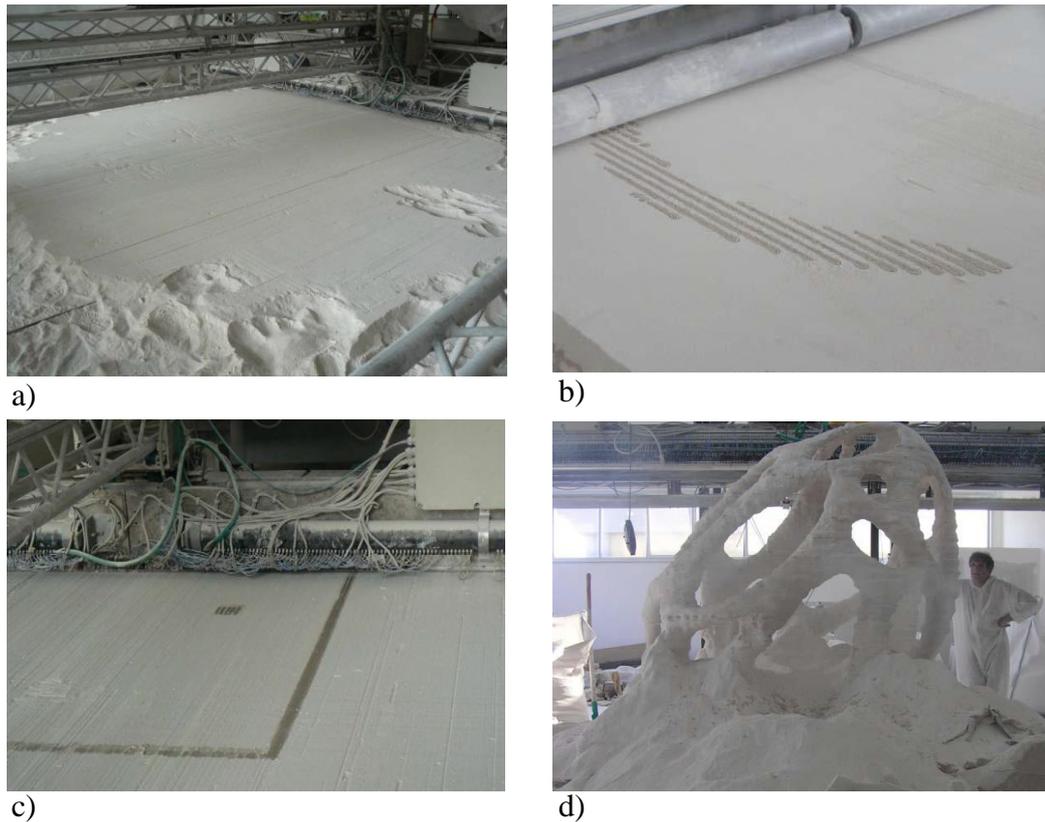


Figura 2.9 – Procedimento de produção D-Shape (Dini, 2009)

Em termos de propriedades mecânicas exibidas pelo material desenvolvido destaca-se a elevada resistência à compressão, que se aproxima dos 240 MPa (S. Lim, 2012).

Na Figura 2.10 podem-se observar três objetos criados em laboratório através do equipamento desenvolvido pelo projeto, destacando-se o facto de os objetos da Figura 2.10 b) e c), terem respetivamente 2 m e 3 m de altura.

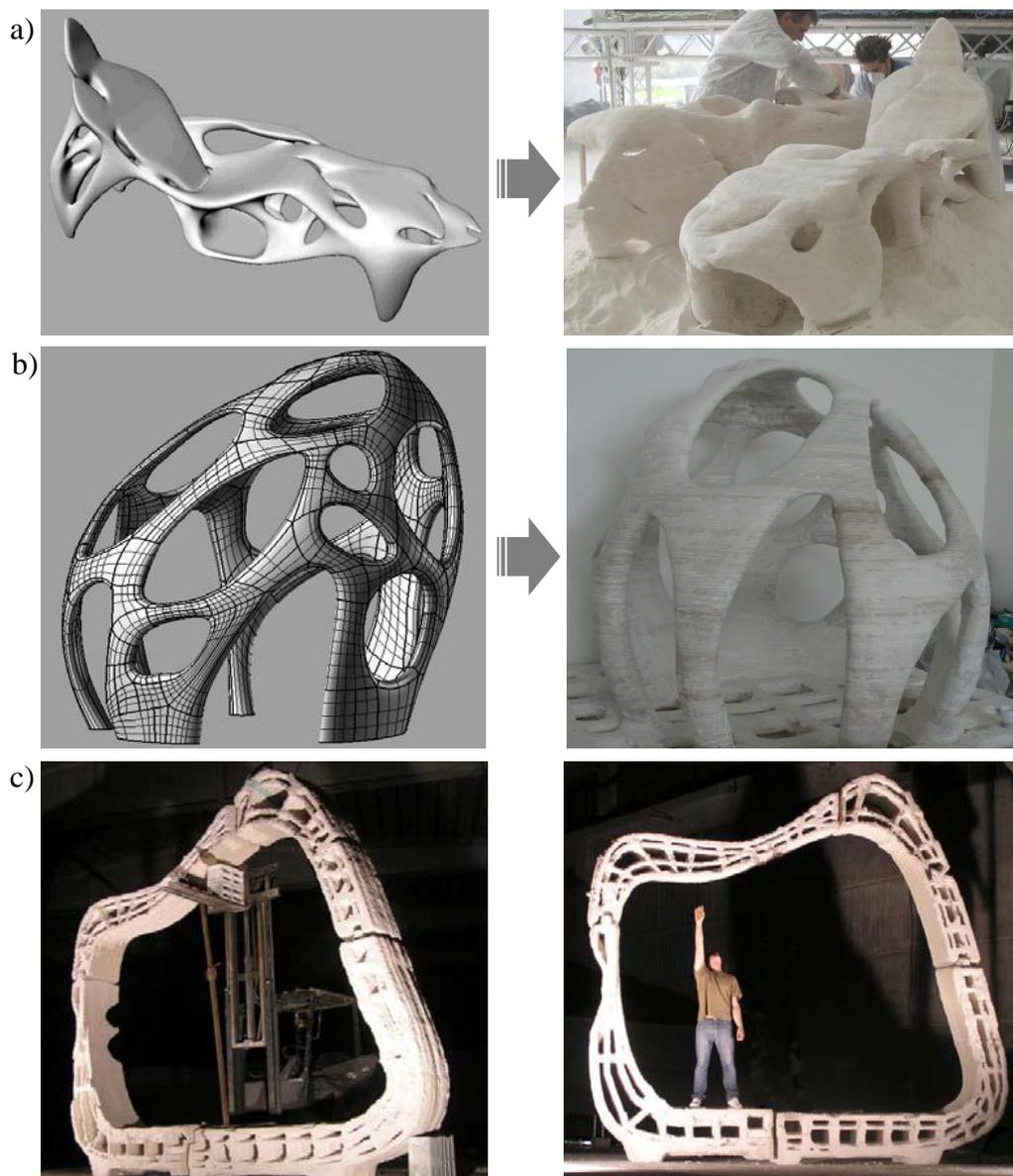


Figura 2.10 – Peças concebidas através da técnica D-Shape (Dini, 2009)

Como limitações, pode-se observar que o sistema protagonizado pela técnica “D-Shape” não abordada a possibilidade de uso de materiais cimentícios, de custo mais compatível com a realidade da construção civil. Por outro lado, os tempos de execução muito elevados, segundo o autor o equipamento protótipo alcança um rendimento de 3 cm por hora, o que para peças com cerca de 3 metros de altura equivale a quatro dias de fabrico (Contu, 2010).

Freeform building

Em desenvolvimento desde o ano 2000, a técnica denominada “Freeform building” baseia-se na extrusão de argamassa cimentícia para realização integral de peças. (R.A. Buswell, 2006).

O processo de produção utilizado por esta técnica consiste na deposição de material em estado fresco sob a forma de filamentos que apresentam seção transversal diminuta, de forma a reproduzir em detalhe o modelo pretendido. Ao contrário da técnica “Contour Crafting” que primeiro constrói os bordos exteriores e só posteriormente é que preenche o núcleo, a presente técnica, permite construir integralmente a peça através da deposição consecutiva de filamentos balizando os contornos e preenchendo de imediato (à medida que o material é deposto) o interior da respetiva peça. A operação do sistema está representada nas fotografias da Figura 2.11 (S. Lim, 2012).



a)



b)

Figura 2.11 – Técnica “Freeform building”: a) vista geral do equipamento em produção; b) detalhe de extrusão do material em estado fresco (S. Lim, 2012)

Pode-se referir que a resolução das camadas, ou seja, a espessura do filamento, é ajustável entre cerca de 6 a 9 mm, e que o filamento extrudido apresenta secção transversal oval para maximizar a interface entre as camadas (S. Lim, 2012).

Em relação ao material fresco a utilizar, a mistura otimizada resulta na composição que se encontra na Tabela 2.1 (Le et al., 2012).

Tabela 2.1 – Composição da mistura utilizada pela técnica “Freeform building” (Le et al., 2012)

Descrição	Valor
Razão areia - ligante	60:40
Razão água - ligante	0,26
Superplastificante	1%
Retardador	0,5%
Microfibras de polipropileno	1,2 kg/m ³

Face à composição apresentada na Tabela 2.1 salienta-se que o ligante é composto por 70% de cimento, 20 % de cinzas volantes e 10% de sílicas de fumo. A mistura requer ainda a utilização de superplastificante e de retardador para que esta se mantenha trabalhável durante um período de aproximadamente 100 minutos (Le et al., 2012).

Em termos de propriedades mecânicas, são obtidos resultados bastante interessantes (em termos de valores médios), com resistência à compressão superior a 100 MPa na direção perpendicular à deposição. Contudo, as propriedades mecânicas sofrem ligeiras reduções quando se analisa na direção paralela à deposição: redução entre 5 a 15% da resistência à compressão (Le et al., 2012).

Na Figura 2.12 podem-se observar dois objetos criados em laboratório através do equipamento protótipo desenvolvido pelo projeto, salientando-se o facto de a tecnologia descrita permitir a construção de peças de dimensões da ordem dos 2 a 3 metros.

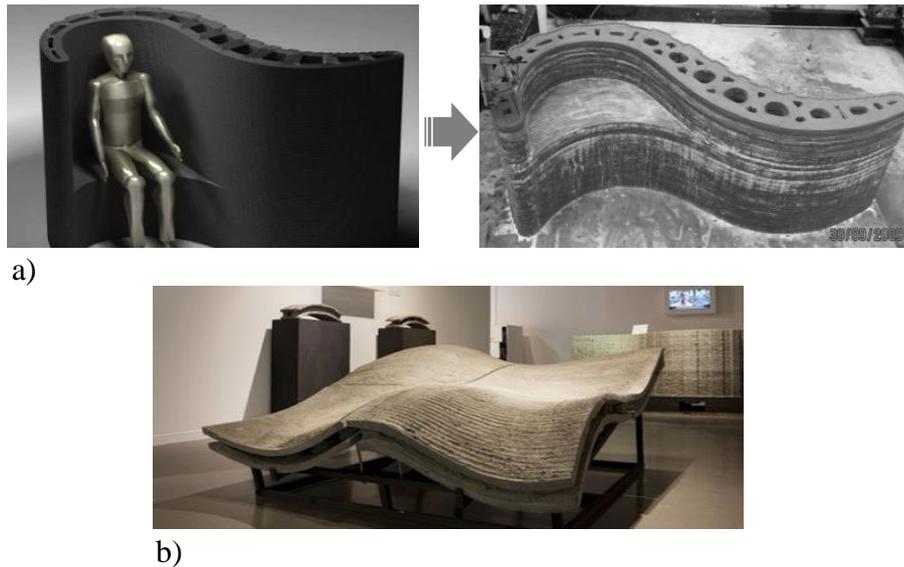


Figura 2.12 – Peças construídas a partir da técnica “Freeform building”: a) banco; b) laje (S. Lim, 2012)

Relativamente às limitações da técnica descrita, tal como no caso “Contour crafting” pode-se constatar o elevado risco de desagregação no caso de geometrias pouco convencionais, assim como o facto de necessitar de material de suporte no caso de impressão de peças com configuração semelhante a uma pirâmide invertida, sendo que para este tipo de situações a técnica “Freeform building” recorre a peças secundárias que funcionam como molde inferior para que a deposição da pasta se torne exequível (S. Lim, 2012).

Por sua vez, a técnica “Freeform building” apresenta ainda problemas de resolução o que para além da fraca coesão entre camadas, leva à existência de vazios resultando na fraca aderência entre camadas (ver Figura 2.13) (Le et al., 2012).

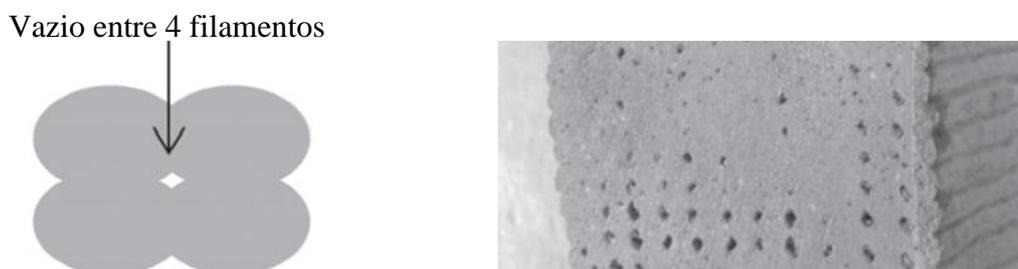


Figura 2.13 – “Freeform building” - Vazios existentes entre filamentos (Le et al., 2012)

Idealização proposta por J. Pegna

No seu trabalho publicado em 1997, J. Pegna (1997) reportou que até a essa data os processos de prototipagem apenas eram utilizados para construção de maquetes e de peças mecânicas, observando que a indústria da construção tem sido relutante à entrada de inovação, um paradoxo devido ao facto de a automação arrecadar consigo diminuição do tempo de execução, aumento do tempo de produtividade e controlo do desperdício ao nível dos materiais. J Pegna teorizou um novo processo de construção derivante do procedimento de impressão 3D aditivo, com recurso a materiais vulgarmente utilizados na indústria em questão: areia, cimento Portland e água.

O procedimento proposto pelo autor baliza-se nas seguintes fases retratadas na Figura 2.9:

1. Deposição de uma camada (de 1 mm de espessura) de areia (apresenta uma granulometria inferior a $800 \mu m$) sobre a totalidade da área de trabalho;
2. Seguidamente deposição do cimento nos pontos que constituem o elemento;
3. Por fim, aplicação de vapor sobre os materiais secos depositos. Salienta-se a aplicação de água sob a forma de vapor, pois segundo J. Pegna, caso a água se aplique de forma líquida ocorre a hidratação do cimento sem que este se ligue à areia. A razão areia/cimento cifra-se em 0,1.

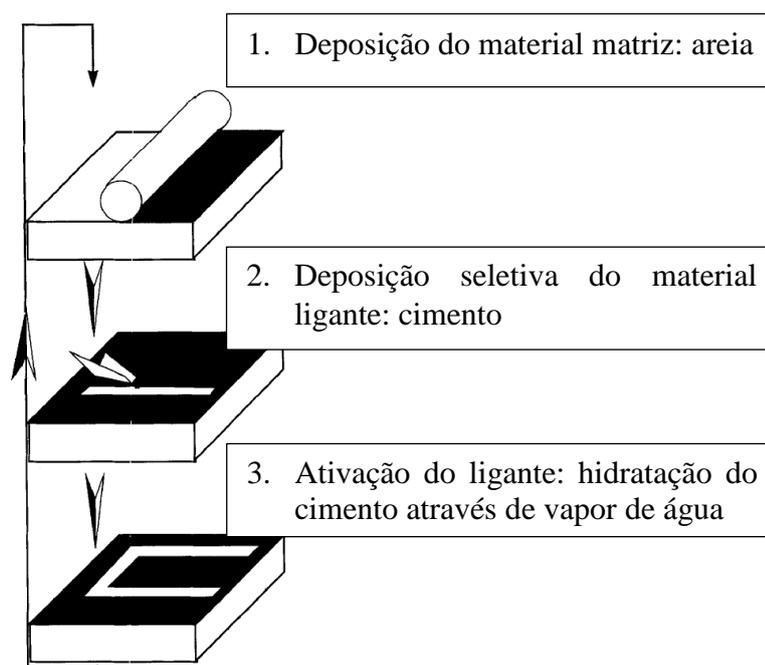


Figura 2.14 – Procedimento proposto (Pegna, 1997)

Como modo de validação do procedimento, o autor desencadeou um conjunto de experiências preliminares, executando provetes de forma manual (utilizando o procedimento idealizado). Relativamente às propriedades mecânicas da argamassa produzida, obteve valores na ordem dos 30 MPa para a resistência à compressão na direção perpendicular às camadas. Na direção paralela às camadas, observou uma diminuição da propriedade referida em cerca de 20%, mostrando a existência de anisotropia. No que diz respeito à utilização de vapor como meio de injeção de água, verificou que possibilitou uma maior homogeneização da distribuição de água sobre o material seco depositado (Pegna, 1997).

Síntese das aplicações de impressão 3D na construção civil

Na Tabela 2.2 encontram-se sintetizadas as principais propriedades e características dos vários métodos de impressão 3D aplicada à construção que acabam de ser apresentados.

Tabela 2.2 – Síntese dos métodos de impressão 3D aditiva existentes (S. Lim, 2012)

	Contour crafting	D-Shape	Freeform building	Pegna (Pegna, 1997)
Processo	Impressão 3D por extrusão	Impressão 3D por deposição material seco aglomerado por um ligante	Impressão 3D por extrusão	Impressão 3D por deposição material seco aglomerado por um ligante
Uso de molde	Sim, tornando-se parte do elemento	-	Sim	-
Material construtivo	Argamassa cimentícia	Argamassa epoxídica	Argamassa cimentícia	Areia
Ligante	Cimento	Resina epóxi	Cimento	Cimento
Diâmetro do bico de deposição	15mm	0,15mm	9-20mm	1mm
Espessura da camada	13mm	4-6mm	6-25mm	Desconhecido
Fibras (p.ex. metálicas, polipropileno).	Sim	-	Sim	-
Resistência à compressão	-	253-242 MPa	100-110 MPa	28,30 MPa

2.3 Bio-inspiração

2.3.1 Conceito

A natureza apresenta por si só princípios de sustentabilidade, sendo que os seus desafios têm vindo a ser superados ao longo de milhões de anos revelando soluções de máximo desempenho utilizando os menores recursos possíveis. Não é surpreendente portanto que as soluções da natureza tenham sido eternamente fonte de inspiração para o Homem, deixando o seu legado ao nível de materiais e estruturas eficientes, assim como os métodos, ferramentas, mecanismos e sistemas. Torna-se assim premente recorrer aos ensinamentos provenientes da natureza para se conceber estruturas e materiais, assim como técnicas e métodos para os conceber que utilizem cada vez menos matérias-primas mas que aumentem o seu rendimento (Steadman, 1979).

A sobrevivência dos elementos existentes na natureza depende intrinsecamente da capacidade da própria natureza para gerir e promover a viabilidade nas suas construções, assim como satisfazendo um conjunto de propriedades mecânicas desejadas, tais como resistência, dureza, rigidez e resistência ao impacto. Além da regeneração dos materiais e da resposta através da análise, uma das características mais exclusivas dos sistemas biológicos é a sua capacidade para diagnosticar e reparar os danos que lhe são causados. Claramente tal atributo seria desejável para todos os objetos criados pelo homem. É, no entanto, importante afirmar que os processos naturais de normal regeneração, análise e fabricação estão bem integrados, devido à escala temporal de desenvolvimento que os precedeu, contrariamente aos objetos e processos criados pelo homem cujo tempo de desenvolvimento comparativamente com o da natureza é praticamente nulo, indicando o motivo de estes ainda não conseguirem acompanhar o grau de desenvolvimento instalado na natureza (Oxman, 2010a).

Assim, compreender a relação de análise, dimensionamento e construção existente na natureza constitui um fator de desenvolvimento fundamental, uma vez que é a partir dos pressupostos aplicados nas amostras naturais que se podem especular novas abordagens para futura integração na conceção e dimensionamento ao nível das diversas engenharias, arquitetura, entre muitas outras áreas.(Oxman, 2010a). Bio-inspiração traduz-se assim, na capacidade de integração dos conceitos presentes na natureza passíveis de darem o seu contributo em prol da vivência do ser humano (Gruber, 2011).

2.3.2 Princípios provenientes da natureza potencialmente aplicáveis à Engenharia de Estruturas

O comportamento estrutural de diversos elementos presentes na natureza não pode deixar de inspirar a conceção de soluções estruturais que, reproduzindo de uma forma mais ou menos fiel as aptidões de tais elementos, abrem novos horizontes na área da Engenharia de Estruturas (Pacheco, 1998). Assim, na presente seção apresentam-se de forma sintetizada os princípios base de duas estruturas naturais, entre muitos outros exemplos que poderiam ser referidos: as estruturas das árvores e dos ossos.

Estruturas das árvores

Para além da sua beleza estética, as árvores são um dos exemplos de sistemas que foram moldados pelas forças da natureza e, como tal, representam estratégias da natureza no que diz respeito ao crescimento, geração e adaptação. A gama de cargas a que está exposta uma árvore é vasta e inclui forças de diversas magnitudes e direções (Mattheck, 1998).

Nas disciplinas de engenharia muitas vezes simplifica-se os casos atribuindo-lhes relações retiradas dos modelos de barras, com o intuito de se prever a deformação física. No entanto, as estratégias da natureza não podem ser meramente reduzidas à abstração geométrica. De facto, na natureza a distribuição dos materiais e suas orientações relativamente aos sistemas de forças atuantes desempenham um papel tão ou mais importante para a estratégia de estabilidade estrutural do que a forma do elemento em si. O estudo do comportamento estrutural duma árvore permite um bom ponto de partida para compreender estas intrincadas relações estruturais/materiais nas estruturas da natureza (Mattheck, 1998).

Ao observar um corte transversal dum tronco consegue-se determinar a localização relativa dos ramos, na medida em que o ponto de irradiação do material que constitui a árvore encontra-se descentralizado, afastando-se da zona do ramo para permitir que maior quantidade de material (madeira) no tronco resista ao momento provocado pelo ramo (Mattheck, 1998). Para melhor se perceber o que acaba de ser referido, pode-se visualizar na Figura 2.15 a seção transversal de um tronco e a Figura 2.16 onde se percebe claramente que devido à ação do ramo, a distribuição de tensões ao nível do tronco não se encontra simétrica.



Descentralização do ponto de irradiação de material, de modo a mobilizar o material para a zona de maior tensão

Figura 2.15 – Descentralização do ponto de irradiação de material em função do posicionamento dos ramos gerados de momentos fletores (Mattheck, 1998)

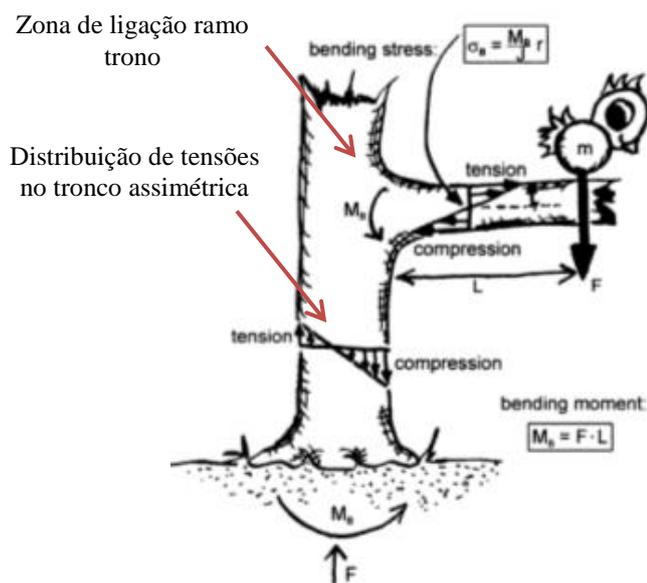


Figura 2.16 – Comportamento das árvores face às solicitações a que se encontram expostas, p.ex. ação dos animais e do vento (Mattheck, 1998)

Relativamente à Figura 2.16, podem-se ainda destacar dois aspetos em relação ao comportamento que as árvores mostram em virtude das solicitações a que se encontram expostas: face a um carregamento excêntrico ao nível de um ramo (p.ex. a ação dos animais) ou ao nível do tronco (p.ex. a ação do vento), a árvore responde através de uma compensação a partir das raízes (as suas fundações), podendo-se estabelecer um paralelismo com os elementos de fundação existentes nas obras de construção civil; outro aspeto reside no modo de ligação existente entre os ramos e o tronco, composto por contornos suaves em curva com o intuito de diminuir a seção dos próprios ramos, otimizando deste modo o material, através da redução das tensões localizadas (Mattheck, 1998).

Tendo por base a geometria curvilínea que traduz a zona de ligação ramo-tronco, Mattheck conduziu estudos numéricos comparando este tipo de ligação com a geometria normalmente

utilizada no dimensionamento estrutural em Engenharia Civil. Na Figura 2.17 ilustra-se assim um exemplo que traduz uma ligação entre um banzo e uma alma de uma geometria de um “T” invertido, em que do lado esquerdo o autor considerou uma ligação do tipo chanfro (correntemente utilizada em perfis metálicos) e do lado direito uma ligação concebida através de algoritmos desenvolvidos com base na ligação ramo-tranço que o autor depreendeu das árvores.

