



CONSTRÓITECHTS
TÂMEGA E SOUSA

GIA: Guias de capacitação

Impressão 3D inovadora

Aplicações na construção

Agosto/2026

Índice geral

Introdução	7
Objetivo do Guia	8
Dez decisões antes de investir	10
Módulo 1 - Tecnologia e cadeia digital	11
A impressão 3D (fabrico aditivo) na construção	12
O que é — e o que não é	14
Relevância, oportunidades e limites	15
Principais tecnologias de impressão 3D na construção e respetivo nível de maturidade	16
Cadeia digital e conceção para impressão 3D	17
Dados, formatos e preparação para a impressão	18
Pórtico, braço robótico e sistemas móveis	20
Célula de impressão e local de produção	22
Rastreabilidade e atividade de aplicação	23
Síntese do módulo 1 - Tecnologia e cadeia digital	24
Módulo 2 - Materiais e processo	25
Materiais e propriedades	26
Reologia e janela de imprimibilidade	27
Bombear, extrudir e construir em altura	28
Constituintes e formulações de menor impacto	29
Materiais alternativos e conteúdo reciclado	30
Camadas, interfaces e anisotropia	31
Reforço, aberturas e especialidades	32
Ambiente, cura e controlo da qualidade	33
Síntese prática: preparar a impressão do primeiro elemento	34
Síntese do módulo 2 - Materiais e processo	35
Módulo 3 - Aplicações e casos	36
Onde pode ser aplicada	37
Protótipos, moldes e cofragens	38

Componentes não estruturais e mobiliário urbano	39
Elementos estruturais	40
Infraestruturas, reparação e personalização	41
Matriz para selecionar uma aplicação	42
Caso português: ReCircular (Matosinhos)	43
Gemert e Striatu: duas pontes, duas estratégias	45
Wallenhausen e TECLA: habitação, materiais e sistemas distintos	46
Malawi e Nijmegen: rapidez de paredes e infraestrutura segmentada	47
Lições dos casos e transferibilidade	48
Síntese do módulo 3 - Aplicações e casos	49
Módulo 4 - Valor e sustentabilidade	50
Benefícios, limites e produtividade	51
Custos e modelos de acesso	53
Pessoas, competências e logística	54
Sustentabilidade e ciclo de vida.....	55
Materiais, energia e contrapartidas ambientais.....	56
Circularidade e fim de vida	57
Como avaliar alegações ambientais.....	59
Síntese do módulo 4 - Valor e sustentabilidade.....	60
Módulo 5 - Qualidade, segurança e conformidade	61
Sistema de garantia da qualidade	62
ISO/ASTM 52939 e qualificação do processo	63
Monitorização, ensaios e aceitação	64
Segurança de máquinas, materiais e estaleiro	65
Produtos de construção e rota de conformidade.....	67
Contratos e diligência sobre fornecedores.....	69
Não conformidades e atividade	70
Síntese do módulo 5 - Qualidade, segurança e conformidade.....	71
Módulo 6 - Roteiro de adoção	72
Preparação da empresa	73

Escolher o primeiro caso de utilização	74
Produzir, contratar ou cooperar.....	75
Preparar a consulta e selecionar o parceiro	76
Projeto-piloto por etapas de decisão.....	77
Indicadores e caso de negócio.....	78
Competências e gestão da mudança	79
Roteiro indicativo de 12 meses	80
Boas práticas, erros e lista final	81
Síntese do módulo 6 - Roteiro de adoção	82
Fichas práticas	83
Ficha 1 — Definir o primeiro caso de utilização	84
Ficha 2 — Comparar parceiros ou fornecedores	85
Ficha 3 — Plano do piloto e indicadores	86
Glossário	87
Referências e ligações	91
Créditos e transparência	95
Ficha Técnica	97

Índice de ilustrações

Figura 1 - Representação conceptual da impressão 3D na construção, gerada com recurso a IA (inteligência artificial).	8
Figura 2 - Estrutura temática do Guia de Capacitação sobre Impressão 3D na Construção.	9
Figura 3 - Percurso de aprendizagem proposto pelo Guia de Capacitação sobre Impressão 3D na Construção.	9
Figura 4 - Princípio de funcionamento da impressão 3D na construção: do modelo digital ao elemento físico.	12
Figura 5 - O que é e o que não é a impressão 3D na construção.	14
Figura 6 - Potencial e principais condicionantes da impressão 3D na construção.	15
Figura 7 - Principais abordagens de impressão 3D aplicadas à construção.	16
Figura 8 - Dos requisitos do projeto ao elemento validado.	17
Figura 9 - Ambientes e formatos digitais utilizados na preparação de ficheiros para fabrico aditivo (impressão 3D).	18
Figura 10 - Comparação indicativa entre arquiteturas de movimento utilizadas na impressão 3D para a construção.	20
Figura 11 - Principais subsistemas de uma célula de impressão 3D.	22
Figura 12 - Síntese do módulo 1.	24
Figura 13 - Principais famílias e abordagens de materiais utilizadas na impressão 3D para a construção.	26
Figura 14 - Principais requisitos de desempenho de uma mistura imprimível.	27
Figura 15 - Relação entre bombeabilidade, extrudabilidade e capacidade de construção.	28
Figura 16 - Funções dos principais constituintes de uma mistura imprimível.	29
Figura 17 - Principais critérios para a avaliação de materiais alternativos na impressão 3D para a construção.	30
Figura 18 - Condições favoráveis e fatores de risco na ligação entre camadas.	31
Figura 19 - Principais estratégias de reforço e integração híbrida na impressão 3D para a construção.	32
Figura 20 - Fluxo de controlo da qualidade, desde os materiais até à aceitação do elemento.	33
Figura 21 - Representação conceptual da integração entre projeto digital, fabrico aditivo e execução em obra, gerada com recurso a inteligência artificial.	34
Figura 22 - Síntese do módulo 2.	35
Figura 23 - Principais aplicações do fabrico aditivo (impressão 3D) na construção.	37
Figura 24 - Valor potencial e pontos de controlo na utilização de moldes e cofragens impressos.	38
Figura 25 - Diferenças entre aplicações estruturais e não estruturais na impressão 3D para a construção.	39
Figura 26 - Etapas indicativas de desenvolvimento e validação de um elemento estrutural impresso.	40
Figura 27 - Representação conceptual, gerada por inteligência artificial, de aplicações do fabrico aditivo na construção.	41
Figura 28 - Matriz de apoio à seleção da primeira aplicação de fabrico aditivo.	42
Figura 29 - As métricas divulgadas para o projeto ReCircular não são diretamente comparáveis, porque se referem a diferentes aspetos da construção.	43
Figura 30 - Síntese do módulo 3.	49
Figura 31 - Do atributo tecnológico ao valor empresarial na adoção da impressão 3D na construção.	51
Figura 32 - Principais componentes a considerar na avaliação da adoção da impressão 3D na construção.	53

Figura 33 - Perfis e responsabilidades essenciais numa equipa interfuncional para a adoção da impressão 3D na construção.	54
Figura 34 - Principais etapas do ciclo de vida a considerar na avaliação da impressão 3D na construção.	55
Figura 35 - Principais ganhos e contrapartidas ambientais associados à impressão 3D na construção.	56
Figura 36 - Principais etapas do ciclo de vida que influenciam o fim de vida e a recuperação de materiais na impressão 3D na construção.	57
Figura 37 - Síntese do módulo 4.	60
Figura 38 - Principais componentes de um sistema de garantia da qualidade aplicado à impressão 3D na construção.	62
Figura 39 - Principais etapas do processo de qualificação aplicadas à impressão 3D na construção.	63
Figura 40 - Principais parâmetros de monitorização do processo de impressão 3D na construção.	64
Figura 41 - Principais camadas de prevenção para uma operação segura de uma célula robotizada de impressão 3D na construção.	65
Figura 42 - Etapas principais para a definição da rota de conformidade de produtos de construção obtidos por impressão 3D.	67
Figura 43 - Principais áreas a avaliar na seleção e diligência de fornecedores de impressão 3D na construção.	69
Figura 44 - Síntese do módulo 5.	71
Figura 45 - Principais dimensões da prontidão empresarial para a adoção da impressão 3D na construção.	73
Figura 46 - Matriz de apoio à seleção do primeiro caso de utilização da impressão 3D na construção.	74
Figura 47 - Comparação entre produção interna e serviço/parceria na adoção da impressão 3D na construção.	75
Figura 48 - Exemplos das principais áreas de avaliação de fornecedores e parceiros para a adoção da impressão 3D na construção.	76
Figura 49 - Projeto-piloto com portas de decisão.	77
Figura 50 - Painel mínimo para acompanhar um piloto.	78
Figura 51 - Exemplo de organização funcional de uma equipa interfuncional para a adoção da impressão 3D na construção.	79
Figura 52 - Roteiro indicativo para um primeiro projeto.	80
Figura 53 - Boas práticas e erros frequentes.	81
Figura 54 - Síntese do módulo 6.	82

Introdução

Objetivo do Guia

O que este guia oferece

Este guia ajuda a compreender a tecnologia, a comparar soluções e a apoiar a tomada de decisão. Não constitui um manual de projeto estrutural nem de operação de equipamentos. Foi desenvolvido como um recurso de capacitação para as PME do setor da construção. Apresenta os princípios, as aplicações, os riscos e os critérios de decisão associados ao fabrico aditivo (impressão 3D), com especial destaque para os processos de extrusão de materiais cimentícios.

Como foi construído

O conteúdo deste guia baseia-se em normas técnicas, artigos científicos, documentos europeus, projetos demonstradores e fontes institucionais. As referências e ligações disponibilizadas foram selecionadas para permitir verificar a informação apresentada, consultar as fontes originais e aprofundar cada tema abordado. Em cada ficha, a secção "Para aprofundar" reúne as referências mais relevantes para o tema tratado, indicando o principal contributo de cada uma para facilitar a continuação da aprendizagem.

Princípio editorial

A tecnologia é apresentada de forma equilibrada, valorizando uma análise crítica das suas possibilidades, dos seus limites, dos riscos associados e das condições necessárias à sua adoção.



Estrutura modular — Cada módulo está organizado em fichas temáticas, permitindo uma leitura sequencial ou a consulta autónoma de cada tema.



Figura 1 - Representação conceptual da impressão 3D na construção, gerada com recurso a IA (inteligência artificial).



Figura 2 - Estrutura temática do Guia de Capacitação sobre Impressão 3D na Construção.



Figura 3 - Percurso de aprendizagem proposto pelo Guia de Capacitação sobre Impressão 3D na Construção.

LEITURA RÁPIDA

Dez decisões antes de investir

Antes de investir, confirme os principais aspetos que importa avaliar.

1. Problema Que necessidade concreta pretende resolver, como uma forma complexa, uma pequena série, um molde, um prazo crítico, a personalização ou a redução do consumo de material?	2. Função O elemento é estrutural, não estrutural, temporário, uma ferramenta, um protótipo ou parte de um sistema híbrido?
3. Referência Qual é a solução convencional equivalente para comparar o custo, o prazo, a qualidade e o impacto ambiental?	4. Material A mistura foi validada para o equipamento, o bocal, a geometria e as condições ambientais previstas?
5. Processo Existem os parâmetros, os limites, os registos, os critérios de paragem e os procedimentos de resposta às não conformidades?	6. Qualidade Como serão verificados a geometria, as interfaces, a resistência, a durabilidade, o reforço e a montagem?
7. Segurança A célula de impressão, as pressões, os materiais e a interação com as pessoas foram avaliados por profissionais com as competências adequadas?	8. Conformidade Estão definidos os requisitos regulamentares e de conformidade aplicáveis ao produto, à obra e ao equipamento?
9. Economia O cálculo inclui a preparação, os ensaios, o acabamento, a manutenção, a formação, a logística e a taxa de utilização prevista do equipamento?	10. Decisão O piloto tem definidos, antes do seu início, os critérios de continuidade, de reformulação ou de abandono?
 IDEIA-CHAVE	Decisão prudente — Para a maioria das PME, o primeiro passo deverá consistir na realização de um ensaio ou na contratação de um serviço especializado, antes de investir na aquisição de uma célula de impressão.

Para aprofundar: [8], [11], [25]

Módulo 1 - Tecnologia e cadeia digital

A impressão 3D (fabrico aditivo) na construção

Conceitos fundamentais, cadeia digital, equipamentos e rastreabilidade.

Porque desperta tanto interesse no setor da construção?

A impressão 3D na construção tem sido explorada como uma resposta a alguns dos principais desafios do setor, como a escassez de mão de obra qualificada, a necessidade de aumentar a produtividade, a redução do desperdício de materiais, a execução de geometrias complexas e a procura de soluções mais sustentáveis.

Esta tecnologia não pretende substituir a construção tradicional. Constitui, antes, uma abordagem complementar que permite produzir determinados elementos construtivos de forma mais automatizada e controlada, com maior capacidade de adaptação às necessidades de cada projeto.

O que é?

A impressão 3D na construção é um processo de fabrico aditivo que produz elementos físicos a partir de um modelo digital, através da deposição controlada de material, camada a camada.

Na prática, podem ser produzidas paredes, componentes, moldes e outros elementos construtivos, sem que isso signifique, necessariamente, a impressão de um edifício completo.

1 Compreender o processo

2 Distinguir equipamentos

3 Compreender os fatores críticos



i Os benefícios dependem do projeto, dos materiais, da aplicação e da validação.

Figura 4 - Princípio de funcionamento da impressão 3D na construção: do modelo digital ao elemento físico.

Princípio de base

A geometria física é produzida a partir de informação digital através da deposição controlada de material, camada a camada. A norma ISO/ASTM 52900 [1] define o fabrico aditivo como a produção de geometrias tridimensionais por adição sucessiva de material.

Na construção, este conceito abrange diferentes processos e escalas, incluindo a extrusão de argamassas e betões, o jato de ligante, o fabrico de moldes, a deposição de metais e a produção de componentes poliméricos.

A expressão "impressão 3D de uma casa" raramente corresponde à construção integral de um edifício. Em muitos projetos são impressas apenas as paredes ou determinados componentes, permanecendo convencionais as fundações, as armaduras, as lajes, as coberturas, as instalações, os revestimentos, as caixilharias e os trabalhos de acabamento.

Para aprofundar: [1] Conceitos e terminologia do fabrico aditivo. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [9] Processos de fabrico por extrusão de materiais cimentícios.

Uma cadeia, não uma máquina

A produção resulta da articulação entre o modelo digital, a preparação, o material, a alimentação, o sistema de movimento, a deposição, a cura, a inspeção e a montagem. A qualidade final depende da compatibilidade entre todas estas etapas.

Cada etapa influencia a seguinte. Um erro na modelação, na preparação do material ou na parametrização do equipamento pode comprometer a qualidade do elemento produzido. Por essa razão, a impressão 3D deve ser entendida como um processo integrado e não apenas como uma operação de deposição de material.

Para aprofundar: [4] Processamento da informação digital. [7] Fabrico digital com materiais cimentícios. [9] Etapas e fundamentos do processo de fabrico por extrusão de materiais cimentícios..

Que problemas procura resolver

A impressão 3D na construção é explorada como uma resposta a algumas limitações do processo construtivo tradicional, como a dependência da cofragem para a execução de formas complexas, o desperdício de material, a escassez de mão de obra qualificada, os prazos de execução e a dificuldade em produzir peças personalizadas em pequena série.

Não substitui os métodos construtivos convencionais em todas as situações. Acrescenta valor, sobretudo, quando a geometria, a personalização, a redução do desperdício ou o grau de automatização justificam a sua utilização.

Para aprofundar: [8] Aplicações e desenvolvimento da impressão 3D por extrusão de betão. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção.

O que é — e o que não é

Compreender a impressão 3D implica distinguir aquilo que a tecnologia permite fazer das expectativas que frequentemente lhe são atribuídas.

 É	 Não é
 Produção por adição sucessiva de material a partir de dados digitais.	 Não equivale a imprimir um edifício completo sem outros trabalhos.
 Família de processos: impressão direta, moldes impressos, deposição de ligantes e soluções híbridas.	 Não elimina automaticamente armaduras, fundações, instalações ou acabamentos.
 Processo integrado com preparação, controlo, cura, ensaio e montagem.	 Não garante, por si só, menor custo ou menor impacto ambiental.

Figura 5 - O que é e o que não é a impressão 3D na construção.

O que é

A expressão "impressão 3D" simplifica uma cadeia industrial complexa. Trata-se de um processo de fabrico digital que articula a geometria, o material, o equipamento, os parâmetros de processo, o ambiente e o controlo da produção. Pode criar formas personalizadas, reduzir a necessidade de cofragens e aproximar a produção do modelo digital e dos dados associados. Não elimina automaticamente a necessidade de trabalho humano, de projeto, de controlo da segurança, de verificação da conformidade, de transporte, de montagem ou de acabamentos. Também não garante, por si só, a redução dos custos, dos prazos de execução ou do impacto ambiental.

Comparar com a solução convencional

A comparação deve ser feita ao nível da função e do sistema completo, e não apenas da fase de deposição. O processo convencional pode beneficiar de cadeias de fornecimento consolidadas, de normas estabilizadas e de mão de obra experiente. A impressão 3D pode reduzir a necessidade de ferramentas específicas, permitir a iteração digital e concentrar operações, mas exige software, controlo, qualificação, ensaios e condições de processo rigorosamente controladas.

Uma comparação correta deve incluir o projeto, os materiais, o equipamento, a preparação, a produção, o pós-processamento, a montagem, a inspeção, a manutenção, a vida útil e o fim de vida.



IDEIA-CHAVE

Comparação correta — Compare soluções que cumpram a mesma função, assegurem o mesmo desempenho, apresentem o mesmo nível de acabamento e tenham a mesma vida útil.

Para aprofundar [1] Conceitos e terminologia do fabrico aditivo. [4] Cadeia e processamento digital. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção.

Relevância, oportunidades e limites

A tecnologia pode criar valor em determinadas situações, mas também apresentar limitações e riscos.

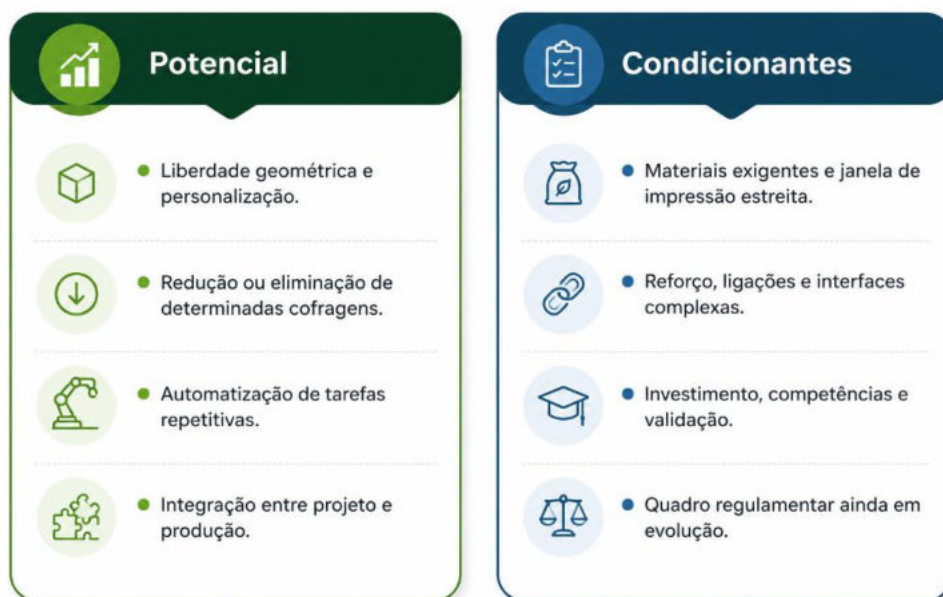


Figura 6 - Potencial e principais condicionantes da impressão 3D na construção.

Porque pode ser relevante

A tecnologia pode responder a alguns dos principais desafios do setor, mas exige uma mudança de métodos de trabalho e de competências. A impressão 3D pode reduzir a necessidade de cofragens específicas, permitir a execução de geometrias complexas, automatizar tarefas repetitivas e produzir componentes personalizados sem recurso a ferramentas dedicadas. Estas características podem ser particularmente relevantes para empresas de pré-fabricação, construção especializada, reabilitação, mobiliário urbano e produção de moldes.

A relevância para cada empresa depende da repetibilidade da procura, da possibilidade de digitalizar o produto, dos requisitos de desempenho, do acesso a parceiros e do custo de qualificação da solução. O potencial de criação de valor é maior quando a geometria ou a personalização justificam a utilização desta tecnologia e menor quando o produto é simples, padronizado e já dispõe de um processo convencional eficiente.

Potencial e condicionantes

O potencial da impressão 3D depende da aplicação, do contexto e da forma como a tecnologia é utilizada. A liberdade geométrica só cria valor quando reduz o consumo de material, simplifica operações, melhora o desempenho ou cria diferenciação. A automatização exige um fluxo estável de dados, materiais e processos. A produção no estaleiro pode reduzir o transporte de elementos volumosos, mas aumenta a exposição às condições climáticas e às interferências da obra. Antes de adotar esta tecnologia, a empresa deve definir uma solução convencional de referência, formular hipóteses de melhoria e medir os resultados obtidos, em vez de assumir benefícios universais.



IDEIA-CHAVE

Pergunta essencial — A geometria, o volume de produção ou o prazo justificam alterar a cadeia produtiva?

Para aprofundar: [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção. [8] Aplicações e desafios da impressão 3D na construção. [17] Estratégias de impressão, materiais cimentícios e métodos de caracterização.

