

Optimisation and digital fabrication of concrete structures

Sébastien MAITENAZ, PhD thesis, 2022

CIFRE convention: 2018/1055

Supervisors

Jean-François CARON ^(a)

Director

Adélaïde FERAILLE ^(a)

Co-director

Romain MESNIL ^(a)

Supervisor

Nicolas METGE ^(b)

Corporate scientific advisor

(a) Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, Univ Gustave Eiffel, CNRS
6-8 av. Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne

(b) ISC, Vinci Construction France, direction déléguée des Travaux Publics d'Île-de-France
3 rue Ernest Flammarion, 94550 Chevilly-Larue

Keywords

reinforced concrete, optimisation, digital fabrication, 3D printing, automation, LCA



Abstract

Since the rise of modern reinforced concrete construction in the late 19th century, there has been little change in production methods. This thesis investigates the possibilities offered by the recent democratisation of digital manufacturing technologies. These technologies should allow creating new reinforced concrete construction standards, able to better meet challenges such as the environmental crisis, the drudgery of work on construction sites, or the lack of productivity.

First, we propose a model for optimised reinforced concrete beams that in accordance with Eurocode 2. Based on the strut optimisation method (SOM), it allows designing truss-like beams. The strut optimisation method is then applied to the design of typical building beams to study the potential concrete savings, and the concrete distribution in the beams. We then lead an analysis of the failure and stiffness behaviour of seven three-metre-long prototypes designed with the SOM. The results of four-point bending tests, instrumented by a motion capture system, show the compliance between the failure behaviour of the optimised beams and the theoretical model. Finally, we develop a manufacturing process to manage the geometric complexity of these truss-like elements. To this end, the whole value chain - from design to manufacture - is integrated in a digital process on the one hand. And, an additive manufacturing process is used to build custom moulds on the other hand. We illustrate the constructability of the optimised beams through the presentation of several prototypes saving 30% of concrete. We demonstrate the need to automate the assembly of the reinforcement cages, and we introduce novel reinforcement shapes to ease their assembly.

The second part of the thesis focuses on the comparison, from an environmental perspective, of two beam production systems: an off-site prefabrication process based on the manufacturing process developed in the thesis, and a conventional in-situ production process. As concrete mixes are critical parameters in the environmental models of each production system, it is necessary to select formulations that are suitable in terms of fresh and hardened properties, and that minimise production-related impacts. A common method to reduce these impacts is to partially replace Portland cement with industrial co-products. This leads us to provide a critical review of impact allocation methods. Then, we propose a multi-criteria method for the selection of concrete formulations. Finally, we compare the two production systems. On the one hand, we show the importance of the share of impacts related to the production of steel. On the other hand, we demonstrate the differentiating role played by the production and transport stages in the context of off-site prefabrication.

Résumé

Depuis l'essor de la construction en béton armé moderne, à la fin du XIX^{ème} siècle, les méthodes de production n'ont que très peu évolué. Cette thèse explore les possibilités offertes par la récente démocratisation des technologies de fabrication numérique. Ces dernières doivent permettre de proposer de nouveaux standards de construction en béton armé à même de mieux répondre aux enjeux, environnementaux d'une part, mais également de réduction de la pénibilité du travail sur chantier et de productivité d'autre part.

Nous commençons par proposer un modèle de poutres en béton armé optimisées conforme à l'Eurocode 2. Basé sur la méthode d'optimisation des bielles de béton (*strut optimisation method* en anglais), il permet de concevoir des poutres de type treillis. La méthode d'optimisation des bielles est ensuite appliquée pour concevoir des poutres de bâtiment et étudier les économies de béton, et la distribution du béton au sein de ces poutres. Nous conduisons ensuite une analyse du comportement à la rupture et en raideur de sept prototypes de trois mètres de portée, conçus avec la méthode d'optimisation des bielles. Les résultats d'essais de flexion quatre points, instrumentés par un système de *motion capture*, montrent l'adéquation entre le comportement à la rupture des poutres optimisées et le modèle théorique. Enfin, nous développons un procédé de fabrication permettant de gérer la complexité géométrique de tels éléments, grâce à l'intégration complète de la chaîne de valeur — de la conception à la fabrication — dans un processus numérique d'une part, et à la fabrication additive de coffrages sur mesure d'autre part. Nous illustrons la constructibilité des poutres optimisées au travers de la présentation de plusieurs prototypes économisant 30% de béton. Nous démontrons la nécessité d'automatiser également la fabrication des cages d'armatures, et introduisons des formes d'armatures permettant de mieux appréhender leur assemblage.

La suite de la thèse se concentre sur la comparaison, du point de vue des impacts environnementaux, du procédé de fabrication développé — pensé dans un contexte de préfabrication en usine — avec une technique conventionnelle de préfabrication forraine. La formulation du béton étant un paramètre critique des modèles environnementaux de chacun des systèmes de production, il convient de sélectionner des formulations adaptées en termes de propriétés aux états frais et durcis, et minimisant les impacts liés à la production. Une méthode couramment utilisée pour réduire ces impacts consiste à remplacer une partie du ciment Portland par certains coproduits industriels. Cela nous amène à livrer une revue critique des méthodes d'allocation d'impacts entre coproduits, suite à quoi nous proposons une méthode multicritère pour la sélection de formulations de béton. Enfin, nous menons la comparaison des deux procédés. Nous montrons d'une part l'importance de la part des impacts liés à la production de l'acier. D'autre part, nous démontrons le rôle différenciant joué par les étapes de production et de transport dans le cadre de la préfabrication.