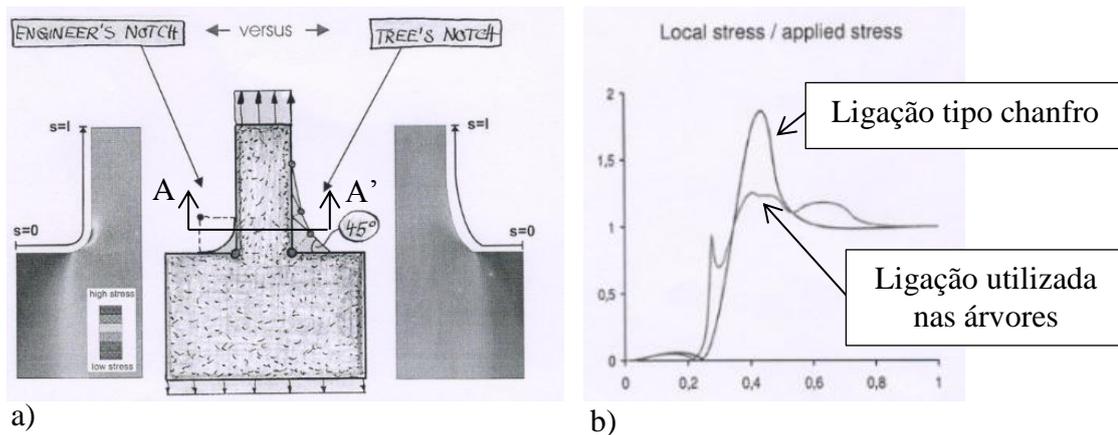


Figura 2.17 – Estudo da ação da tensão de tração numa ligação: a) modelo analisado; b) gráfico da tensão local na zona de ligação (Mattheck, 1998)

Analisando-se os resultados obtidos a partir da análise geométrica no nó, considerando-se um único material homogéneo e isotrópico, pode-se verificar que a utilização, na zona de ligação tronco-ramo, de uma geometria idêntica ao de uma árvore diminui o valor da tensão local nesse ponto. Comparativamente, uma ligação corrente utilizada no dimensionamento estrutural apresenta valores de tensões superiores, provocando um aumento da seção ao nível dos elementos da ligação de modo a resistir à ação que lhe é imposta. Assim, pode-se destacar o facto de que uma ligação ramo tronco possibilita uma diminuição da seção ao nível do ramo, otimizando deste modo o material (Mattheck, 1998).

Em relação ao material que constitui as árvores, a madeira, também se observam processos de adaptação e otimização da rigidez (densidade) do material em resposta às ações externas atuantes sobre a árvore. Assim, nas zonas sujeitas a maiores tensões, ocorre um processo conhecido por transdução, que consiste na movimentação dos grãos de amido dentro das células que constituem a planta (tecido lenhoso), de modo a dotar as fibras na direção das cargas atuantes de maior rigidez (correspondendo à magnitude da ação aplicada) (Oxman, 2010a).

Os ossos

Para além das árvores, que constituem um inequívoco exemplo de uma estrutura à qual a sede humana de conhecimento deve de facto procurar inovação, pode-se destacar também os ossos. As estruturas ósseas apresentam módulos de elasticidade consideravelmente superiores aos restantes bio-elementos das estruturas orgânicas e são responsáveis pelo comportamento coerente que os correspondentes animais exibem. Apesar de os materiais que constituem os ossos serem dotados de uma significativa capacidade resistente à tração, estes têm melhor comportamento à compressão (maior ductilidade e maior resistência) pelo que quando os ossos se integram em sistemas essencialmente sujeitos à flexão, as tensões positivas máximas (trações) só podem assumir valores moderados (Pacheco, 1998).

Focalizando nas funções estruturais dos ossos, pode-se observar que o esqueleto apresenta três funções principais: sustentar os corpos, funcionar como um sistema de alavancas para que os músculos possam realizar o trabalho e complementar a proteção dos tecidos mais frágeis. Salienta-se que cada uma destas funções apresenta inequivocamente uma vertente estrutural: a primeira por organizar a matéria; a segunda apresenta natureza cinemática, já que visa reduzir o grau de hipostaticidade, de modo a restringir os movimentos; por fim a terceira devido ao facto de oferecer proteção aos corpos resultante de ações mecânicas exteriores, distribuindo os esforços pelos elementos capazes de os sustentar (Johnson, 1981). A partir de ilustrações de casos clássicos, é possível observar o tipo de solicitações a que os ossos são sujeitos quando exercem as funções para as quais se encontram vocacionados, Figura 2.18.

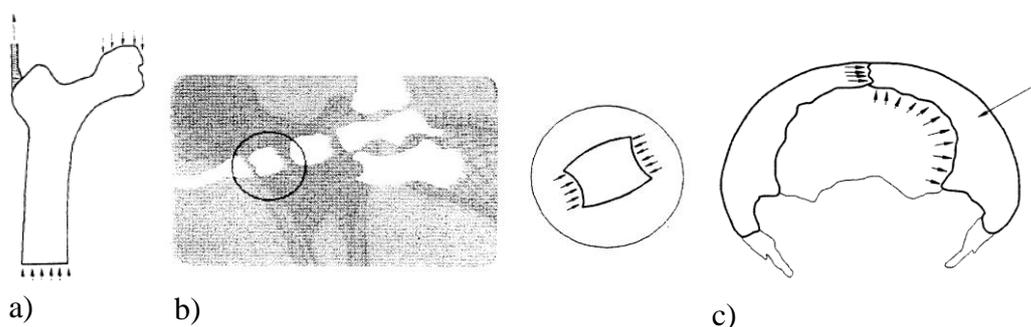


Figura 2.18 – Solicitações tipo a) num osso longo que assume funções de suporte e de condicionamento mecânico; b) num osso curto que assume funções de suporte; c) num osso plano quando exerce a função de proteção

Relacionando a constituição, a forma e a trajetória das tensões nos ossos, pode-se observar que nos ossos longos há essencialmente dois tipos de trajetórias de compressões: retas e paralelas na díafase e curvilíneas convergentes nas epífises, Figura 2.19 (Wolf, 1986).

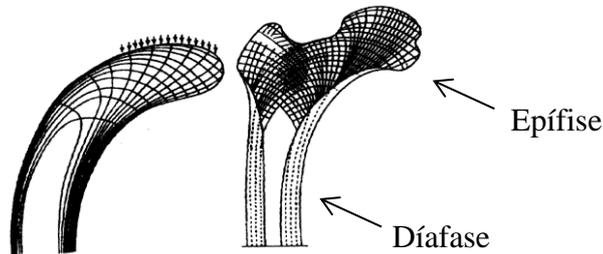


Figura 2.19 – Trajetórias de tensões no fêmur humano (Wolf, 1986)

Nos ossos curtos, o comportamento tensional é muito semelhante ao dos ossos longos, verificando-se porém que, quando os primeiros são solicitados em várias superfícies, assumem uma distribuição tensional semelhante às epífises dos ossos longos, e que, com solicitações em faces opostas, exibem trajetórias de tensões semelhantes às díafases dos ossos longos. Esses dois casos podem ser observados por exemplo no pé humano quando está solicitado apenas pelo peso do corpo - ver Figura 2.20 (Wolf, 1986) .



Figura 2.20 – Trajetórias de tensões nos ossos do pé humano (Wolf, 1986)

Observando-se os exemplos apresentados, constata-se que os ossos não dispõem de massa estruturalmente inútil. Nas zonas regulares existe uma distribuição uniforme de tensões, enquanto as saliências surgem para degradar as cargas concentradas para as zonas uniformes, resultando dos processos de remodelação óssea que eliminam a matéria menos tencionada. Verifica-se assim haver matéria mais rígida onde a densidade das trajetórias é maior, e uma matriz menos sólida onde as trajetórias de tensão são mais afastadas, tal como se pode identificar nas zonas a sombreado na Figura 2.21 (Parker, 1988).



Figura 2.21 – Corte frontal no fémur humano (Parker, 1988)

Relativamente à capacidade de remodelação óssea, o esqueleto vivo encontra-se constantemente “informado” sobre as intensidades e direções das suas tensões predominantes. O osso auto-constrói sensores que monitorizam a deformação e que permitem ativar mecanismos de destruição e crescimento. Assim, quando as tensões são periodicamente severas o osso é lentamente remodelado de modo a diminuir essas tensões (Hildebrant, 1988).

2.4 Otimização estrutural

A presente secção debruçar-se-á sobre os aspetos históricos e técnicas de otimização estrutural, focando-se de seguida em aspetos específicos relacionados com a Engenharia Mecânica que está particularmente desenvolvida neste domínio, com o intuito de perceber quais as possibilidades de enquadramento da otimização estrutural ao nível da Engenharia Civil, visto o que existe é ainda extremamente incipiente.

2.4.1 Breve resenha histórica

O conceito de otimização estrutural iniciou-se com os estudos efetuados por Maxwell, em 1872. O seu trabalho diferenciava-se da maioria dos engenheiros da época na medida em que não utilizava modelos pré-determinados, propondo uma nova abordagem com base no objetivo de minimizar o valor do peso das treliças (tipologia de estrutura em estudo por parte do autor), onde o valor da força axial apresenta sinal idêntico, reduzindo deste modo o valor da quantidade de material a utilizar (Maxwell, 1872).

No entanto, o trabalho desenvolvido por Maxwell não foi suficientemente abrangente de modo a tornar-se aplicável a todos os tipos de estruturas treliçadas. Só em 1902 o projetista Michell retoma os conceitos idealizados por Maxwell, aplicando o método a vários projetos

de estruturas, introduzindo os princípios básicos da teoria da otimização estrutural (Michell, 1904).

Ao longo dos últimos 90 anos, vários cientistas têm desenvolvido extensivamente os princípios propostos por Michell, sendo a teoria da otimização estrutural estendida para a otimização de elementos em grelha e reforço de placas de dobragem (Rozvany, 1995). Contudo, estas técnicas mostraram-se apenas adequados para problemas relativamente pequenos e simples, cuja resolução poderia passar facilmente pelos cálculos clássicos estruturais correntes. Porém, graças ao desenvolvimento da tecnologia informática a partir da década de 80, que permitiu aos investigadores obter um meio de fazer cálculos matemáticos repetitivos com relativa facilidade e em tempo razoável, foi possível obter então uma combinação entre os métodos numéricos de análise de componentes estruturais, tais como o método dos elementos finitos (MEF) ou o método das diferenças finitas (MDF), e os princípios de otimização, possibilitando melhorias significativas nos próprios métodos de otimização (Querin, 1997).

Assim, no final da década de 90 surgem três metodologias de otimização que ainda nos dias de hoje se apresentam como os métodos mais precisos: análise de otimização paramétrica (Ding, 1986); otimização da forma (Ding, 1986); e o método mais poderoso constitui a otimização topológica (Bendsoe, 1995). Importa salientar que na seguinte seção descrever-se-á quais as possibilidades que cada metodologia permite alcançar em termos de otimização de um dado elemento.

2.4.2 Técnicas de otimização

Para se perceber o conceito de otimização, pode-se exemplificar com caso típico da Engenharia Mecânica, relativo ao chassi de um automóvel, pretendendo-se obter a maior rigidez possível com a menor quantidade de material. Supondo um hipotético elemento cuja geometria pode ser descrita por dez parâmetros independentes, existem duas abordagens que permitem alcançar o objetivo proposto. Numa primeira abordagem, designada por abordagem de análise, serão analisados os diversos resultados obtidos em termos de rigidez e quantidade do material alterando em múltiplas combinações os valores dos parâmetros, determinando-se deste modo os parâmetros que preenchem o objetivo em questão. Contudo, este caminho pode ser bastante moroso: se se apenas variar três parâmetros e cada parâmetro puder englobar

apenas dez valores, são necessárias 10^3 combinações, se o tempo de cálculo de cada combinação for de 0,1 segundos, observa-se um tempo total de 100 segundos, mas se se variar os dez parâmetros (10^{10} combinações) e se o tempo de cálculo passar para 10 segundos, obtém-se um tempo total de 3200 anos, indicando que esta abordagem apenas se aconselha para casos em que o número de parâmetros a variar seja reduzido (Rozvany, 1995).

Por sua vez, numa segunda abordagem para se alcançar o objetivo proposto, designada por abordagem otimizada, são utilizados métodos computacionais que executam de forma racionalizada uma procura pela solução ótima. Desta forma o termo otimização utiliza-se quando através de processos matemáticos é determinada sistematicamente a solução ótima, ao contrário da abordagem de análise em que é necessário analisar as múltiplas combinações derivantes dos valores dos parâmetros, com base na “tentativa e erro” (Rozvany, 1995).

Os métodos de otimização estrutural, desenvolvidos e aplicados sobretudo nas áreas da Engenharia Mecânica e Civil, são definidos pelos seguintes conceitos:

- Função objetivo – diretamente relacionado com o parâmetro que se pretende maximizar ou minimizar, por exemplo a rigidez, a frequência de ressonância, ou o volume da peça;
- Restrições – limites impostos à solução da otimização, por exemplo, o máximo volume que o elemento pode apresentar, o máximo valor possível admitido para os esforços em análise num determinado ponto, ou o deslocamento máximo;
- Variáveis – constituem os parâmetros do elemento que podem ser alterados no decorrer do processo de otimização, por exemplo, as dimensões do elemento, ou a distribuição de material no domínio do elemento.

Existem essencialmente três métodos de otimização: paramétrico, de forma e topológico. Tendo por base um elemento em consola sujeito a uma carga concentrada F aplicada na sua extremidade (ver Figura 2.22), cujo objetivo de otimização se prende com a determinação da máxima rigidez para o menor volume de material possível, descrever-se-ão os métodos de otimização existentes.

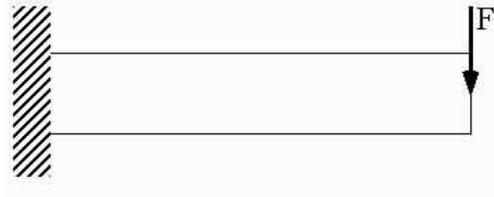


Figura 2.22 – Problema exemplo

A otimização paramétrica, ilustrada na Figura 2.23 a), executa um conjunto de alterações nos valores que definem a forma (b , t e h) de modo a obter o resultado ótimo, sem alteração da forma pré-definida, que no caso ilustrado é um perfil “I”. Por sua vez, o método de otimização da forma, Figura 2.23 b), considera os contornos externos da estrutura como variáveis, procedendo à determinação da forma ótima para se alcançar o objetivo pretendido, modificando-se a forma da estrutura. Por fim, o método de otimização topológica, Figura 2.23 c), ao contrário da otimização da forma que apenas considera como variável o contorno externo, considera toda a área ou volume como variável, procedendo à distribuição ótima de zonas com e sem material (Haftka, 1995). A quantidade de material removido, ou seja, o grau de otimização, aumenta pela ordem em que foram apresentados os métodos.

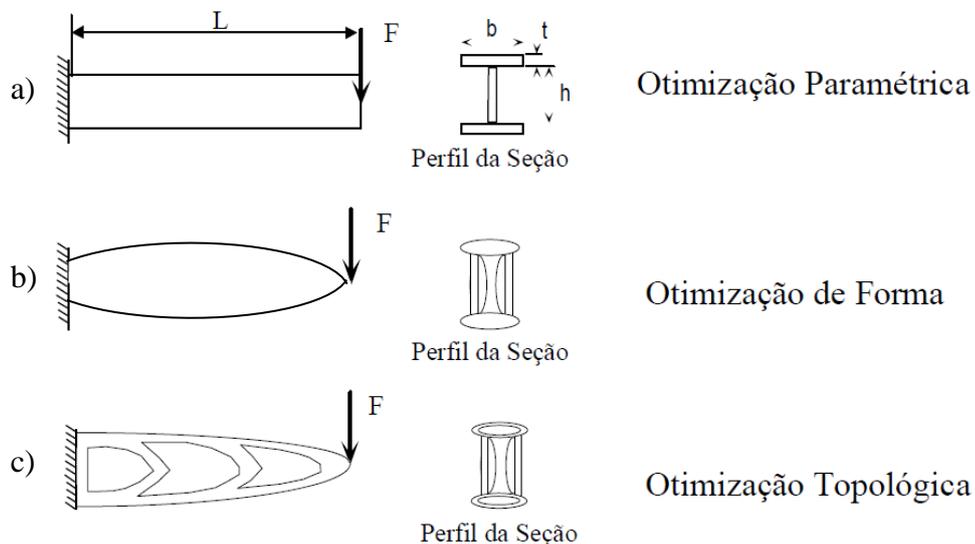


Figura 2.23 – Métodos de otimização: a) Paramétrico; b) Forma; c) Topológico (Haftka, 1995)

Seguidamente apresentam-se com maior detalhe os métodos de otimização da forma e da topologia, pois tratam-se dos que apresentam maior interesse sob o ponto de vista da inovação que se pretende procurar com a contribuição da presente dissertação no contexto da Engenharia Civil.

2.4.2.1 Otimização da forma

A otimização da forma permite alterar a forma da estrutura de maneira a encontrar a solução ótima. As variáveis de projeto podem ser as coordenadas de alguns pontos ou a parâmetros mais abstratos como coeficientes de uma curva que representam os limites exteriores do elemento - ver Figura 2.24 (Ding, 1986).

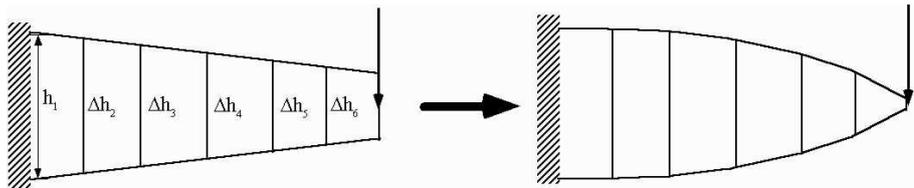


Figura 2.24 – Exemplo de otimização da forma (Ding, 1986)

Devido às formas complexas que podem ser obtidas é utilizado o método dos elementos finitos (MEF) para a análise das estruturas durante o processo de otimização. Relativamente ao procedimento destacam-se as seguintes fases representadas na Figura 2.25 (Ding, 1986):

1. Definição do elemento – características geométricas, propriedades mecânicas e o carregamento;
2. Definição das direções e regiões em que se pretende alterar a forma;
3. Análise de sensibilidade que avalia o quanto a alteração da forma em cada direção influencia a função objetivo (por exemplo a rigidez), através de programas de cálculo automático que englobam os algoritmos de otimização de forma propostos por Ding (1986).

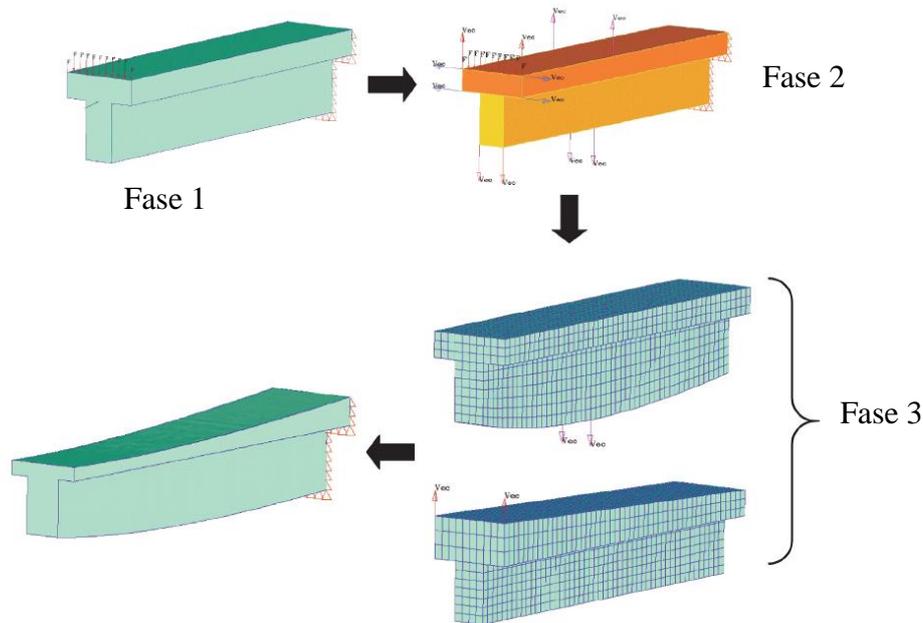


Figura 2.25 – Procedimento otimização da forma (Ding, 1986)

2.4.2.2 Otimização topológica

De uma forma simplificada, o método em questão distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar a função objetivo especificada. Logo, o material pode em cada ponto do domínio variar de vazio (sem material) até sólido (com material), podendo ainda assumir uma densidade intermédia (Bendsoe, 1988).

O procedimento típico utilizando a análise topológica baliza-se nas cinco fases ilustradas na Figura 2.26 (Bendsoe, 1988):

1. Definição do domínio no qual a estrutura pode existir, sendo restringido pelas condições de contorno da estrutura e pelos pontos de aplicação de carga;
2. Discretização do domínio em elementos finitos, considerando as condições de contorno;
3. Fornecimento dos dados obtidos das fases anteriores a uma aplicação de otimização topológica (que recorre aos algoritmos proposto por Bendsoe (1995)) que através de um processo iterativo distribui o material no dominó de forma a minimizar ou maximizar a função objetivo;
4. Após a obtenção dos resultados por parte da aplicação de otimização, procede-se a uma análise que visa a correção das linhas que definem o elemento;

5. Como último, após a correção, deve-se aplicar o MEF para se confirmar a adequabilidade da solução adotada.

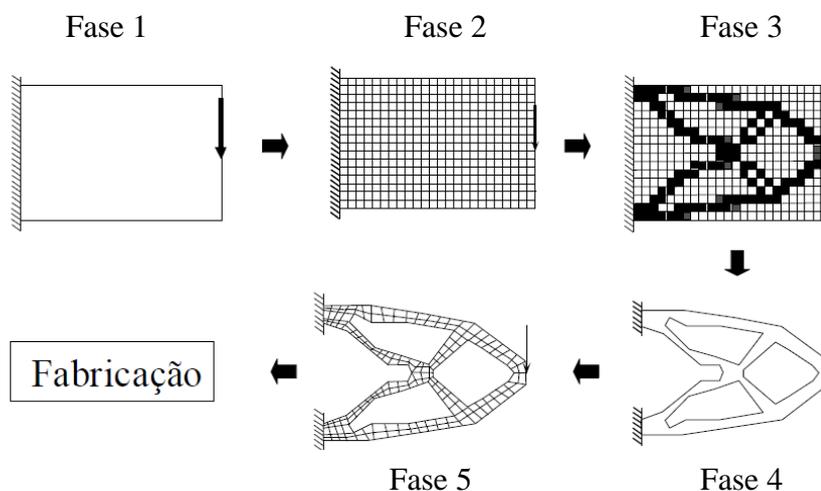


Figura 2.26 – Procedimento da otimização topológica (Haftka, 1995)

Na Figura 2.27 encontra-se um exemplo de um elemento otimizado topologicamente ao nível tridimensional.

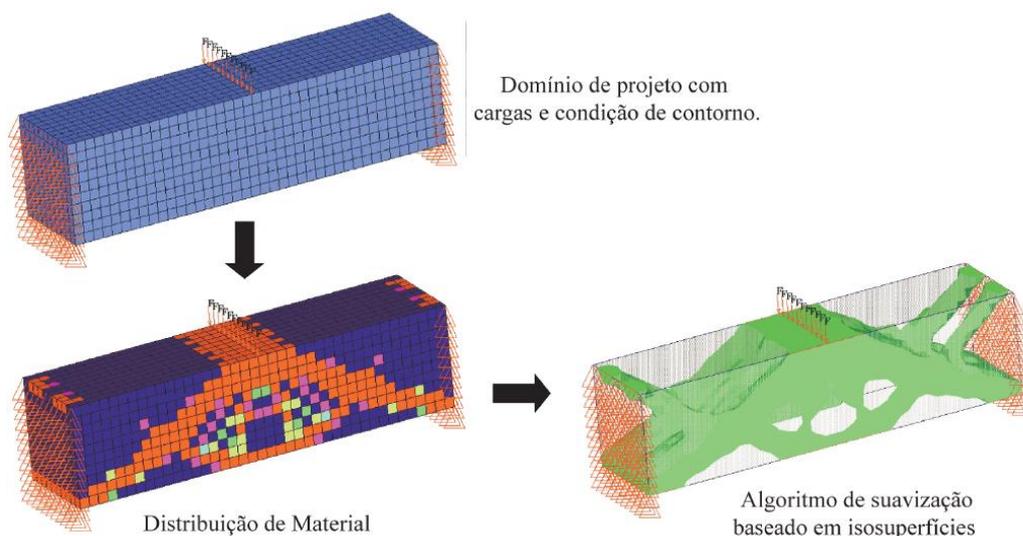


Figura 2.27 – Exemplo otimização topológica (Haftka, 1995)

2.4.3 Possibilidades de otimização estrutural na Engenharia Civil

Otimizar uma estrutura de Engenharia Civil significa, na generalidade dos casos, determinar a solução que torna mínimo o valor de uma função escalar que traduz, direta ou indiretamente, um custo e que é designada função objetivo. Para que a estrutura tenha utilidade, devem ser

satisfeitas algumas exigências relativas à sua segurança e performance. Estas exigências constituem um conjunto de igualdades e/ou desigualdades designadas restrições (Azevedo, 1994).

Nos problemas de otimização, além dos deslocamentos dos nós e das tensões existem outras variáveis que dependem do tipo de problema e do grau de complexidade que o projetista pretende incluir no estudo da estrutura. No conjunto de parâmetros que definem a solução estrutural, é necessário selecionar previamente aqueles que podem ser modificados pelo algoritmo de otimização. Estes parâmetros passam a pertencer ao conjunto das variáveis e os restantes assumem valores constantes durante o processo de otimização da estrutura. Os parâmetros que não são fixados designam-se por variáveis de projeto e constituem o principal critério de classificação de problemas de otimização de estruturas (Azevedo, 1994).