Principais tecnologias de impressão 3D na construção e respetivo nível de maturidade

A extrusão cimentícia domina a maioria das aplicações atualmente divulgadas, mas não é a única tecnologia disponível.



Figura 7 - Principais abordagens de impressão 3D aplicadas à construção.

Principais abordagens de impressão 3D na construção

A extrusão cimentícia domina atualmente a maioria das aplicações de impressão 3D na construção, mas não é a única tecnologia disponível. Neste processo, um material pastoso é depositado através de um bocal, camada a camada. Existem também outras tecnologias, como o jato de ligante, utilizado para consolidar seletivamente um leito granular, ou a deposição de metais, aplicada na produção de componentes especializados. A impressão 3D com polímeros, areia ou espuma é utilizada sobretudo no fabrico de moldes e cofragens. A escolha da tecnologia mais adequada depende da aplicação pretendida, do material, da precisão necessária, da função do elemento, do volume de produção, dos requisitos de pós-processamento e do enquadramento regulamentar.

Maturidade das aplicações

A existência de um protótipo não significa que uma solução esteja preparada para uma utilização corrente. Em geral, os modelos, os moldes e os componentes não estruturais apresentam menores barreiras técnicas e regulamentares do que os elementos estruturais, os edifícios completos ou as aplicações sujeitas a condições de serviço mais exigentes. O grau de maturidade também varia entre tecnologias, materiais, países e sistemas de aprovação. Antes de investir, confirme se existem projetos já realizados, especificações técnicas estáveis, dados de desempenho e durabilidade, referências comerciais comparáveis, assistência técnica e uma rota de conformidade aplicável.



IDEIA-CHAVE

Maturidade — Um protótipo demonstra que uma solução é possível; não demonstra, por si só, a sua repetibilidade, conformidade ou viabilidade comercial.

Para aprofundar: [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [25] Estado da arte e maturidade da impressão 3D em betão. [24] Normalização da impressão 3D em betão. [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas.

Cadeia digital e conceção para impressão 3D

Um erro introduzido no modelo digital pode propagar-se até ao elemento produzido.



Figura 8 - Dos requisitos do projeto ao elemento validado.

Cadeia digital e produtiva

Um erro introduzido no modelo digital pode propagar-se até ao elemento construído. O percurso típico inclui a definição dos requisitos, a modelação, a análise, a preparação da geometria, a divisão em camadas, a geração de trajetórias, a parametrização, a simulação, a produção, a monitorização, a inspeção e o registo final. Cada transferência de informação deve ter um responsável, um formato, uma versão e uma verificação. A automatização não elimina a necessidade de revisão; pelo contrário, desloca parte do controlo para as fases iniciais do processo e torna a gestão de versões ainda mais importante.

Conceção para fabrico aditivo

A conceção para fabrico aditivo (DfAM) - impressão 3D - começa pela função do elemento e pelos requisitos de desempenho, e não pela procura de formas geométricas complexas. O modelo deve incorporar os requisitos de utilização, as cargas, as interfaces, as tolerâncias, o percurso do bocal, a estabilidade durante a produção, as juntas, os reforços, as instalações, o transporte e a montagem. Geometrias difíceis de imprimir, mas fáceis de executar por outro método, raramente criam valor. A equipa deve distinguir os requisitos obrigatórios, as opções de projeto e os parâmetros que podem ser otimizados. Defina as superfícies críticas e as zonas que admitem acabamento. Planeie o início e o fim da impressão, as mudanças de direção e as eventuais interrupções. Evite cavidades inacessíveis sem uma estratégia de inspeção, limpeza ou drenagem.

“Conceção para fabrico aditivo (DfAM)” é a abordagem de projeto que adapta a geometria, os materiais, a estratégia de deposição, a orientação das camadas e os requisitos de verificação às possibilidades e limitações do processo de fabrico aditivo.



IDEIA-CHAVE

DfAM — Conceber para fabrico aditivo começa pela função do elemento, pelos requisitos de desempenho e pelas interfaces, e não pela criação de formas complexas.

Para aprofundar: [4] Processamento da informação digital. [6] Modelos BIM e formato IFC (openBIM). [13] Conceção e produção de elementos estruturais em betão impresso. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção.

Dados, formatos e preparação para a impressão

A preparação da impressão exige a verificação das unidades, da geometria, das propriedades do modelo e da versão dos dados.



Figura 9 - Ambientes e formatos digitais utilizados na preparação de ficheiros para fabrico aditivo (impressão 3D).

Modelo e coordenação

O modelo geométrico não contém, necessariamente, toda a informação necessária para a produção. Além da forma, pode ser necessário indicar as unidades, o sistema de coordenadas, os materiais, as tolerâncias, a identificação das zonas, a orientação, as interfaces, a estratégia de reforço, a sequência de produção e os parâmetros do processo. Quando existe um modelo BIM, a informação necessária ao fabrico deve articular-se com o modelo de informação do projeto. A responsabilidade pela transformação do modelo de projeto num modelo de fabrico deve estar claramente definida, incluindo do ponto de vista contratual.

Formatos de ficheiro

O formato de ficheiro escolhido influencia a informação que é preservada e transmitida entre as diferentes etapas do processo. O STL representa a geometria através de uma malha de triângulos e continua a ser amplamente utilizado, mas não preserva, de forma robusta, informação como as unidades, a semântica ou os materiais. O OBJ e outros formatos de malha podem acrescentar informação visual. O 3MF e o AMF foram desenvolvidos para transportar informação mais completa relacionada com o fabrico aditivo. O IFC é relevante para a coordenação da informação do projeto, mas não substitui, necessariamente, o ficheiro que contém as trajetórias de impressão. A transferência de informação deve ser acompanhada por uma folha de controlo que identifique o formato, a versão, as unidades, a origem, a data, a orientação, as tolerâncias e a verificação efetuada.

Camadas e trajetórias

O *slicing* (fatiamento do modelo digital) converte a geometria num conjunto de trajetórias executáveis e influencia o tempo de produção, a qualidade das interfaces entre camadas e o desempenho do elemento produzido. Este processo divide o modelo em camadas sucessivas e gera os percursos que serão seguidos pelo equipamento durante a impressão. A altura da camada, a largura do cordão, a orientação, a velocidade, a aceleração, o caudal e a sequência de deposição têm de ser compatíveis entre si. Mudanças bruscas de direção podem aumentar a ocorrência de defeitos e as interrupções prolongadas podem originar juntas frias. Trajetórias definidas sem considerar o comportamento estrutural podem ser incompatíveis com a direção dos esforços. Antes da produção, a simulação deve identificar possíveis colisões, zonas sem apoio, acumulações de material, tempos de espera e incompatibilidades com reforços ou elementos incorporados.



Controlo de versão — Registe quem aprovou o modelo, a respetiva versão, as conversões efetuadas, os parâmetros utilizados e o ficheiro executado. Esta informação é essencial para garantir a rastreabilidade do processo.

Para aprofundar: [4] Processamento da informação digital. [5] Formato 3MF e gestão de dados de fabrico aditivo. [6] Modelos BIM e formato IFC (openBIM). [9] Processos de fabrico por extrusão de materiais cimentícios.

Pórtico, braço robótico e sistemas móveis

O volume de trabalho, a liberdade de movimento e os requisitos logísticos variam consoante a arquitetura do equipamento.

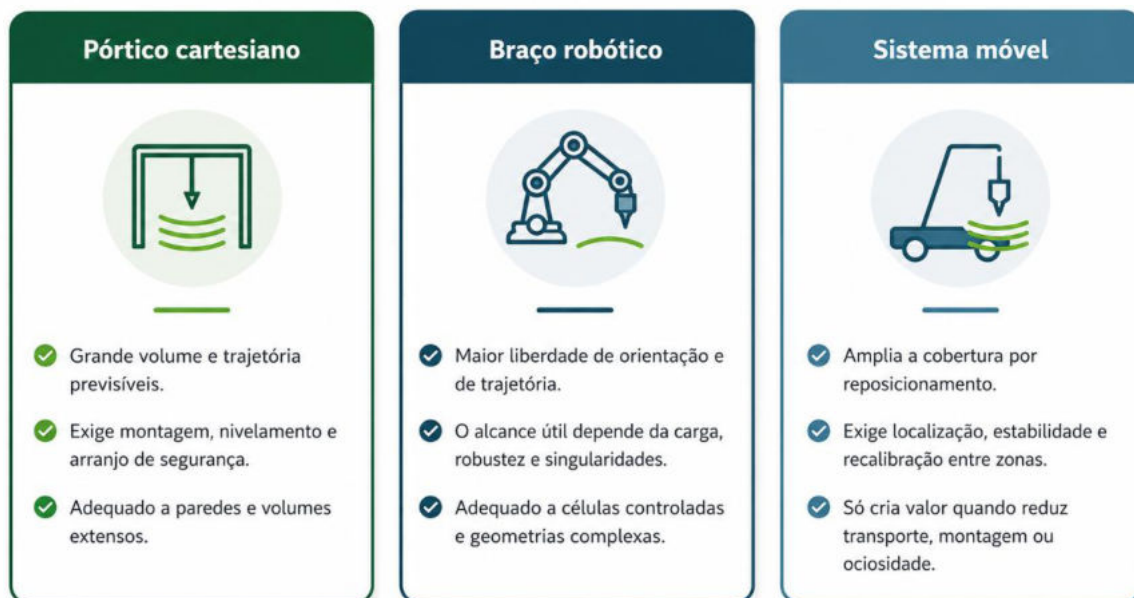


Figura 10 - Comparação indicativa entre arquiteturas de movimento utilizadas na impressão 3D para a construção.

Sistema de pórtico

O pórtico cartesiano oferece um volume de trabalho amplo e trajetórias previsíveis. A estrutura desloca a cabeça de impressão segundo eixos definidos e pode abranger um edifício ou uma zona de produção. A instalação exige uma base ou estrutura de apoio estável, nivelamento, montagem, calibração e uma zona de segurança devidamente delimitada. A definição do volume de trabalho deve considerar não apenas a área de impressão, mas também o espaço necessário para o movimento do equipamento, a alimentação de material, a manutenção e o acesso dos operadores. A rigidez, a precisão, a repetibilidade e a velocidade devem ser avaliadas com a carga real da cabeça de impressão, da tubagem e do material.

Braço robótico

O braço robótico oferece uma elevada liberdade de movimento e de orientação, permitindo executar trajetórias complexas. Em contrapartida, exige uma programação cuidada e uma gestão rigorosa do alcance de trabalho. Pode inclinar o bocal, imprimir superfícies não horizontais e operar em células de produção automatizadas. O alcance útil é geralmente inferior ao alcance nominal, devido a fatores como as singularidades cinemáticas, a orientação do robô, a carga transportada, a tubagem, o risco de colisões e os requisitos de segurança. A célula de produção deve integrar o robô, o controlador, o sistema de alimentação, os sensores, as barreiras de proteção, os dispositivos de paragem segura e os procedimentos de recuperação após uma interrupção.

Sistemas móveis

A mobilidade pode aumentar a área de trabalho, mas transfere parte da complexidade para o posicionamento e a estabilidade do equipamento. Os sistemas móveis, as gruas, os sistemas por cabos e outros equipamentos que podem ser reposicionados permitem alargar a área de intervenção e adaptar a produção a diferentes contextos de obra. Esta abordagem exige referências de posicionamento, calibração entre zonas, controlo de assentamentos, proteção das trajetórias e coordenação com pessoas, equipamentos e outras atividades. Para uma PME, a mobilidade só constitui uma vantagem quando reduz, de forma efetiva, os tempos de montagem, os custos de transporte ou os períodos de inatividade do equipamento.



IDEIA-CHAVE

Seleção do equipamento — Não existe uma arquitetura de equipamento universalmente melhor. A escolha deve ser feita em função da aplicação, dos requisitos técnicos e das condições de utilização.

Para aprofundar: [8] Tecnologias e aplicações da impressão 3D na construção. [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e respetivos equipamentos. [28] Requisitos de segurança aplicáveis às máquinas e às células robotizadas. [29] Aplicação do Regulamento (UE) 2023/1230 relativo às máquinas. [51] Sistemas robotizados e equipamentos de grande escala para fabrico aditivo.

Célula de impressão e local de produção

A impressora constitui apenas um dos subsistemas de uma célula de produção.



Figura 11 - Principais subsistemas de uma célula de impressão 3D.

Componentes da célula

A impressora constitui apenas um dos subsistemas da célula de produção. A dosagem, a mistura, a bombagem, a tubagem, a cabeça de impressão, o sistema de movimento, os sensores, o sistema de controlo, a alimentação elétrica, a limpeza, a recolha de resíduos e os sistemas de segurança integram uma única célula de produção. O desempenho global é condicionado pelo elo mais fraco do sistema: uma trajetória perfeita não compensa um material instável e uma mistura adequada não compensa uma bombagem irregular. A consulta ao fornecedor deve incluir o diagrama da célula, as interfaces entre os diferentes subsistemas, os consumos, os requisitos de manutenção, os sobressalentes recomendados e as condições de instalação.

Fábrica ou estaleiro

A escolha do local de produção influencia a qualidade, a logística, o transporte, a montagem e o risco operacional. A produção em fábrica oferece um ambiente mais estável, uma equipa permanente, melhores condições de manutenção, maior controlo das matérias-primas e maior repetibilidade do processo. A produção em estaleiro evita o transporte de elementos volumosos e permite adaptar a produção às condições específicas da obra, mas está sujeita ao vento, à chuva, às variações de temperatura, às poeiras, às limitações de acesso, às interferências com outras atividades e às alterações do planeamento. As soluções híbridas — com componentes produzidos em fábrica e posteriormente montados no local — podem constituir uma opção mais realista para uma primeira adoção da tecnologia.



IDEIA-CHAVE

Escolha do local — A produção em fábrica proporciona um maior controlo do processo; a produção em estaleiro reduz o transporte de elementos, mas exige uma maior adaptação às condições da obra.

Para aprofundar: [3] Qualificação dos processos de fabrico e dos locais de produção. [8] Aplicações da impressão 3D na construção e respetivos contextos de produção. [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e organização da célula de produção. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

Rastreabilidade e atividade de aplicação

A empresa deve conseguir reconstruir o que foi produzido, com que dados, por que processo e em que condições.



Rastreabilidade mínima

Cada elemento deve poder ser relacionado com os dados que permitem reconstruir a forma como foi produzido. O registo mínimo deve incluir a identificação do elemento, o ficheiro utilizado e a respetiva versão, o lote do material, a receita, o equipamento, o estado de calibração, o operador, as condições ambientais, os parâmetros do processo, as interrupções, os desvios, os registos fotográficos, os resultados dos ensaios e a decisão de aceitação. O nível de detalhe dos registos deve ser proporcional ao risco e à função do elemento. Os registos gerados automaticamente constituem um apoio importante, mas necessitam de contexto, de proteção contra alterações e de uma política de retenção.



Mapa de dados

Desenhe o percurso dos dados desde o modelo fornecido pelo cliente até ao ficheiro executado pelo equipamento.



Pontos de controlo

Assinale quem aprova a geometria, as unidades, a orientação, a trajetória, os parâmetros do processo e as alterações ao longo do fluxo de trabalho.



Falha simulada

Imagine uma interrupção de 20 minutos. Que dados, registos e critérios de aceitação permitem decidir se a produção pode ser retomada ou se o elemento deve ser rejeitado?



IDEIA-CHAVE

Exercício — Escolha um elemento que a sua empresa produza, ou possa vir a produzir, por impressão 3D e descreva o percurso da informação, desde o modelo digital até ao fabrico.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas produzidos por fabrico aditivo. [3] Qualificação dos processos de fabrico e dos locais de produção. [4] Processamento da informação digital e preparação dos dados para o fabrico. [23] Controlo da qualidade e rastreabilidade no fabrico digital com betão.

Síntese do módulo 1 - Tecnologia e cadeia digital

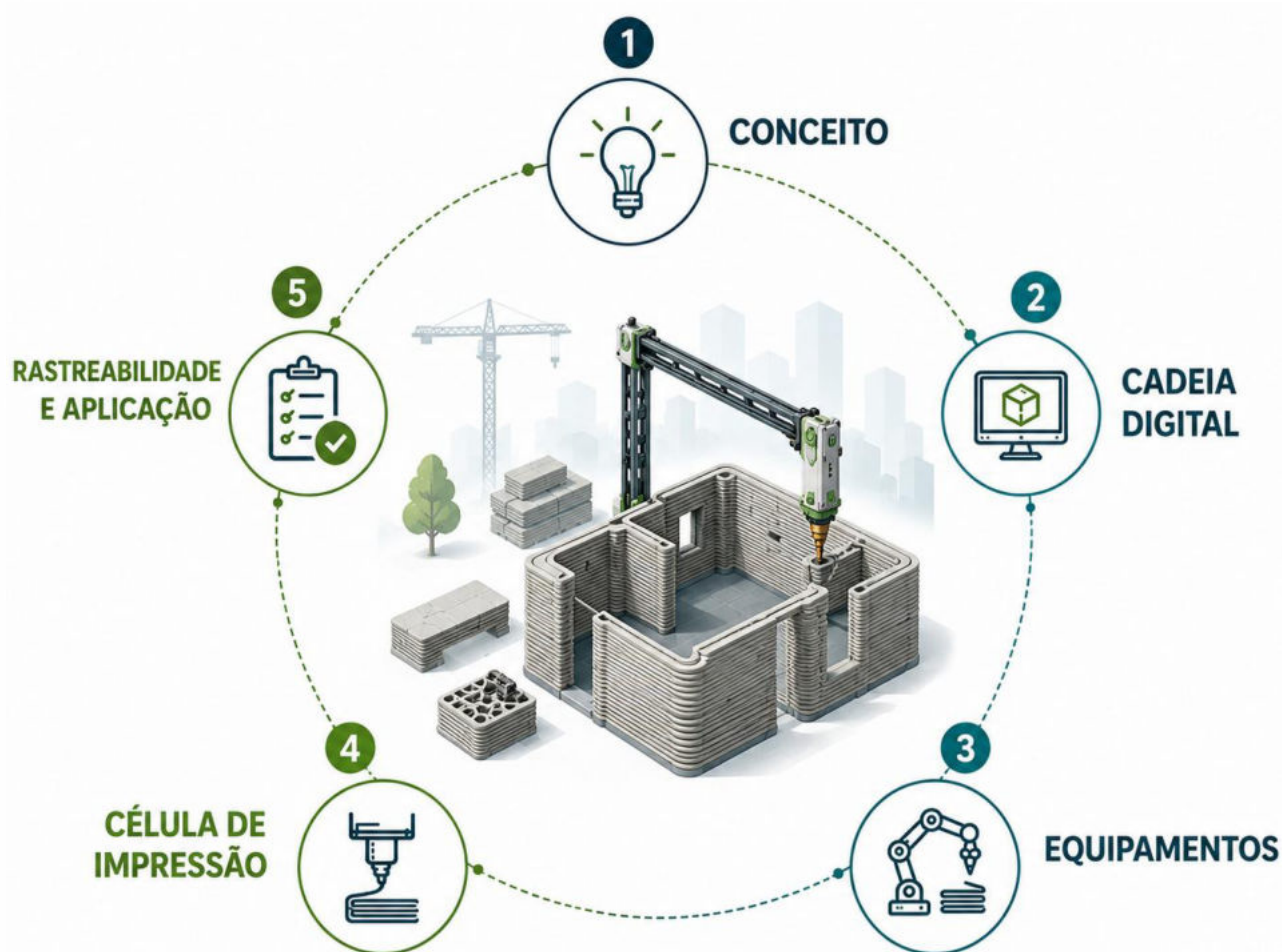


Figura 12 - Síntese do módulo 1.

Módulo 2 - Materiais e processo

Materiais e propriedades

Imprimibilidade, constituintes, deposição por camadas, reforço e controlo do processo.

1 Relacionar material e máquina 2 Reconhecer a janela de processo 3 Definir pontos de controlo



Figura 13 - Principais famílias e abordagens de materiais utilizadas na impressão 3D para a construção.

Famílias de materiais

Cada família de materiais oferece possibilidades distintas e exige métodos próprios de caracterização, qualificação e validação. Os materiais cimentícios dominam atualmente a maioria das aplicações de grande escala na construção. Os materiais à base de terra e argila são utilizados em protótipos, elementos não estruturais e soluções de baixa altura, mas requerem um controlo rigoroso da composição, do teor de água e da durabilidade. Os polímeros e os compósitos são frequentemente utilizados no fabrico de moldes, cofragens, componentes leves e elementos auxiliares. Os metais são utilizados sobretudo em ligações, componentes especializados e aplicações estruturais específicas. Os resultados obtidos com uma família de materiais não devem ser transferidos diretamente para outra.

Materiais cimentícios

Uma mistura imprimível é formulada para um determinado equipamento, uma estratégia de deposição, condições ambientais e um intervalo de tempo específicos. Pode incluir cimento, adições, agregados finos, água, adjuvantes modificadores da reologia, aceleradores, retardadores e fibras. A ausência de cofragem exige um ganho de resistência nas primeiras idades, enquanto a bombagem exige uma adequada capacidade de escoamento. O equilíbrio entre estas propriedades depende da composição da mistura, da temperatura, da humidade, da energia de mistura e do tempo decorrido desde a preparação. As formulações comerciais devem ser acompanhadas da ficha técnica, da ficha de segurança, das tolerâncias de dosagem e do procedimento de verificação à receção.

Para aprofundar: [7] Fabrico digital com materiais cimentícios e principais desafios tecnológicos. [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e respetivos equipamentos. [10] Formulação das misturas e propriedades relevantes para a impressão 3D em betão. [16] Materiais sustentáveis para impressão 3D em betão. [17] Estratégias de impressão, materiais cimentícios e métodos de caracterização.

Reologia e janela de imprimibilidade

O material deve escoar durante a extrusão e manter um comportamento adequado ao longo de todo o processo de impressão.

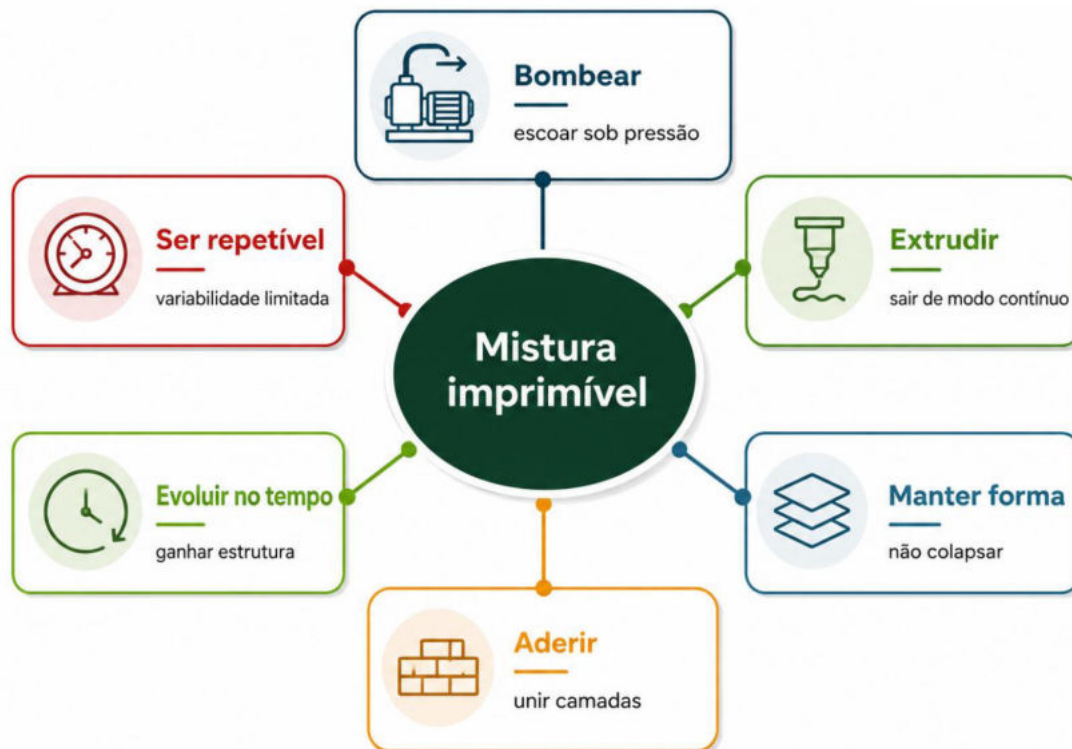


Figura 14 - Principais requisitos de desempenho de uma mistura imprimível.

Reologia e tixotropia

A reologia corresponde ao comportamento do material quando é sujeito a forças ou deformações, determinando a forma como flui, se deforma e recupera a sua estabilidade. A tixotropia corresponde à capacidade de a mistura recuperar gradualmente a sua estrutura após deixar de ser solicitada, permitindo que cada camada suporte as camadas seguintes sem recorrer a cofragem. O material deve escoar durante a extrusão e recuperar rapidamente a estabilidade após a deposição. A tensão de cedência, a viscosidade plástica e a taxa de recuperação estrutural ajudam a explicar a bombagem, a extrusão e a estabilidade das camadas. Valores isolados não bastam: o método de ensaio, o histórico de corte, a temperatura e o tempo influenciam os resultados. Para o controlo corrente podem ser utilizados ensaios empíricos correlacionados com medições laboratoriais, desde que essa correlação seja demonstrada para o material e para o sistema.

Janela de imprimibilidade

A janela de imprimibilidade corresponde ao intervalo de condições em que uma mistura pode ser produzida de forma consistente e segura. A imprimibilidade não é uma propriedade permanente; depende das características da mistura e das condições do processo. A mistura pode estar demasiado fluida no início, apresentar um comportamento adequado durante um determinado período e tornar-se demasiado rígida mais tarde. A janela de imprimibilidade deve abranger a preparação da mistura, o transporte, o tempo de espera, a bombagem, a deposição e as eventuais interrupções. O procedimento deve definir os critérios de aceitação, a frequência das verificações e as ações a adotar quando o material deixa de cumprir essas condições.



IDEIA-CHAVE

Não existe uma “mistura universal” — Cada mistura deve ser formulada e validada para as condições em que será utilizada.

Para aprofundar: [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e respetiva influência na imprimibilidade. [10] Formulação das misturas e propriedades relevantes para a impressão 3D em betão. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio aplicáveis aos materiais cimentícios imprimíveis.

Bombear, extrudir e construir em altura

O desempenho da mistura depende do equilíbrio entre a bombeabilidade, a extrudabilidade e a capacidade de construção.



Figura 15 - Relação entre bombeabilidade, extrudabilidade e capacidade de construção.

Bombeabilidade

A alimentação do material deve ser contínua, sem segregação, bloqueios, pulsações ou pressões excessivas. O diâmetro e o comprimento da tubagem, o número de curvas, a altura de bombagem, o caudal, a granulometria, as fibras, a lubrificação da tubagem e o tempo de paragem influenciam a pressão necessária para o transporte da mistura. Um bloqueio pode provocar uma sobrepressão e a libertação súbita de material. O plano de ensaio deve incluir o arranque, o regime estável, a interrupção, a retoma, a limpeza e a resposta a um entupimento, em condições previamente definidas de acordo com as instruções do fabricante e com a análise de risco.

Extrudabilidade

Extrudir consiste em forçar a passagem da mistura através de um bocal, formando um cordão contínuo com a geometria pretendida. A extrudabilidade corresponde à capacidade da mistura para manter esse processo de forma estável e consistente. O cordão deve ser depositado de forma contínua, preencher a trajetória prevista e conservar uma geometria controlada. A relação entre o diâmetro do bocal, a dimensão máxima do agregado, o caudal e a velocidade de deposição determina a largura e a altura do cordão. Vazios, rasgos, arrastamento, acumulação de material ou rotura do cordão podem indicar incompatibilidades entre a mistura e os parâmetros do processo. A inspeção deve combinar a observação do cordão, a medição da sua geometria e, quando disponível, o registo da pressão ou do caudal.

Capacidade de construção

As camadas inferiores suportam um peso crescente e podem deformar-se antes do endurecimento. A estabilidade depende da resistência nas primeiras idades, da tixotropia, da altura e da largura das camadas, da geometria do elemento, do tempo entre deposições e do ritmo de construção. Uma parede pode manter-se estável num troço reto e falhar numa curva, junto de uma abertura ou numa zona de concentração de tensões. O ensaio deve reproduzir a altura, o percurso, as interrupções e as condições ambientais previstas para a impressão, em vez de se limitar a pequenos provetes.



IDEIA-CHAVE

Equilíbrio da mistura — Melhorar uma propriedade pode comprometer a outra; a formulação deve equilibrar a bombeabilidade, a extrudabilidade e a capacidade de construção.

Para aprofundar: [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e fatores que influenciam a bombeabilidade e a extrudabilidade. [10] Formulação das misturas e propriedades relevantes para a impressão 3D em betão. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio aplicáveis aos materiais cimentícios imprimíveis. [23] Controlo da qualidade durante o fabrico digital com betão.

Constituintes e formulações de menor impacto

A escolha dos constituintes influencia o desempenho da mistura e o seu impacto ambiental.



Figura 16 - Funções dos principais constituintes de uma mistura imprimível.

Função dos constituintes

Alterar um constituinte pode resolver um problema e criar outro. O cimento e as adições contribuem para a ligação e para o desenvolvimento das propriedades mecânicas; os agregados influenciam o volume, a retração e o custo; a água condiciona a trabalhabilidade; os adjuvantes regulam o escoamento, a reologia e a presa; as fibras podem controlar a fissuração e influenciar a bombagem. A empresa deve conhecer os limites de substituição, a compatibilidade entre constituintes, as tolerâncias de dosagem e o procedimento de revalidação.

Numa avaliação do ciclo de vida, a unidade funcional é a referência quantitativa utilizada para comparar sistemas que desempenham a mesma função, por exemplo, 1 m² de parede com o mesmo desempenho, a mesma vida útil e as mesmas condições de serviço.

Formulações de menor impacto

Reduzir o impacto ambiental do material exige um desempenho equivalente e a validação da formulação e do processo. A substituição parcial do clínquer por adições, a redução da quantidade de material através da otimização da geometria e o aumento da durabilidade podem melhorar o desempenho ambiental. Contudo, as misturas para impressão 3D podem utilizar uma maior quantidade de ligante, de adjuvantes ou de energia de preparação do que as soluções convencionais. A comparação deve ser efetuada com base na mesma unidade funcional e incluir a resistência, a durabilidade, a espessura, o reforço e a vida útil.



IDEIA-CHAVE

Menor impacto — Uma formulação de menor impacto ambiental deve manter o desempenho previsto e ser tecnicamente validada.

Para aprofundar: [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e influência da formulação no desempenho. [10] Formulação das misturas e propriedades relevantes para a impressão 3D em betão. [16] Materiais sustentáveis para impressão 3D em betão. [18] Sustentabilidade no fabrico digital e estratégias de redução do impacto ambiental. [20] Comparação ambiental entre a impressão 3D e a construção convencional com base na mesma unidade funcional.

Materiais alternativos e conteúdo reciclado

A origem circular não dispensa a demonstração do desempenho, da segurança e da conformidade.

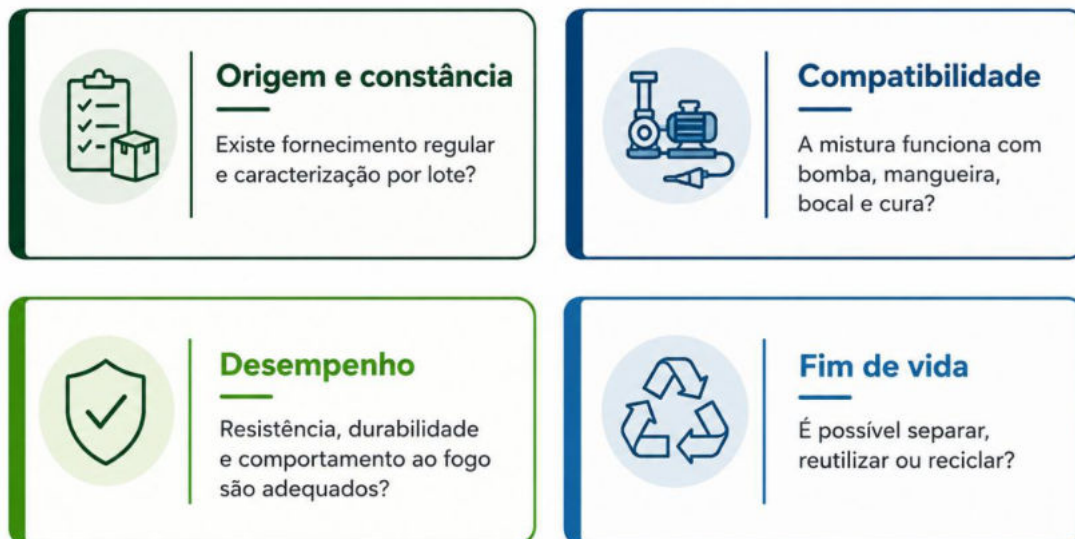


Figura 17 - Principais critérios para a avaliação de materiais alternativos na impressão 3D para a construção.

Avaliação técnica

A origem circular não significa, automaticamente, qualidade, segurança ou menor impacto ambiental. Os agregados reciclados, os resíduos minerais, as fibras recuperadas e os ligantes alternativos podem ser incorporados quando a sua composição, os contaminantes, a variabilidade e a compatibilidade com o processo são conhecidos. A água recuperada e os materiais de origem local também exigem critérios de aceitação. Antes de adotar um novo material, confirme a sua origem, a disponibilidade, a regularidade do fornecimento, as necessidades de preparação, as condições de transporte, o fim de vida e a compatibilidade com os requisitos técnicos.

Perguntas de decisão

Qual é a origem e a variabilidade do material? Existem contaminantes ou impurezas relevantes? Como é preparado e transportado? O material altera a pressão de bombagem, o desgaste dos equipamentos, o tempo de presa, a cura, a aderência entre camadas ou a durabilidade? Existe disponibilidade regular e uma estratégia para o fim de vida?



Reavaliação — Qualquer alteração relevante do material deve desencadear uma reavaliação do impacto e, quando necessário, uma nova qualificação.

Para aprofundar: [16] Materiais sustentáveis para impressão 3D em betão e critérios para a sua utilização. [20] Comparação ambiental entre a impressão 3D e a construção convencional com base na mesma unidade funcional.

Camadas, interfaces e anisotropia

A geometria do cordão e a qualidade da ligação entre camadas condicionam o desempenho e a durabilidade do elemento.



Figura 18 - Condições favoráveis e fatores de risco na ligação entre camadas.

Geometria do cordão e da camada

Na impressão 3D, cada passagem do bocal deposita um cordão de material. A sucessão e a sobreposição destes cordões formam uma camada, e a acumulação de camadas dá origem ao elemento impresso. A medição da geometria do cordão é um indicador simples e valioso da estabilidade do processo e da qualidade da camada. A largura, a altura, a posição, a ondulação, a existência de vazios e a sobreposição entre cordões devem ser comparadas com as tolerâncias definidas. A medição pode recorrer a réguas, calibres, fotografia calibrada, sistemas de visão artificial ou sistemas de varrimento, consoante o risco e a escala da aplicação. A geometria deve ser avaliada ao longo de todo o elemento, e não apenas no arranque da impressão.

Interface entre camadas

A interface entre camadas corresponde à zona de contacto entre camadas consecutivas e pode condicionar o comportamento mecânico e a durabilidade do elemento. Intervalos longos entre deposições, secagem da superfície, contaminação, baixa energia de deposição e uma geometria irregular podem reduzir a aderência entre camadas. A orientação das camadas cria anisotropia, ou seja, um comportamento diferente consoante a direção considerada. Por essa razão, o plano de ensaios deve contemplar diferentes direções de carregamento e métodos de preparação dos provetes (amostras preparadas para ensaio). A aparência superficial, por si só, não demonstra a qualidade da interface.



IDEIA-CHAVE

Inspeção — Uma boa aparência superficial não garante uma ligação adequada entre camadas.

Para aprofundar: [12] Influência dos parâmetros do processo na ligação entre camadas e no desempenho do elemento. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio aplicáveis aos materiais cimentícios imprimíveis. [22] Avaliação do desempenho de materiais e elementos produzidos por fabrico aditivo. [23] Controlo da qualidade e inspeção no fabrico digital com betão.

Reforço, aberturas e especialidades

A impressão 3D deve assegurar o mesmo desempenho estrutural e a mesma segurança exigidos às soluções convencionais.



Figura 19 - Principais estratégias de reforço e integração híbrida na impressão 3D para a construção.

Estratégias de reforço

A ausência de cofragem não elimina a necessidade de assegurar a resistência à tração e ao corte, a estabilidade e a resposta às ações acidentais. As estratégias de reforço incluem fibras, armaduras colocadas durante ou após a impressão, cabos, enchimentos, pós-tensão, cofragens permanentes produzidas por impressão 3D e componentes híbridos. Cada abordagem influencia a trajetória de impressão, a produtividade, a inspeção e o comportamento estrutural do elemento. A solução de reforço deve ser definida e validada pelo projetista competente; não deve resultar de uma adaptação informal em obra.

Aberturas e especialidades

As portas, as janelas, as instalações e as ligações interrompem as trajetórias de impressão e criam interfaces adicionais. A conceção deve prever as zonas de paragem, as vergas, as caixas, as mangas, as reservas, os inserts (elementos incorporados para fixação ou ligação), as fixações e os acessos necessários à execução e à manutenção. Os elementos incorporados podem interferir com o bocal, reduzir a aderência entre camadas ou criar vazios. Os elementos instalados posteriormente exigem tolerâncias e métodos de fixação compatíveis com o sistema construtivo. Uma maquete digital coordenada e um ensaio à escala real podem reduzir significativamente as correções em obra.



IDEIA-CHAVE

Coordenação precoce — As portas, as janelas, os inserts, as fixações e as instalações devem ser considerados na fase de projeto, antes da geração das trajetórias.

Para aprofundar: [8] Aplicações da impressão 3D na construção e integração em projetos de edifícios e infraestruturas. [9] Processos de extrusão de materiais cimentícios e condicionantes do processo de impressão. [13] Conceção e produção de elementos estruturais em betão impresso. [14] Estratégias de reforço para impressão 3D em betão. [15] Tecnologias de reforço para impressão 3D em betão e respetivas aplicações. [22] Avaliação do desempenho de materiais e elementos produzidos por fabrico aditivo.

Ambiente, cura e controlo da qualidade

As condições ambientais influenciam o processo de impressão, a cura e o desempenho do elemento.



Figura 20 - Fluxo de controlo da qualidade, desde os materiais até à aceitação do elemento.

Ambiente e cura

A temperatura, o vento e a humidade influenciam a perda de água, a presa e a ligação entre camadas. Em estaleiro, o plano de produção deve definir os limites ambientais, as medidas de proteção, a monitorização e as ações a adotar quando esses limites são ultrapassados. Em fábrica, devem ser controladas a temperatura, a humidade e a ventilação. A cura (conjunto de medidas destinadas a controlar a humidade e a temperatura durante o endurecimento) pode exigir membranas de cura, proteção física, nebulização ou outros métodos compatíveis com o processo. O registo das condições ambientais ajuda a explicar as variações observadas e a definir os limites operacionais.

Controlo da qualidade

O plano de controlo da qualidade deve abranger as matérias-primas, o processo de impressão, a geometria, o material endurecido e o elemento final. Para cada característica crítica devem ser definidos o método de controlo, a frequência, o responsável, a tolerância, o modo de registo e as ações a adotar em caso de desvio. Os ensaios do material fresco não substituem os ensaios do elemento produzido; os provetes (amostras de ensaio) moldados podem não representar adequadamente as interfaces nem a orientação das camadas. A estratégia de controlo deve ser proporcional à função do elemento e considerar a amostragem, a inspeção em linha e a validação por lotes ou por elementos.



IDEIA-CHAVE

Consistência do processo — A qualidade do elemento impresso depende de controlar o ambiente, a cura e o processo de produção de forma consistente.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas produzidos por impressão 3D. [9] Processos de fabrico por extrusão de materiais cimentícios e respetivos parâmetros de produção. [12] Influência dos parâmetros do processo na ligação entre camadas e no desempenho do elemento. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio para materiais cimentícios imprimíveis. [23] Controlo da qualidade na produção digital com betão e estratégias de inspeção. [24] Normalização da impressão 3D em betão e evolução dos documentos técnicos aplicáveis.

Síntese prática: preparar a impressão do primeiro elemento

Planeie os ensaios, os controlos e os critérios de aceitação antes de iniciar a impressão.

 <u>Receita</u> Registe os constituintes, as respetivas tolerâncias, a sequência de mistura e o tempo útil da mistura.	 <u>Processo</u> Registe a pressão, o caudal, a velocidade, a altura da camada, as condições ambientais, os tempos de espera e as interrupções ocorridas durante a impressão.
 <u>Produto</u> Defina os requisitos relativos à geometria, à resistência, à ligação entre camadas, ao acabamento, às tolerâncias e à durabilidade.	 <u>Ações perante desvios</u> Descreva o procedimento a adotar quando um parâmetro ou um resultado de ensaio não cumprir os limites estabelecidos.

 **IDEIA-CHAVE**

Produção repetível — Elabore uma ficha de controlo que permita repetir o processo, identificar desvios e demonstrar como foi produzido cada elemento.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas produzidos por impressão 3D. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio para materiais cimentícios imprimíveis. [23] Controlo da qualidade na produção digital com betão e estratégias de inspeção.



Figura 21 - Representação conceptual da integração entre projeto digital, fabrico aditivo e execução em obra, gerada com recurso a inteligência artificial.