Tendo por base os pressupostos descritos pelo autor Álvaro Azevedo (1994), apresentam-se dois estudos realizados pelo autor Osvaldo Querin (1997) que procedeu à aplicação de um programa de otimização topológica (normalmente aplicado à Engenharia Mecânica) a uma viga-parede e a uma viga encastrada, respetivamente Figuras 2.28 e 2.29. Relativamente ao exemplo da viga-parede, importa salientar que se trata de um exemplo académico formulado pelo autor Michell (1904).

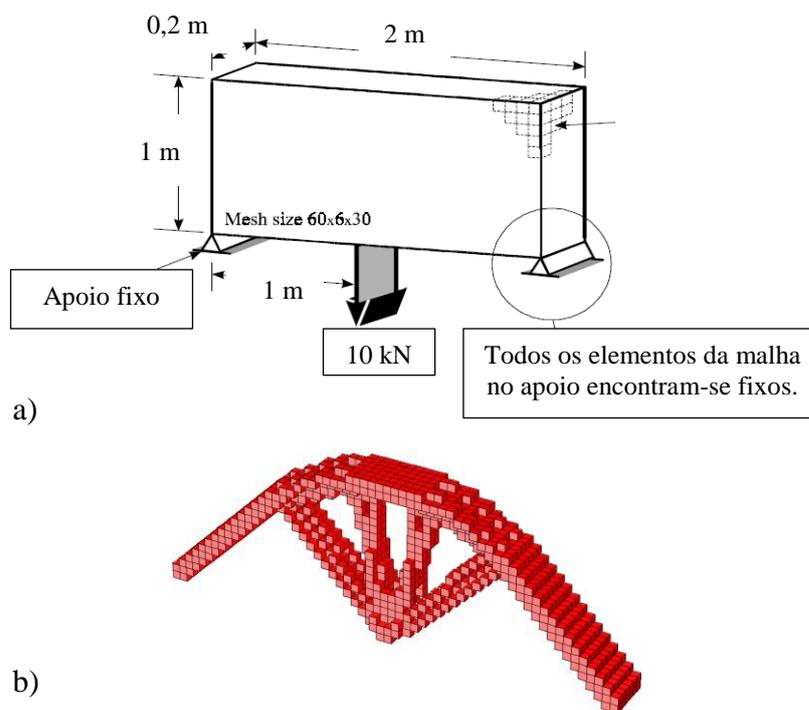


Figura 2.28 – Viga-parede: a) descrição do modelo; b) otimização obtida (Querin, 1997)

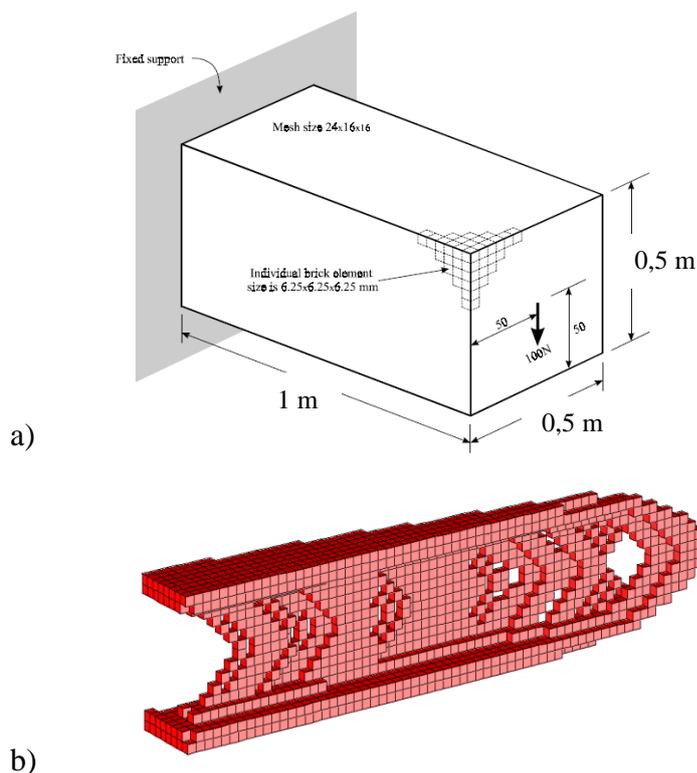


Figura 2.29 – Viga encastrada: a) descrição do modelo; b) otimização obtida (Querin, 1997)

Por sua vez, na Figura 2.30 pode-se visualizar o processo iterativo de otimização topológica de uma viga simplesmente apoiada. Estudo desenvolvido pelos autores Per Dombernowsky e Asbjorn Sondergaard (2009).

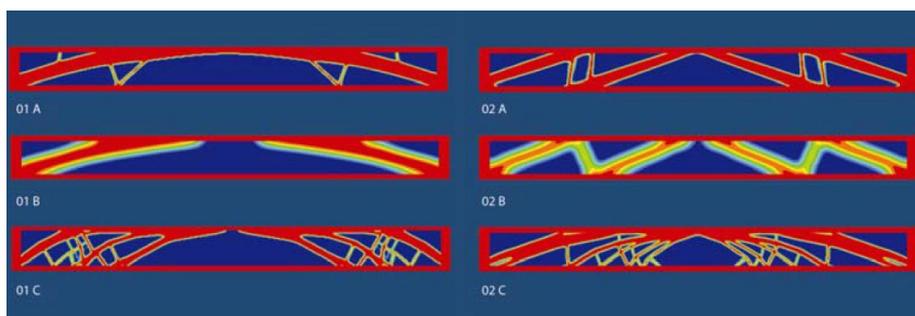


Figura 2.30 – Processo iterativo de otimização: viga simplesmente apoiada (Sondergaard, 2009)

Com base no resultado obtido e através de técnicas de impressão tridimensional por corte os autores procederam à construção da viga a uma escala reduzida, Figura 2.31.



Figura 2.31 – Viga otimizada construída a escala reduzida (Sondergaard, 2009)

De modo a se perceber melhor quais as potencialidades e os limites dos programas de otimização estrutural, recorreu-se, de uma forma simplificada, a um software de otimização FEMAP[®] propriedade da empresa SIEMENS (software correntemente utilizado nas áreas da engenharia aeronáutica e automóvel) e analisou-se duas tipologias de estruturas: uma viga clássica constituída por betão (não considerando explicitamente a armadura), Figura 2.32 b); e uma ponte em betão, Figura 2.33 b). Relativamente à viga, indica-se que para a zona A (ver Figura 2.32 a)) considerou-se a existência de um apoio duplo, ou seja, restrição do descolamento dos nós na direção normal e tangencial, e na zona B (ver Figura 2.32 a)) a existência de um apoio simples, ou seja, restrição do deslocamento dos nós na direção normal. Definiram-se ainda três zonas restritivas (com o intuito de salvaguardar duas zonas para o suporte dos apoios e uma para o acondicionamento da armadura), ou seja, zonas que não serão sujeitas ao processo de otimização. Introduziu-se uma carga uniformemente distribuída na face superior da viga cujo valor se cifrou em 3 kN/m.

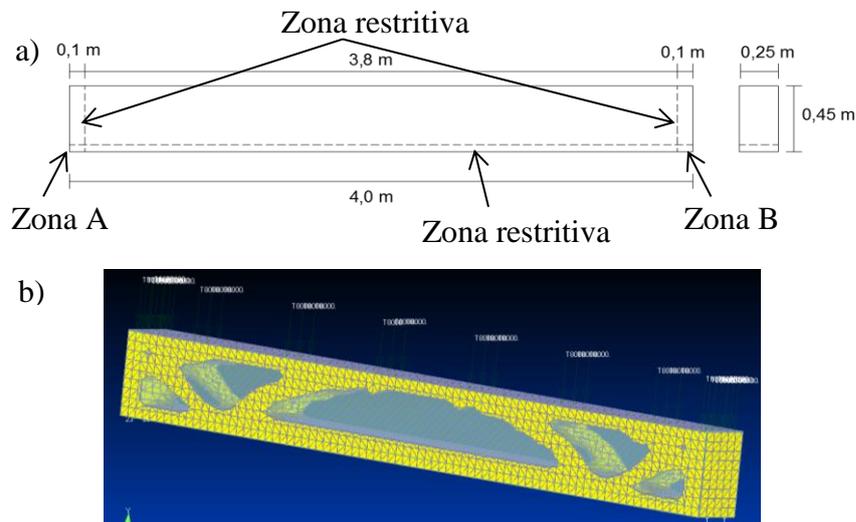


Figura 2.32 – Viga clássica otimizada através do programa FEMAP[®]

Para o exemplo da ponte importa salientar que se considerou uma zona A (Figura 2.33 a)) onde se inserem os apoios duplos, ou seja restrição do descolamento dos nós na direção

normal e tangencial. Relativamente ao carregamento, considerou-se uma carga distribuída sobre a face superior na ordem dos 10 kN/m.

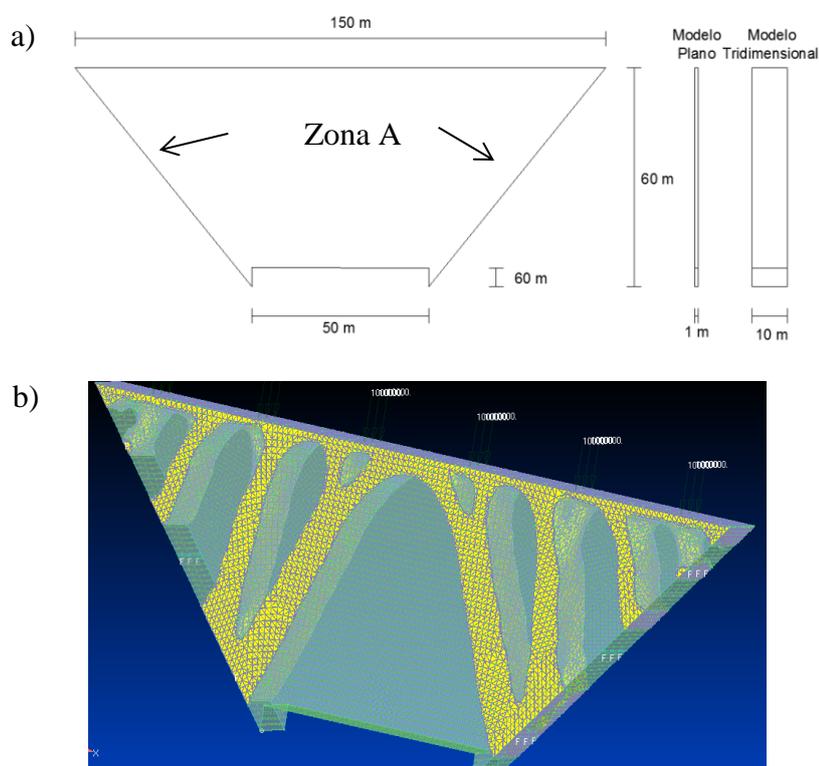


Figura 2.33 – Ponte otimizada através do programa FEMAP®

Numa primeira análise, pode-se referir que os resultados alcançados através do programa FEMAP® aproximam-se dos obtidos pelos autores apresentados (Querin, 1997, Sondergaard, 2009) na medida em que no final da análise topológica da peça apenas se verifica a presença de material nas direções das tensões principais de compressão, ou seja nas zonas onde existe a transferência de tensões, eliminando material nas zonas onde as tensões são praticamente nulas. Na viga clássica em estudo (Figura 2.32 b)), no final do processo de otimização observa-se que a geometria obtida traduz a trajetória do caminho das forças internas dentro de uma viga de betão que não apresenta fissuração como é o caso em análise, tal como ocorre no exemplo da viga-parede (Figura 2.28) e na viga encastrada (Figura 2.29). No exemplo da ponte (Figura 2.33 b)) observa-se a formação de arcos em compressão, concretizando deste modo a geometria padronizada do elemento em estudo.

Desta análise simplificada e preliminar, pode-se referir que se trata apenas de um pequeno exemplo daquilo que se poderá tornar prática corrente de dimensionamento à luz do que ocorre noutras áreas da engenharia, desde que a construção consiga concretizar as formas

resultantes. A construção de estruturas idênticas às apresentadas após o processo de otimização através das técnicas atuais seria praticamente inviável dado o custo elevado que representaria pelo facto da tecnologia da construção atual não ser facilmente adaptável para qualquer tipo de geometria. Assim urge a necessidade de desenvolvimento de métodos de construção capazes de concretizar modelos mais complexos de modo económico mais atrativo, a impressão 3D aditiva.

2.5 Conservadorismo e paradigmas na Indústria da Construção Civil

Tal como na maior parte dos países do mundo, os processos adotados pela indústria da construção em Portugal são do tipo artesanal, continuando a basear-se excessivamente nos métodos de construção tradicional, com baixo grau de industrialização, e na mão-de-obra não qualificada, sendo caracterizada pela sua baixa produtividade e utilização excessiva de recursos naturais e energia (Mateus, 2004).

À semelhança do que já aconteceu noutras indústrias, espera-se que ao nível dos processos construtivos e tecnologia, ocorra uma automatização crescente, neste caso com o aumento de tarefas a realizar em fábrica e diminuição das tarefas em estaleiro, ou seja o aumento da indústria de pré-fabricação como base de apoio da indústria construtora - ver Figura 2.34 (Mateus, 2004). A crescente necessidade de industrialização do processo construtivo é um dos pontos-chave para a maximização da sustentabilidade da construção ao nível dos seus três vetores: social, ambiental e económico.

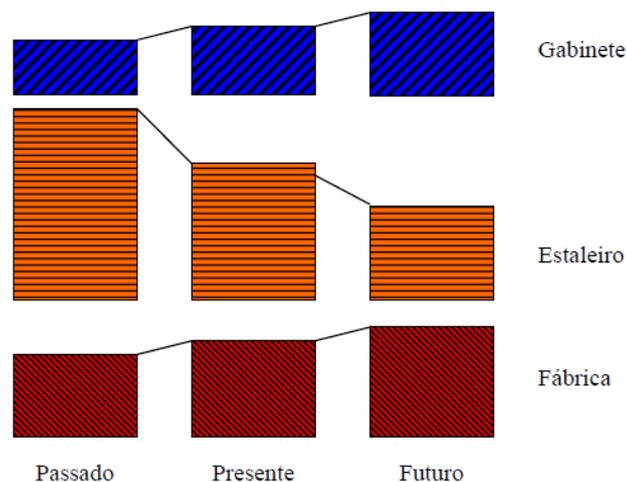


Figura 2.34 – Repartição do tempo e tarefas na construção civil (Mateus, 2004)

Contudo, para que a referida evolução da indústria da construção civil possa ocorrer, o tradicional conservadorismo teria que ser ultrapassado, desde o processo de dimensionamento até ao processo de construção, passando pelos materiais utilizados: o betão armado desde há mais de um século predomina como a técnica construtiva e material de eleição (particularmente em Portugal), devido ao reduzido tempo e custo de construção que implica, inviabilizando a inovação no campo da engenharia e da arquitetura, uma vez que apenas se apresenta economicamente viável para estruturas de geometria rígida (blocos paralelepípedos) devido ao facto de o processo construtivo se obter através de cofragens pré-definidas, cuja modificação e implementação para formas geométricas arrojadas aumentaria o custo, impedindo deste modo a construção de estruturas que apresentem geometrias mais complexas que permitem a diminuição do material a utilizar (Contu, 2010). Relativamente ao sector da pré-fabricação já existente, importa salientar que apesar de constituir a área da construção civil com maior grau de desenvolvimento tecnológico, apresenta ainda um custo elevado quando se pretende customizar um determinado produto, não se podendo facilmente modificar as geometrias dos objetos a produzir (Khoshnevis, 2004).

Outra questão que contribui para o tradicional conservadorismo consiste no risco de investimento inicial elevado, ou seja, a procura de novos processos de dimensionamento, construção e de materiais envolverá sempre um custo elevado por parte da indústria da construção na fase inicial. Contudo este custo poderá ser insignificante caso as inovações obtidas alcancem reduções significativas no tempo de construção e mão-de-obra necessária e ainda um aumento no grau de qualidade do produto acabado (Contu, 2010). Em Portugal são poucas as empresas de construção que apostam na inovação e as poucas que o fazem limitam-se a procurar soluções redutoras na tentativa de obtenção do lucro a curto prazo, não investindo em métodos que se poderiam tornar numa verdadeira revolução tecnológica (que ainda não ocorreu) na indústria da construção e conceção civil (Mateus, 2004).

Salienta-se ainda a falta de dinamismo que existe no setor atual da construção civil nomeadamente ao nível das elevadas dificuldades dos projetistas em mudarem de técnicas, muitas vezes devido a falta de cooperações entre os centros de investigação (universidades) e também devido à falta de regulamentação, que não certifica atempadamente as diversas tipologias de tecnologias que vão surgindo, concretizando-se em bloqueios à inovação (Mateus, 2004).

Ao nível tecnológico, importa referir que muitas das inovações utilizadas com sucesso em áreas diversas da indústria, que não a de construção, muitas vezes acabam por não se adaptar à construção civil devido à sua escala, nomeadamente as dificuldades de implantação *in-situ*, sobretudo devido às condições a que as obras de construção se encontram sujeitas e a escala de grandeza normalmente requerida pela construção. Deste modo, requer-se dos equipamentos e dos procedimentos a desenvolver todo um conjunto de inovações que permitam que independentemente do local de trabalho, ou da dimensão da obra, o comportamento dos sistemas se mantenha (Mateus, 2004).

Com base nos elementos que acabam de ser expostos, pode-se aferir que a indústria e os processos de dimensionamento na área de Engenharia Civil encontram-se de certo modo aprisionados por paradigmas cujos interlocutores, por motivos diversos, se encontram renitentes em ultrapassar e/ou explorar.

3 IMPRESSÃO 3D DE ARGAMASSAS DE CIMENTO: METODOLOGIA E PROTÓTIPO

3.1 Concetualização geral

Tendo em conta os vários vértices identificados no capítulo anterior, compreendendo a tecnologia de impressão 3D, a otimização estrutural e o biomimetismo, considera-se haver condições tecnológicas para que seja aberto o caminho para uma nova geração de estruturas de Engenharia Civil. De facto, os trabalhos de otimização estrutural existentes até à presente data têm incidido essencialmente sobre aspetos geométricos das estruturas, o que fica aquém do que se observa na natureza, que para além do aspeto geométrico, também incide sobre a distribuição diferenciada das propriedades dos materiais (p.ex. rigidez e resistência). Até à presente data, este tipo de otimização combinada de geometria e distribuição de material foi pouco explorada no contexto da Engenharia Civil pelo simples facto de ser impraticável com as técnicas de construção disponíveis. No entanto, com o crescente desenvolvimento das técnicas de impressão 3D, ficaram criadas as condições para que se possa conceber um equipamento capaz de efetuar impressão tridimensional de estruturas com geometria arbitrária e distribuição de material não uniforme. Fica então aberto o caminho para novos paradigmas de dimensionamento estrutural e de utilização sustentada de recursos.

No presente trabalho é efetuada uma idealização de um método de impressão 3D de material de base cimentícia que permita simultaneamente a criação de peças com geometria arbitrária e a distribuição diferenciada de material no espaço (ex: alteração da quantidade de cimento ou da relação água/cimento). As duas principais inovações da idealização proposta (apresentada em detalhe na secção 3.2), relativamente às metodologias atualmente implementadas para impressão 3D (Contu, 2010, Khoshnevis, 2004, Pegna, 1997, S. Lim, 2012), relacionam-se com a capacidade de distribuição diferenciada de misturas, e com a possibilidade de trabalhar com os componentes da mistura secos até ao instante da sua colocação.

Na secção 3.3 será apresentado o protótipo de impressora 3D de argamassas implementado no âmbito desta dissertação para prova do conceito proposto, explicando-se detalhadamente as várias componentes do mesmo, bem como os procedimentos para a sua utilização.

3.2 Idealização da metodologia proposta

Dado o objetivo de distribuição diferenciada de material ao longo do elemento a produzir, assim como a eliminação de elementos adicionais de suporte, desenvolveu-se uma abordagem distinta das técnicas atualmente existentes para impressão 3D estrutural, tendo sido necessária a ligação de várias áreas do conhecimento. Na parte inicial desta secção será feita uma breve referência a aspetos fundamentais do betão projetado e do betão compactado com cilindros que servirão de inspiração aos princípios base da metodologia a propor, que se apresenta neste capítulo.

3.2.1 Conceitos e princípios do betão projetado e do betão compactado com cilindros

Na nova metodologia a propor nesta dissertação, há dois aspetos fundamentais a ter em conta, na medida em que se tratará de um processo aditivo: a deposição do material; a garantia da compactação adequada do material após deposição para obtenção de propriedades mecânicas aceitáveis. Tendo em conta os aspetos mencionados e as tecnologias atualmente disponíveis no contexto das estruturas de betão, os conceitos de betão projetado e de betão compactado com cilindros (BCC) tornam-se bastante relevantes, atuando como importante conhecimento de base.

Betão projetado

O betão é pneumáticamente transportado através de uma tubagem e expelido sob pressão a elevada velocidade sobre uma superfície adequadamente preparada, proporcionando deste modo em simultâneo a sua própria compactação. Existem dois tipos de procedimento distintos: por via seca ou por via húmida. No processo via seca, a mistura seca é transportada por toda a extensão da mangueira, até à extremidade, onde então, através de um anel acoplado ao canhão de ejeção, é introduzida a água, de maneira uniforme e em quantidade necessária e suficiente

para promover a hidratação da mistura – ver esquema funcional da projeção por via seca na Figura 3.1 (ACI, 1995).

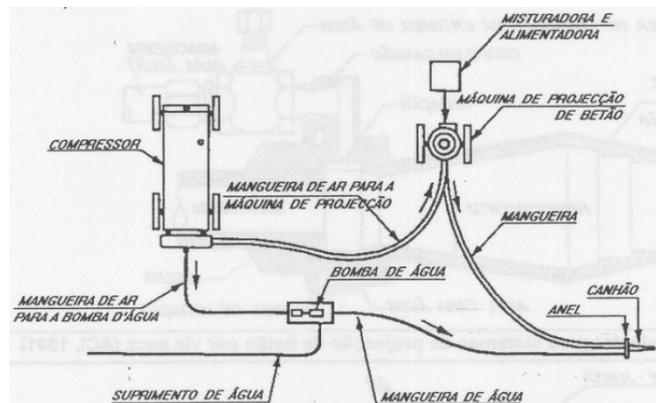


Figura 3.1 – Esquema funcional do sistema de via seca para a projeção de betão (ACI, 1995)

No processo via húmida, esquematicamente representado na Figura 3.2, a mistura húmida é introduzida na máquina, como se de betão convencional se tratasse. A mistura é então transportada pela mangueira, sob pressão, até ao canhão ejetor, onde é introduzido ar adicional, por forma a aumentar a velocidade de projeção.

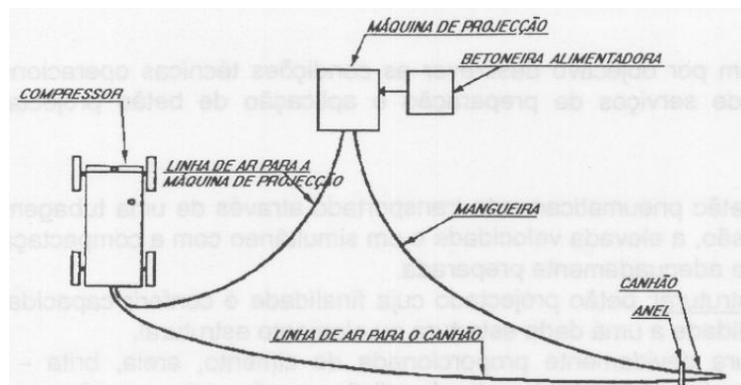


Figura 3.2 – Esquema genérico do sistema de via húmida para a projeção de betão (ACI, 1995)

Tendo em conta o propósito de se criar uma metodologia de impressão 3D que permita distribuição não uniforme da composição do material, a inspiração na via seca do betão projetado revela-se mais adequada, ao permitir a afinação em tempo real dos componentes secos da mistura que entram na máquina de projeção. Por outro lado, há uma vantagem inerente à via seca: o material não utilizado numa determinada aplicação não fica inutilizado, ao contrário do que acontece no caso da via húmida, em que todo o material que não é

utilizado se torna num desperdício devido ao endurecimento do cimento após contacto com a água.

Betão compactado com cilindros (BCC)

O BCC é um material utilizado principalmente na construção de barragens e pavimentos, consistindo num betão seco consolidado por vibração externa muito potente, efetuada através dos cilindros vibradores usados na compactação de solos – ver Figura 3.3, aplicação do BCC numa barragem. Este material difere do betão convencional não só no método de colocação mas também na consistência e na composição. De facto a consistência tem de ser tal que permita a circulação dos pesados cilindros na superfície do betão e a composição caracteriza-se, entre outros parâmetros, pela incorporação de uma dosagem reduzida de cimento. A energia a que o BCC é sujeito durante a compactação é superior à normalmente usada com o betão vibrado o que permite diminuir a dosagem de água na mistura, e por consequência, poder obter melhores características, quando se usam os mesmos inertes e as mesmas dosagens de ligante (Ribeiro, 2004).



Figura 3.3 – Aplicação betão compactado por cilindros (BCC) numa barragem (Ribeiro, 2004)

Os princípios de aplicação e consolidação do BCC perfazem um modo de resolução dos problemas existentes ao nível das técnicas de impressão 3D de argamassas de cimento existentes na medida em que permitem colmatar a existência de vazios entre os filamentos e as camadas. De facto, com a introdução do processo de compactação providencia-se o arranjo

entre as partículas constituintes do material, e aumenta-se a densidade do elemento, conferindo-lhe propriedades mecânicas superiores.

3.2.2 Idealização geral da metodologia proposta

Partindo das limitações referidas para as técnicas de impressão de materiais cimentícios atualmente existentes, procedeu-se à idealização de uma técnica de impressão 3D baseada no método aditivo, parcialmente inspirada no processo proposto por Enrico Dini (D-Shape), nas idealizações não concretizadas propostas por J. Pegna, nos conceitos de betão compactado com cilindros e nos princípios subjacentes ao betão projetado por via seca.

Relativamente ao método de impressão 3D aditivo, utilizado pelos processos propostos de impressão 3D estrutural mencionados, face ao método subtrativo, apresenta-se como o indicado para o objetivo que se pretende, na medida em que permite que num simples processo se produza um objeto como algo único, podendo referir o exemplo paradigmático de uma esfera oca, evitando deste modo o recurso a elementos de ligação, permite também a integração de vários tipos de materiais, podendo conjugar propriedades físicas distintas com o intuito de otimizar o material a utilizar, assim como a própria geometria da estrutura, e é compatível com a conjugação de vários componentes, como por exemplo tubagens e cabulagens, no decorrer do próprio processo de impressão (ex: técnica Contour crafting (Kwon, 2002)).

O processo idealizado está representado de forma esquemática na Figura 3.4 e resulta na existência de dois ou mais depósitos com as componentes secas da mistura (por exemplo, cimento e areia), com doseadores na sua extremidade que permitem a colocação do material armazenado numa cavidade de mistura seca, com velocidade e quantidade controlada, Essa cavidade de mistura, onde os materiais secos são homogeneizados, está por sua vez ligada a um misturador/injetor que permite a deposição do material em quantidades controladas. Com este processo será possível efetuar a deposição de misturas secas contendo várias relações entre os componentes, podendo no limite depor apenas areia.

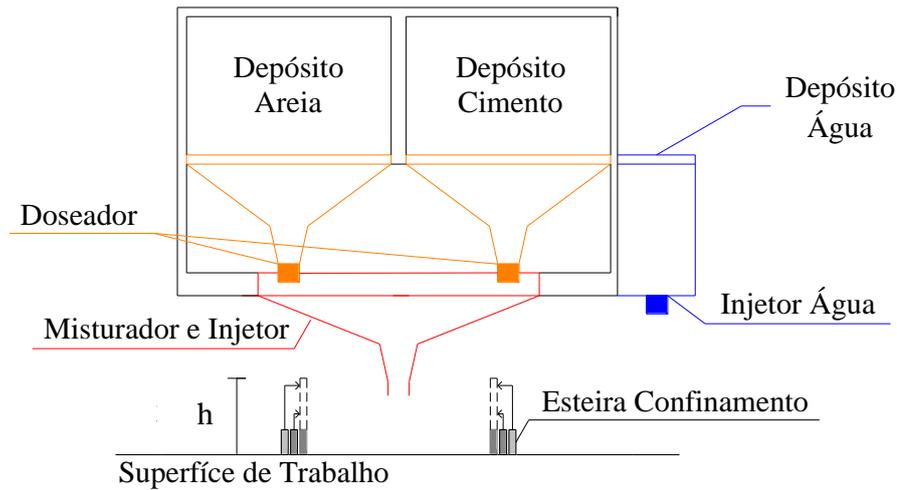


Figura 3.4 – Injetor: modelo conceitual

O funcionamento do equipamento como um todo decorre numa área de trabalho, representada em planta na Figura 3.5, que confina os limites de produção do equipamento, e dentro da qual a cabeça injetora das misturas secas será capaz de depor sucessivas camadas de material. Refira-se que, conforme o exemplo da Figura 3.5, o material será composto por areia apenas nas zonas em que não se pretende impressão da argamassa, sendo a areia totalmente removida e reaproveitada após fabricação da peça. Nas zonas em que se pretende impressão de argamassa será possível a deposição diferenciada de misturas com traços distintos, consoante indicação do utilizador.

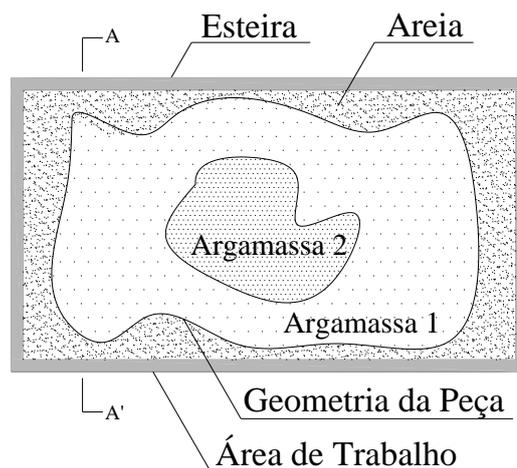


Figura 3.5 – Processo de produção: vista em planta

Na planta representada na Figura 3.5, é possível observar a existência de apenas duas misturas distintas denominadas 1 e 2 a título exemplificativo, mas o princípio de funcionamento aqui subjacente permitiria fazer muitas misturas distintas sem problemas.

Após a deposição de uma camada de material seco na área de trabalho, é posicionado e ativado um injetor de água (também representado na Figura 3.4) para distribuição de água pelas várias partes da camada, podendo essa mesma distribuição ser também feita de forma diferenciada.

O processo de deposição de componentes secos é posteriormente retomado, repetindo-se o ciclo, até que seja atingida uma espessura h pré-definida pela altura da esteira lateral que define a área de trabalho, conforme indicado na Figura 3.4. Ao ser atingida essa espessura é ativado o processo de compactação (p.ex, por cilindro compactador ou aplicação de pressão uniforme sobre a área de trabalho) - Figura 3.6 - para garantir propriedades mecânicas adequadas, à imagem do que acontece com o caso do BCC.

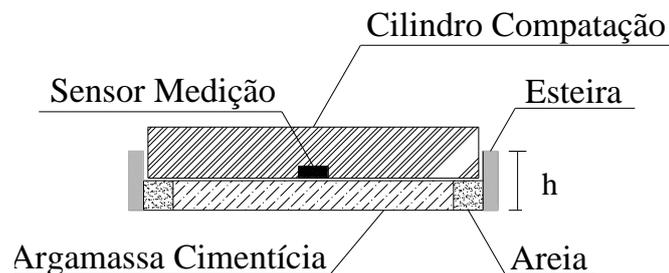


Figura 3.6 – Processo de produção: corte AA' (Figura 3.5) após compactação

Após a compactação, que conduz naturalmente ao abaixamento do material inicialmente depositado, o valor desse abaixamento é detectado com sensor de distância, e é automaticamente feita a necessária correção de geometria para as camadas subsequentes, minimizando as distorções associadas à compactação. Sempre que é atingido o limite lateral superior da esteira lateral, a mesma é deslizada verticalmente de uma altura h . Releva-se a importância das esteiras laterais para confinar o material depositado aquando do processo de compactação.

A cabeça injetora tem capacidade de movimentação segundo os três eixos espaciais, num espaço definido pela área de trabalho em planta Figura 3.5 e pela altura livre imposta pela configuração do equipamento de impressão. Assim sendo, durante todo o processo de fabrico,

a peça em produção mantém-se imóvel, e todos os movimentos são feitos pela cabeça injetora, e pelas esteiras laterais.

Após a aplicação de todas as camadas previstas, dispõe-se de um bloco prismático com a dimensão do volume de trabalho que envolve a peça em fabrico. É aplicada uma técnica de remoção da areia solta, por exemplo com pressão de ar ou água, ficando disponível a peça final. Refira-se no entanto que antes da remoção da areia solta deverá ser garantido um período de cura adequado da peça, e que nesse período deverão ser garantidas condições de saturação à areia de forma a evitar problemas relacionados com a humidade circundante ao material cimentício.

Para além da deposição da argamassa pode-se conceber um sistema que permite a colocação de armadura, podendo desde modo aumentar as capacidades de resistência mecânica do elemento a produzir. Existem diferentes tipologias de armaduras que se podem integrar: armadura convencional (varões de aço) no plano horizontal, macro e micro fibras. Relativamente às microfibras a sua adição concretiza-se na própria mistura, sendo introduzidas de forma aleatória no elemento. Por sua vez as macrofibras são colocadas através de um elemento sob pressão de injeção, podendo ser introduzidas transversalmente no elemento ao fim de um determinado conjunto de camadas ou camada dependendo da espessura da camada e da fibra a introduzir - ver Figura 3.7. No que concerne aos varões, podem ser colocados no final da deposição de uma camada através de um sistema de transporte que trabalha em conjunto com o sistema de deposição da argamassa, podendo a armadura ser colocada no plano horizontal na direção pretendida - ver Figura 3.7.

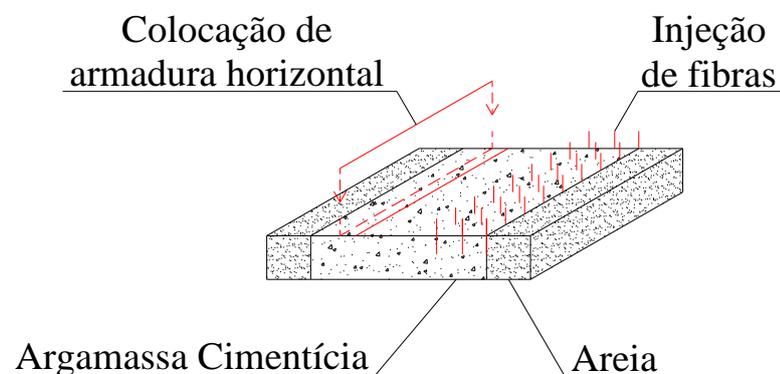


Figura 3.7 – Aplicação de armaduras (em planos horizontais) e fibras (macrofibras transversais por injeção)

3.3 Protótipo: impressora 3D a escala reduzida

3.3.1 Visão geral do protótipo

Com base na idealização veiculada na seção 3.2, e tendo em vista a avaliação da sua exequibilidade, foi construído um protótipo de impressora 3D para argamassas, com a colaboração do departamento de Engenharia Mecânica. Trata-se de um protótipo de escala reduzida, com potencial para impressão de peças com dimensão máxima envolvente de 100 cm × 40 cm × 30 cm.

O equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas é composto por três núcleos, cuja interação está esquematicamente representada na Figura 3.8:

1. Aplicação informática de comando – implementada num computador, permite ao utilizador introduzir todas as ações que pretende executar nas diversas funcionalidades do equipamento;
2. Equipamento controlador – equipamento cujo objetivo reside no controlo numérico das ações pretendidas pelo utilizador, permitindo o tratamento dos dados provenientes do computador de forma a serem transformados em informação reconhecida pelos equipamentos mecânicos, ou seja impulsos elétricos;
3. Equipamento mecânico – constituído por um sistema que visa o suporte e posicionamento do injetor, deposição de material seco e injeção de água.

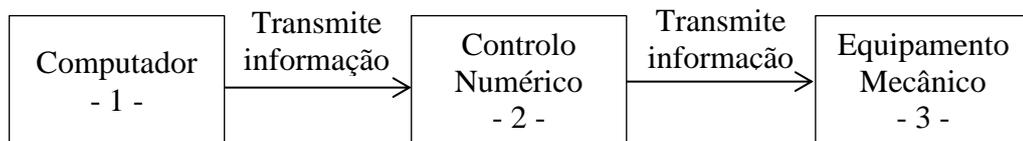


Figura 3.8 – Representação esquemática dos elementos constituintes do equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas de cimento

Na Figura 3.9 é possível observar o equipamento protótipo construído, indicando-se as seções onde serão descritos os subsistemas. Assim, nas secções que se seguem será descrito o desenvolvimento da impressora, com descrição detalhada das suas componentes. Será dada especial atenção às diferenças entre o protótipo realizado e a idealização anteriormente

apresentada, que não se considera porem em causa o propósito de prova de conceito em questão.

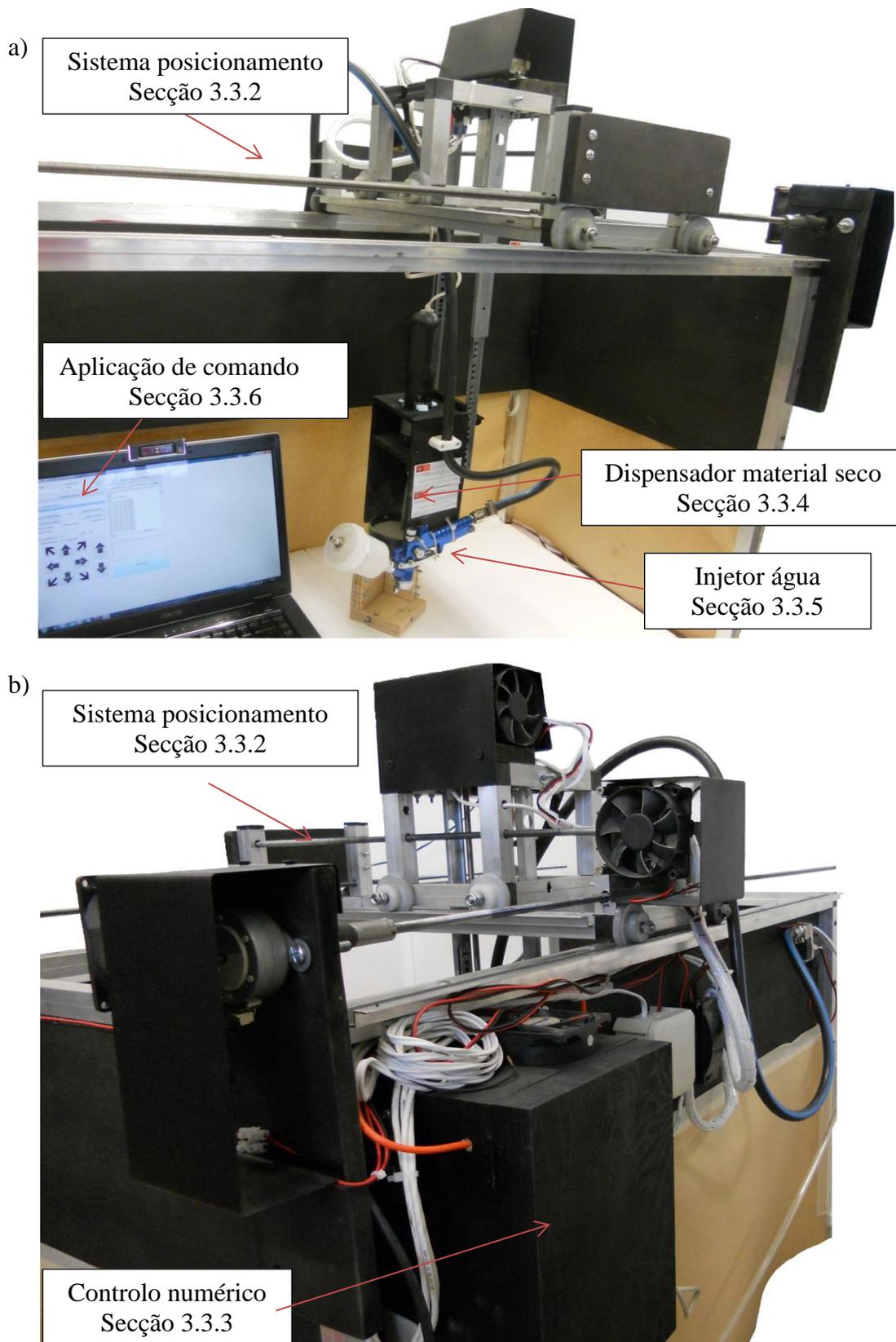


Figura 3.9 – Foto protótipo: a) vista de frente; b) vista de trás

3.3.2 Sistema de suporte e posicionamento

Para o desenvolvimento do sistema de posicionamento foi necessário primeiramente quantificar a janela de impressão. Como se trata de um equipamento protótipo de escala reduzida, definiu-se um campo de impressão compatível com a produção de objetos em argamassa para eventuais ensaios mecânicos em flexão: 1.00 m × 0.40 m em planta, com altura de 0.3 m.

Para assegurar a área de trabalho pretendida foi projetado e construído um sistema composto por elementos mecânicos, que asseguram o posicionamento tridimensional do injetor (eixos X, Y e Z) dentro dos limites do correspondente sistema de suporte - ver Figura 3.10.

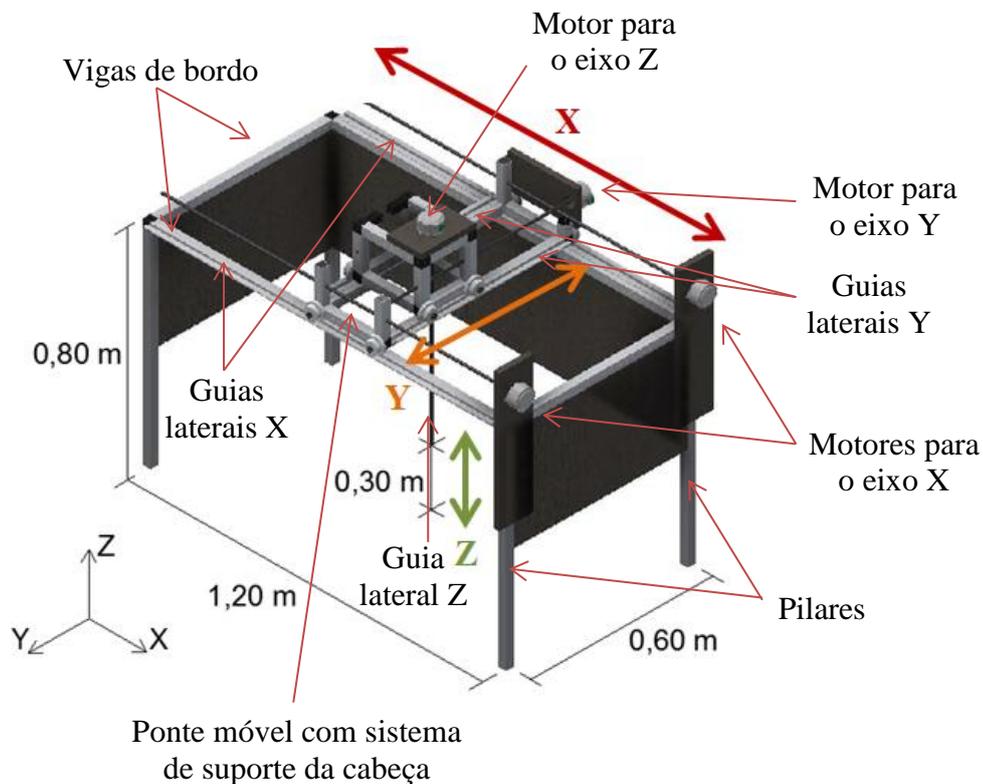


Figura 3.10 – Representação esquemática das componentes dos sistemas de suporte e posicionamento

Para eliminar a possibilidade de estragos no elemento a fabricar por parte do equipamento mecânico, dimensionou-se todo o sistema de posicionamento ao nível superior. Assim, construiu-se um sistema de suporte constituído por quatro pilares que se erguem a uma altura de 0.80 m (superior à altura máxima da janela de impressão para acomodar o injetor,

aproximadamente 0,50 m), que por sua vez se encontram conectados por vigas de bordo, permitindo deste modo obter uma área livre de movimentação para o injetor – ver Figura 3.10.

Interligado com o sistema de suporte, o sistema de posicionamento promove a movimentação da cabeça injetora ao longo do eixo X (ver definição dos eixos na Figura 3.10) através de guias laterais superiores, na qual se apoia uma estrutura análoga a ponte móvel que contém guias para movimentação na direção Y. Apoiado nestas últimas guias está o sistema de suporte da cabeça injetora que a suspende e movimenta ao longo do eixo Z. Relativamente à motorização necessária, salienta-se a utilização de dois motores para o eixo do X, uma vez que é ao longo desta direção que o sistema de posicionamento dos eixos Y e Z e de injeção se movimentam, existindo uma grande massa para deslocar, um motor para o movimento no eixo Y e outro para o eixo Z. Os motores de passo utilizados neste protótipo para assegurar a movimentação foram PM55L-048-HPA7 (NMB, 2010) - ver Figura 3.11



Figura 3.11 – Modelo motor de passo utilizado no protótipo: PM55L-048-HPA7 (NMB, 2010)

De modo a dotar o sistema de movimento utilizaram-se varões roscados ligados aos motores e à estrutura de suporte que pretendem deslocar, ocorrendo o movimento através da existência de roscas que oferecem reação à rotação do varão, promovendo a movimentação dos elementos que se pretende deslocar através da transformação do movimento de rotação (promovido pelos motores) em translação (obtido através das roscas existentes nos elementos que se pretende deslocar e dos varões que efetuam efetivamente a transferência de movimento) - ver Figura 3.12. Salienta-se que o sistema de posicionamento permite que a cabeça de injeção se movimente em todos os eixos (X, Y e Z) numa velocidade que se cifra em 5 mm/s.

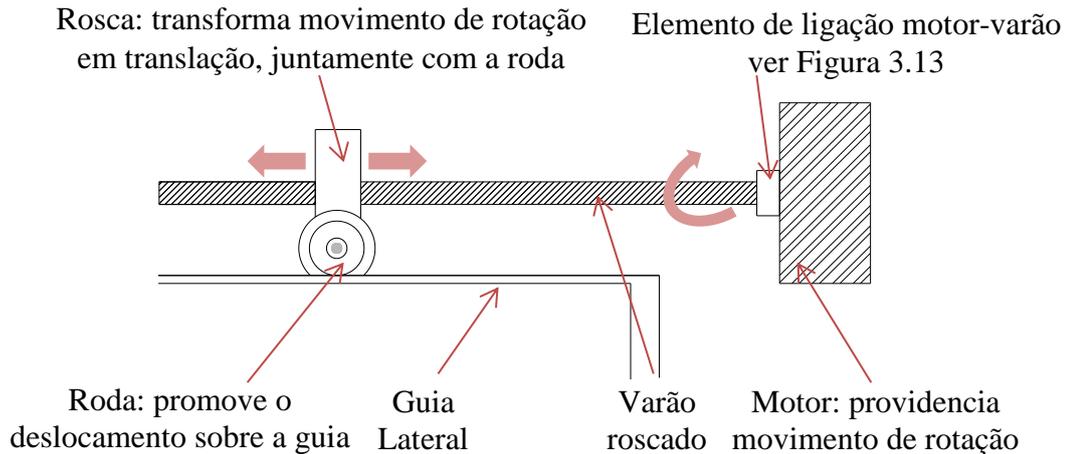


Figura 3.12 – Esquema representativo do funcionamento do processo de movimentação dos elementos sobre os eixos

Um dos elementos constituintes do sistema de posicionamento diz respeito aos elementos que têm como função transmitir a rotação promovida pelos motores para os varões. Inicialmente considerou-se uma ligação rígida, através de um conector que ligava diretamente o motor ao varão, contudo verificou-se constantemente a rotura desta ligação devido às vibrações ocorridas nos próprios varões. De modo a dissipar a energia de vibração do sistema, optou-se pela utilização de uma junta de ligação com propriedades flexíveis, Figura 3.13. Para tal, colocou-se um elemento de borracha macia ligado ao varão e ao motor através de conectores rígidos. Esta solução mostrou-se ser bastante eficiente, não ocorrendo a rotura da junta.

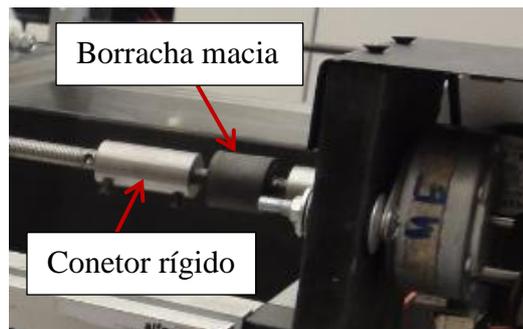


Figura 3.13 – Fotografia da junta de ligação varão roscado/motor flexível

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 encontra-se discriminado respetivamente o material utilizado para a construção do sistema de posicionamento e de suporte, cuja numeração dos elementos se pode observar na Figura 3.14.