Síntese do módulo 2 - Materiais e processo

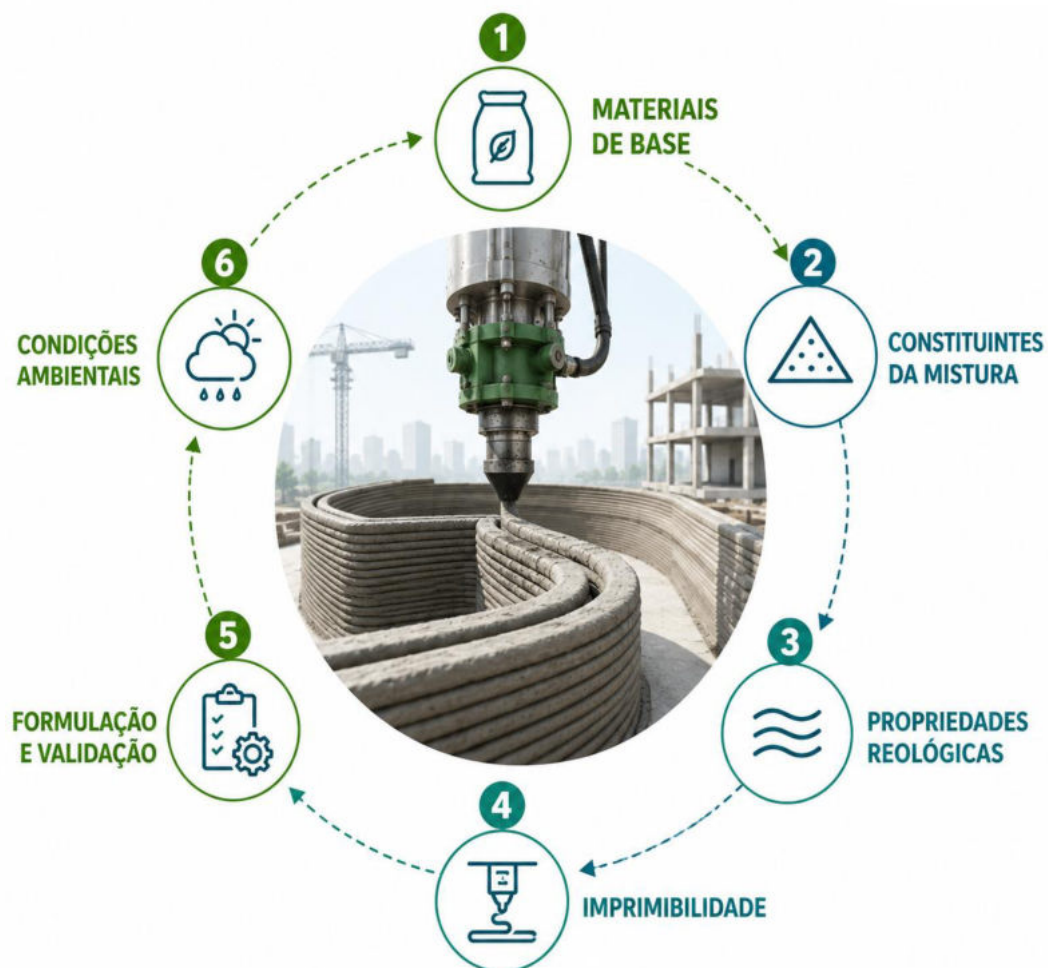


Figura 22 - Síntese do módulo 2.

Módulo 3 - Aplicações e casos

Onde pode ser aplicada

Conheça aplicações da impressão 3D em diferentes contextos e níveis de maturidade.

1 Identificar aplicações

2 Escolher um primeiro caso

3 Aprender com casos reais



Figura 23 - Principais aplicações do fabrico aditivo (impressão 3D) na construção.

Mapa de aplicações

As aplicações da impressão 3D diferem quanto ao risco, à escala, à repetibilidade e aos requisitos de conformidade. Os modelos, as ferramentas e os moldes permitem adquirir experiência com menor exposição ao risco. Os componentes não estruturais podem criar valor através da personalização e da redução do desperdício. As paredes, os elementos estruturais e as infraestruturas exigem uma validação técnica mais rigorosa. A produção com terra, polímeros, metais ou materiais cimentícios corresponde a aplicações distintas e não deve ser tratada como um único mercado. A primeira aplicação da PME deve combinar valor demonstrável, risco controlável e acesso aos meios necessários para validação e ensaio.

Critério de entrada

Antes de selecionar uma aplicação, descreva a sua função, a escala, a quantidade, o material, as tolerâncias, o ambiente de utilização, a exposição, a necessidade de reforço, o acabamento, a inspeção e a integração com outros trabalhos.

Para aprofundar: [8] Aplicações da impressão 3D na construção e exemplos de utilização em edifícios e infraestruturas. [11] Potencial, limitações e critérios para a seleção de aplicações da impressão 3D na construção. [17] Estratégias de impressão, materiais cimentícios e métodos de caracterização. [25] Estado da arte da impressão 3D em betão e principais tendências de desenvolvimento.

Protótipos, moldes e cofragens

Permitem testar soluções e produzir ferramentas antes de avançar para aplicações mais exigentes.

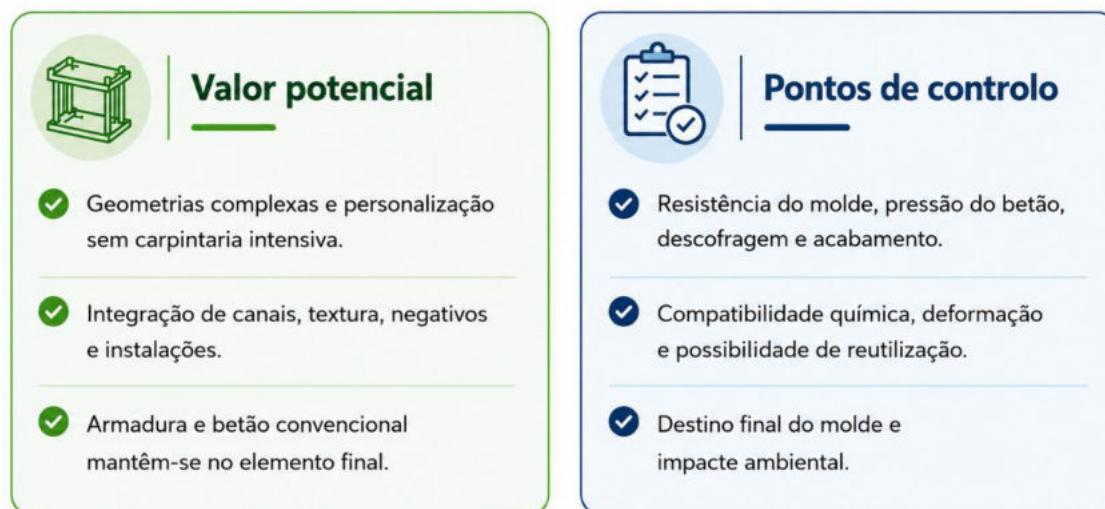


Figura 24 - Valor potencial e pontos de controlo na utilização de moldes e cofragens impressos.

Modelos e protótipos

Os modelos e protótipos permitem testar e validar soluções antes da produção do elemento final. Podem apoiar a comunicação com clientes, a coordenação, os ensaios de forma, a avaliação da ergonomia, a montagem e a validação de conceitos. O seu valor não está apenas na aparência: um protótipo pode ser utilizado para testar interfaces, sequências de montagem, acessibilidade e tolerâncias antes de investir numa ferramenta ou num componente final. Antes da produção, a empresa deve definir a escala, a precisão, o material, a finalidade e a decisão que o protótipo irá suportar.

Moldes e cofragens

A impressão 3D de ferramentas pode ser mais acessível do que a impressão direta do produto final. Os moldes em polímeros ou em areia permitem produzir geometrias complexas e séries curtas. As cofragens impressas podem permanecer incorporadas no elemento ou ser reutilizadas. A avaliação deve considerar a estabilidade, a pressão do material durante a betonagem, o acabamento, a desmoldagem, a compatibilidade química, a possibilidade de reparação e o número de ciclos de utilização. Esta aplicação pode aproveitar competências já existentes nas áreas da carpintaria, dos compósitos, do betão pré-fabricado e da metalomecânica.



IDEIA-CHAVE

Entrada prudente — Começar por um protótipo, um molde ou uma cofragem permite aprender a cadeia digital sem assumir, de imediato, risco estrutural.

Para aprofundar: [8] Aplicações da impressão 3D na construção e exemplos de utilização em edifícios e infraestruturas. [11] Potencial, limitações e critérios para a seleção de aplicações da impressão 3D na construção. [17] Estratégias de impressão, materiais cimentícios e métodos de caracterização. [52] Impressão 3D de moldes e cofragens: estado da arte, oportunidades, desafios e principais aplicações.

Componentes não estruturais e mobiliário urbano

A personalização, a textura e a produção em pequena série podem justificar a utilização da impressão 3D.

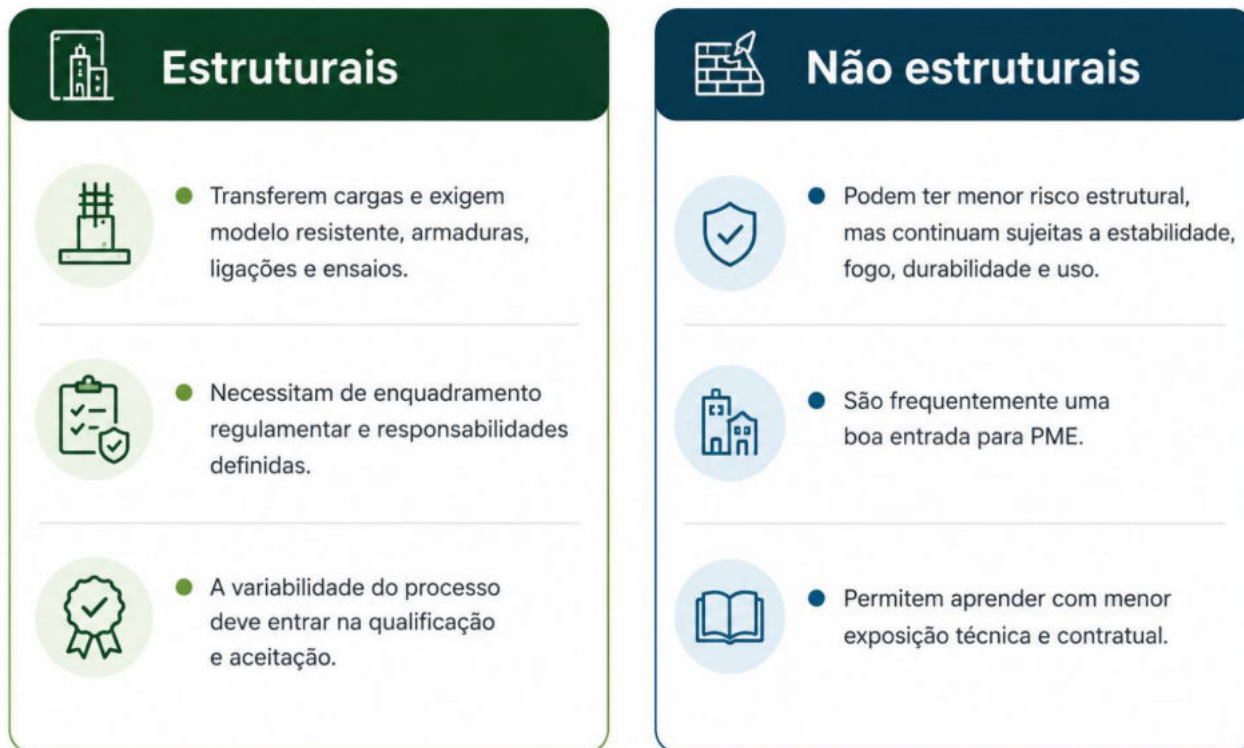


Figura 25 - Diferenças entre aplicações estruturais e não estruturais na impressão 3D para a construção.

Elementos não estruturais

A personalização, a textura e a produção em pequena série podem justificar a utilização da impressão 3D. Os painéis, as divisórias, o mobiliário, os elementos paisagísticos, os revestimentos e os elementos acústicos apresentam requisitos distintos. Mesmo sem função estrutural, podem existir exigências relacionadas com a reação ao fogo, a estabilidade, a fixação, a durabilidade, a higiene, a acessibilidade e a segurança de utilização. Começar por um elemento interior, removível e facilmente inspecionável pode reduzir o risco e acelerar a aprendizagem.

Mobiliário urbano

Os bancos, as floreiras, os abrigos e os elementos paisagísticos permitem testar soluções de desenho e durabilidade numa escala controlada. A aplicação deve considerar a ergonomia, a estabilidade, as arestas, a acessibilidade, a drenagem, a resistência ao vandalismo, a facilidade de limpeza, a manutenção e a substituição. A liberdade formal não deve comprometer a segurança nem a facilidade de conservação. A produção local só é vantajosa quando os materiais, o equipamento e a equipa não implicam deslocamentos ou tempos de preparação desproporcionados.



IDEIA-CHAVE

Não estrutural não significa sem risco — A estabilidade, a fixação, a reação ao fogo, a durabilidade, a acessibilidade e a manutenção continuam a exigir verificação.

Para aprofundar: [17] Estratégias de impressão, materiais cimentícios e métodos de caracterização. [18] Sustentabilidade e fabrico digital. [26] Regulamento (UE) 2024/3110 relativo aos produtos de construção e respetivos requisitos de desempenho. [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas, como referência para situações em que a aplicação evolua para elementos com função estrutural.

Elementos estruturais

A utilização estrutural exige evidência técnica em todas as etapas do processo.

DA IDEIA AO ELEMENTO ESTRUTURAL

Não utilizar valores genéricos de resistência sem relação com orientação, processo e lote.

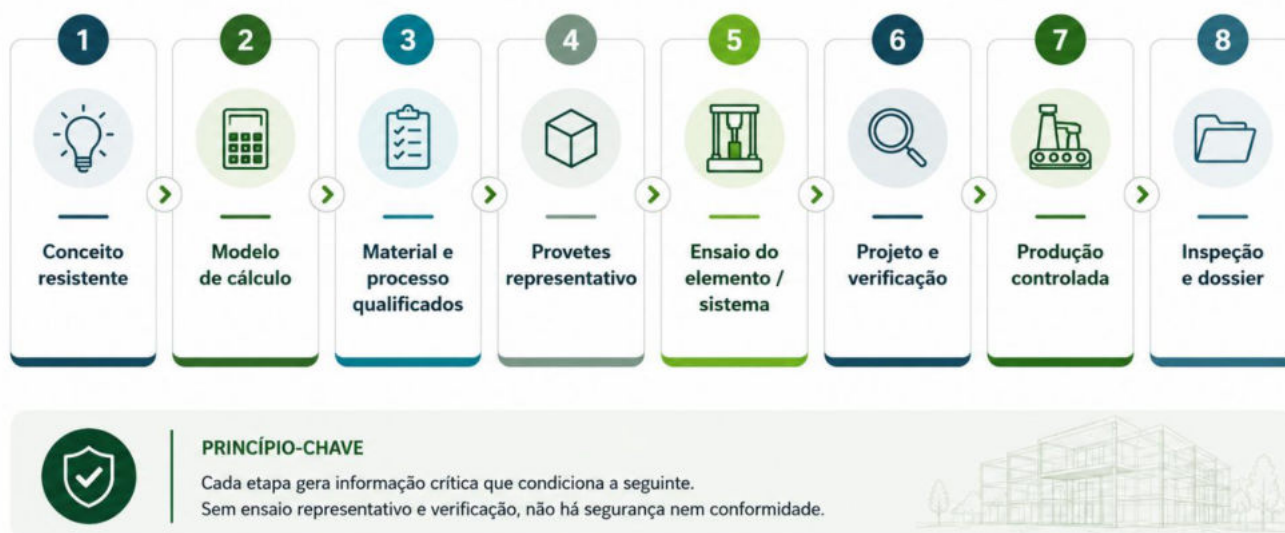


Figura 26 - Etapas indicativas de desenvolvimento e validação de um elemento estrutural impresso.

A utilização estrutural não depende apenas do material. Exige um processo de qualificação, projeto, ensaio e controlo da produção que permita demonstrar a segurança do elemento.

Paredes e envoltantes

A parede impressa constitui, normalmente, apenas uma das camadas funcionais de um sistema construtivo mais amplo. Pode funcionar como cofragem, acabamento, suporte, barreira ou elemento resistente. O isolamento, a estanquidade, o controlo da humidade, as pontes térmicas, as juntas, as fixações, as instalações e os revestimentos continuam a exigir uma solução coordenada. A geometria das cavidades deve permitir o enchimento, a inspeção e a drenagem, quando aplicável. O protótipo deve incluir os encontros com a fundação, a laje, a cobertura, os vãos e os cantos.

Elementos estruturais

A forma impressa, o material e o reforço devem ser avaliados como um sistema resistente. O projeto deve considerar os estados limite, a estabilidade durante a impressão, a anisotropia, as interfaces entre camadas, as ações durante a montagem, as ligações, a durabilidade e a robustez. Os ensaios podem abranger o material, as juntas, os subcomponentes e os elementos à escala real. A impressão 3D pode permitir formas otimizadas ou cofragens integradas, mas não dispensa a demonstração da segurança de acordo com o enquadramento regulamentar aplicável.

IDEIA-CHAVE

Sistema completo — O desempenho depende do conjunto da solução construtiva e não apenas do elemento impresso.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas produzidos por impressão 3D. [13] Conceção e produção de elementos estruturais em betão impresso. [15] Tecnologias de reforço para impressão 3D em betão e respetivas aplicações. [22] Avaliação do desempenho de materiais e elementos produzidos por fabrico aditivo. [36] Estudo de caso de um edifício habitacional produzido por impressão 3D.

Infraestruturas, reparação e personalização

As geometrias específicas e a produção localizada podem justificar a utilização da impressão 3D.



Figura 27 - Representação conceptual, gerada por inteligência artificial, de aplicações do fabrico aditivo na construção.

Infraestruturas

As pontes, os sistemas de drenagem, as estruturas de proteção costeira e os equipamentos urbanos combinam grande escala, elevada exposição e longa vida útil. A vantagem potencial reside na otimização da geometria e na produção de segmentos personalizados. As exigências incluem a fadiga, o impacto, os ciclos de gelo-degelo (quando aplicáveis), a ação dos cloretos, a abrasão, a exposição à água, o vandalismo, a inspeção e a manutenção. Os projetos demonstradores devem ser acompanhados por ensaios, monitorização e um plano de manutenção.

Reparação e personalização

O fabrico aditivo (impressão 3D) pode produzir peças únicas, moldes personalizados ou material depositado de acordo com uma geometria previamente capturada. O varrimento 3D e a modelação digital podem apoiar a reposição de ornamentos, a produção de próteses construtivas (elementos concebidos para substituir ou completar partes degradadas de uma construção), de moldes e de peças de adaptação. A compatibilidade com o suporte existente — mecânica, química, térmica, hídrica e estética — é determinante. Em património, qualquer intervenção requer critérios de reversibilidade, legibilidade, documentação e aprovação pelas entidades competentes.



IDEIA-CHAVE

Aplicar onde faz diferença — O maior potencial da impressão 3D pode estar em aplicações específicas, onde a personalização, a geometria e a adaptação ao contexto criam valor.

Para aprofundar: [8] Aplicações da impressão 3D na construção e exemplos de utilização em diferentes contextos. [34] Conceção e validação de uma ponte em betão produzida por impressão 3D. [35] Ponte Striatius: projeto computacional e fabrico robótico. [40] Ponte em betão produzida por impressão 3D em Nijmegen. [41] Desenvolvimento da ponte produzida por impressão 3D de Alcobendas.

Matriz para selecionar uma aplicação

Nem todas as aplicações beneficiam da impressão 3D. Esta matriz ajuda a identificar os casos em que a tecnologia pode criar maior valor.

Critério	Bom candidato	Requer análise adicional	Evitar como primeiro piloto
Valor para o cliente	Benefício claro e mensurável	Benefício provável, mas ainda pouco quantificado	Benefício pouco claro ou difícil de demonstrar
Geometria e personalização	Geometria complexa, peça personalizada ou pequena série	Algumas variantes ou adaptação moderada	Produto simples, normalizado e já eficiente por métodos convencionais
Risco técnico e regulamentar	Elemento não estrutural, removível e inspecionável	Integração com outros sistemas ou exposição moderada	Elemento estrutural crítico ou sem rota de conformidade definida
Capacidade de validação	Ensaio simples, critérios claros e referência convencional conhecida	Ensaio exigentes ou dados técnicos incompletos	Sem método de ensaio, tolerâncias ou critérios de aceitação definidos
Logística e produção	Dimensão controlável, transporte simples e produção acessível	Custos logísticos ou acessos a avaliar	Grande dimensão, elevada complexidade de montagem ou forte dependência do fornecedor

Figura 28 - Matriz de apoio à seleção da primeira aplicação de fabrico aditivo.

Como utilizar esta matriz: Avalie cada critério para a aplicação em análise. Um bom primeiro piloto deve concentrar-se nas situações da coluna "Bom candidato" e evitar aplicações com risco técnico elevado, validação difícil ou consequências significativas em caso de falha. A decisão final deve resultar da avaliação conjunta dos critérios e não da classificação de um único aspeto.

Critérios de seleção

A matriz anterior é uma ferramenta de apoio à decisão, mas não substitui a análise técnica da aplicação. A escolha deve resultar da avaliação conjunta dos critérios apresentados, considerando o objetivo da aplicação, os requisitos de desempenho, a capacidade de produção e de controlo da qualidade, a disponibilidade dos materiais, os recursos da empresa e a possibilidade de validar a solução através de ensaios adequados.

Primeiro piloto recomendado

Para um primeiro piloto, é geralmente preferível selecionar uma aplicação com um objetivo bem definido, uma dimensão reduzida, consequências limitadas em caso de falha, um processo de validação simples e uma solução convencional que permita estabelecer uma comparação.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção.

Caso português: ReCircular (Matosinhos)

Apresentado por **fontes institucionais** como o **primeiro edifício público em Portugal** executado com recurso à impressão 3D.



Figura 29 - As métricas divulgadas para o projeto ReCircular não são diretamente comparáveis, porque se referem a diferentes aspetos da construção.

LOCAL: Matosinhos, Portugal.

APLICAÇÃO: Edifício público ReCircular dedicado à economia circular.

TECNOLOGIA: Robô articulado para impressão 3D por deposição camada a camada.

ESCALA E TEMPO DIVULGADOS: Cerca de 500–600 m²; cinco a seis dias para a execução das paredes ou da estrutura, consoante a fonte consultada.

SITUAÇÃO: Inaugurado em maio de 2026.