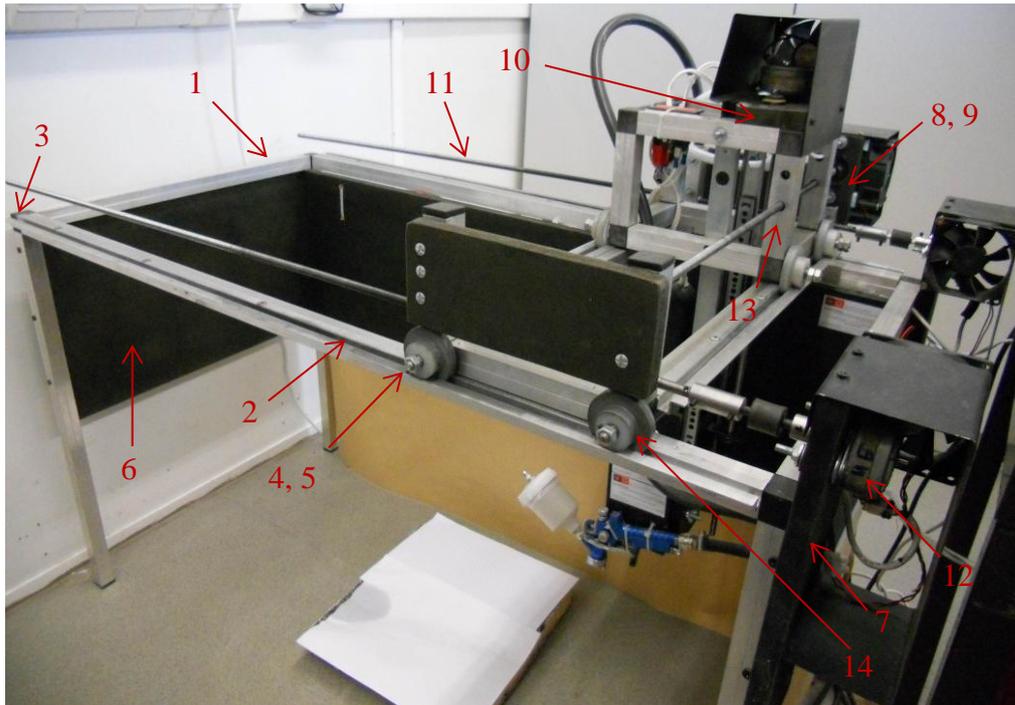


Figura 3.14 – Sistemas de suporte e posicionamento concebidos

Tabela 3.1 – Material utilizado para a construção do sistema de posicionamento

Numeração na Figura 3.11	Figura	Descrição	Quantidade (Unidades)
11		Fuso roscado M8 1000 mm	3
12		Motor NMB PL55M-048	4
13		Pinos / Rosca M8	3
14		Rodas de Náilon 40mm diâmetro	8

Tabela 3.2 – Material utilizado para a construção do sistema de suporte

Numeração na Figura 3.11	Figura	Descrição	Quantidade (Unidades)
1		Barra quadrada 23,5x23,5x1,5 1200 mm	4
2		Calha U 2 abas 31,5x11,5x1,5 1000 mm	3
3		Junta de 3 Pinos Alfer Aluminium	16
4		Porca M8	8
5		Anilhas M8	8
6		Tábua 1000x300x16 mm	3
7		Suporte Motor X 400x100x16 mm	2
8		Suporte motor Y 197x70x16 mm	1
9		Suporte motor Y 210x80x16 mm	1
10		Suporte motor Z 157x100x16 mm	1

3.3.3 Controlo numérico computadorizado

O controlador tem como função transmitir aos mecanismos os pontos traçados computacionalmente que permitirão a fabricação das peças, através de impulsos elétricos. Verificando-se a necessidade de conhecimentos específicos nas áreas de eletrónica e informática aplicada à eletrónica, despoletou-se uma iniciativa conjunta entre os Departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Mecatrónica da Universidade do Minho, apresentando-se nesta subsecção os procedimentos de funcionamento base do equipamento desenvolvido, ressaltando-se a consulta da bibliografia para um aprofundamento dos conhecimentos relativamente ao controlo (Pereira, 2012).

Na Figura 3.15 encontra-se um esquema do processo de funcionamento, do ponto de vista do utilizador, do controlo numérico desenvolvido.

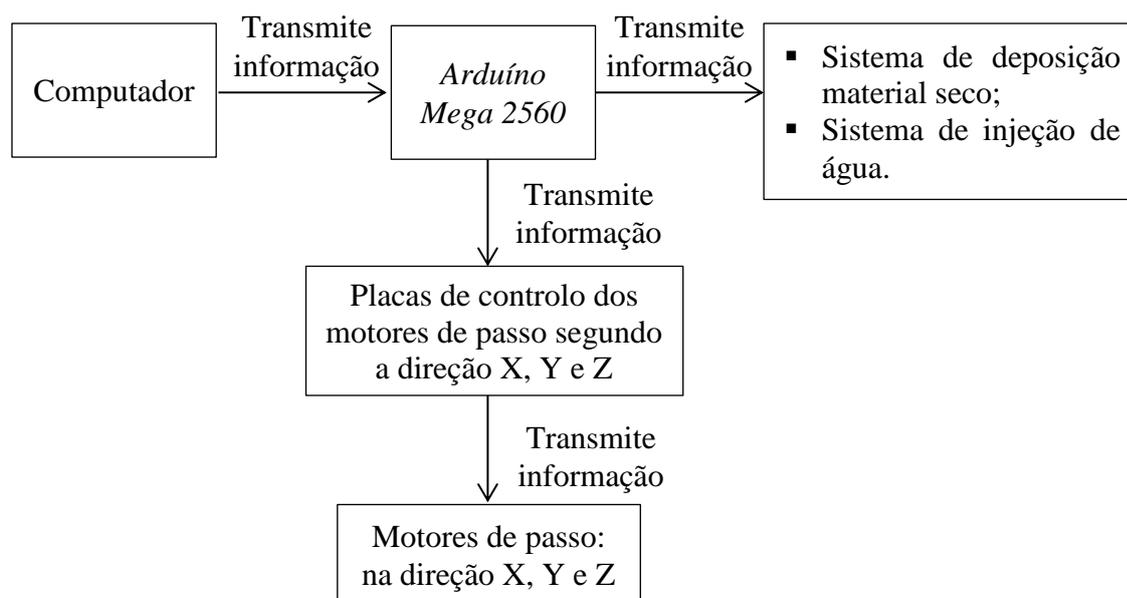


Figura 3.15 – Representação esquemática do processo de funcionamento do controlo numérico desenvolvido

O computador transmite informação à placa *Arduíno Mega 2560* (2011) primeiro componente do controlador a receber informação, que consiste numa placa com um microcontrolador embutido capaz de interpretar linguagens de programação dedicadas baseadas em C e C++, cujo objetivo prende-se com a criação de impulsos elétricos capazes de acionar os sistemas eletrónicos dos motores e dos sistemas de injeção de água e de deposição de material seco. Para pôr em funcionamento os motores de passo é necessário ainda uma placa de controlo

para cada motor, com o intuito de através da receção dos impulsos elétricos gerados pela placa *Arduíno Mega 2560* (2011) acionar a passagem da corrente necessária para que os motores trabalhem (corrente proveniente de uma fonte de alimentação, uma vez que o computador não tem capacidade de fornecimento da potencia necessária) bem como possibilitar a inversão de rotação nos motores. Para mais informação sobre as placas de controlo recomenda-se a consulta da referência (Pereira, 2012). Relativamente aos sistemas de deposição e injeção, não necessitam de placas de controlo, a placa *Arduíno Mega 2560* (2011) por si só consegue estabelecer o controlo dos mesmos dada a simplicidade dos sistemas: ligar e desligar.

Na Figura 3.16 pode-se observar o controlo numérico implementado no equipamento protótipo de impressão 3D, salientando-se os seguintes pontos:

- A placa *Arduíno Mega 2560* (2011) liga-se ao computador por via de uma porta USB;
- As placas de controlo dos motores de passo contêm um indicador LED de luz de coloração verde que indica, quando ligado, o correto funcionamento das mesmas;
- As placas de controlo contêm um potenciómetro ajustável que permite ao utilizador controlar a corrente que é aplicada aos motores, ou seja, permite a regulação da força que se pretenda que estes transmitam aquando da rotação;
- As placas de controlo são alimentadas por uma fonte tradicional de computador de 24 V.

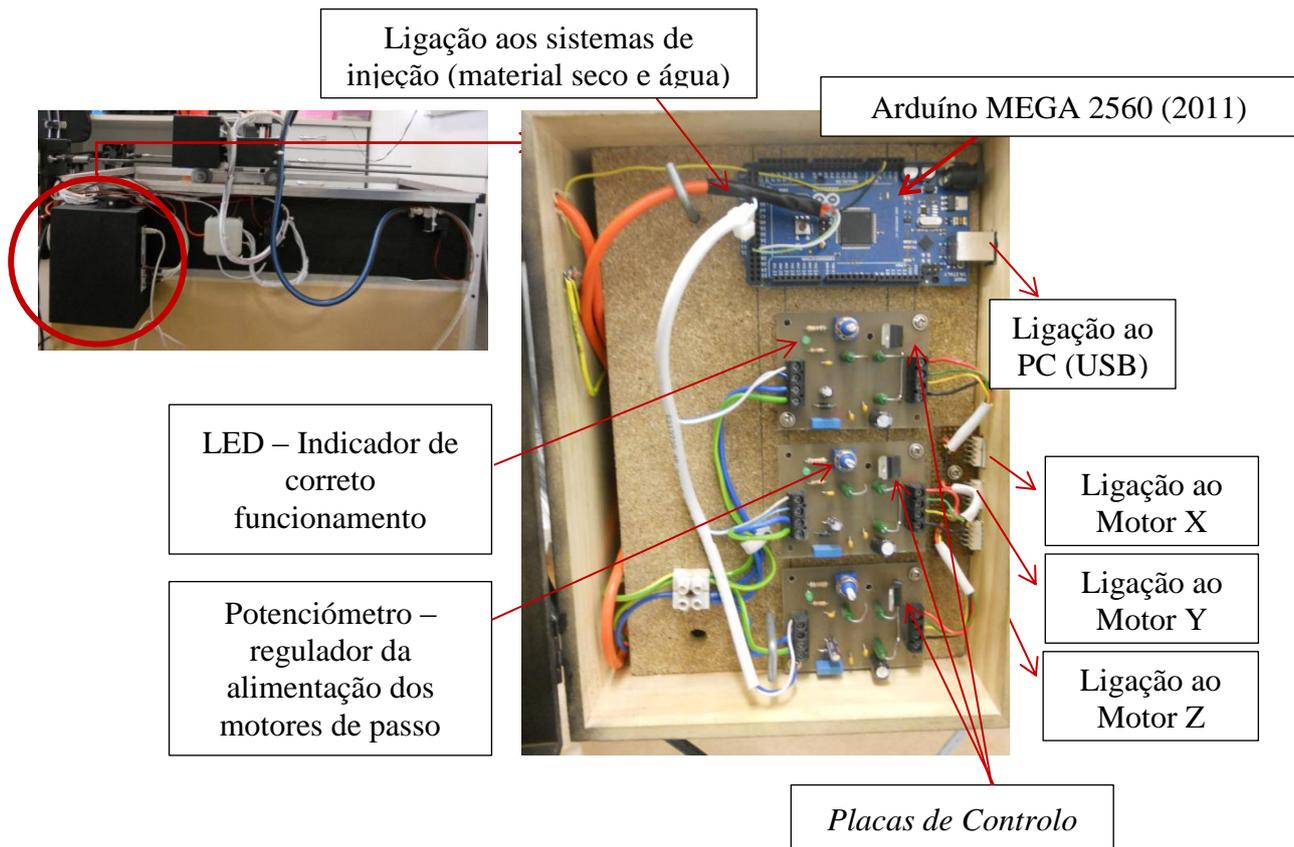


Figura 3.16 – Fotografia do controlo numérico desenvolvido

3.3.4 Dispensador de material seco (cimento e areia)

Dada a fase inicial de desenvolvimento do equipamento protótipo, cujo objetivo essencial é a avaliação da exequibilidade da técnica, optou-se pela utilização de um dispensador no qual é já pré-colocada a mistura homogénea de materiais secos, relegando-se o dispensador que permita misturas arbitrárias entre a areia e o cimento para desenvolvimentos futuros da metodologia.

O desafio inicial centrou-se no modo de conseguir transportar e depositar a mistura seca de areia e cimento, evitando o bloqueio do sistema devido a aglomerações de material. Tendo como referência os princípios subjacentes à técnica do betão projetado por via seca, idealizou-se a solução esquematizada na Figura 3.17. Como principais diferenças face ao betão projetado destacam-se: utilização de uma pressão mínima que possibilitou o deslocamento das partículas da mistura, valor que se cifrou em 1 bar, diminuto comparativamente com o valor mínimo necessário para o correto funcionamento do sistema de betão projetado, 7 bar (ACI, 1995); e inclusão de uma membrana de borracha que possibilite a retenção do ar aquando da deposição do material seco de modo a que não ocorra espalhamento do mesmo.

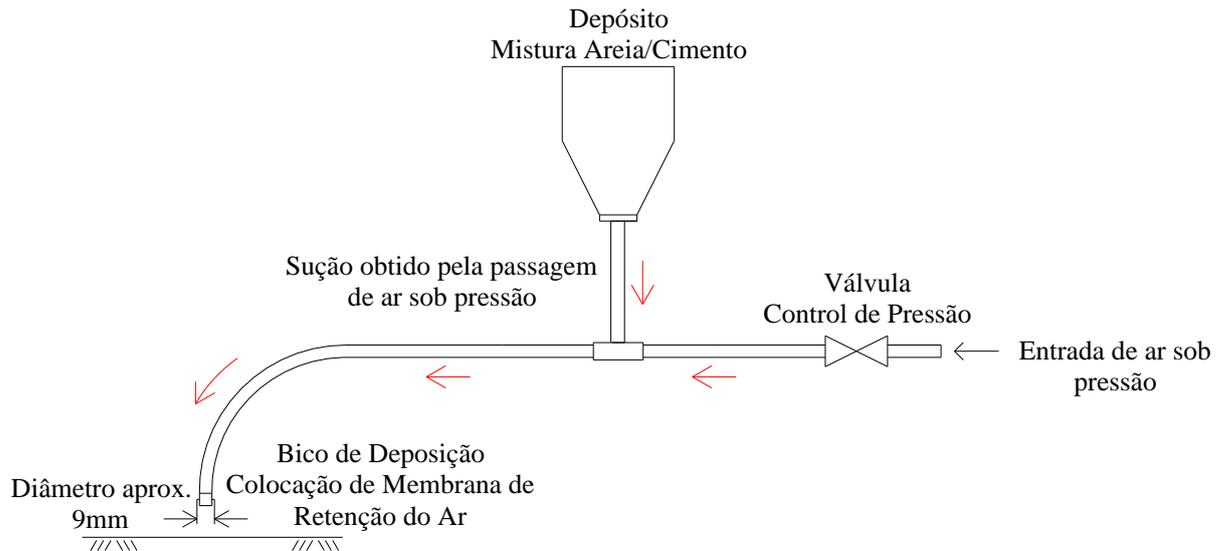


Figura 3.17 – Dispensador de material seco: idealização com base no betão projetado por via seca

Concebido o dispensador protótipo verificaram-se os seguintes aspetos:

- Ocorrência contante de bloqueamentos nas tubagens devido à aglomeração do material seco;
- A razão dos componentes da mistura depositados não se mantém constante no momento de deposição do material;
- No bocal a saída de material seco conjuntamente com ar, provoca danos no material já depositado, mesmo considerando a pressão mínima que permite o deslocamento do material pelas tubagens.

Tendo em conta as dificuldades encontradas, foi feita uma reavaliação conceptual do dispensador, tendo-se optado por uma filosofia distinta baseada nas tecnologias de transporte de cimento a partir de silos para o fabrico de betão, em que o encaminhamento do cimento dos silos de armazenamento para o local de mistura com os restantes agregados ocorre por meio de um parafuso de Arquimedes, conforme ilustrado na Figura 3.18 (Sousa Coutinho, 1966).



Figura 3.18 – Central de betão: destaque para o transporte dos componentes através do parafuso de Arquimedes (Sousa Coutinho, 1966)

Foi então desenvolvido um dispensador-teste, representado na Figura 3.19, para verificação da extrapolação do conceito, que consiste num funil dentro do qual está pré-colocada a mistura seca de cimento e areia. No interior do funil está um parafuso de Arquimedes, cuja rotação controlada permite o controlo da velocidade de deposição da mistura. O bico de deposição utilizado tem diâmetro de 9 mm. Refira-se que na parte do parafuso que fica em contacto com o material armazenado no funil foram colocadas peças acessórias perpendicularmente ao mesmo para garantir a movimentação da mistura de material durante o processo de rotação do parafuso e facilitar a sua progressão da direção da boca do funil – ver Figura 3.19.

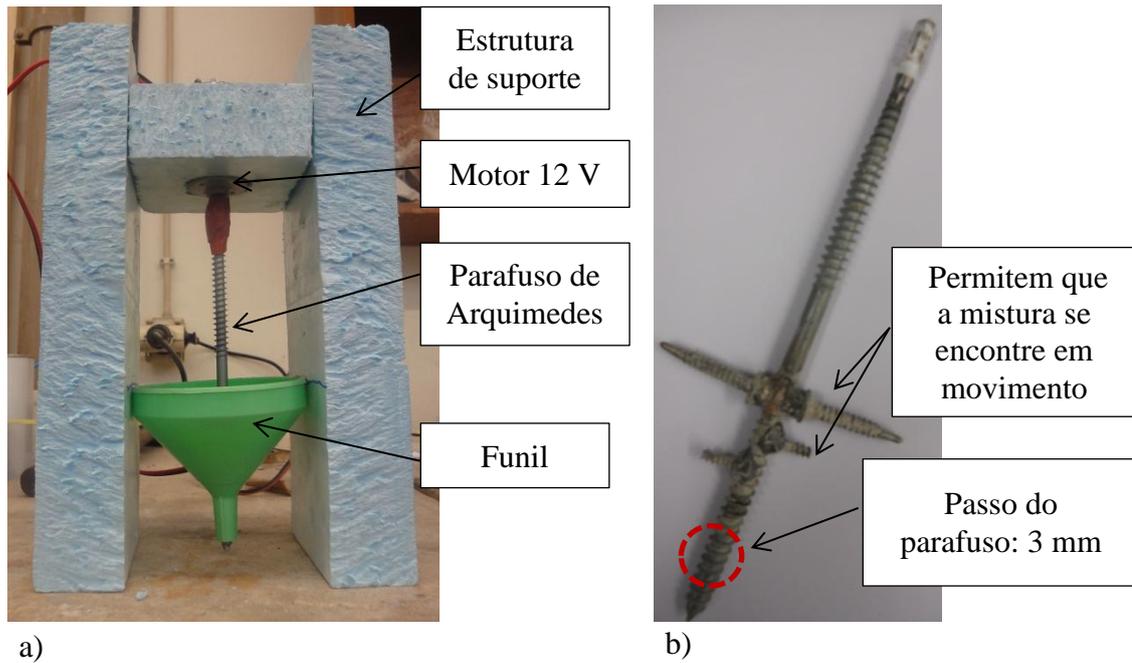


Figura 3.19 – Dispensador protótipo de material seco: a) vista geral; b) parafuso de Arquimedes utilizado

Concebido o dispensador protótipo com base nos princípios do parafuso de Arquimedes, verificaram-se os seguintes aspetos para a solução concebida:

- Para ocorrer deposição do material, a rotação tem que ocorrer no sentido anti-horário, para que o material, por reação dos passos do parafuso, seja impulsionado na direção descendente;
- A rotação do parafuso de Arquimedes para que não ocorra espalhamento do material seco cifra-se em 0,8 Hz;
- O funil deve distanciar-se da superfície de aplicação aproximadamente 10 mm;
- Dado o passo de 3 mm do parafuso do Arquimedes, o funcionamento do sistema só se revela adequado para granulometrias com máxima dimensão abaixo de 1 mm;
- O parafuso deve conter elementos perpendiculares a este com o intuito de prover movimento à mistura;
- Respeitando as condições dos pontos anteriores, pode-se observar que esta tipologia de transporte e aplicação da mistura preenche os requisitos inerentes à metodologia proposta na seção 3.2.2.

Na Figura 3.20 apresenta-se o dispensador de material seco construído para o equipamento protótipo de impressão 3D, devidamente caracterizado geometricamente. Salienta-se que todas as características ao nível da velocidade e sentido de rotação do motor, distâncias de deposição e afastamento entre os passos do parafuso de Arquimedes se mantiveram face ao dispensador protótipo. Como nota indica-se que o sistema de deposição desenvolvido é capaz de depositar uma faixa de material seco com uma largura de aproximadamente 9mm e 3mm de espessura, cujos valores poderam ser influenciados pela velocidade de rotação e pela distancia do bico de deposição à superfície.

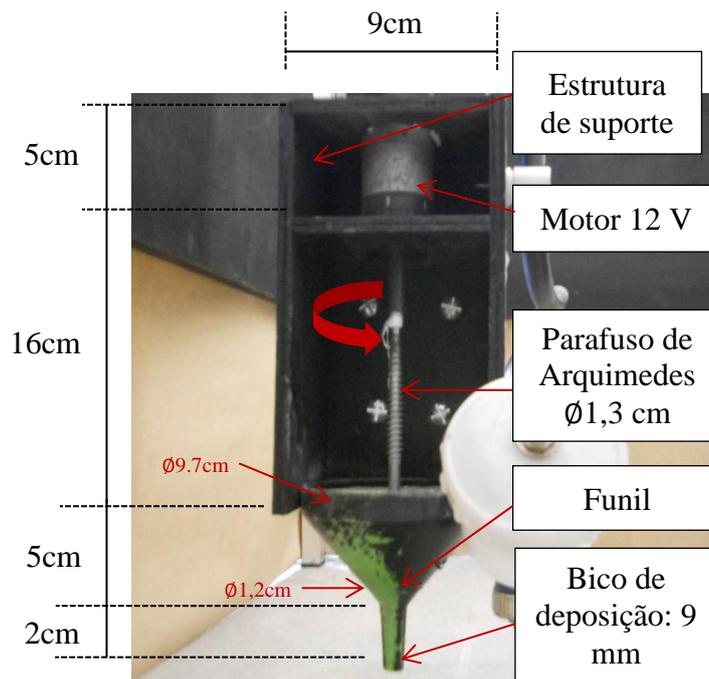


Figura 3.20 – Dispensador material seco construído para o equipamento protótipo de impressão 3D

De modo a integrar o dispensador no equipamento de impressão e permitir o seu acionamento automático aquando da produção de um elemento, desenvolveu-se um sistema esquematizado na Figura 3.21.

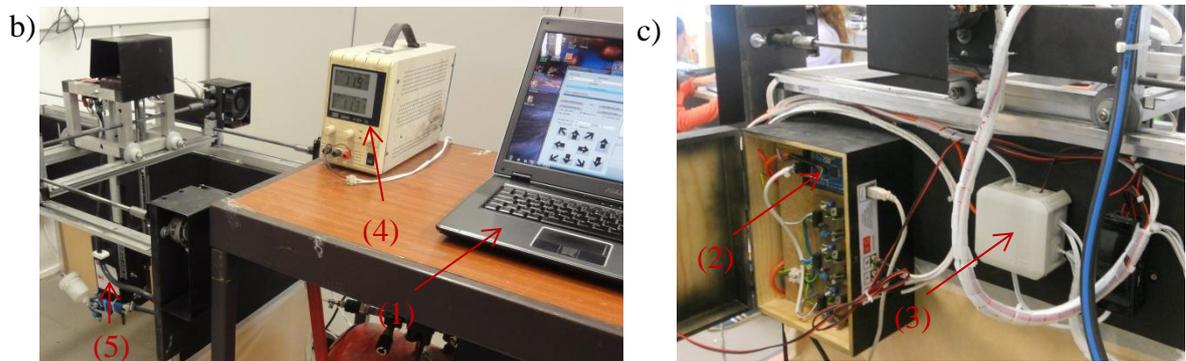
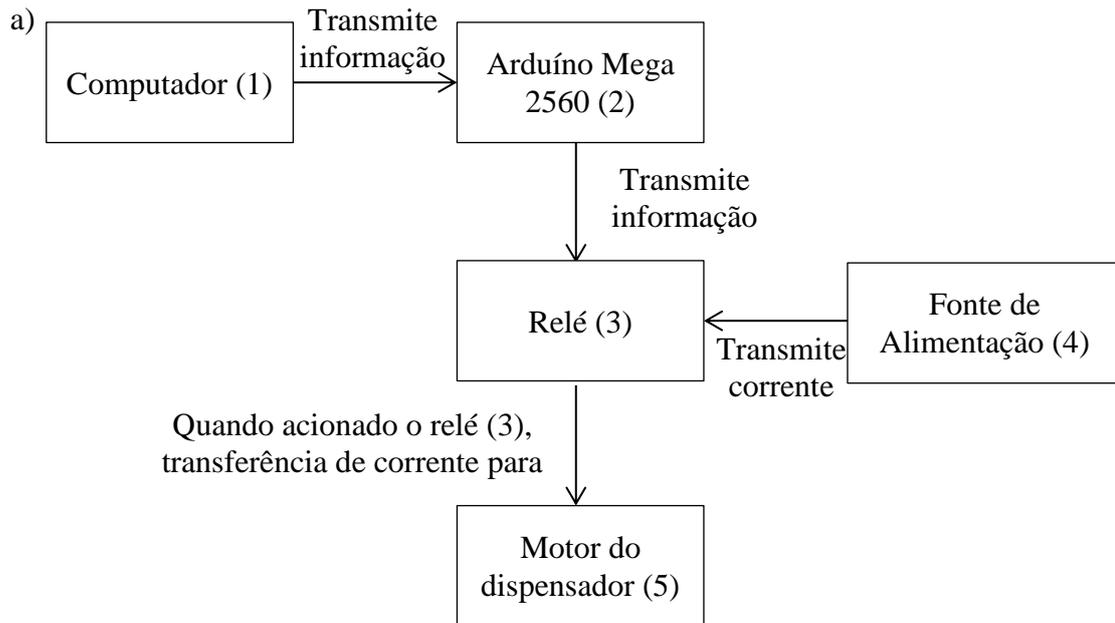


Figura 3.21 – Sistema que permite controlo automático do dispensador: a) esquema; b) foto - vista de frente; c) foto - vista de trás

3.3.5 Injetor de água

Uma primeira tentativa de desenvolvimento de um sistema de injeção de água no material seco depositado consistiu na aplicação do conceito do betão projetado por via seca ao dispensador apresentado na seção 3.3.4. Para esse efeito, colocaram-se duas agulhas, frente a frente, afastadas cerca de 3 mm do bico de deposição, que injetaram água (sob pressão) no material seco, molhando-o antes de este atingir a superfície de deposição, dispostas de acordo com a Figura 3.22.

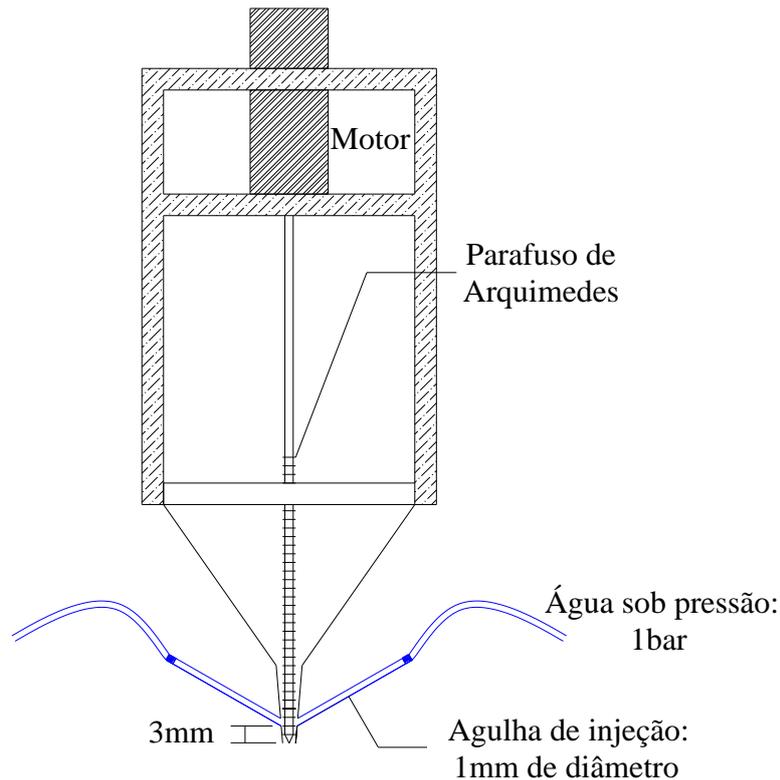


Figura 3.22 – Sistema injeção de água: baseado no betão projetado por via seca

Concebido e aplicado o protótipo do sistema de injeção de água ao sistema dispensador, verificaram-se os seguintes aspetos:

- Parte da água era sugada no sentido ascendente para a zona de funil de armazenamento, molhando a mistura e bloqueando deste modo o próprio dispensador de material seco;
- Após várias tentativas - alterando a pressão de injeção da água, a altura e inclinação das agulhas face ao bico de deposição – destacaram-se sempre dois problemas: a mistura deposta não se encontrava totalmente molhada e existia sempre deposição de água sobre a argamassa já deposta.

Então, para que a injeção de água ocorresse de forma controlada, e para obviar perturbações da deposição dos componentes secos associada à deposição da água, recorreu-se a uma pistola de projeção, representada na Fig. 3.23. A pistola de projeção está fisicamente ligada ao sistema de injeção de material seco, sendo posicionada e ativada em instantes distintos de acordo com o processo descrito em 3.2.2.

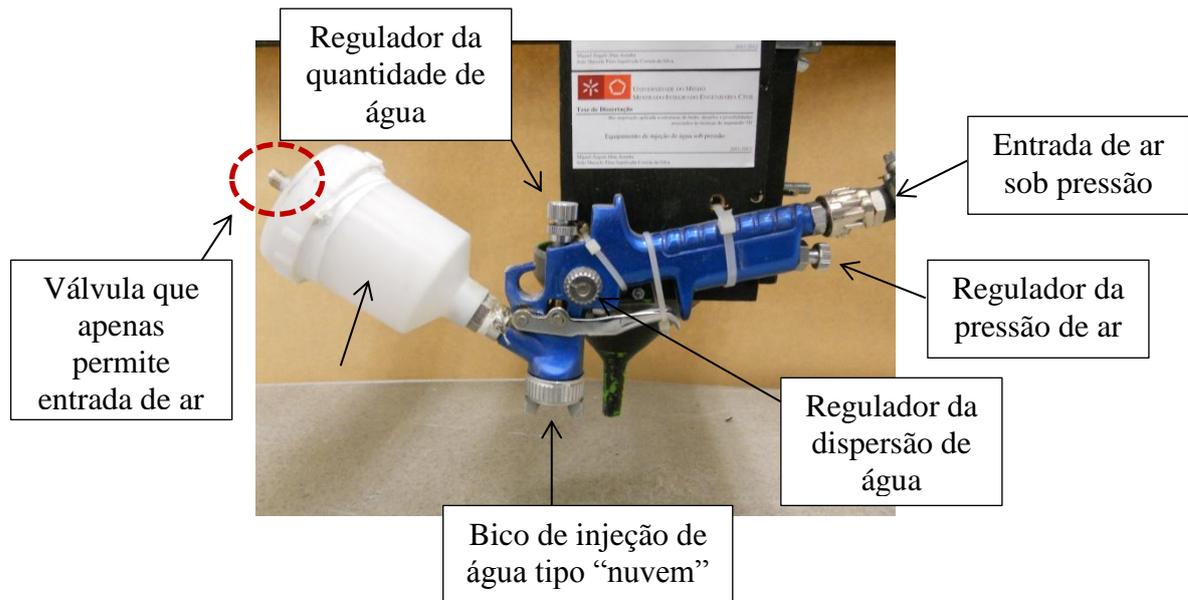


Figura 3.23 – Sistema injeção de água: pistola de projeção

Concebido o sistema de injeção de água, utilizando uma pistola de projeção de baixa pressão, verificaram-se os seguintes aspetos:

- Deposição de água sobre a camada de material seco depositado sob a forma de uma “nuvem” de pequenas gotículas de água, aproximando-se deste modo do objetivo proposto na metodologia apresentada na secção 3.2.2 de se obter um espalhamento homogéneo de água;
- Para que a deposição de água ocorra sob a forma descrita no item anterior o valor da pressão deve estar compreendido no intervalo de 2 a 4 bar (introdução de ar sob pressão através de um compressor);
- Existência de comandos manuais reguláveis que permitem o ajustamento da pressão do ar, do alcance da dispersão da água e da quantidade de água a injetar;
- Para que o sistema funcione autonomamente, a pistola encontra-se sempre “aberta”, logo ocorre entrada de ar, pelo bico de saída da água, que se deslocará para o reservatório provocando o escorrimento da água, mesmo quando não existe ar sob pressão. Para que tal não ocorra, introduziu-se uma válvula que apenas permite a entrada de ar no reservatório. Desde modo, a água do reservatório, ao ser sugada para ser depositada, ativa, por sucção, a válvula que preenche com ar o vazio deixado pela água depositada e evita as perdas de água do reservatório que destruiriam a camada de material seco previamente depositado.

Através da associação deste sistema de injeção a electroválvulas, pode-se controlar eficazmente a pressão e o caudal de deposição da água, o que permite já na presente fase de desenvolvimento fazer distribuições de água de forma não uniforme nas peças fabricadas. Na Figura 3.24 encontra-se o organigrama do sistema que permite o controlo automático da pistola de projecção.

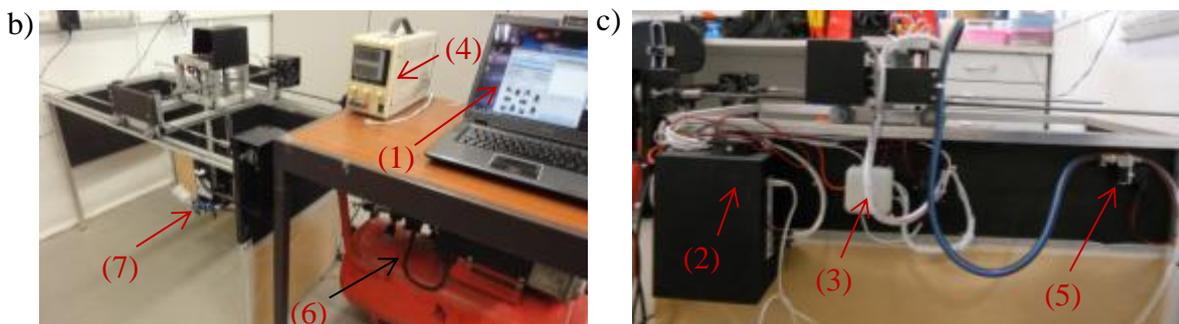
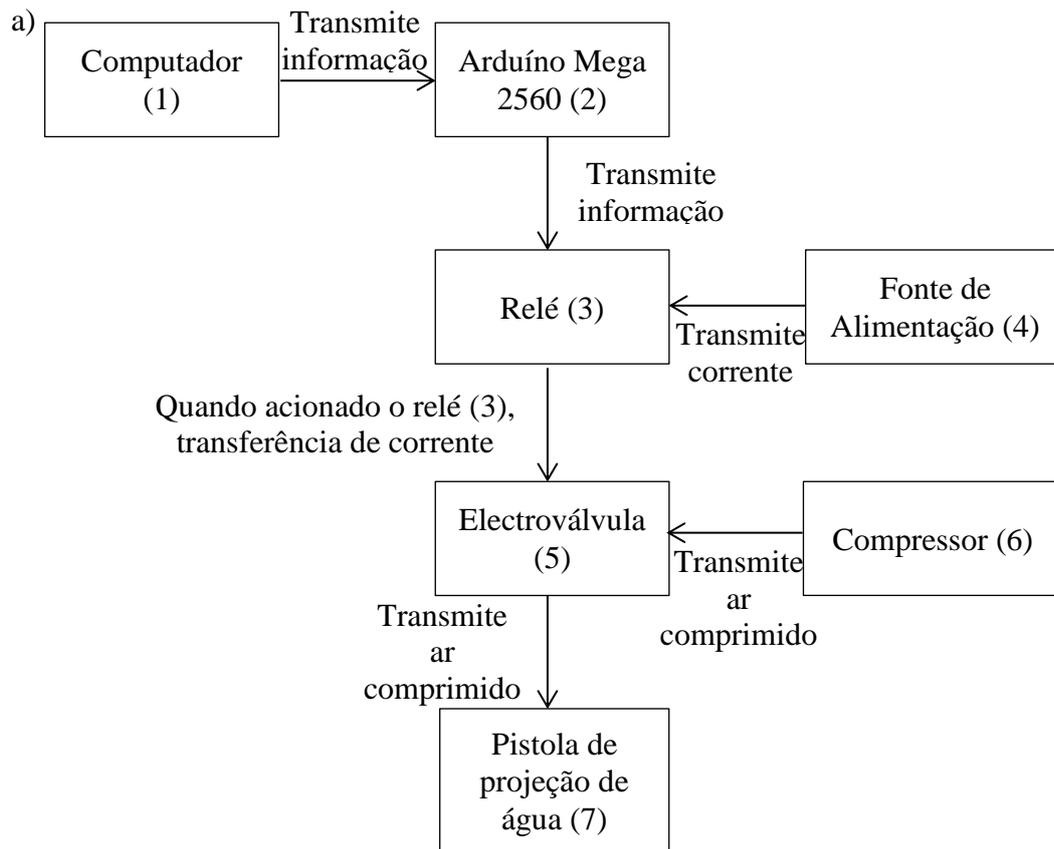


Figura 3.24 – Sistema que permite controlo automático do injetor de água: a) esquema; b) foto-vista de frente; c) foto-vista de trás

3.3.6 Aplicação para comando

No sentido de se controlar computacionalmente o sistema de posicionamento, o dispensador e o injetor, desenvolveu-se conjuntamente com o departamento de Engenharia Mecatrônica um programa executável capaz de controlar e de reproduzir automaticamente comandos introduzidos na forma de texto (ficheiro.txt), designado por UminhoCNC.exe (Pereira, 2012), utilizou-se linguagem de programação C#, através do Visual Studio 2012[®] da Microsoft[®]. O programa desenvolvido comunica com o equipamento protótipo a partir da placa Arduino Mega 2560 (2011), fazendo com que este execute os procedimentos necessários para a produção de um determinado elemento. Na Figura 3.25 pode-se observar a janela de comandos com a qual o utilizador pode interagir, bem como a especificação das funcionalidades disponíveis.

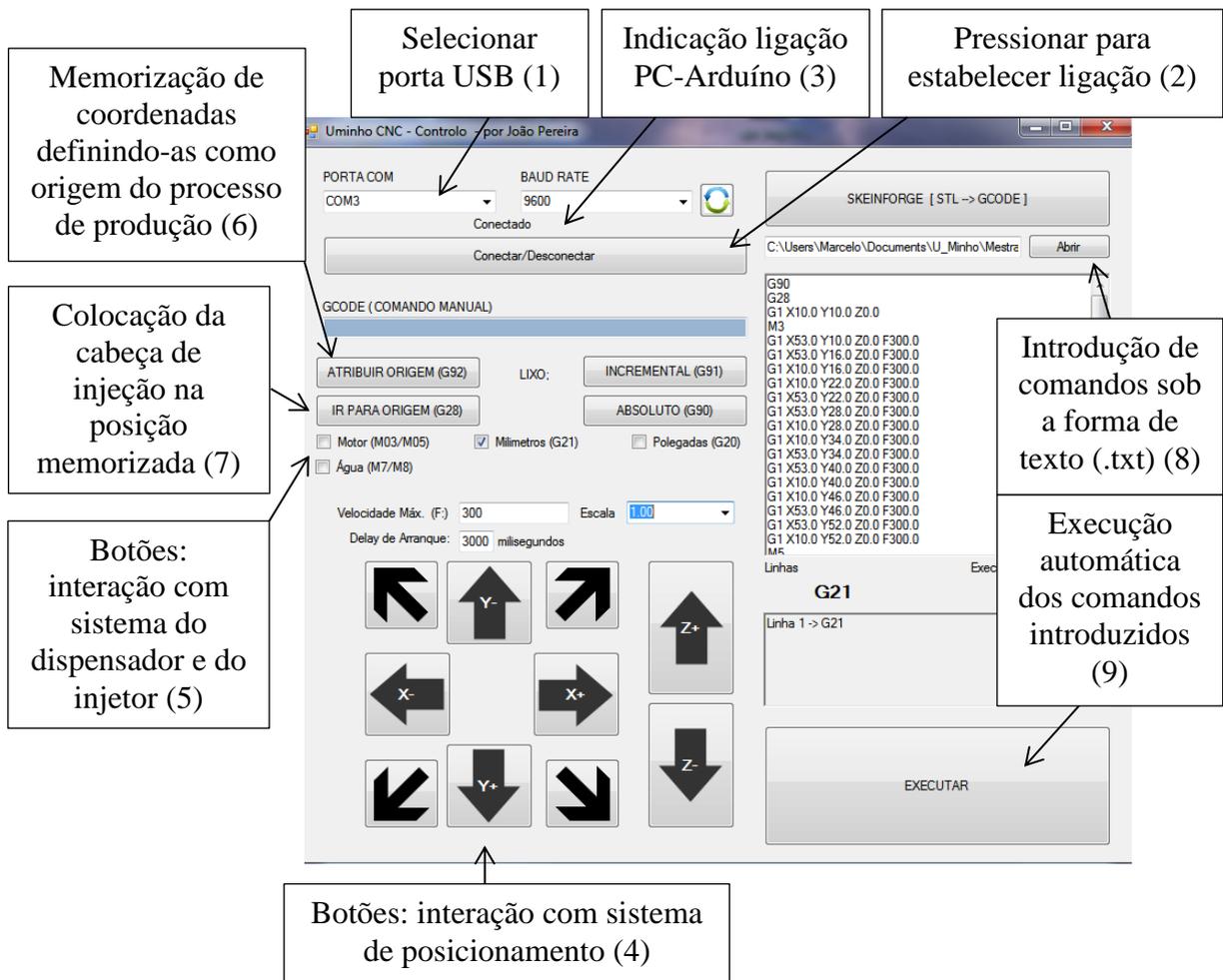


Figura 3.25 – Janela de comandos disponibilizada pelo programa de comando

Nos pontos que se seguem indica-se o procedimento a adotar pelo utilizador para ligar o computador ao equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas, assim como o modo de interagir com os sistemas que a compõe.

1. Após a execução do programa UminhoCNC.exe, selecionar no campo (1) a porta USB onde se pretende estabelecer a ligação;
2. Pressionar o campo (2) para que o computador estabeleça contato com a placa Arduíno Mega 2560 (2011). Se a ligação tiver sido estabelecida, no campo (3) é indicado com o aparecimento da palavra **Conectado**;
3. Uma vez estabelecida a conexão entre o computador e a Arduíno, deve-se ligar as placas de controlo dos motores de passo. Para tal basta pressionar o botão que se encontra na caixa referente ao controlo numérico e verificar se os indicadores LED se encontram na coloração verde (indicando correto funcionamento do controlo) - Figura 3.26 a). Deve-se também ligar a fonte de alimentação (calibrando-a em 12 V) dos sistemas que englobam o grupo injetor - Figura 3.26 b);
4. Interagir com o equipamento pressionando os botões indicados no campo (4) e (5), respetivamente o sistema de posicionamento do grupo injetor e do sistema do dispensador e da injeção de água;
5. Como comandos adicionais há que referir a existência de um botão, (6), que permite memorizar um determinado conjunto de coordenadas X, Y e Z estabelecendo-o como ponto de origem para o início de produção de um determinado elemento. Complementarmente existe um botão, (7), que permite ao utilizador fazer regressar o grupo injetor à posição memorizada como origem;
6. Para executar um determinado conjunto de comandos, deve-se introduzir o ficheiro de texto através do campo (8), pressionando de seguida o botão (9) para que o equipamento inicie as indicações existentes nos comandos.

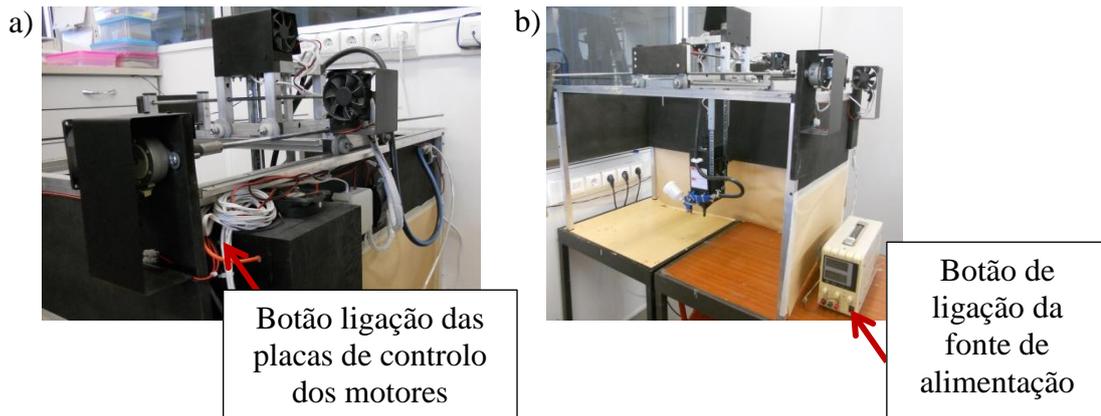


Figura 3.26 – Procedimento de ligação: a) placas de controlo dos motores; b) fonte de alimentação

Para se proceder à criação de um ficheiro de comandos passível de ser executado pelo programa desenvolvido é necessário o conhecimento dos seguintes parâmetros concebidos através da linguagem G-CODE, ISO 6983 (2009):

- G92 – Atribuição da origem (memorização de uma posição X, Y e Z);
- G90 – Posicionamento ocorre de forma incremental;
- G28 – Parâmetro que induz o grupo injetor a regressar ao ponto definido como origem;
- M03 – Liga o sistema de deposição de material seco;
- M05 – Desliga o sistema de deposição de material seco;
- M07 – Liga o sistema de injeção de água;
- M08 – Desliga o sistema de injeção de água;
- F000 – Parâmetro que permite a introdução da velocidade, salientando-se para a segurança do equipamento que não deve ultrapassar o valor de 300, que tal como referido na secção 3.3.2 permite que o sistema de posicionamento se movimento em todos os eixos com uma velocidade de 5 mm/s;
- Para que o sistema de posicionamento se desloque para um determinado ponto, deve introduzir a seguinte linha: G1 X000 Y000 Z000 F000. Salienta-se que o programa encontra-se desenvolvido para unidades de deslocamento em milímetros.

3.3.7 Procedimento

As várias fases de produção de peças com o sistema desenvolvido estão representadas na Figura 3.27, seguindo genericamente a idealização definida na secção 3.2.2, com as

concretizações indicadas na secção 3.3. No entanto, há que ressaltar algumas diferenças adicionais no procedimento de produção relativamente à idealização apresentada:

- Em primeiro lugar, dada a intenção de produzir pequenos provetes com $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ para os ensaios preliminares no contexto desta dissertação, optou-se por utilizar esteiras de confinamento lateral com dimensão em planta de $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (ver Figura 3.27 a)), ficando dispensada a necessidade de imprimir partes da zona de trabalho apenas com areia;
- Por outro lado, em vez de se efetuar deslizamento vertical da esteira para elaboração de camadas subsequentes, optou-se por utilizar uma cofragem lateral modular em madeira impermeabilizada com vários níveis (ver Figura 3.27 a)), onde se pode observar o primeiro nível dessa cofragem com 1.25 cm de altura);
- Finalmente, no que diz respeito ao processo de compactação, foram utilizadas cargas estáticas aplicadas de forma manual com recurso a pesos sobre peça de interface indentada, conforme indicado na Figura 3.27 g,h) (uma operação de compactação efetuada a cada 5 camadas de deposição consecutivas). A indentação teve como objetivo a promoção de melhor ligação entre camadas compactadas consecutivamente.

Nos seguintes itens, apresenta-se de forma sequencial o procedimento adotado para a produção de uma peça em argamassa de cimento (recomenda-se a observação paralela da Figura 3.27):

1. Após o estabelecimento da ligação do equipamento protótipo com o computador (procedimento que se encontra descrito na seção 3.3.6), carregar o funil com a mistura de material seco com que se pretende efetuar o elemento, assim como colocar água no reservatório da pistola de baixa pressão;
2. Posicionamento do grupo injetor no ponto onde se pretende iniciar a produção do elemento - Figura 3.27 a). Importa realçar que a cofragem apenas apresenta um módulo, uma vez que se trata do início da produção. À medida que o elemento for crescendo os módulos seguintes devem ser acrescentados;
3. Pré-deposição de água sobre a cofragem - Figura 3.27 b) - para garantir melhor deposição da primeira camada de material seco;
4. Deposição primeira camada de material seco - Figura 3.27 c) - segundo o percurso indicado na Figura 3.27 d);

5. No final da deposição da camada de material seco, injeção de água a uma distância compreendida entre os 8 a 10 cm da camada depositada durante 4 segundos, salientando-se que o bico da pistola de projeção encontra-se centrado no provete – ver Figura 3.27 e). Para mais informações relativas à injeção de água recomenda-se a leitura da seção 4.3.2 da presente dissertação;
6. Deposição da segunda camada de material seco, no sentido perpendicular face à camada anterior - Figura 3.27 f) e g);
7. No final do processo de produção de cada cinco camadas, aplicação de compactação através de um elemento indentado - Figura 3.27 h) - por intermédio de um peso pré-determinado durante trinta segundos, Figura 3.27 i);
8. Os pontos de 4 a 7 repetem-se até o elemento estar concluído;
9. Uma vez finalizada a produção, procede-se ao envolvimento da cofragem numa película para evitar trocas de humidade com o exterior;
10. No final do processo de cura e desmoldagem obtém-se o elemento produzido - Figura 3.27 j).

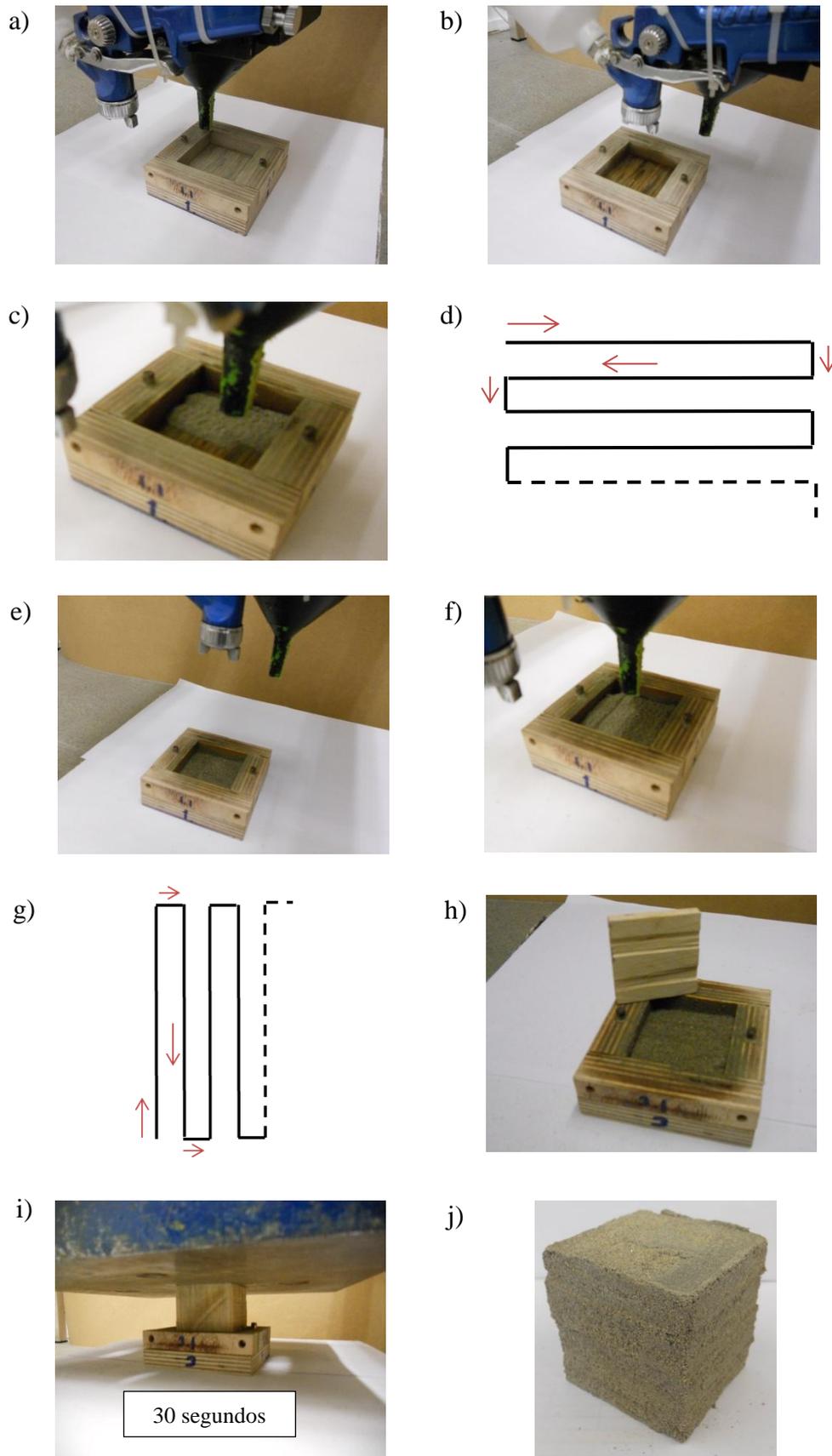


Figura 3.27 – Procedimento de aplicação do método de produção concebido

4 EXPERIÊNCIAS PRELIMINARES

4.1 Introdução

No decorrer deste trabalho foi efetuado um conjunto de experiências preliminares com vista à avaliação do desempenho da metodologia proposta, assim como da robustez do equipamento protótipo construído.