“A crise de mão de obra e incremento dos preços da construção em Portugal leva a que se procurem soluções eficientes que ajudem a resolver um problema que afeta o mercado imobiliário, e é nesse sentido que a inovação e a engenharia podem dar um contributo essencial.” [32]

“Pensando em toda a cadeia produtiva, do projeto à obra, automatizando as tarefas, tanto em obra (com a impressão das paredes) como em estaleiro (na pré-fabricação dos restantes elementos do edifício), tem-se vindo a estudar processos e métodos de otimização do projeto de arquitetura e das especialidades com base no DfMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) para reduzir

As fontes institucionais apresentam o ReCircular como o primeiro edifício público em Portugal executado com recurso à impressão 3D. A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) assegurou o projeto de arquitetura e o acompanhamento científico, incluindo a avaliação estrutural, térmica e energética. A construção articulou a deposição robotizada das paredes com a montagem paralela da estrutura metálica e dos restantes elementos não estruturais.

Os dados divulgados por diferentes entidades referem-se a aspetos distintos da obra e, por isso, não são diretamente comparáveis. A notícia da FEUP, publicada em 2025, refere a execução das paredes de um edifício com cerca de **500 m²** em aproximadamente **seis dias**, embora a legenda da figura indique **cinco dias** [32]. A informação publicada pelo PRR, em 2026, refere uma **estrutura com cerca de 600 m²** construída em **cinco dias** [43]. Em ambos os casos, os valores dizem respeito apenas a fases

não só o tempo, as tarefas e as equipas de obra, bem como os desperdícios gerados.” [32]

específicas da construção e não à duração total da obra.

Importante para as PME

Distinguir a área total do edifício, a área efetivamente impressa, o tempo de deposição e a duração total da obra antes de comparar projetos ou avaliar resultados.

Integrar a arquitetura, a engenharia, o BIM, os materiais, a produção e as especialidades desde as fases iniciais do projeto.

Recorrer ao acompanhamento técnico-científico e manter registos do processo para validar novos sistemas construtivos e facilitar a sua futura replicação.

EVIDÊNCIA

Leitura da evidência — A existência do projeto e o respetivo acompanhamento científico encontram-se documentados por fontes institucionais. As áreas, os tempos de execução e os benefícios divulgados devem ser interpretados de acordo com as métricas utilizadas, uma vez que podem referir-se a diferentes fases ou componentes da construção.

Para aprofundar: [32] Desenvolvimento técnico-científico do projeto ReCircular pela FEUP. [43] Inauguração do edifício público ReCircular e informação institucional do PRR. [44] Acompanhamento científico da FEUP ao projeto ReCircular.

Gemert e Striatus: duas pontes, duas estratégias

A comparação mostra que a mesma tecnologia pode conduzir a soluções muito diferentes.

Caso Gemert — Países Baixos

Ponte ciclável em betão impresso, reforçada e validada por ensaios

Local: Gemert, Países Baixos.

Aplicação: Ponte para ciclistas.

Tecnologia: Extrusão cimentícia em segmentos produzidos em fábrica.

Estratégia estrutural: Reforço e pós-tensão; validação por ensaios antes da entrada em serviço.

Leitura empresarial

O projeto da Universidade de Tecnologia de Eindhoven (TU Eindhoven) demonstrou uma abordagem baseada na produção segmentada, no reforço, na montagem e na validação por ensaios. A estratégia de reforço deve ser definida pelo projeto estrutural e validada experimentalmente para o sistema de impressão utilizado. A incorporação de fibras pode complementar o desempenho do material, mas não deve ser apresentada como substituição geral das armaduras convencionais.

O artigo técnico do projeto descreve o desenvolvimento, a validação experimental e a entrada em serviço da ponte, constituindo uma referência importante para compreender a necessidade de demonstrar o desempenho do sistema à escala do elemento.

Lições

- O projeto estrutural deve considerar as características do processo de fabrico.
- A produção em segmentos pode facilitar o controlo da qualidade, o transporte e a montagem.
- Os ensaios de prova aumentam a confiança no desempenho do sistema, mas não substituem um sistema de garantia da qualidade.

Caso Striatus — Itália

Ponte em blocos impressos, montados a seco e concebidos para trabalhar predominantemente à compressão

Local: Veneza, Itália.

Aplicação: Ponte pedonal temporária.

Dimensão divulgada: 16 × 12 m.

Tecnologia: Blocos de betão impressos com orientação específica das camadas.

Leitura empresarial

O projeto Striatus, desenvolvido pela ETH Zurich e pelos seus parceiros, combinou os princípios da alvenaria abobadada, a otimização geométrica e a impressão 3D orientada segundo as trajetórias principais de compressão. Os blocos foram montados a seco, permitindo a desmontagem, a reutilização e a separação dos materiais no final da vida útil.

Este caso não demonstra que qualquer ponte possa dispensar armaduras. Demonstra uma solução concebida especificamente para um regime resistente dominado pela compressão, suportada por um projeto estrutural, um método de fabrico e uma geometria cuidadosamente desenvolvidos para esse objetivo.

O projeto evidencia ainda o potencial da integração entre o projeto computacional, a engenharia estrutural, o fabrico digital e os princípios de conceção para desmontagem (*Design for Disassembly*), mostrando que a impressão 3D pode contribuir para soluções construtivas mais circulares quando considerada desde a fase de conceção.

Lições

- O desempenho estrutural pode depender mais da geometria e da conceção do que da resistência do material, quando a solução é desenvolvida para trabalhar predominantemente à compressão.
- A desmontagem, a reutilização e a separação dos materiais devem ser consideradas desde as fases iniciais do projeto.
- Soluções excecionais exigem métodos de projeto, fabrico, validação e controlo equivalentes; não devem ser reproduzidas sem a respetiva fundamentação técnica.

EVIDÊNCIA

Leitura da evidência — O caso Gemert é suportado por fontes institucionais e por artigos técnicos. O caso Striatus constitui um demonstrador amplamente documentado na literatura técnica. Nenhum dos casos representa uma solução estrutural universal. Qualquer aplicação deve ser reavaliada em função do projeto, dos materiais, das normas aplicáveis e das condições de execução.

Para aprofundar: [33] Ponte ciclável impressa em betão de Gemert. [34] Projeto e validação estrutural da ponte de Gemert. [35] Ponte Striatus: projeto computacional e fabrico robótico. [48] Projeto estrutural e fabrico da ponte Striatus.

Wallenhausen e TECLA: habitação, materiais e sistemas distintos

A mesma tecnologia pode utilizar materiais e sistemas muito diferentes.

Caso Wallenhausen — Alemanha

Edifício residencial multifamiliar produzido no local com sistema de pórtico

Local: Wallenhausen, Baviera, Alemanha.

Aplicação: Edifício de três pisos e cinco apartamentos.

Área divulgada: Aproximadamente 380 m².

Tempo divulgado: 72 horas de impressão efetiva, distribuídas por seis semanas.

Leitura empresarial

A PERI comunica que a estrutura de um edifício com cerca de **380 m²**, três pisos e cinco apartamentos foi executada ao longo de **seis semanas**. As **72 horas** correspondem apenas ao tempo efetivo de impressão, distribuído por esse período. As paredes são constituídas por múltiplas camadas, incluindo cavidades destinadas ao isolamento e, quando necessário do ponto de vista estrutural, ao enchimento com betão moldado.

Os tempos divulgados referem-se à impressão e à execução da estrutura, não correspondendo à duração total do projeto, das aprovações, da preparação da obra, das instalações, dos acabamentos ou da entrada em utilização.

Lições

- Distinguir o tempo de impressão, o tempo de execução da estrutura e a duração total da construção.
- Avaliar as cavidades, os enchimentos e as interfaces como partes integrantes do sistema construtivo.
- Confirmar o desempenho do edifício durante a utilização, incluindo a ocupação, a manutenção e o comportamento em serviço.

Caso TECLA — Itália

Habitat experimental impresso com terra local por dois braços sincronizados

Local: Massa Lombarda, Itália.

Aplicação: Protótipo habitacional.

Material: Mistura baseada em terra local, segundo os promotores.

Tecnologia: Dois sistemas WASP sincronizados.

Leitura empresarial

O projeto TECLA explora a utilização de terra local, formas otimizadas, fabrico digital e construção sem cofragem. O comportamento da terra crua, a proteção contra a água, a durabilidade, a manutenção e os requisitos regulamentares diferem significativamente dos sistemas baseados em materiais cimentícios.

As alegações de neutralidade carbónica apresentadas pelos promotores não devem ser generalizadas sem uma avaliação do ciclo de vida (ACV) e sem a definição das respetivas fronteiras de estudo.

Lições

- Não confundir sistemas de impressão com terra crua e sistemas de impressão com materiais cimentícios.
- A utilização de materiais locais exige caracterização, controlo da qualidade e validação do desempenho.
- Os protótipos permitem explorar novas soluções, mas não correspondem, por si só, a sistemas construtivos correntes.

“Avaliação do ciclo de vida (ACV)” é um método normalizado para quantificar as entradas, as saídas e os potenciais impactos ambientais de um produto, processo ou sistema ao longo das etapas do seu ciclo de vida previamente definidas.

EVIDÊNCIA

Leitura da evidência — Os dados relativos ao caso Wallenhausen são divulgados pelo fornecedor PERI. O projeto TECLA constitui um protótipo documentado pelos seus promotores. Os tempos, os materiais, os sistemas construtivos e as alegações ambientais devem ser interpretados no contexto de cada projeto e não permitem, por si só, estabelecer comparações diretas ou conclusões gerais sem uma avaliação técnica adequada.

Para aprofundar: [36] Edifício residencial impresso em 3D de Wallenhausen. [38] Projeto TECLA e arquitetura em terra impressa. [39] Tecnologia WASP e construção com terra local.

Malawi e Nijmegen: rapidez de paredes e infraestrutura segmentada

A mesma tecnologia pode responder a necessidades construtivas muito diferentes.

Caso Malawi — 14Trees

Edifício escolar com paredes impressas em 3D

Local: Salima, Malawi.

Aplicação: Edifício escolar.

Tecnologia: Extrusão de material cimentício para execução das paredes.

Tempo divulgado: Cerca de 18 horas para a impressão das paredes.

Leitura empresarial

O caso é frequentemente citado pelo reduzido tempo de impressão das paredes e pelo potencial de resposta às necessidades de infraestruturas escolares. A informação é divulgada pelos promotores do projeto e inclui alegações ambientais que devem ser interpretadas em função da solução convencional utilizada como referência, da composição do material e das fronteiras da comparação.

O valor social do projeto não elimina a necessidade de assegurar a durabilidade da construção, a manutenção, o conforto dos utilizadores, a formação local e a disponibilidade de materiais e peças de substituição.

Lições

- Distinguir o tempo de impressão das paredes da duração total da construção.
- Avaliar a transferência de competências, a capacidade de manutenção e a disponibilidade de recursos locais.
- Interpretar as alegações ambientais à luz de uma metodologia comparável e de uma avaliação do ciclo de vida (ACV).

Caso Nijmegen — Países Baixos

Ponte pedonal e ciclável de 29 m com geometria paramétrica e cinco vãos

Local: Nijmegen, Países Baixos.

Aplicação: Ponte pedonal e ciclável.

Comprimento global divulgado: 29 m.

Produção: Segmentos impressos em fábrica, transportados e montados no local.

Leitura empresarial

O modelo paramétrico foi utilizado para gerar a geometria da ponte, apoiar a análise estrutural e produzir a informação necessária ao fabrico. A ponte, com **29 m** de comprimento e **cinco vãos**, foi produzida em segmentos, transportada, montada e pós-tensionada antes da entrada em serviço. A inauguração ocorreu em **8 de setembro de 2021**.

Este caso demonstra que uma cadeia digital integrada deve produzir informação consistente para o projeto, a análise estrutural, o fabrico, a montagem e o controlo da execução. A produção segmentada evidencia também a importância de planear a logística, o transporte, a montagem e a ligação entre os elementos desde as fases iniciais do projeto.

Lições

- Definir uma única fonte de informação geométrica para todas as fases do projeto.
- Validar um segmento ou um subcomponente antes da produção integral.
- Integrar a segmentação, o transporte, a montagem e a pós-tensão desde a fase de conceção.

EVIDÊNCIA

Leitura da evidência — O caso Malawi baseia-se na informação divulgada pelo promotor 14Trees. O caso Nijmegen encontra-se documentado por publicações técnicas e institucionais. Os tempos de impressão das paredes ou dos segmentos devem ser interpretados no contexto de cada projeto e não correspondem à duração total da construção.

Para aprofundar: [37] Escola impressa em 3D no Malawi (14Trees). [40] Ponte em betão produzida por impressão 3D em Nijmegen. [47] Projeto, estrutura e validação da ponte de 29 m em betão impresso.

Lições dos casos e transferibilidade

Os casos de estudo revelam padrões úteis, mas não constituem receitas universais.

 <u>O que se repete</u> A integração entre o projeto, os materiais, os equipamentos, os ensaios, a montagem e uma equipa multidisciplinar.	 <u>O que varia</u> Os materiais, o clima, o sistema de reforço, a aprovação, a escala, a maturidade e o modelo de negócio.
 <u>O que não copiar</u> As alegações promocionais, os tempos parciais e as soluções estruturais sem contexto.	 <u>O que transferir</u> O método de decisão, a qualificação, a rastreabilidade, os projetos-piloto e a aprendizagem documentada.

 IDEIA-CHAVE	Pergunta de transferência — Que condições destes casos também se verificam no seu projeto? Considere o material, a escala, o clima, as normas, os parceiros e a repetibilidade da aplicação.
---	---

Para aprofundar: [32] Caso ReCircular: desenvolvimento de uma aplicação em Portugal. [40] Ponte em betão produzida por impressão 3D em Nijmegen: projeto, fabrico segmentado e montagem.

Síntese do módulo 3 - Aplicações e casos

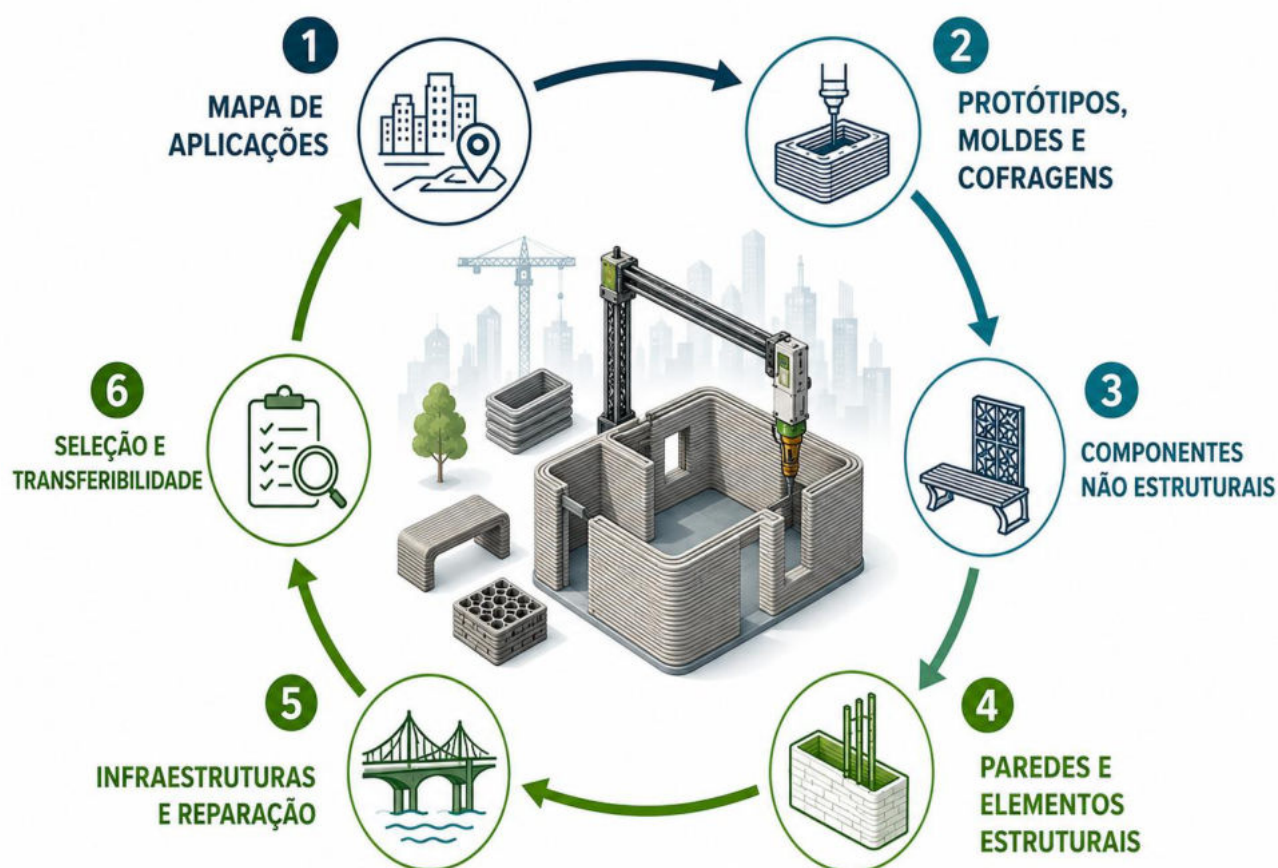


Figura 30 - Síntese do módulo 3.

Módulo 4 - Valor e sustentabilidade

Benefícios, limites e produtividade

Valor empresarial, custos, competências e sustentabilidade.

1 Separar benefício de promessa 2 Calcular custo total 3 Comparar ciclo de vida

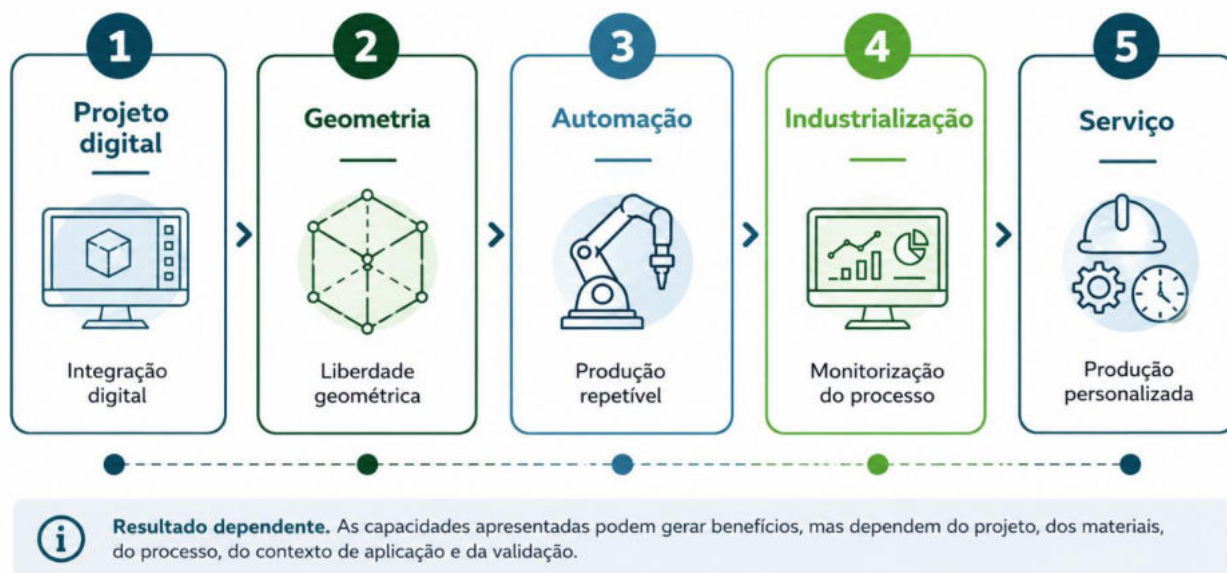


Figura 31 - Do atributo tecnológico ao valor empresarial na adoção da impressão 3D na construção.

Benefícios potenciais

O valor empresarial pode resultar da geometria, da digitalização, da automatização ou da reorganização da cadeia de produção. Entre os benefícios potenciais encontram-se a redução da necessidade de cofragens, a personalização sem recurso a ferramentas dedicadas, a produção por encomenda, a integração de funções, a menor exposição a tarefas repetitivas, a documentação digital e a otimização do consumo de material. Cada benefício deve ser convertido num indicador mensurável, como as horas de cofragem evitadas, a massa por unidade funcional, o tempo de ciclo, a taxa de retrabalho, o número de variantes, a distância de transporte ou os incidentes evitados.

Principais limitações

A tecnologia mantém dependências críticas relacionadas com o material, o processo, as pessoas e o enquadramento regulamentar. A escala do equipamento, a preparação, o controlo ambiental, a instabilidade do material fresco, a ligação entre camadas, o reforço, as tolerâncias, os acabamentos e a maturidade ainda limitada da normalização específica podem limitar a aplicação. A cadeia pode depender de consumíveis, de software ou de assistência técnica proprietários. O risco aumenta quando a empresa não consegue ensaiar, manter, programar ou recuperar a produção sem o apoio do fornecedor.

Produtividade e prazo

A velocidade da cabeça de impressão não corresponde, por si só, à produtividade do projeto. O tempo total inclui o desenho, a engenharia, a aprovação, a preparação do local, a montagem e a calibração do equipamento, a mistura, a impressão, as interrupções, a limpeza, a cura, o pós-processamento, o transporte, a montagem dos elementos e os acabamentos. A produtividade deve ser medida por unidade aceite e não por metro de cordão depositado. A comparação deve utilizar o mesmo âmbito de análise e distinguir o tempo efetivo de impressão, o tempo de turno e a duração total da execução.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção. [18] Sustentabilidade e fabrico digital. [24] Normalização da impressão 3D em betão. [25] Estado da arte da impressão 3D em betão. [32] Caso ReCircular: desenvolvimento de uma aplicação em Portugal. [36] Edifício residencial impresso em 3D em Wallenhausen.

Custos e modelos de acesso

Adquirir um equipamento é apenas uma das formas de utilizar o fabrico aditivo.



Figura 32 - Principais componentes a considerar na avaliação da adoção da impressão 3D na construção.

Estrutura de custos

A utilização do fabrico aditivo não implica, necessariamente, a aquisição de equipamento. A empresa pode comprar, alugar, contratar a produção como serviço, cooperar com um centro tecnológico ou desenvolver um projeto conjunto. O custo total inclui a instalação, o espaço, a energia, o software, os materiais, a mão de obra, a formação, os ensaios, a manutenção, as peças de substituição, a limpeza, os seguros, a conformidade e o tempo de indisponibilidade da produção. O modelo de prestação de serviços reduz o investimento inicial, mas exige especificações claras, definição da propriedade dos dados, responsabilidades e critérios de controlo da qualidade.

Modelos de acesso

A empresa pode contratar um serviço, cooperar num projeto-piloto, alugar capacidade, desenvolver um produto em parceria ou produzir internamente. A escolha depende da frequência de utilização, da propriedade intelectual, da urgência, do risco e da capacidade para operar e manter o sistema.



Custo total — Inclua software, instalações, material, ensaios, manutenção, peças, paragens, formação, acabamento, logística e obsolescência.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção.

Pessoas, competências e logística

A adoção exige uma equipa interfuncional e uma cadeia de fornecimento estável.



Figura 33 - Perfis e responsabilidades essenciais numa equipa interfuncional para a adoção da impressão 3D na construção.

Pessoas e competências

A adoção exige uma equipa interfuncional, mesmo quando a produção é contratada externamente. São necessárias competências em gestão do caso de negócio, desenho e modelação, materiais, produção, automação, qualidade, segurança, manutenção, contratação e conformidade. Nem todas têm de existir internamente, mas cada responsabilidade deve ter um responsável claramente definido. A capacitação deve combinar a formação teórica, a observação, os ensaios, os procedimentos e a avaliação prática.

Logística e fornecimento

A regularidade do fornecimento dos materiais e a disponibilidade de peças de substituição podem determinar a continuidade da produção. A empresa deve avaliar os fornecedores alternativos, os prazos de entrega, a validade dos materiais, as condições de armazenamento, o transporte, a calibração, a assistência técnica, as peças críticas e a capacidade para limpar ou reparar o sistema. No estaleiro, deve planear os acessos, os silos, o abastecimento de água, a energia, a gestão dos resíduos, a zona de impressão e as interferências com outras atividades. Um projeto-piloto deve testar também a logística e não apenas a qualidade do cordão.



IDEIA-CHAVE

Capacidade interna — Mesmo com a produção contratada, a PME necessita de competências para definir os requisitos, avaliar as propostas, validar os resultados e gerir as interfaces.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [9] Processos de fabrico por extrusão de materiais cimentícios. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

Sustentabilidade e ciclo de vida

A vantagem ambiental não é automática; depende da solução completa e da referência escolhida.



Figura 34 - Principais etapas do ciclo de vida a considerar na avaliação da impressão 3D na construção.

Princípios de sustentabilidade

A vantagem ambiental não é automática; resulta de escolhas verificáveis. Podem existir ganhos associados à eliminação da cofragem, à redução da quantidade de material, à otimização da geometria, à produção local, à redução do retrabalho ou à desmontagem. Também podem existir contrapartidas resultantes de um maior teor de ligante, da utilização de adjuvantes, do consumo de energia, dos equipamentos, das medidas de proteção ambiental, do acabamento, da menor durabilidade ou do transporte especializado. A decisão deve comparar soluções funcionalmente equivalentes e explicitar as fronteiras da análise.

Avaliação do ciclo de vida

A unidade funcional e o cenário de referência condicionam a interpretação dos resultados. A análise deve considerar as matérias-primas, a produção, o transporte, a construção, a utilização, a manutenção, a substituição e o fim de vida. Para uma parede, a unidade funcional pode incluir a área, a resistência, o desempenho térmico, a vida útil e o acabamento, em vez de considerar apenas a massa de material. Os resultados obtidos em protótipos não devem ser generalizados quando a composição, a escala ou as fronteiras da análise são diferentes.



IDEIA-CHAVE

Unidade funcional — Compare elementos que desempenham a mesma função, durante o mesmo período de utilização, com desempenho e necessidades de manutenção equivalentes.

Para aprofundar: [46] Avaliação do ciclo de vida: princípios, requisitos e unidade funcional. [18] Sustentabilidade e fabrico digital com betão. [20] Comparação ambiental entre a impressão 3D e a construção convencional.

Materiais, energia e contrapartidas ambientais

Um menor volume de material pode coexistir com um maior impacto por quilograma.



Figura 35 - Principais ganhos e contrapartidas ambientais associados à impressão 3D na construção.

Contrapartidas ambientais

Um menor volume de material pode coexistir com um maior impacto por quilograma. As geometrias vazadas ou otimizadas podem reduzir a massa total utilizada. Contudo, uma mistura com elevado teor de cimento pode anular parte desse ganho. O reforço, o enchimento, o isolamento, o acabamento e as rejeições também devem ser considerados no balanço ambiental. A empresa deve medir a massa total, a composição, as perdas, o consumo de energia, o transporte e a durabilidade da solução completa.

Fatores a medir

O teor de ligante e de adjuvantes, a quantidade de material, o reforço, o consumo de energia na mistura e na bombagem, a taxa de rejeição, o acabamento, o transporte, a cura, a manutenção, a durabilidade e o fim de vida.



IDEIA-CHAVE

Evitar absolutos — Não utilize expressões como “sem desperdício” ou “carbono neutro” sem indicar as fronteiras da análise, o método utilizado, a fonte dos dados e a base de comparação.

Para aprofundar: [16] Materiais sustentáveis para impressão 3D em betão. [18] Sustentabilidade e fabrico digital. [20] Comparação ambiental entre a impressão 3D e a construção convencional.

Circularidade e fim de vida

A desmontagem exige ligações, materiais e informação concebidos para recuperação.



Figura 36 - Principais etapas do ciclo de vida que influenciam o fim de vida e a recuperação de materiais na impressão 3D na construção.

Conceção para circularidade

A desmontagem só é possível quando as ligações, os materiais e a informação disponível a tornam viável. Os elementos segmentados e montados a seco podem ser reutilizados; os materiais monolíticos ou os compósitos podem dificultar a separação dos materiais. As cavidades, os enchimentos e as armaduras alteram o cenário de fim de vida. Os passaportes digitais e os registos da composição podem apoiar a manutenção e a valorização futura. A circularidade deve ser traduzida em requisitos de desmontagem, separação, reutilização ou reciclagem.

Decisões de projeto

Reduza as misturas inseparáveis, identifique os materiais e os lotes, preveja os acessos, as ligações reversíveis, a reutilização dos componentes e as rotas de reciclagem. A liberdade formal não deve comprometer a manutenção nem a separação dos materiais.



IDEIA-CHAVE

Informação acompanha o elemento — a circularidade depende também da documentação sobre o material, o reforço, as ligações, as condições de exposição e o histórico do elemento.

Para aprofundar: [18] Sustentabilidade e fabrico digital. [26] Regulamento (UE) 2024/3110 relativo aos produtos de construção. [35] Ponte Striatu: desmontagem, reutilização e conceção para circularidade.

Como avaliar alegações ambientais

Uma alegação ambiental robusta explica o que foi comparado e com que dados.

Definir

Defina a unidade funcional, a vida útil, o âmbito da análise e a solução de referência.

Comparar

Verifique se as soluções cumprem o mesmo desempenho estrutural e térmico, a mesma durabilidade e as mesmas condições de utilização.

Medir

Identifique quais são os dados primários. Meça a massa, o consumo de energia, o transporte, as perdas, o acabamento e a manutenção.

Comunicar

Indique a incerteza, a fonte dos dados, as fronteiras da análise e as condições consideradas. Evite percentagens apresentadas como universais.



IDEIA-CHAVE

Regra de publicação — Distinga claramente **os resultados medidos, as estimativas, as hipóteses e as alegações dos fornecedores.**

Para aprofundar: [46] Avaliação do ciclo de vida: princípios, requisitos, unidade funcional e fronteiras da análise. [18] Sustentabilidade e fabrico digital. [20] Comparação ambiental entre a impressão 3D e a construção convencional.

Síntese do módulo 4 - Valor e sustentabilidade



Figura 37 - Síntese do módulo 4.

Módulo 5 - Qualidade, segurança e conformidade

Sistema de garantia da qualidade

Qualificar o processo, proteger as pessoas e demonstrar a conformidade.

1 Definir requisitos **2 Controlar o processo** **3 Conservar evidência**



Figura 38 - Principais componentes de um sistema de garantia da qualidade aplicado à impressão 3D na construção.

Garantia da qualidade

A qualidade começa nos requisitos e termina na evidência da aceitação. O sistema deve ligar os requisitos, as responsabilidades, a qualificação, o controlo das matérias-primas, os procedimentos, a monitorização, os ensaios, a calibração, a manutenção, as não conformidades, as alterações e os registos. A qualidade não pode depender apenas da experiência do operador. A documentação deve permitir repetir uma produção aceite e investigar um desvio.

Estrutura mínima

Os requisitos e as responsabilidades; a qualificação; o controlo das entradas; a monitorização; os ensaios; os critérios de aceitação; a gestão das alterações; as não conformidades; a rastreabilidade e o arquivo.

Evidência da qualidade

A conformidade demonstra-se por procedimentos, registos, ensaios e rastreabilidade, e não apenas pela experiência ou pelo resultado final.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

ISO/ASTM 52939 e qualificação do processo

A norma estabelece requisitos de garantia da qualidade para a construção aditiva.



Figura 39 - Principais etapas do processo de qualificação aplicadas à impressão 3D na construção.

ISO/ASTM 52939:2023

A ISO/ASTM 52939:2023 especifica os requisitos de garantia da qualidade para projetos de construção que utilizam fabrico aditivo. Aplica-se às tecnologias de construção aditiva, independentemente do material e da categoria de processo, em elementos estruturais e não estruturais de edifícios e infraestruturas. Exclui as aplicações em metais e não substitui o projeto, a aprovação regulamentar, a caracterização e o ensaio dos materiais, nem os requisitos de ambiente, saúde e segurança. Para uma PME, constitui um referencial para definir responsabilidades, características críticas e registos, adaptados ao caso concreto.

Qualificação do processo

Qualificar o processo significa demonstrar, com evidência objetiva, que a célula de produção, o material e o procedimento produzem resultados repetíveis. A abordagem pode incluir a qualificação da instalação, da operação e do desempenho: confirmar o equipamento e as instalações; demonstrar a operação dentro dos intervalos definidos; e comprovar resultados aceitáveis com materiais, geometrias e condições representativas. Alterações ao material, ao bocal, ao software, à trajetória, ao equipamento, ao ambiente ou ao reforço exigem uma avaliação do impacto e, quando necessário, a requalificação. O trabalho desenvolvido pelo ACI e pela ASTM demonstra que os métodos complementares de qualificação continuam em evolução.



IDEIA-CHAVE

Âmbito da norma — A ISO/ASTM 52939 aplica-se a diferentes materiais e categorias de processo na construção aditiva, mas exclui explicitamente as aplicações em metais.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão. [30] Recomendações do ACI para impressão 3D com materiais cimentícios. [31] Desenvolvimento de normas ASTM para impressão 3D em betão.

Monitorização, ensaios e aceitação

Medir as variáveis críticas permite detetar desvios e decidir atempadamente.



Figura 40 - Principais parâmetros de monitorização do processo de impressão 3D na construção.

Monitorização

Monitorizar não significa recolher toda a informação disponível; significa medir as variáveis críticas e reagir atempadamente. Podem ser monitorizadas a geometria, a posição, a velocidade, o caudal, a pressão, a temperatura, a humidade, o tempo entre camadas e as imagens do processo. O sistema deve definir os alertas, os limites, a autoridade para interromper a produção e o procedimento de segregação do produto. Os sensores sem calibração, sincronização ou contexto geram dados de utilidade limitada.

Ensaios e aceitação

O plano de ensaios deve representar o material, a interface entre camadas, a orientação e o elemento real. Podem ser necessários ensaios do material fresco, da geometria, da resistência, da aderência entre camadas, da densidade, da absorção, da durabilidade, das fixações, do reforço e do comportamento do componente. A amostragem deve indicar onde e quando o provete foi obtido. Os critérios de aceitação devem estar definidos antes da realização dos ensaios; caso contrário, os resultados tornam-se difíceis de interpretar.



IDEIA-CHAVE

Crítérios antes do ensaio — Defina previamente o método, a amostragem, a tolerância, a autoridade de decisão e a resposta ao resultado.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [21] Requisitos de desempenho e métodos de ensaio para materiais cimentícios imprimíveis. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão. [24] Normalização da impressão 3D em betão. [49] Garantia da qualidade e avaliação do desempenho de materiais cimentícios produzidos por fabrico aditivo.

Segurança de máquinas, materiais e estaleiro

A célula de produção combina movimento automático, pressão, energia e exposição a materiais.

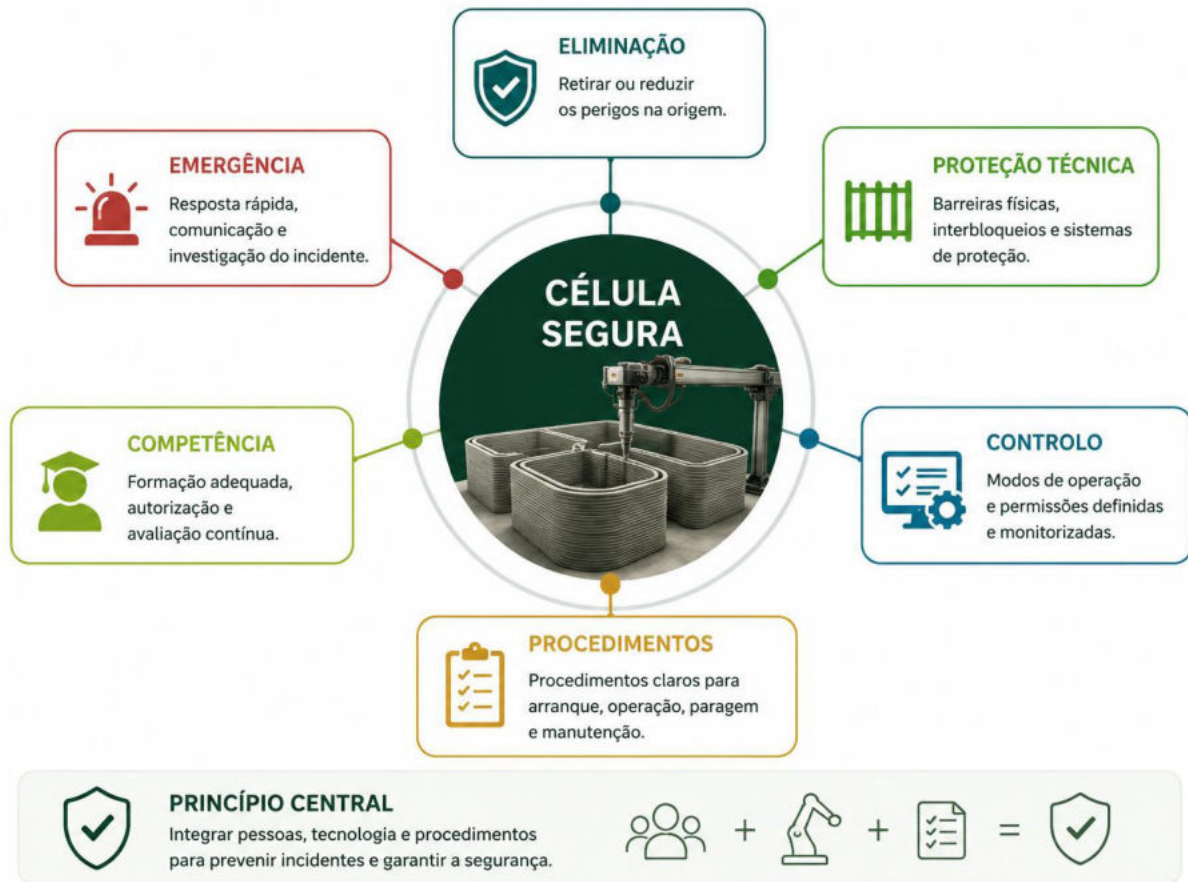


Figura 41 - Principais camadas de prevenção para uma operação segura de uma célula robotizada de impressão 3D na construção.

Máquinas e robôs

A célula de produção combina movimento automático, pressão, energia, partes móveis e interação humana. A avaliação de risco deve abranger o projeto, a instalação, a operação, a manutenção, a limpeza, o desentupimento, a mudança de ferramenta, a recuperação e as situações de emergência. As barreiras, os scanners, os interbloqueios, as velocidades reduzidas e as paragens de emergência devem ser definidos em função da arquitetura do sistema e do modo de operação. O Regulamento (UE) 2023/1230 aplica-se, em geral, a partir de 20 de janeiro de 2027, embora algumas disposições sejam aplicáveis em datas anteriores. Até 19 de janeiro de 2027, para a colocação de máquinas no mercado ou a sua entrada em serviço, mantém-se aplicável a Diretiva 2006/42/CE, sem prejuízo da avaliação de cada caso concreto.

Materiais e estaleiro

As poeiras, o cimento, os adjuvantes, a pressão e as operações de limpeza exigem medidas de prevenção específicas. Devem ser consideradas as fichas de dados de segurança, o contacto com a pele e os olhos, a inalação, a ergonomia, as mangueiras pressurizadas, os derrames, a lavagem, os resíduos, as superfícies escorregadias, as condições climáticas, a circulação e os trabalhos simultâneos. A zona de impressão deve ser controlada e devidamente sinalizada. O procedimento de desentupimento constitui uma operação crítica e não deverá ser improvisado.



IDEIA-CHAVE

Operação crítica — A limpeza, o desentupimento, a manutenção, a recuperação após uma paragem e a mudança de ferramenta exigem procedimentos específicos.

Para aprofundar: [28] Regulamento (UE) 2023/1230 relativo às máquinas. [29] Aplicação do Regulamento (UE) 2023/1230 e requisitos de segurança das máquinas.

Produtos de construção e rota de conformidade

A impressão 3D não cria uma exceção geral às regras aplicáveis ao produto, à máquina ou à obra.



Figura 42 - Etapas principais para a definição da rota de conformidade de produtos de construção obtidos por impressão 3D.

Enquadramento europeu

O Regulamento (UE) 2024/3110 estabelece o novo quadro para a comercialização de produtos de construção, aplicando-se, em geral, a partir de 8 de janeiro de 2026, sem prejuízo das exceções e dos períodos transitórios previstos no próprio regulamento. O primeiro passo consiste em classificar o resultado: produto de construção colocado no mercado, kit, componente produzido no local ou parte integrante da obra. A rota de conformidade deve ser definida em função dessa classificação, da utilização prevista, das características essenciais aplicáveis e da existência de especificação técnica harmonizada ou Documento de Avaliação Europeu aplicável. O sistema de avaliação e verificação aplicável deve ser determinado de acordo com o enquadramento técnico e regulamentar aplicável ao produto ou sistema em causa. Esta análise é independente da conformidade da máquina ou do equipamento de impressão: a marcação CE da máquina, quando aplicável, não demonstra o desempenho nem a conformidade do produto ou elemento de construção produzido. Para produtos, kits ou sistemas inovadores não abrangidos, ou não totalmente abrangidos, por especificação técnica harmonizada aplicável, pode ser considerada a via voluntária da Avaliação Técnica Europeia (ETA), emitida por um Organismo de Avaliação Técnica com base num Documento de Avaliação Europeu (EAD) cuja referência tenha sido publicada no Jornal Oficial da União Europeia. A decisão deve ser tomada caso a caso, com apoio técnico e jurídico.

Ação recomendada para a PME

Classifique o resultado — produto colocado no mercado, componente produzido no local ou parte integrante da obra. Identifique a utilização prevista e as características essenciais. Verifique a especificação técnica aplicável. Defina os fabricantes, os integradores e os restantes operadores económicos. Avalie a via ETA/EAD, quando pertinente. Documente os ensaios, as declarações, as instruções e as responsabilidades. Obtenha parecer técnico e jurídico antes de definir a rota de conformidade.

Enquadramento nacional da avaliação e homologação

O LNEC está designado como Organismo de Avaliação Técnica (OAT) em Portugal para a emissão de Avaliações Técnicas Europeias, no âmbito das gamas de produtos para que se encontra habilitado.

No plano nacional, o Decreto-Lei n.º 50/2008 torna obrigatória a homologação pelo LNEC, salvo as exceções previstas, dos produtos e sistemas de construção utilizados em edificações urbanas que não sejam abrangidos por Normas Portuguesas ou Normas Europeias adotadas em Portugal, que não sejam objeto de uma Avaliação Técnica Europeia e que não estejam sujeitos a certificação obrigatória.

Um sistema construtivo com paredes impressas poderá enquadrar-se nesta situação, dependendo da sua configuração, utilização prevista, forma de disponibilização no mercado e existência de normas, ETA ou outros documentos aplicáveis. O Documento de Homologação tem prazo de validade. A validade e o regime aplicável às ETA/EAD devem ser confirmados em função do enquadramento europeu e das regras transitórias em vigor. Confirme sempre o enquadramento junto do LNEC antes de iniciar o processo.