Na parte inicial deste capítulo será feita uma descrição detalhada dos materiais utilizados, seguida da discussão da eficácia dos sistemas desenvolvidos na deposição de material seco e de injeção de água. Posteriormente, apresenta-se o programa experimental que permitiu a produção e ensaio de várias peças em argamassa de cimento utilizando a impressora 3D desenvolvida. Para tal efeito, desencadeou-se a produção de várias peças, avaliando-se também as propriedades mecânicas das mesmas, com o intuito de fazer uma análise comparativa entre os resultados alcançados com os provetes produzidos por impressão 3D e os alcançados com os provetes concebidos consoante os métodos clássicos de produção de argamassas de cimento em misturadora.

4.2 Materiais

No âmbito deste trabalho foi utilizado uma argamassa cuja composição compreendeu cimento Portland CEM II/B-L 32.5 N (SECIL, 2004) e areia fina de rio (granulometria compreendida entre o peneiro 0.063 e 2 mm).

A composição química do cimento utilizado, de acordo com a folha de caracterização mensal (controlo de qualidade) dos lotes utilizados no presente trabalho, é apresentada na Tabela 4.1 (SECIL, 2004).

Tabela 4.1 – Composição química e propriedades físicas do cimento utilizado

		Sigla	CEM II/B-L 32.5N
Perda ao fogo	%	P.F.	13,5
Resíduo Insolúvel	%	R.I.	3,02
Óxido de Silício	%	SiO ₂	15,91
Óxido de Alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,21
Óxido de Ferro	%	Fe ₂ O ₃	2,56
Óxido de Cálcio	%	CaO	58,02
Óxido de Magnésio	%	MgO	1,38
Sulfatos	%	SO ₃	2,71
Óxido de Potássio	%	K ₂ O	
Óxido de Sódio	%	Na ₂ O	
Cloretos	%	Cl ⁻	0,04
Cal Livre	%	-	
Dióxido de carbono	%	CO ₂	Sem informação
Superfície específica de Blaine	(cm ² /g)	-	4899

A curva granulométrica da areia fina utilizada encontra-se na Figura 4.1. Salienta-se o facto de preencher o requisito para o correto funcionamento do dispensador de não ultrapassar o peneiro 1 mm.

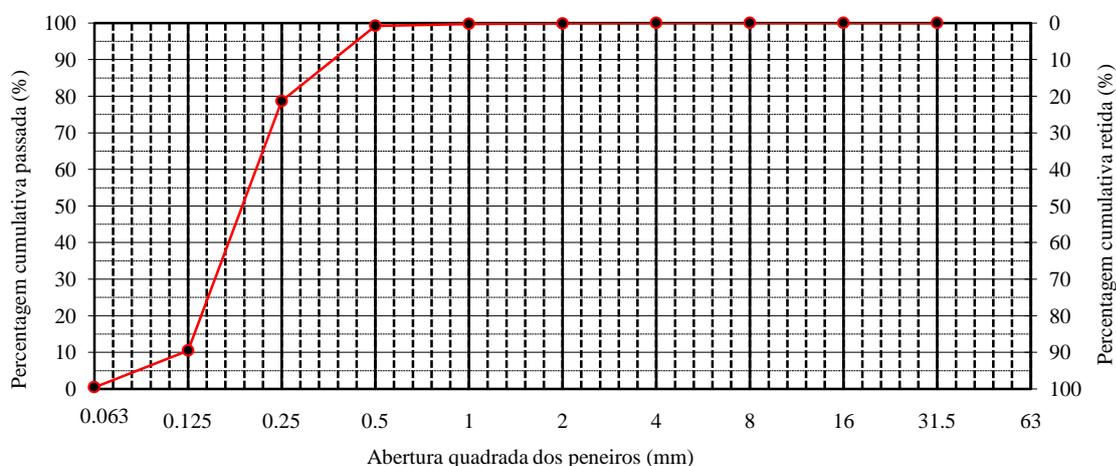


Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia utilizada

No âmbito deste programa experimental piloto, a mistura seca de areia/cimento colocada no funil tinha relação areia/cimento a/c de 0.5. Em termos de relação água/cimento, adotou-se um valor de 0.23. O baixo valor da razão w/c justifica-se pelo facto de o método de produção utilizado não necessitar que a argamassa contenha trabalhabilidade. De referir ainda que foi utilizada água destilada em todas as misturas efetuadas.

4.3 Análise das características do equipamento protótipo de impressão 3D de argamassas de cimento

Na presente secção efetua-se um conjunto de pequenos ensaios de verificação das capacidades do sistema de deposição de material seco e do sistema de injeção de água.

4.3.1 Dispensador de material seco (cimento e areia)

A análise experimental compreendeu a avaliação do dispensador de material seco nos seguintes três pontos:

- Razão areia/cimento, a/c – observar o comportamento deste parâmetro ao longo de dez camadas, avaliando se o sistema consegue debitar a mistura mantendo as componentes nas proporções apresentadas na Tabela 4.1;
- Quantidade de material depositado – observar se o sistema, no final de dez camadas, apresenta variações no material depositado face à primeira camada produzida;
- Largura de espalhamento da mistura depositada.

Para se proceder às avaliações mencionadas executou-se o seguinte procedimento: pesagem da peça de apoio em rofmate $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ onde será aplicada uma camada de mistura através do equipamento protótipo, segundo a metodologia de deposição apresentada na seção 3.3.7; seguidamente procedeu-se à deposição de uma camada de mistura seca com dimensão de $5 \times 5 \text{ cm}^2$ sobre a peça de apoio com resultado reportado na Figura 4.2; após a produção da camada de material seco, executou-se a pesagem da peça de apoio conjuntamente com a mistura referente à camada; por fim, após a pesagem e anotação do valor, o material seco foi peneirado para separação e pesagem da areia e do cimento. A peça de apoio foi limpa, e o processo dos pontos repetido sucessivamente.



Figura 4.2 – Deposição de uma camada de mistura seca sobre peça de apoio

Impondo uma rotação ao parafuso de Arquimedes de 0,8 Hz e uma velocidade de deslocamento do equipamento de posicionamento de 5 mm/s observou-se que o tempo de produção de uma camada balizou-se em aproximadamente 3 minutos. Salienta-se que no funil foi introduzido 100 gramas de material que constitui a mistura seca. Executando-se o procedimento descrito pode-se obter os resultados que se encontram na Tabela 4.2 que permitem analisar o comportamento do dispensador de material seco.

Tabela 4.2 – Análise comportamento dispensador material seco

Ensaio	Peso mistura (g)	Peso cimento (g)	Peso areia (g)	Razão a/c	Erro, a/c 2:1	Δ peso mistura
1	5,60	1,82	3,78	2,08	3,85%	-
2	5,40	1,79	3,61	2,02	0,84%	3,57%
3	5,30	1,75	3,55	2,03	1,43%	5,36%
4	5,36	1,76	3,60	2,05	2,27%	4,29%
5	5,30	1,73	3,57	2,06	3,18%	5,36%
6	5,36	1,74	3,62	2,08	4,02%	4,29%
7	5,37	1,77	3,60	2,03	1,69%	4,11%
8	5,20	1,69	3,51	2,08	3,85%	7,14%
9	5,04	1,65	3,39	2,05	2,73%	10,00%
10	5,10	1,69	3,41	2,02	0,89%	8,93%

Face aos resultados apresentados na Tabela 4.2 observa-se que a razão areia/cimento mantém praticamente igual ao longo das dez camadas produzidas, sendo o erro máximo, em relação à

razão pretendida (2:1) de 4,02%. Considera-se portanto que o dispensador mostrou um nível de desempenho adequado no que diz respeito à proporção dos componentes da mistura seca ao longo da produção das 10 camadas.

Em relação à quantidade de material depositado observa-se que até à sétima camada a variação face à primeira camada produzida não ultrapassa os 6%. Contudo, nas três últimas camadas produzidas o valor do erro aumenta para cerca de 9%, constatando-se uma diminuição da quantidade de material depositado. Este problema pode-se ficar a dever à diminuição da carga promovida pela redução de material no funil. No final da produção das sete camadas observa-se que se gastou 40 gramas das 100 gramas existentes no funil, o que representa uma redução de 40 % da carga sobre o parafuso de Arquimedes, o que poderá estar a influenciar a capacidade de deposição do parafuso.

Foi também analisada a largura do material deposto ao longo das dez camadas independentes de impressão (ver Figura 4.3), tendo-se observado que a largura se cifrou em média em 9 mm para todos os casos, com variações impercetíveis a olho nu.



Figura 4.3 – Largura de espalhamento da mistura depositada

4.3.2 Injetor de água

A análise experimental compreendeu a avaliação do injetor de água nos seguintes três pontos:

- Razão água-cimento, w/c – observar o comportamento deste parâmetro ao longo de dez camadas, ou seja avaliar se o sistema consegue por camada manter as componentes nas proporções apresentadas na Tabela 4.1;
- Quantidade de água injetada – observar se o sistema, no final de dez camadas, apresenta variações de água injetada face à primeira camada produzida;
- Analisar, numa camada, o potencial de dispersão do sistema injetor, por outras palavras, se a quantidade de água deposta é igual em toda a área constituinte da camada.

Para se proceder às análises compreendidas nos primeiros dois pontos supratranscritos, efetuou-se o seguinte procedimento:

1. Pesagem da peça de apoio em roofmate $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ onde será aplicada uma camada de mistura através do equipamento protótipo, segundo a metodologia de deposição apresentada na seção 3.3.7;
2. Deposição de uma camada de mistura seca com dimensão de $5 \times 5 \text{ cm}^2$ sobre a peça de apoio conforme mostrado na Figura 4.3;
3. Pesagem da peça de apoio conjuntamente com a mistura referente à camada e anotação do valor;
4. Injeção de água sobre a camada de mistura seca segundo a metodologia apresentada na seção 3.3.7;
5. Pesagem do conjunto formado por peça de apoio, mistura seca e água referente à camada e anotação do valor;
6. Após pesagem e anotação do valor, limpeza da peça de apoio e repetição do processo referido nos pontos de 1 a 5.

Executando-se o procedimento descrito, obtiveram-se os resultados que se encontram na Tabela 4.3 que permitem analisar o comportamento do sistema de injeção de água.

Tabela 4.3 – Análise do comportamento do injetor de água

Ensaio	Peso mistura seca (g)	Δ peso mistura seca	Peso mistura e água (g)	Δ água	Razão w/c
1	6,588	-	8,302	-	0,232
2	6,472	1,76%	8,201	1,22%	0,244
3	6,360	3,46%	8,103	2,40%	0,253
4	6,550	0,58%	8,265	0,45%	0,233
5	6,354	3,55%	8,070	2,79%	0,241
6	6,484	1,58%	8,152	1,81%	0,215
7	6,438	2,28%	8,120	2,19%	0,221
8	6,060	8,01%	8,031	3,26%	0,377
9	6,067	7,91%	8,012	3,49%	0,363
10	6,005	8,85%	7,951	4,23%	0,368

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.3 retira-se em primeiro lugar que as observações relativas à variabilidade do peso da mistura seca foram semelhantes às já constatadas no contexto da secção 4.3.1. De facto, a partir da 7^a/8^a camada começam a ocorrer variações relevantes do peso da mistura. No que diz respeito à razão água/cimento, constatou-se que esta se mantém razoavelmente idêntica ao longo das primeiras sete camadas, sendo que o erro máximo ocorreu na terceira camada, em que a relação a/c obtida foi de 0.25 em oposição ao valor pretendido de 0,23. Salienta-se que, nas referidas camadas, o valor de w/c médio é de 0,23. Contudo, o parâmetro em estudo, w/c, aumenta de forma expressiva nas três últimas camadas: em média o valor de w/c nas referidas camadas passa de 0,23 (registado nas anteriores) para 0,36, elevando o valor da razão w/c médio (10 camadas) para 0,27. No entanto, este erro está essencialmente associado à variação do material seco depositado, uma vez que o valor absoluto do peso em água adicionado se manteve bastante próximo do verificado nas camadas anteriores. É portanto uma razão exógena ao sistema de injeção de água.

Para se proceder à avaliação do último ponto em análise, o potencial de dispersão do injetor de água, efetuou-se o seguinte procedimento:

1. Injeção de água, segundo a metodologia de produção apresentada na secção 3.3.7, sobre um elemento impermeável constituído por favos cuja área individual se cifra em 0,477 cm² - ver Figura 4.4;

2. Através de uma seringa, sucção e pesagem da água existente em cada favo que se encontra dentro dos limites dos provetes a produzir, ou seja $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Note-se uma ligeira adaptação da forma retangular da zona em estudo dada a inclinação das fronteiras dos favos, perceptível na Figura 4.4.

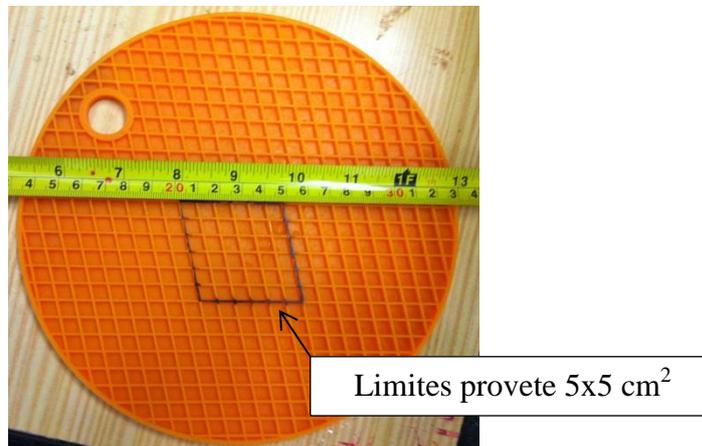


Figura 4.4 – Elemento constituído por favos quer permite a análise da dispersão da água

Por execução do procedimento que acaba de ser descrito foi possível obter a massa de água alocada em cada favo, adotando-se a nomenclatura indicada na Figura 4.5. Para se determinar a variação da quantidade de água existente em cada favo, $\% \Delta F_i$, em relação ao favo que apresenta a maior quantidade, FM, considerou-se a expressão (4.1), em que QF_i traduz a quantidade de água num determinado favo. Os resultados obtidos encontram-se presentes na Tabela 4.4.

$$\% \Delta F_i = \frac{FM - QF_i}{FM} \times 100 \quad (4.1)$$

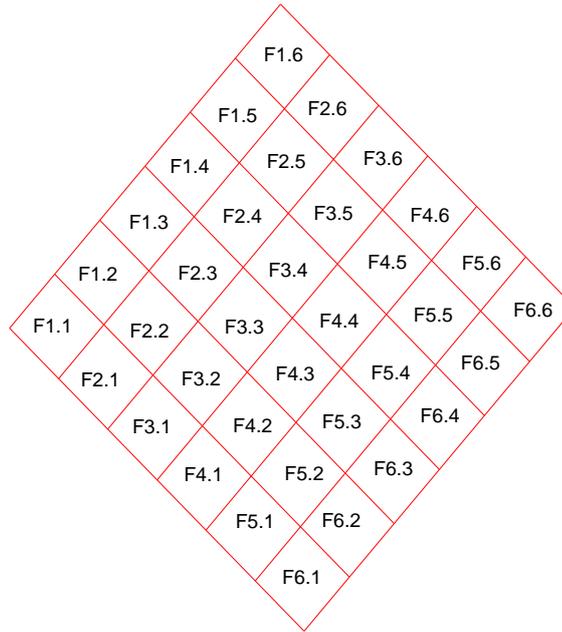


Figura 4.5 – Numeração dos favos

Tabela 4.4 – Análise da dispersão do injetor de água

Favo	QF _i (g)	% ΔF _i	Favo	QF _i (g)	% ΔF _i
1.1	0,058	52%	4.1	0,084	31%
1.2	0,107	12%	4.2	0,102	16%
1.3	0,066	46%	4.3 (FM)	0,122	0%
1.4	0,061	50%	4.4	0,121	1%
1.5	0,059	52%	4.5	0,107	12%
1.6	0,050	59%	4.6	0,094	23%
2.1	0,054	56%	5.1	0,063	48%
2.2	0,114	7%	5.2	0,113	7%
2.3	0,110	10%	5.3	0,110	10%
2.4	0,111	9%	5.4	0,106	13%
2.5	0,112	8%	5.5	0,101	17%
2.6	0,058	52%	5.6	0,063	48%
3.1	0,075	39%	6.1	0,060	51%
3.2	0,111	9%	6.2	0,073	40%
3.3	0,111	9%	6.3	0,103	16%
3.4	0,115	6%	6.4	0,079	35%
3.5	0,098	20%	6.5	0,064	48%
3.6	0,062	49%	6.6	0,065	47%

Compilando a informação presente na Tabela 4.4, pode-se obter a análise de dispersão do injetor de água sobre a área dos provetes a produzir segundo uma vertente numérica e gráfica.

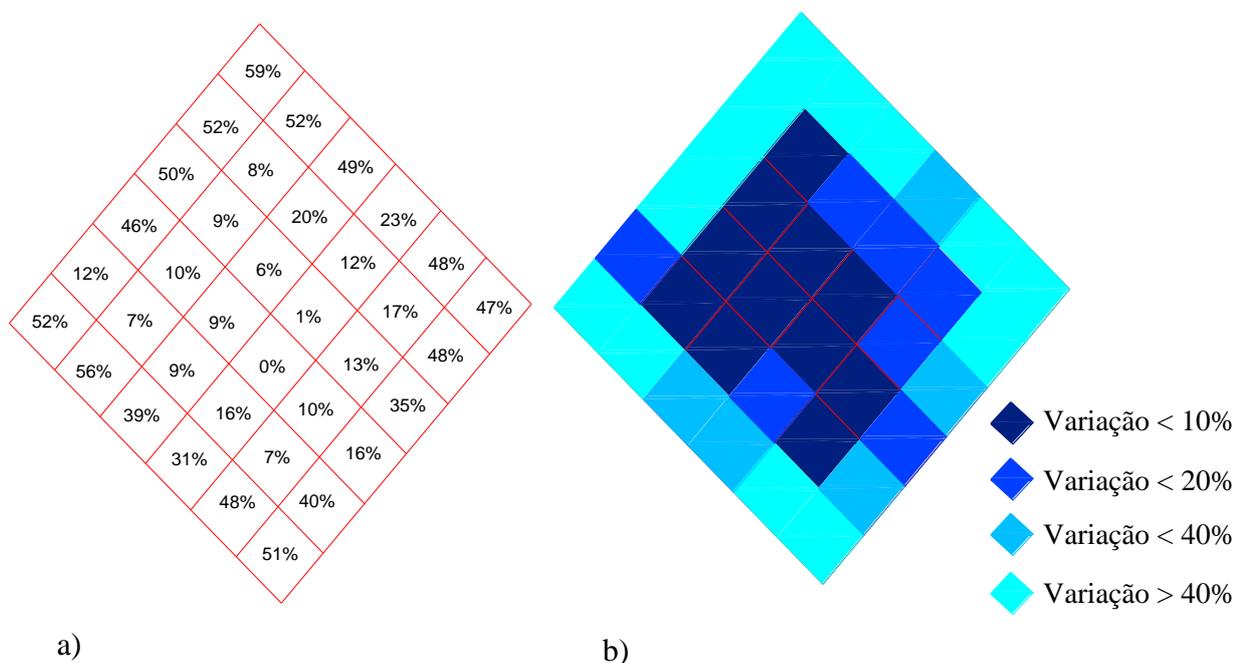


Figura 4.6 – Análise da dispersão do injetor de água: a) análise numérica; b) análise gráfica

Analisando-se os resultados obtidos, Tabela 4.4 e Figura 4.6, pode-se constatar que o sistema de injeção não atinge todas as zonas de forma idêntica, ou seja, a quantidade de água depositada no centro é superior àquela que é debita nas zonas de contorno da área. Salientam-se os seguintes pontos:

- As zonas cuja variação, face ao favo que apresenta quantidade de água superior, é inferior a 20% simbolizam aproximadamente 50% da área total;
- Já as zonas cuja variação, face ao favo que apresenta quantidade de água superior, é superior a 40% constituem aproximadamente 35% da área total.

Pode-se verificar então que o sistema de injeção de água não garante dispersão idêntica para a totalidade das zonas que constituem a área de produção, existindo zonas que apresentam menor quantidade de água que as restantes. Por tal motivo, o próximo passo será o estudo e desenvolvimento de novas formas de injetar a água, quer modificando a própria pistola, quer por exemplo, efetuando um conjunto de passagens previamente estudadas com o intuito de depositar a água de igual modo em todas as zonas.

4.4 Programa experimental: produção de provetes

4.4.1 Ensaios e procedimentos

O programa experimental compreendeu a aplicação do procedimento exposto na secção 3.3.7 através do equipamento protótipo construído, tendo sido produzidos 9 provetes com dimensões $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ e com a composição indicada em 4.2. Desses 9 provetes, 3 foram produzidos com cargas de compactação de 25 kg (P1, P2 e P3) e 6 foram produzidos com cargas de compactação de 50 kg (P4, P5, P6, P7, P8 e P9).

No caso dos provetes P1 a P6, a direção de aplicação de carga para determinação da resistência à compressão foi perpendicular aos planos de deposição, enquanto nos provetes P7 a P9, a aplicação da carga foi paralela a esses planos. A nomenclatura dos provetes e informações complementares podem ser consultadas na Tabela 4.5.

Para se poder analisar qual a influência do procedimento de produção nas propriedades da argamassa, foram adicionalmente produzidos 3 provetes de dimensão idêntica com recurso a técnicas tradicionais, de acordo com a norma EN 196-1 (2005), em misturadora de argamassas (provetes P10, P11 e P12). Indica-se que no caso destes provetes adicionais foi necessário adicionar superplastificante (2%) para garantir trabalhabilidade adequada da mistura, dada a diminuta razão água-cimento: 0,23.

Após a produção, todos os provetes foram curados a 20°C , selados com recurso a película aderente. Aos 7 dias de idade os provetes foram desmoldados, tendo-se avaliado a sua massa volúmica e a resistência à compressão de acordo com a norma EN 12390-3 (2009). Salienta-se que após a desmoldagem os provetes produzidos através do equipamento protótipo foram retificados numa serra elétrica para garantir paralelismo e adequado acabamento às superfícies de contacto com os pratos da prensa atuadora. Os ensaios de resistência à compressão dos provetes produzidos através do equipamento protótipo decorreram numa prensa *Lloyd LR50K Plus* com capacidade de carga de 50 kN, que permitiu obter a curva que relaciona a extensão com o valor da resistência, enquanto os provetes produzidos segundo as técnicas tradicionais, decorreram numa prensa *ELE AutoTest* com capacidade de carga de 120 kN, que apenas permitiu obter o valor da resistência à compressão máximo. Após cada ensaio de compressão uniaxial foi confirmado e documentado o modo de rotura do provete.

Como nota, pode-se referir que, durante a produção dos provetes com impressão 3D, confirmou-se a robustez do equipamento, após alguns ajustes. Constatou-se também uma boa homogeneidade na deposição dos materiais. O tempo de produção de cada provete cifrou-se em cerca de 120 minutos.

4.4.2 Análise e discussão dos resultados

Os resultados da avaliação da massa volúmica e resistência à compressão da totalidade dos provetes encontram-se resumidos na Tabela 4.5. Por sua vez, as curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios de resistência à compressão dos provetes produzidos no equipamento protótipo estão ilustrados nos gráficos das Figuras 4.7 a 4.9.