“Avaliação Técnica Europeia (ETA)” é a avaliação documentada do desempenho de um produto de construção, emitida por um Organismo de Avaliação Técnica com base num Documento de Avaliação Europeu e no âmbito regulamentar aplicável.

“Documento de Avaliação Europeu (EAD)” é o documento adotado pela organização dos Organismos de Avaliação Técnica para servir de base à emissão de uma Avaliação Técnica Europeia, definindo métodos e critérios de avaliação do desempenho do produto em relação às características essenciais aplicáveis.

A marcação CE do equipamento de impressão, quando aplicável ao abrigo da legislação de máquinas, não demonstra a conformidade nem o desempenho do elemento de construção produzido. O produto ou kit de construção deve ser analisado separadamente no quadro do Regulamento dos Produtos de Construção e das especificações técnicas aplicáveis.



Cautela — A rota regulamentar não deve ser determinada apenas pelo nome comercial da tecnologia, mas pelas características do produto, da aplicação e pelo enquadramento regulamentar aplicável.

Para aprofundar [26] Regulamento (UE) 2024/3110 e rota de conformidade dos produtos de construção. [27] Transição para o novo Regulamento dos Produtos de Construção. [42] LNEC: Documentos de Homologação e Avaliações Técnicas Europeias. [50] Marcação CE voluntária pela via ETA.

Contratos e diligência sobre fornecedores

A cadeia digital cria novas passagens de responsabilidade.



Figura 43 - Principais áreas a avaliar na seleção e diligência de fornecedores de impressão 3D na construção.

Contratos e responsabilidades

A cadeia digital cria novas passagens de responsabilidade que devem estar claramente definidas. O contrato deve identificar quem fornece e quem aprova os requisitos, o modelo, a trajetória, o material, os parâmetros, o equipamento, a operação, a inspeção, os ensaios, a montagem e a documentação. Deve igualmente regular a propriedade intelectual, a confidencialidade, a cibersegurança, as alterações, a aceitação, as garantias e a responsabilidade por defeitos. A expressão "ficheiro fornecido pelo cliente" não deve dispensar a verificação nem a preparação adequada do ficheiro para fabrico.

Diligência sobre o fornecedor

Uma demonstração impressionante não substitui evidência sobre o suporte técnico, a qualidade e a conformidade. Solicite referências comparáveis, limites de aplicação, especificações, evidência de qualificação, resultados de ensaios, planos de manutenção, disponibilidade de peças, assistência técnica, formação, medidas de cibersegurança e condições de atualização. Confirme quem assume a responsabilidade pelo material, pela operação e pela aprovação. Visite uma instalação em produção e fale com utilizadores, e não apenas com a equipa comercial.



IDEIA-CHAVE

Verificação prática — Visite uma instalação em produção, peça referências comparáveis e fale com utilizadores, e não apenas com a equipa comercial.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [4] Processamento da informação digital. [26] Regulamento (UE) 2024/3110 relativo aos produtos de construção. [27] Informação da Comissão Europeia sobre o novo regulamento e o período de transição. [50] Marcação CE voluntária pela via da Avaliação Técnica Europeia (ETA). [29] Aplicação do Regulamento (UE) 2023/1230 e requisitos de segurança das máquinas.

Não conformidades e atividade

Um desvio deve ser detetado, contido, investigado e objeto de decisão por autoridade definida e documentada.

<u>Detetar</u> Defina os sinais, as medições e os alertas que permitem identificar o desvio.	<u>Conter</u> Interrompa a produção em segurança, identifique o material e o elemento afetado e proceda à sua segregação.
<u>Investigar</u> Conserve os dados do processo, compare as versões e procure a causa técnica e a causa organizacional.	<u>Decidir</u> Defina se o elemento deve ser reparado, aceite mediante concessão formal, repetido ou rejeitado, com autoridade de decisão documentada.



IDEIA-CHAVE

Registos a conservar — Os dados do processo, as imagens, as versões, as amostras, a identificação do elemento, a análise da causa e a decisão.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

Síntese do módulo 5 - Qualidade, segurança e conformidade

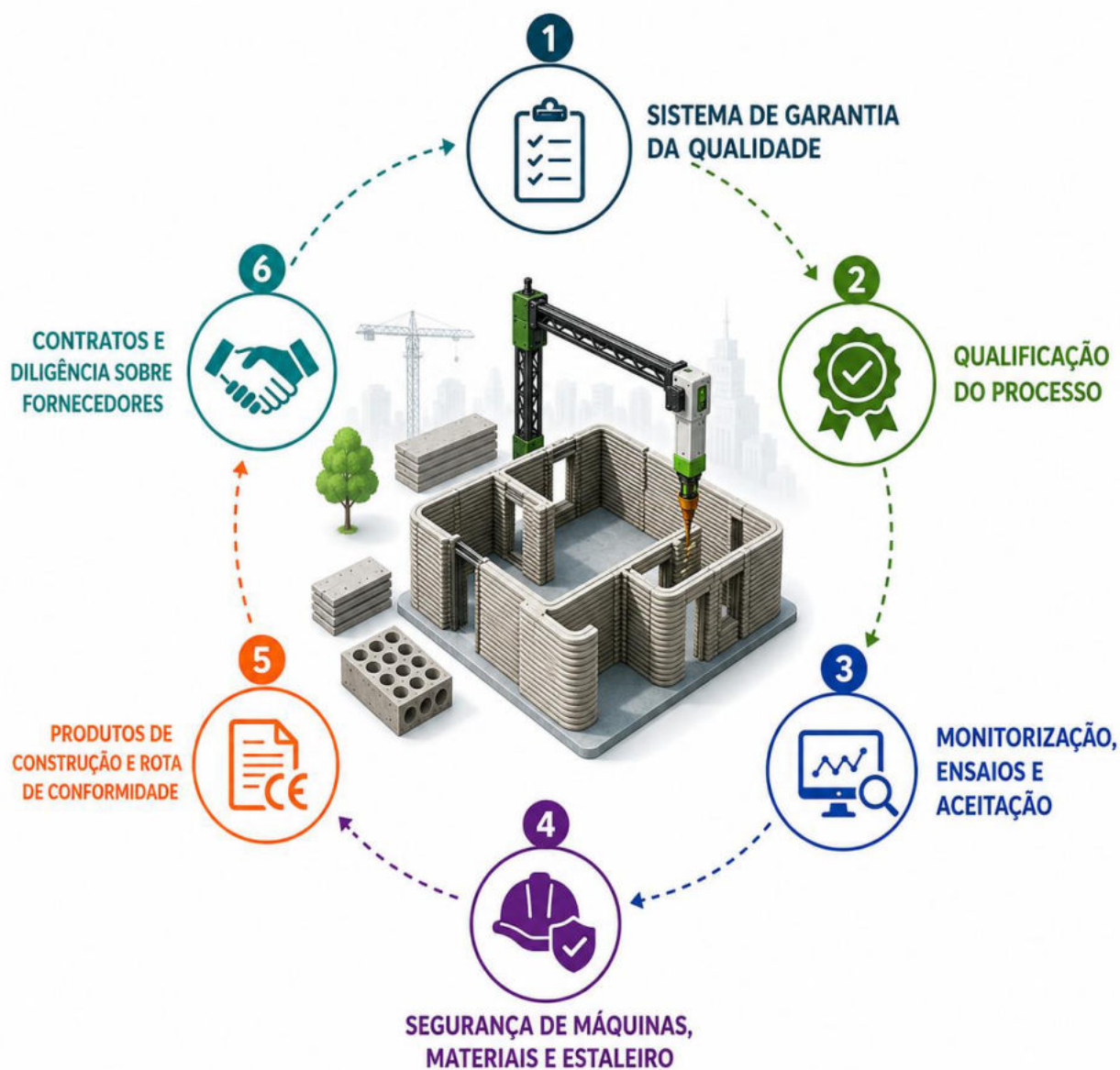


Figura 44 - Síntese do módulo 5.

Módulo 6 - Roteiro de adoção

Preparação da empresa

Do interesse inicial a um piloto controlado e a uma decisão informada.

1 Avaliar prontidão

2 Escolher o modelo de acesso

3 Conduzir um piloto



Figura 45 - Principais dimensões da prontidão empresarial para a adoção da impressão 3D na construção.

Prontidão empresarial

A prontidão empresarial vai muito além do orçamento necessário para adquirir um equipamento. Avalie a estratégia, a procura, o produto, os dados, as pessoas, a qualidade, a segurança, o espaço, a logística, a manutenção, o capital e os parceiros. Uma empresa pode estar preparada para contratar um serviço, mas não para operar uma célula de produção. Pode estar preparada para produzir protótipos, mas não para fabricar elementos estruturais. O resultado da avaliação deve indicar o próximo passo, e não apenas uma pontuação.

Leitura do resultado

A avaliação deve traduzir-se numa decisão operacional: avançar para a contratação de um serviço, desenvolver um projeto-piloto, reforçar competências internas, procurar parceiros ou adiar o investimento. O objetivo é definir o próximo passo adequado, reduzindo o risco e orientando a evolução da empresa.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção.

Escolher o primeiro caso de utilização

O primeiro projeto-piloto deve maximizar a aprendizagem e limitar as consequências de uma eventual falha.

Critério	Bom candidato para primeiro piloto	Requer análise adicional	Evitar como primeiro piloto
Valor para o cliente	Benefício claro, mensurável e fácil de comunicar.	Benefício provável, mas ainda pouco quantificado.	Benefício pouco claro ou difícil de demonstrar.
Complexidade geométrica	Geometria em que a impressão 3D pode acrescentar valor face à solução convencional.	Geometria moderadamente complexa; comparar alternativas.	Geometria simples, já resolvida de forma eficiente por métodos convencionais.
Personalização ou variantes	Peça personalizada, pequena série ou necessidade de variantes.	Algumas variantes, mas com requisitos ainda pouco definidos.	Produto normalizado, repetitivo e sem necessidade de adaptação.
Risco técnico	Elemento não estrutural, removível, inspecionável e com consequências limitadas em caso de falha.	Elemento com interfaces, exposição moderada ou requisitos de desempenho adicionais.	Elemento estrutural crítico, difícil de inspecionar ou sem solução de validação definida.
Validação e ensaios	Critérios de aceitação claros, ensaios acessíveis e referência convencional conhecida.	Ensaio possíveis, mas com requisitos técnicos ou custos relevantes.	Sem método de ensaio definido, sem tolerâncias ou sem critérios de aceitação.
Materiais e processo	Material disponível, processo conhecido e fornecedor com experiência comparável.	Material ou processo ainda a ajustar ao caso concreto.	Material sem caracterização suficiente ou processo dependente de condições pouco controladas.
Logística e produção	Dimensão controlável, transporte simples e produção possível em ambiente adequado.	Custos logísticos, acessos ou montagem a avaliar.	Grande dimensão, transporte complexo ou forte dependência de condições de estaleiro.
Capacidade interna da PME	A empresa consegue definir requisitos, acompanhar o fornecedor e avaliar os resultados.	Necessidade de apoio externo relevante.	Ausência de competências mínimas para especificar, acompanhar ou validar o piloto.

Figura 46 - Matriz de apoio à seleção do primeiro caso de utilização da impressão 3D na construção.

Como utilizar esta matriz: Avalie cada critério para a aplicação em análise e identifique em que coluna se concentra a maioria das respostas. A matriz não deve ser usada como pontuação automática: a decisão final deve resultar da avaliação conjunta dos critérios e da análise técnica do caso concreto.

<u>Critérios do primeiro caso</u> Depois de aplicar a matriz, selecione uma aplicação concreta e traduza-a num piloto controlado. Defina o requisito a validar, a solução convencional de referência, os critérios de aceitação, os meios de inspeção, os ensaios necessários e as condições em que o piloto deverá ser reformulado, repetido ou interrompido. Evite começar por um elemento estrutural crítico, um contrato com prazo inflexível ou uma solução sem método de ensaio disponível.	<u>Pergunta de decisão</u> Formule uma pergunta mensurável, por exemplo: “Conseguimos produzir este componente dentro das tolerâncias, do custo, do prazo e da documentação definidos?”
--	---

 IDEIA-CHAVE	Boa escolha — Geometria digital disponível, volume controlável, requisito mensurável, inspeção simples e uma alternativa convencional conhecida.
--	--

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção.

Produzir, contratar ou cooperar

O modelo de acesso deve corresponder à frequência de utilização, ao risco e à capacidade da empresa.

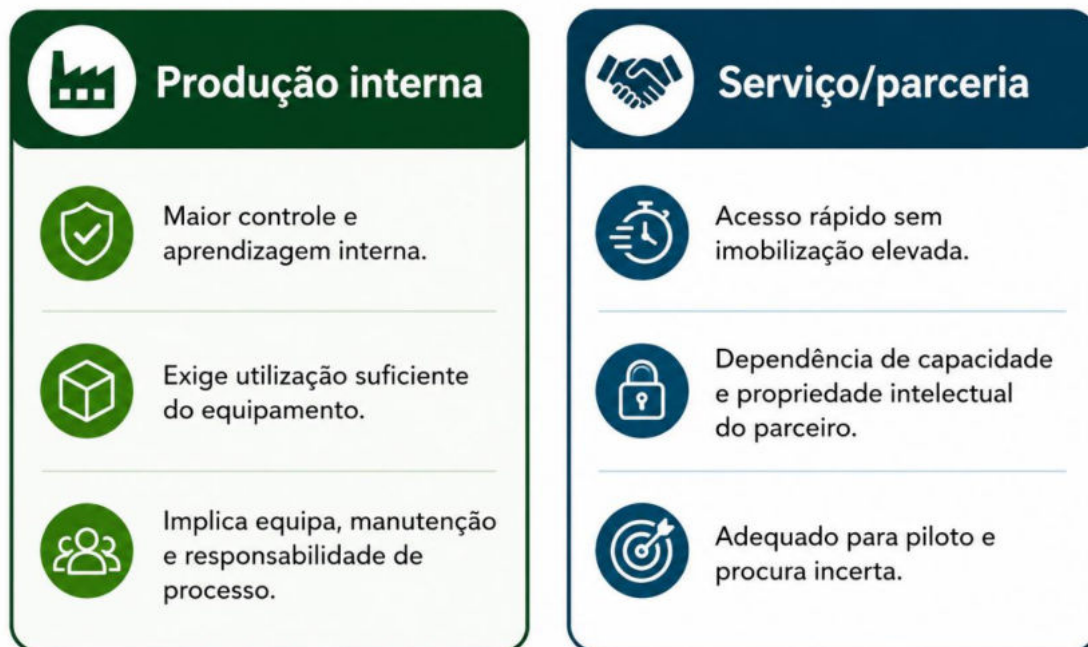


Figura 47 - Comparação entre produção interna e serviço/parceria na adoção da impressão 3D na construção.

Três modelos de acesso

A empresa pode produzir internamente, contratar a produção como serviço ou cooperar com uma universidade, um centro tecnológico ou um parceiro industrial. A produção interna oferece aprendizagem e controlo, mas exige investimento, equipa, manutenção e utilização suficiente para justificar a capacidade instalada. O serviço externo reduz a barreira ao investimento inicial e permite comparar fornecedores. A cooperação é adequada para ensaios, desenvolvimento e validação inicial. A decisão deve considerar a propriedade dos ficheiros, a confidencialidade, os critérios de aceitação e o plano para assegurar a continuidade da solução.

Decisão progressiva

A adoção pode evoluir por etapas: serviço externo ou cooperação para testar a aplicação, projeto-piloto para validar requisitos e produção interna apenas quando existam procura recorrente, equipa qualificada, espaço, sistema de qualidade, condições de segurança, capacidade de manutenção e capacidade financeira.



IDEIA-CHAVE

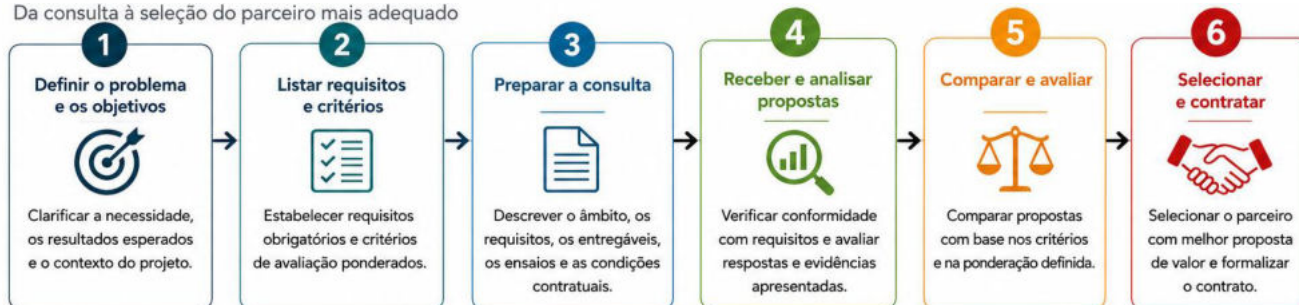
Princípio — Aprenda através de um serviço externo ou de um projeto-piloto antes de assumir um investimento fixo elevado.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção.

Preparar a consulta e selecionar o parceiro

Uma boa consulta descreve o problema, os requisitos e os critérios de aceitação.

Da consulta à seleção do parceiro mais adequado



CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO (exemplos)	PONDERAÇÃO (%)	PARCEIRO A		PARCEIRO B		PARCEIRO C	
		Pontuação (1-5)	Pontuação ponderada	Pontuação (1-5)	Pontuação ponderada	Pontuação (1-5)	Pontuação ponderada
Experiência relevante e casos de aplicação	20	5	1,00	3	0,60	4	0,80
Materiais e tecnologias disponíveis	15	4	0,60	5	0,75	4	0,60
Qualidade e ensaios propostos	20	4	0,80	4	0,80	5	1,00
Suporte técnico e assistência	15	3	0,45	5	0,75	4	0,60
Prazo e capacidade de resposta	10	4	0,40	3	0,30	4	0,40
Garantias e condições contratuais	10	5	0,50	3	0,30	4	0,40
Custo total de propriedade	10	3	0,30	4	0,40	3	0,30
TOTAL	100		4,05		3,90		4,10

A ponderação e as pontuações são exemplificativas. Devem ser ajustadas à natureza e complexidade de cada projeto.

Escala de pontuação (1-5): 1 = Muito insuficiente 2 = Insuficiente 3 = Suficiente 4 = Bom 5 = Excelente

Figura 48 - Exemplos das principais áreas de avaliação de fornecedores e parceiros para a adoção da impressão 3D na construção.

Conteúdo da consulta

Uma boa consulta descreve o problema e os requisitos, e não apenas a intenção de "imprimir". Deve incluir, entre outros elementos adequados ao caso, a função, a geometria, a quantidade, o material admissível, as tolerâncias, o desempenho, as condições ambientais, as interfaces, o prazo, os requisitos de inspeção e a documentação a entregar. Devem ser solicitadas propostas técnica e comercial separadas, com indicação dos pressupostos, das exclusões, da matriz de responsabilidades, do plano de ensaios e de referências comparáveis. As propostas devem ser comparadas com base em critérios ponderados, registrando-se as dúvidas, as reservas e os desvios identificados.

Comparação ponderada

A avaliação deve considerar a experiência comparável, a qualificação, os materiais e as tecnologias disponíveis, a capacidade produtiva, os ensaios propostos, os prazos, o suporte técnico, a manutenção, a propriedade dos ficheiros, a confidencialidade, a cibersegurança, as garantias, as exclusões contratuais e a dependência tecnológica.



IDEIA-CHAVE

Proposta técnica e comercial — Solicite os pressupostos e as exclusões de forma separada, acompanhados da matriz de responsabilidades.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [26] Regulamento (UE) 2024/3110 relativo aos produtos de construção.

Projeto-piloto por etapas de decisão

Cada etapa deve terminar com evidência e uma decisão explícita.



Figura 49 - Projeto-piloto com portas de decisão.

Sequência do piloto

Cada etapa deve terminar com evidência documentada e uma decisão explícita. Uma sequência adequada inclui a definição do problema e da solução de referência; os requisitos; o conceito e os riscos; a amostra de material; o provete ou o subcomponente; o elemento-piloto; a avaliação; e a decisão de escalar, reformular ou terminar. O orçamento deve reservar tempo e verba para a repetição dos ensaios, a análise das falhas e uma nova validação, quando necessária. A aprovação de uma etapa não deve ser presumida apenas porque o calendário avançou.

Portas de decisão

Em cada etapa, defina a decisão esperada: avançar para a fase seguinte, repetir o ensaio, reformular a solução ou interromper o piloto. A decisão deve basear-se nos critérios de aceitação definidos previamente, nos resultados obtidos e na evidência documentada.

Ficha mínima do piloto: problema empresarial; componente; função; solução convencional de referência; requisitos; parceiro; material; etapas; critérios de aceitação; indicadores; riscos; responsáveis; decisão final.



IDEIA-CHAVE

Orçamento realista — Reserve tempo e verba para a repetição, a análise das falhas e uma nova validação.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

Indicadores e caso de negócio

Medir apenas um indicador, como a velocidade de impressão, conduz a conclusões incompletas.



Figura 50 - Painel mínimo para acompanhar um piloto.

Indicadores do projeto-piloto

O painel de indicadores deve incluir, entre outros, a qualidade, o prazo, o custo, o consumo de material, a segurança, o consumo de energia, a disponibilidade, o retrabalho, a documentação e a aprendizagem. Cada indicador deve ter uma definição, uma fonte de dados, uma unidade de medida, uma frequência de avaliação, um responsável, uma meta e um valor de referência. Registe também os incidentes, as alterações e o tempo de apoio prestado pelo fornecedor.

Caso de negócio

O retorno do investimento depende do fluxo anual de oportunidades e não apenas do custo de uma peça. Estime a procura, o preço, a margem, a taxa de utilização, a capacidade, as perdas, a formação, os ensaios, a manutenção, o financiamento, a obsolescência e o valor residual. Construa cenários baixo, central e alto. Inclua os custos de integração e o tempo das equipas. Quando recorrer a um serviço externo, compare o custo por unidade, o prazo, o risco contratual e a dependência do fornecedor. Em caso de aquisição de equipamento, calcule o ponto de equilíbrio e a sensibilidade à taxa de utilização.



IDEIA-CHAVE

Três cenários — Construa **cenários baixo, central e alto** para a **procura, a taxa de utilização, as perdas, o preço, os custos e o suporte.**

Para aprofundar: [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção e fatores que condicionam a viabilidade. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão e indicadores de processo.

Competências e gestão da mudança

A tecnologia altera as funções, as rotinas, os critérios de decisão e a relação entre as diferentes áreas.



Figura 51 - Exemplo de organização funcional de uma equipa interfuncional para a adoção da impressão 3D na construção.

Organização da mudança

Designe um patrocinador da direção, um responsável pelo projeto e os responsáveis pelos principais processos. Defina as competências mínimas, um plano de formação, o tempo protegido para a aprendizagem e um mecanismo de partilha do conhecimento. Inclua os operadores e as equipas de obra na conceção dos procedimentos. Os resultados iniciais devem ser comunicados com os respetivos limites e os dados que os suportam, evitando criar expectativas que o projeto-piloto ainda não demonstrou.

Responsabilidades mínimas

O patrocinador da direção; o responsável pelo projeto; os responsáveis pelos principais processos; o técnico de dados/modelo; o responsável pelos materiais; os responsáveis pela operação, pela qualidade, pela segurança e pelas compras; e o parceiro externo.



IDEIA-CHAVE

Tempo protegido — A aprendizagem exige disponibilidade formal da equipa e tempo dedicado, não apenas tarefas adicionais ao trabalho corrente.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [9] Processos de fabrico por extrusão de materiais cimentícios. [23] Controlo da qualidade no fabrico digital com betão.

Roteiro indicativo de 12 meses

O calendário deve ser adaptado à complexidade do projeto e à rota de conformidade.



Figura 52 - Roteiro indicativo para um primeiro projeto.

Etapas ao longo do ano

Nos meses 1 e 2, selecione o problema e a equipa. Nos meses 2 e 3, defina os requisitos e realize a consulta ao mercado. Nos meses 3 a 5, execute os ensaios de materiais e de geometria. Nos meses 5 a 7, desenvolva o subcomponente. Nos meses 7 a 9, realize o projeto-piloto. Nos meses 9 e 10, efetue a avaliação dos resultados. Nos meses 10 a 12, tome a decisão, proceda à normalização interna e prepare o plano de expansão. As aplicações estruturais ou o desenvolvimento de novos produtos podem exigir períodos substancialmente superiores.

Marcos de decisão

A seleção do problema; a consulta ao mercado; os ensaios; o subcomponente; o projeto-piloto; a avaliação; a normalização interna; a decisão de continuidade; e o plano de expansão.



IDEIA-CHAVE

Aplicações críticas — Os elementos estruturais ou o desenvolvimento de novos produtos podem exigir períodos substancialmente superiores.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção.

Boas práticas, erros e lista final

A disciplina na tomada de decisão é mais importante do que o entusiasmo pela tecnologia.

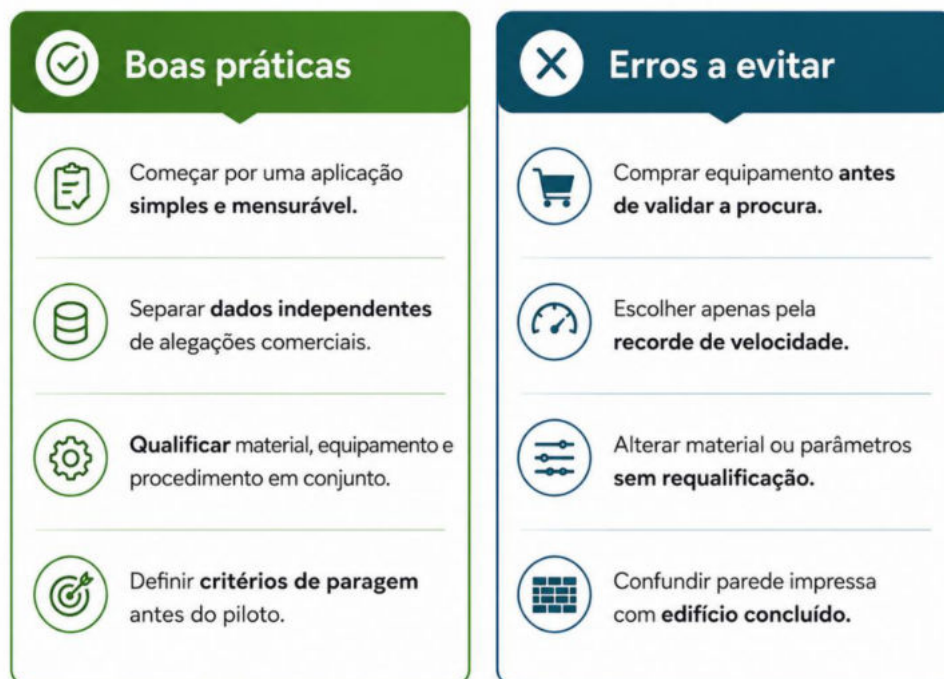


Figura 53 - Boas práticas e erros frequentes.

Boas práticas e erros

Entre as boas práticas destacam-se começar por um problema mensurável, definir os critérios de aceitação antes dos ensaios, tratar o material e o equipamento como um sistema, conservar as diferentes versões e comparar sempre com uma solução de referência equivalente. Entre os erros mais frequentes incluem-se adquirir equipamento sem procura identificada, aceitar dados promocionais sem validação, omitir o reforço e a conformidade, alterar parâmetros sem registo e excluir os custos de pós-processamento da avaliação económica.

Lista de verificação

Utilize esta página para transformar as boas práticas e os erros identificados num plano de ação. Registe os aspetos que já estão assegurados, os pontos ainda por validar e as ações necessárias antes de avançar.



Plano de ação — Registe três ações, indicando o responsável, o prazo, a evidência esperada e a decisão associada.

Para aprofundar: [2] Qualificação de elementos estruturais e de infraestruturas na construção aditiva. [3] Qualificação dos processos e dos locais de produção. [8] Aplicações da impressão 3D na construção. [11] Potencial e limitações da impressão 3D na construção. [18] Sustentabilidade e fabrico digital.

Síntese do módulo 6 - Roteiro de adoção



Figura 54 - Síntese do módulo 6.

Fichas práticas

FERRAMENTA PRÁTICA

Ficha 1 — Definir o primeiro caso de utilização

Preencha em equipa antes de contactar um fornecedor.

1. Problema empresarial

Que problema concreto pretende resolver e como é medido hoje?

2. Elemento, ferramenta ou serviço

Que elemento, ferramenta ou serviço será avaliado? Qual é a sua função?

3. Solução convencional de referência

Como é produzido atualmente, com que custo, prazo, qualidade e desperdício?

4. Requisitos e riscos

Indique dimensões, tolerâncias, desempenho, exposição, consequência de falha e ensaios.

5. Pergunta de decisão

Escreva uma pergunta que possa ser respondida no final do piloto.



DOCUMENTAR

Registo — Guarde a ficha com a versão do projeto, data, participantes e decisão tomada.

FERRAMENTA PRÁTICA

Ficha 2 — Comparar parceiros ou fornecedores

Use os mesmos critérios para todas as propostas.

1. Experiência comparável

Projetos, materiais, escala, clientes e referências verificáveis.

2. Solução técnica

Equipamento, material, parâmetros, limites, acabamento, reforço e integração.

3. Qualidade e conformidade

Qualificação, ensaios, documentação, rastreabilidade e rota regulamentar.

4. Suporte e continuidade

Formação, manutenção, peças, assistência, atualizações e dependência tecnológica.

5. Condições comerciais e contratuais

Preço, pressupostos, exclusões, prazo, propriedade dos ficheiros, garantias e responsabilidades.



DOCUMENTAR

Registo — Guarde a ficha com a versão do projeto, data, participantes e decisão tomada.

FERRAMENTA PRÁTICA

Ficha 3 — Plano do piloto e indicadores

Defina a sequência e os critérios antes de iniciar.

1. Etapas e marcos

Liste amostra, provete, subcomponente, projeto-piloto, avaliação e decisão.

2. Critérios de aceitação

Qualidade, geometria, resistência, prazo, custo, segurança, documentação e sustentabilidade.

3. Indicadores e fonte de dados

Unidade, valor de referência, meta, frequência, responsável e evidência.

4. Riscos e resposta

O que pode falhar, como será detetado e quem decide parar?

5. Decisão final

Escalar, reformular, repetir ou terminar — condições para cada opção.



DOCUMENTAR

Registo — Guarde a ficha com a versão do projeto, data, participantes e decisão tomada.

Glossário

CONSULTA RÁPIDA

Glossário

Definições simplificadas para utilização empresarial.

Avaliação do ciclo de vida (ACV)	Método normalizado para avaliar entradas, saídas e potenciais impactos ambientais de um produto, processo ou sistema ao longo das etapas definidas do seu ciclo de vida.
Aderência entre camadas	Capacidade de duas camadas sucessivas transmitirem esforços através da respetiva interface.
Anisotropia	Variação do comportamento do material ou do elemento em função da direção considerada.
BIM (Building Information Modeling / modelação da informação da construção)	Modelação da informação da construção num modelo digital que integra geometria e dados partilhados entre especialidades.
Bombeabilidade	Capacidade de uma mistura ser bombeada através do sistema de alimentação, mantendo estabilidade e caudal adequados.
Braço robótico	Manipulador programável com vários eixos, utilizado para deslocar e orientar a cabeça de deposição.
Capacidade de construção (buildability)	Capacidade das camadas frescas suportarem o peso das camadas seguintes sem colapso ou deformação excessiva.
Cadeia digital	Sequência de dados, software, decisões e verificações desde o modelo até à produção e ao registo final.
Cabeça de impressão	Conjunto terminal que recebe, condiciona e deposita o material segundo a trajetória programada.
Camada	Porção de material depositada num determinado nível ou trajetória durante a produção.
Célula de produção	Conjunto integrado de equipamentos, sistemas de alimentação, controlo, sensores, segurança, limpeza e apoio operacional necessários à produção por impressão 3D.
Cordão	Faixa contínua de material extrudido pela cabeça de impressão.
Código G (G-code)	Linguagem de comandos usada em muitos sistemas de controlo numérico; a sua estrutura varia consoante o equipamento.
Cura	Conjunto de condições e ações destinadas a controlar a perda de água e o desenvolvimento das propriedades do material.
DfAM	Design for Additive Manufacturing (conceção para fabrico aditivo): conceção orientada às possibilidades, limitações, interfaces e controlo do processo aditivo.
Extrudabilidade	Capacidade de o material sair do bocal de forma contínua, estável e compatível com a geometria prevista.
Extrusão	Processo em que o material é forçado de forma contínua através de um bocal, sendo depositado em cordões sucessivos.
Fabrico aditivo (AM)	Impressão 3D. Produção de geometrias tridimensionais por adição sucessiva de material a partir de dados digitais.

Ficheiro de fabrico	Ficheiro que transporta a geometria, as trajetórias ou outros dados utilizados na preparação e execução.
Imprimibilidade	Conjunto de propriedades que permite alimentar, extrudir, depositar e empilhar o material dentro de tolerâncias definidas.
Interface	Zona de contacto entre camadas, cordões, componentes ou materiais distintos.
Janela de processo	Intervalo de condições em que material, equipamento e parâmetros produzem um resultado aceitável.
Janela de imprimibilidade	Ver janela de processo.
Jato de ligante	Processo em que um ligante líquido é depositado seletivamente sobre um leito de partículas.
Mistura imprimível	Material formulado e validado para um sistema, uma geometria, um ambiente e um ritmo de produção específicos.
Modelo paramétrico	Modelo cuja geometria e regras podem ser alteradas através de parâmetros e relações definidas.
Passaporte de materiais	Registo organizado de informação sobre a composição, origem, características, utilização, manutenção e potencial de reutilização ou reciclagem de um material, produto ou elemento construtivo.
Pórtico	Estrutura cartesiana que suporta o sistema de movimento e delimita o volume de trabalho.
Pós-processamento	Operações posteriores à deposição, como cura, acabamento, remoção de suportes, montagem ou inspeção.
Provete	Amostra preparada para ensaio, utilizada para avaliar propriedades do material ou do elemento produzido.
Qualificação do processo	Demonstração documentada de que recursos, parâmetros, procedimento e controlo conseguem produzir de forma repetível.
Rastreabilidade	Capacidade de relacionar um elemento produzido com os dados, materiais, parâmetros, equipamentos, registos e decisões que permitem reconstruir o respetivo processo de fabrico.
Reologia	Estudo do escoamento e da deformação dos materiais.
Reforço híbrido	Combinação de material impresso com armaduras, cabos, fibras, enchimentos ou elementos produzidos por outras técnicas.
Divisão em camadas (slicing)	Conversão da geometria digital numa sequência de camadas e trajetórias de deposição.
STL	Formato de malha triangular muito difundido, mas limitado na representação de unidades, materiais e metadados.

Tixotropia	Recuperação estrutural de um material após redução ou cessação do esforço de corte.
Trajectoria	Percurso programado da cabeça de impressão ou do ponto de deposição.
Unidade funcional	Referência quantitativa que traduz a função a comparar (p. ex., 1 m ² de parede com desempenho, vida útil e condições de serviço definidos), à qual se reportam os impactos numa avaliação do ciclo de vida.
Validação	Confirmação, através de evidência, de que a solução cumpre a utilização e os requisitos definidos.

Referências e ligações

Referências e ligações

As ligações são clicáveis; hiperligações verificadas em julho de 2026.

1	ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Abrir fonte
2	ISO/ASTM 52939:2023. Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements. Abrir fonte
3	ISO/ASTM 52920:2023. Additive manufacturing — Qualification principles — Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites. Abrir fonte
4	ISO/ASTM 52950:2021. Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing. Abrir fonte
5	3MF Consortium. 3MF Core Specification and extensions. Abrir fonte
6	buildingSMART International. Industry Foundation Classes (IFC) e openBIM. Abrir fonte
7	RILEM TC 276-DFC. Digital fabrication with cement-based materials. Abrir fonte
8	Buswell, R. et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. Cement and Concrete Research, 2018. Abrir fonte
9	Mechtcherine, V. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials — production steps, processes and underlying physics. Cement and Concrete Research, 2020. Abrir fonte
10	Le, T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and Structures, 2012. Abrir fonte
11	Bos, F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges. Virtual and Physical Prototyping, 2016. Abrir fonte
12	Wolfs, R. et al. Hardened properties of 3D printed concrete: influence of process parameters on interlayer adhesion. Cement and Concrete Research, 2019. Abrir fonte
13	Asprone, D. et al. 3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach. Construction and Building Materials, 2018. Abrir fonte
14	Kloft, H. et al. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. Civil Engineering Design, 2020. Abrir fonte
15	Wu, Zhengyu et al. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete. Energies 2022. Abrir fonte
16	Bhattacharjee, S. et al. Sustainable materials for 3D concrete printing. Cement and Concrete Composites, 2022. Abrir fonte
17	Chen, Y. et al. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. Journal of Building Engineering, 2022. Abrir fonte
18	Flatt, R.; Wangler, T. On sustainability and digital fabrication with concrete. Cement and Concrete Research, 2022. Abrir fonte
19	Mohammad, M. et al. 3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios. Buildings, 2020. Abrir fonte
20	Abu-Enab, L. et al. Comparative life cycle assessment of large-scale 3D printing utilizing kaolinite-based calcium sulfoaluminate cement concrete and conventional construction. Cleaner Environmental Systems, 2022. Abrir fonte
21	RILEM TC 303-PFC. Performance requirements and testing of fresh printable cement-based materials. Abrir fonte
22	RILEM TC 304-ADC. Assessment of additively manufactured concrete materials and structures. Abrir fonte
23	Bos, D. et al. A quality control framework for digital fabrication with concrete. RILEM Technical Letters, 2023. Abrir fonte
24	Vasilic, K. et al. Standardization aspects of concrete 3D printing. RILEM Technical Letters, 2024. Abrir fonte

25	Wolfs, R. et al. The status quo of 3D concrete printing: are we there yet? RILEM Technical Letters, 2024. Abrir fonte
26	Regulamento (UE) 2024/3110 relativo aos produtos de construção. Abrir fonte
27	Comissão Europeia. Construction Products Regulation — informação sobre o novo regulamento e transição. Abrir fonte
28	Regulamento (UE) 2023/1230 relativo às máquinas. Abrir fonte
29	EUR-Lex. Requisitos de segurança das máquinas — síntese do Regulamento (UE) 2023/1230 e datas de aplicação. Abrir fonte
30	American Concrete Institute. Committee 564 — 3-D Printing with Cementitious Materials. Abrir fonte
31	ASTM International. Additive Manufacturing of Concrete Addressed by Proposed Standards, 2024. Abrir fonte
32	Universidade do Porto / FEUP. ReCircular: primeira obra pública com recurso a impressão 3D em Portugal, 2025. Abrir fonte
33	TU Eindhoven. Gemert 3D printed reinforced concrete bridge, 2017. Abrir fonte
34	Salet, T. et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 2018. Abrir fonte
35	ETH Zurich. Striatu — 3D printed and unreinforced concrete bridge, 2021. Abrir fonte
36	PERI 3D Construction. Apartment building in Wallenhausen, 2021. Abrir fonte
37	14Trees. World-first 3D printed school opens in Malawi. Abrir fonte
38	Mario Cucinella Architects. TECLA — Technology and Clay. Abrir fonte
39	WASP. TECLA — 3D printed habitat using local earth. Abrir fonte
40	Summum Engineering. Nijmegen 3D concrete printed bridge. Abrir fonte
41	IAAC. 3D printed bridge development — Alcobendas. Abrir fonte
42	LNEC. Apreciação de produtos e sistemas de construção — enquadramento dos Documentos de Homologação (DH) e das Avaliações Técnicas Europeias (ETA). Abrir fonte
43	Recuperar Portugal. Matosinhos inaugura primeiro edifício público impresso em 3D com apoio do PRR, 12 maio 2026. Abrir fonte
44	Universidade do Porto / FEUP. FEUP lidera acompanhamento científico do primeiro edifício público impresso em 3D, 10 maio 2026. Abrir fonte
45	Pinto Seppä, I., Alunni, A. and Piscaer, B., Advancing Construction Materials - Advanced and innovative materials as enablers of sustainability, circularity, resilience, and competitiveness in the EU construction sector, Lombardi, G. (editor), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2026, https://data.europa.eu/doi/10.2760/8142134 , JRC145969. Abrir fonte
46	ISO 14040:2006. <i>Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework</i> , incluindo a Emenda 1:2020; ISO 14044:2006. <i>Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines</i> , incluindo as Emendas 1:2017 e 2:2020
47	Ahmed, Z. Y. et al. A framework for large-scale structural applications of 3D printed concrete: the case of a 29 m bridge in the Netherlands. Open Conference Proceedings, 2022. Abrir fonte
48	Bhooshan, S. et al. The Striatu bridge: computational design and robotic fabrication of an unreinforced 3D-concrete-printed masonry arch bridge, 2022. Abrir fonte
49	RILEM TC 328-QPA. Quality and performance assurance of additively manufactured cementitious composites by advanced non-invasive techniques. Abrir fonte
50	Comissão Europeia. Voluntary CE marking — European Technical Assessment route. Abrir fonte

- | | |
|----|---|
| 51 | Izard, J.-B. et al. Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots. Construction Robotics, 2017. Abrir fonte |
| 52 | Jipa, A.; Dillenburger, B. 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2022. Abrir fonte |

Créditos e transparência

Créditos e transparência

Elementos visuais

As infografias, esquemas e figuras incluídos neste guia foram concebidos e preparados para o ConstróiTechTS, em 2026, pela equipa técnica do projeto, com apoio de ferramentas digitais, incluindo ferramentas de inteligência artificial, na composição visual e na organização gráfica da informação.

As representações visuais têm finalidade informativa e pedagógica. Simplificam processos, equipamentos, soluções técnicas e fluxos de decisão, pelo que não constituem desenhos de execução, projetos técnicos, especificações construtivas, pareceres de conformidade ou instruções de aplicação em obra.

Inteligência artificial

Ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas como apoio à estruturação editorial, revisão linguística, preparação de versões gráficas preliminares e composição de esquemas e figuras. Todos os conteúdos foram revistos, selecionados e ajustados pela equipa técnica responsável pelo guia, de acordo com os objetivos de capacitação do projeto.

Ficha Técnica

Designação do Projeto | ConstróiTechTS - Transformação Digital no Setor da Construção do Tâmega e Sousa

Nº do projeto | 25442

Promotores |

AEVM: Associação Empresarial de Vila Meã

UPT: Universidade Portucalense - Infante D. Henrique

Aviso | COMPETE2030-2025-4

Designação do aviso | SIAC – Digitalização

Tipologia de Ação | Transição Digital das Empresas

Objetivos | Aproveitar as vantagens da digitalização para os cidadãos, as empresas, os organismos de investigação e as autoridades públicas (FEDER)

Edição e conteúdos | Responsável | AEVM

Versão | n.º 1 – agosto/2026