Tabela 4.5 – Resumo das massas volúmicas e valores da resistência à compressão dos provetes P1 a P12

<i>Designação Provete</i>	<i>Dimensão [mm]</i>	<i>Carga Compactação [kg]</i>	<i>Direção Ensaio</i>	<i>Massa Volúmica [kg/m³]</i>	<i>Resistência Compressão [MPa]</i>
P1_25_PER		25		1632,24	4,15
P2_25_PER		25	Perpendicular	1682,24	***
P3_25_PER	50x50x50	25	ao plano de	1680,22	6,50
P4_50_PER		50	deposição	1725,63	7,66
P5_50_PER		50	das camadas.	1730,86	4,80
P6_50_PER		50		1698,47	8,64
P7_50_PAR	50x50x50	50	Paralela ao	1756,57	3,39
P8_50_PAR		50	plano de	1721,83	7,44
P9_50_PAR		50	deposição das camadas.	1733,34	4,05
P10_Norma		-	-	2091,28	11,32
P11_Norma	50x50x50	-	-	2074,48	12,25
P12_Norma		-	-	2041,89	10,75

*** Resultado do ensaio inválido devido ao facto de a rotura não ter sido bi-piramidal – ver Figura 4.7.

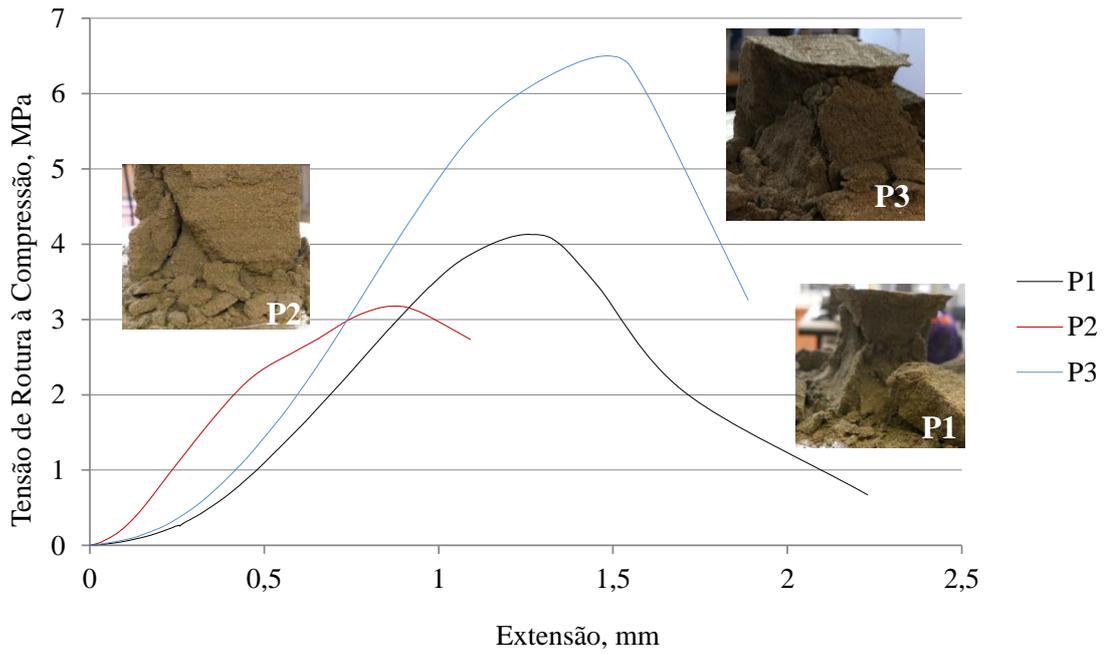


Figura 4.7 – Resultados provetes P1, P2 e P3 (compactação 25 kg – ensaio segundo plano perpendicular aos planos de deposição).

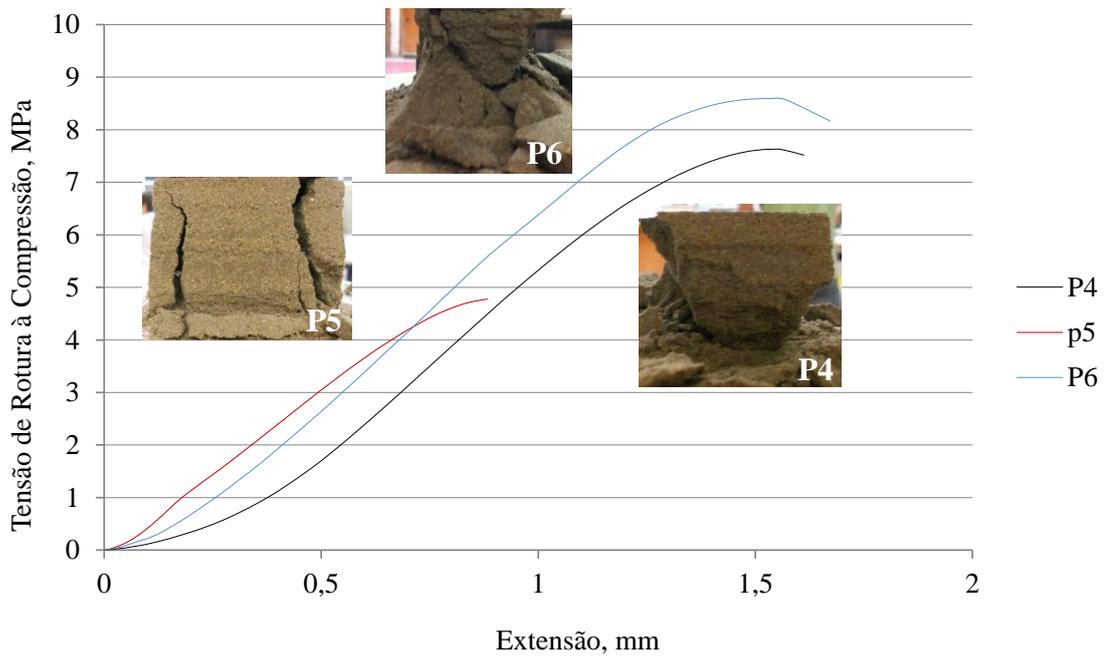


Figura 4.8 – Resultados provetes P4, P5 e P6 (compactação 50 kg – ensaio segundo plano perpendicular aos planos de deposição).

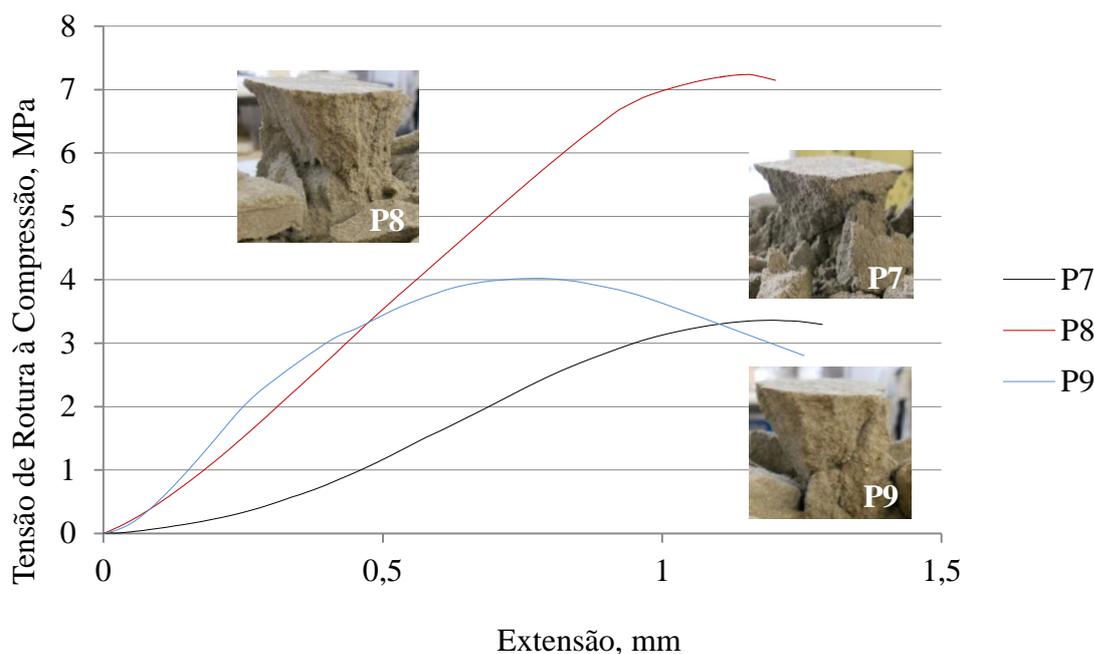


Figura 4.9 – Resultados provetes P7, P8 e P9 (compactação 50 kg – ensaio segundo plano paralelo aos planos de deposição).

Relativamente aos valores da massa volúmica obtidos para todos os tipos de provetes, pode-se destacar o facto de a dispersão ser pequena dentro dos provetes efetuados com cada uma das tipologias em análise, mantendo-se abaixo de 5%. Tendo como referência os provetes P10 a P12, elaborados em misturadora de argamassas, constata-se que a sua massa volúmica média de 2069.22 kg/m^3 se enquadra nos intervalos previstos na NP EN 206-1 (2000), entre 2000 a 2600 kg/m^3 . Já o mesmo não pode ser dito em relação aos provetes produzidos por impressão 3D, cuja densidade média foi de 1720 kg/m^3 para os provetes compactados com pesos de 50 kg e 1660 kg/m^3 para os provetes compactados com pesos de 25 kg, correspondendo respetivamente a decréscimos de 17% e 20% em relação à massa volúmica dos provetes de referência (P1 a P3). Apesar da carga de compactação de 50 kg ter conduzido a melhores densidades do que a carga de 25 kg constata-se que a melhoria é pouco significativa, mantendo-se um afastamento importante relativamente à massa volúmica de P1-P3. Será portanto necessário proceder a ajustes nos procedimentos de compactação da técnica.

No que diz respeito à resistência à compressão aos 7 dias importa salientar o facto de os modos de rotura dos provetes (Figuras 4.7 à 4.9), à exceção do P2, apresentarem a forma bipiramidal desejável. Contudo, constatou-se dispersão relativamente significativa dos resultados, particularmente no que diz respeito aos provetes P5 e P8, apesar da semelhança das suas densidades relativamente aos provetes congéneres (ver Tabela 4.5). Será necessário

proceder a novos ensaios para verificar se este tipo de dispersão terá sido originado pelo procedimento de produção. No entanto, a tendência média das resistências à compressão dos provetes produzidos é coerente com as indicações dadas pelas massas volúmicas dos provetes, conforme se pode observar na Figura 4.10. Importa salientar que apesar da dispersão (sobretudo na resistência à compressão), não foi rejeitado nenhum resultado na realização das médias.

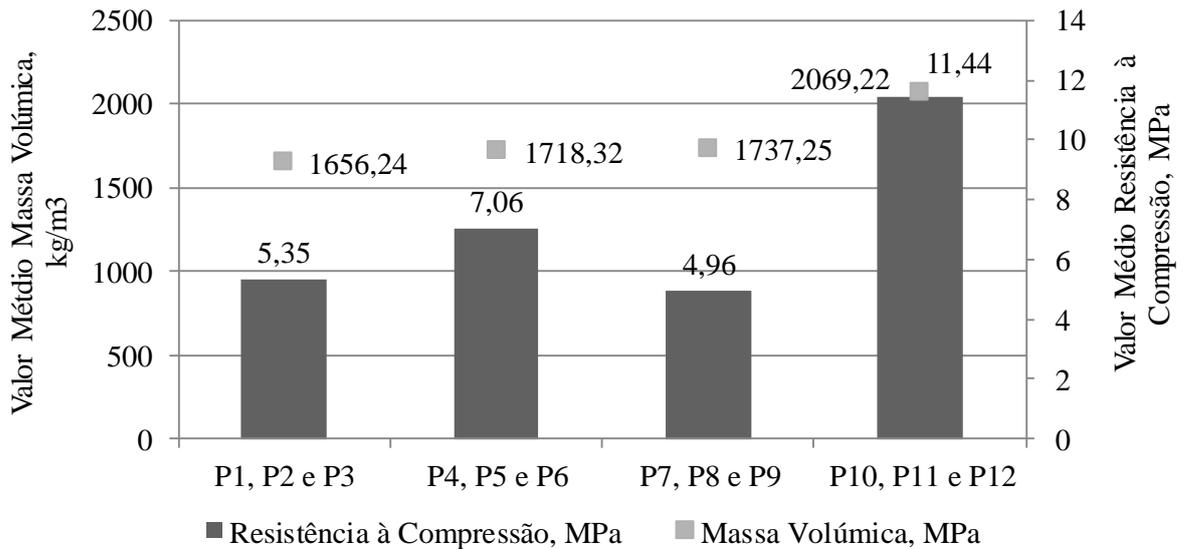


Figura 4.10 – Resultados médios: massa volúmica e resistência à compressão

De facto, a resistência média dos provetes P4 a P6 (compactação 50kg), produzidos pela impressora, é mais baixa do que a resistência dos provetes de referência (P10-P12) em cerca de 30% e a resistência dos provetes P1 a P3 (compactação 25 kg) é inferior à resistência dos provetes P4 a P6 (compactação 50 kg). Indica-se finalmente a existência de anisotropia na resistência à compressão, comparando os resultados de resistência à compressão dos provetes P4-P6 com os de P7-P9, confirmando deste modo a fragilidade introduzida pela estratificação das peças associadas ao processo de deposição: razão pela qual a resistência à compressão segundo direção paralela aos planos de deposição resultou num valor inferior à direção perpendicular aos planos de deposição.

Dos resultados colhidos, presume-se que o valor reduzido da massa volúmica dos provetes produzidos através do equipamento protótipo poderá explicar de certo modo as resistências à compressão baixas obtidas. Contudo, este problema poderá ficar a dever-se também à falta de homogeneidade de distribuição de água e a perda de capacidade dos dispensador, levando à

existência de partículas de cimento não convenientemente hidratadas, o que impede que se obtenha o rendimento máximo do material que compõe os provetes. A ineficiente distribuição de água poderá inclusive ter tido um papel preponderante no que diz respeito à existência de anisotropia no valor da resistência à compressão dos provetes. Outro aspeto a ter em consideração reside no facto de a granulometria da areia utilizada não se encontrar otimizada para processos de compactação. De facto, com base nos estudos reportados para betão compactado com cilindros (Ribeiro, 2004) pode-se observar que existem melhoramentos potenciais a introduzir na composição que influenciarão o processo de compactação de modo a aumentar a coesão existente entre as partículas, melhorando o valor da resistência à compressão, assim como aumentando o valor da massa volúmica.

Conclui-se portanto a necessidade premente de estudos mais aprofundados relativos ao procedimento de compactação, da homogeneidade de distribuição de água nos provetes, e da composição da mistura a utilizar. No entanto, há que assinalar o carácter prometedora do desempenho dos provetes, na medida em que foi possível provar a viabilidade do conceito apresentado e a justificabilidade de efetuar estudos mais aprofundados sobre o mesmo.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Nesta dissertação foi proposta uma metodologia para impressão 3D de elementos estruturais e correspondente protótipo para o fabrico de peças em argamassa de cimento através de técnicas de impressão 3D. A metodologia consiste em ciclos envolvendo a deposição da camada de material seco (p.ex. cimento e areia), sucedida de aplicação de água e compactação. A aplicação da metodologia idealizada permitirá ultrapassar limitações das abordagens atualmente existentes para impressão 3D de materiais cimentícios, na medida em que permite a criação de peças com distribuição espacial não uniforme dos seus constituintes. Esta característica distintiva poderá abrir novas perspectivas ao dimensionamento estrutural na medida em que permitirá alteração de paradigmas ao nível da otimização e biomimetismo. Em termos práticos, antevê-se que a pré-fabricação seja a área do setor da construção que mais rapidamente poderá beneficiar com este tipo de tecnologia e abordagem.

O protótipo desenvolvido corresponde de forma genérica à metodologia idealizada, ainda que com algumas limitações, nomeadamente no que diz respeito à incapacidade de efetuar provetes com distribuição diferenciada de misturas. Salienta-se no entanto que o protótipo permitiu alcançar os pressupostos base da idealização formulada: posicionamento e execução automática das indicações introduzidas pelo utilizador; deposição do material seco de forma controlada e precisa (9 mm); e injeção de água.

O trabalho da dissertação desenvolveu-se segundo dois vetores principais, envolvendo o trabalho de conceção e construção do equipamento protótipo e o trabalho em ambiente de laboratório para a avaliação dos elementos produzidos, ao nível da influência da metodologia e do próprio equipamento nas propriedades da argamassa (nomeadamente na massa volúmica e na resistência à compressão). Da parte dos trabalhos relativos à conceção e construção do protótipo, salientam-se as seguintes conclusões principais:

- O protótipo apresenta capacidade de produção de provetes de argamassa até dimensão máxima de $1.00 \times 0.40 \times 0.30 \text{ m}^3$, sendo testado na criação de provetes cúbicos com 5 cm de aresta, e demonstrando a sua robustez e fiabilidade ao criar vários provetes;
- Confirmou-se que o recurso a um parafuso de Arquimedes para o sistema dispensador de material seco se revelou eficaz para deposição precisa e controlada de material. Em oposição, as tentativas realizadas com recurso a ar pressurizado revelaram-se infrutíferas;
- O sistema injetor de água, constituído por uma pistola de baixa pressão, mostrou-se ser capaz de introduzir água na argamassa seca deposta, sem que ocorra a molhagem do material do dispensador;
- Relativamente aos sistemas de posicionamento e de controlo da máquina, revelaram-se capazes de alcançar o objetivo proposto: movimentação eficaz tridimensionalmente (segundo o eixo do X, Y e Z), suportando uma carga considerável - sistema de deposição da argamassa e os componentes da própria argamassa. Contudo, salienta-se que os mecanismos de locomoção apresentam velocidades diminutas, o que se traduz num tempo de produção elevado (o tempo de produção de cubos de 5 cm de aresta rondava 120 minutos);
- O programa informático de comando desenvolvido em parceria com o departamento de Engenharia Mecatrónica permite ao utilizador, para além de uma fácil interação com os sistemas de posicionamento e de deposição, a introdução de comandos (em ficheiro .txt) que permitem, de forma automática, a produção de um elemento;
- A colaboração entre o autor da dissertação e o colega que desenvolveu a dissertação do Mestrado em Mecatrónica em paralelo foi fundamental para que se pudessem cruzar as várias áreas do conhecimento envolvidas (Eng^a Civil, Mecânica e Eletrónica), produzindo-se um equipamento final que traduziu as sinergias que advieram da colaboração.

O trabalho experimental encetado em laboratório no âmbito da presente dissertação almejou avaliar as capacidades do próprio equipamento protótipo, assim como analisar as propriedades mecânicas dos elementos produzidos, comparando-as com elementos produzidos por via tradicional. Com base nos resultados alcançados, podem ser obtidas as seguintes conclusões principais:

- A capacidade de deposição por parte do sistema dispensador mostrou perdas de eficácia com o uso sucessivo sem reposição de material no funil. Ficou confirmada a necessidade de melhoramentos ou introdução de rotinas de colocação automática de material por parte do dispensador;
- O sistema injetor de água não se revelou capaz de garantir que todas as zonas da área dos provetes elaborados recebessem igual quantidade de água;
- Constatou-se que a densidade e resistência à compressão dos provetes fabricados foram inferiores às propriedades homólogas de provetes produzidos com a mesma mistura, mas com recurso a misturadora;
- Identificou-se coerência entre o aumento da carga de compactação e a aproximação da densidade e resistência à compressão relativamente aos provetes produzidos de forma tradicional (com recurso a misturadora), salientando-se que um acréscimo de 50% no valor da carga de compactação introduz uma redução de 2% na variação da densidade e 30% em relação à resistência à compressão;
- Observou-se anisotropia ao nível dos provetes produzidos segundo a nova metodologia. Os provetes apresentam resistência à compressão superior na direção perpendicular às camadas que os constituem, em cerca de 30% face à direção paralela às camadas.

5.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho iniciado na presente dissertação, e tendo consciência das incertezas que surgiram ao longo dos trabalhos efetuados, assim como do desempenho do equipamento implementado, e das características dos primeiros provetes fabricados, considera-se que a técnica proposta apresenta viabilidade adequada para justificar a continuação de estudos e desenvolvimentos deste equipamento. De seguida enumeram-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros ao nível do equipamento:

- Desenvolvimento de um novo equipamento que permita a extrapolação deste tipo de tecnologia para áreas de trabalho maiores, com possibilidade de maior dimensão de agregados e inclusão de fibras/armaduras;

- Estudo da geometria ideal do parafuso de Arquimedes, bem como de rotinas de autolimpeza, de modo a que não ocorra acumulação de material ao longo do mesmo, e consequente perda eficácia na deposição de material;
- Novo sistema de deposição de água que, para além do espalhamento idêntico em toda a área do elemento a produzir, possibilite a existência de razões água-cimento distintas ao longo da própria camada deposta;
- Dada a velocidade diminuta dos sistemas de posicionamento e deposição, estudo e conceção de procedimentos e equipamentos que possibilitem a produção de provetes através da metodologia de impressão 3D de forma mais célere;
- Conceção e construção de um sistema mecânico capaz de aplicar compactação de forma automática e mais eficaz.

No sentido de melhoramento dos resultados ao nível das propriedades mecânicas dos elementos produzidos, enumeram-se algumas sugestões:

- Otimização da mistura a utilizar, no sentido de melhorar o empacotamento e compatibilidade. Tal otimização passará inevitavelmente por ajustes da granulometria das areias e eventual recurso de adjuvantes;
- Avaliação de formas alternativas de compactação, nomeadamente com recurso a rolos ou a cargas dinâmicas;
- Estudo da possibilidade de recurso a maior dimensão de agregados e inclusão de fibras/armaduras.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 1995. *Guide to Shotcrete. ACI 506R-90*, Farmington Hills, Mich., American Concrete Institute.

ARDUÍNO 2011. *Ficha Técnica Arduino Mega 2560*.

AZEVEDO, Á. F. M. 1994. *Optimização de Estruturas*, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BENDSOE, M. P. 1995. *Optimization of structural topology, shape, and material*, Berlin, Springer.

BENDSOE, M. P. A. K., N 1988. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 224.

CEN 2000. *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. EN 206-1*, European Committee for Standardization.

CEN 2005. *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. EN 196-1*. European Committee for Standardization.

CEN 2009. *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. EN 12390-3*. European Committee for Standardization.

CONTU, C. 2010. *3D-Shape y Contour Crafting. Las Técnicas de Automatización aplicadas a la Construcción Arquitectónica: el “Rapid Building”*. Máster Universitario, Universitat Politècnica de Catalunya.

- DING, Y. 1986. Shape optimisation of structures: A literature survey. *Computers & Structures*, 24, 1006.
- DINI, E. 2009. *D-Shape* [Online]. d-shape.com. [Accessed 15 de Dezembro 2011].
- EVANS, B. 2012. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*, Apress.
- GRUBER, P. 2011. *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*, Springer Wien.
- HAFTKA, R. T. A. G., Z 1995. “*Elements of Structural Optimization*”, *Solid Mechanics and its Applications*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- HILDEBRANT, M. 1988. *Analysis of vertebrate structure*, John Wiley & Sons, Inc.
- ISO 2009. *Numerical control of machines - Program format and definition of address words - Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. ISO 6983*, International Organization for Standardization.
- JOHNSON, G. R. 1981. *The application of basic mechanics to human body*, London, Mechanical Engineering Publications London.
- KELLY, J. F. & HOOD-DANIEL, P. 2011. *Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer*, Apress.
- KHOSHNEVIS, B. 2004. Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction – Special Issue*, 13, 5-19.
- KWON, H. 2002. *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process using uncured Ceramic Materials*. Doctor, University of Southern California.
- 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.

- MADISON, J. 1996. *CNC Machining Handbook: Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures*, Industrial Press.
- MATEUS, R. 2004. *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- MATTHECK, C. 1998. *Design in nature: learning from trees*, Springer-Verlag.
- MAXWELL, J. C. 1872. *On reciprocal figures, frames and diagrams of force*, Trans Roy Soc Edinb.
- MICHELL, A. G. M. 1904. The limits of economy of material in frame-structures. *Phil Mag*, 9, 587.
- NMB 2010. *Ficha Técnica Motor PM55L-048-HPA7*
- OXMAN, N. 2010a. *Material-based Design Computation*. Doctor, Massachusetts Institute of Technology.
- OXMAN, N. 2010b. Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials. *Architectural Design*, 80, 78-85.
- PACHECO, P. 1998. *Pré-Esforço Orgânico - um exemplo de sistema efector*. Grau de Doutor, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PARKER, S. 1988. *Ossos e estruturas ósseas*, Editorial Verbo.
- PEGNA, J. 1997. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5.
- PEREIRA, J. D. 2012. *Máquinas C.N.C. de Baixo Custo - Desenvolvimento do Controlo Triaxial Linear*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- QUERIN, O. M. 1997. *Evolutionary Structural Optimisation: Stress Based Formulation and Implementation*. Doctor of Philosophy, University of Sydney.

- R.A. BUSWELL, R. C. S., A.G.F. GIBB, A. THORPE 2006. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 17, 224-231.
- RIBEIRO, A. C. B. S. 2004. *Betão Compactado com Cilindros. Composições e características*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- ROEBUCK, K. 2011. *3d Printing: High-Impact Emerging Technology - What You Need to Know: Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*, Lightning Source Incorporated.
- ROZVANY, G., BENDSOE, M.P., KIRSCH, U. 1995. Layout Optimization of Structures. *Applied Mechanical Review*, 2, 119.
- S. LIM, R. A. B., T.T. LE, S.A. AUSTIN, A.G.F. GIBB, T. THORPE 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262-268.
- SECIL 2004. *CEM II/B-L 32,5N - Cimento Portland*. In: *S. A. Companhia Geral de Cal e Cimento (ed.)*.
- SONDERGAARD, P. D. E. A. 2009. Three-dimensional topology optimisation in architectural and structural design of concrete structures. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*.
- SOUSA COUTINHO, A. 1966. *Fabrico e Propriedade do Betão*, LNEC.
- STEADMAN, P. 1979. *The evolution of designs: biological analogy in architecture and the applied arts*, Routledge.
- VALENTINO, J. & GOLDENBERG, J. 1993. *Introduction to computer numerical control*, Prentice Hall.
- WOLF, J. 1986. *The law of bone remodelling*, Berlin, Springer-Verlag.

