

Conception générale optimale de structures

Technologie innovatrice avec traitement par batch discret paramétrique dans SCIA • ESA PT 2007

Lubomir Sabatka, Martin Novak, Emiel Peltenburg, J.P. Rammant
SCIA International – www.scia-online.com

Contenu

Introduction
Optimisation de systèmes
Conception optimale de structures
Optimisation dans SCIA • ESA PT
Exemples pratiques d'optimisation
Recherche approfondie
Avantages pour les ingénieurs architectes
Références

Introduction

La plupart des logiciels IAO vous promettent qu'ils vous aideront à optimiser la conception de vos structures. Est-ce qu'ils tiennent leur parole en réalité?

Généralement, quand on parle de l'optimisation de structures, il s'agit en fait de l'optimisation de quelques composants sélectionnés de la structure. Un concepteur cherche par exemple les dimensions minimales appropriées pour que sa section réponde aux exigences de la norme de conception, il ou elle essaye de trouver le nombre minimal de boulons à utiliser pour un assemblage métallique spécifique, il ou elle cherche la zone d'armature minimalement requise dans une poutre en béton etc. Bien que tous les éléments structurels soient conçus aussi optimaux que possible, il n'en résulte pas automatiquement que l'ensemble de la structure est optimal, par exemple quand on la considère du point de vue des frais de matériel, du temps de construction nécessaire, des frais de main-d'œuvre, etc.

On ne trouve la conception optimale d'une structure qu'après avoir soigneusement essayé et comparé de nombreuses variantes. Tout le monde le sait, mais combien de fois cette procédure est effectivement appliquée dans le monde de construction ? Le concepteur est toujours talonné par le client et généralement, il n'a pas le temps d'élaborer des variantes.

Un exemple typique est une poutre en béton armé. Les dimensions de la section sont sélectionnées, les efforts internes calculés et ensuite l'armature est conçue – de manière optimale, évidemment. Mais qui est-ce qu'y pense de varier un peu la hauteur et la largeur de la poutre, pour obtenir ainsi un prix optimal pour l'ensemble de la poutre, qui se compose du prix du béton et de l'acier?

Les logiciels existants offrent pourtant les possibilités et les moyens; ce n'est plus qu'une question d'essayer et de comparer un nombre de variantes pour trouver la plus appropriée. Cette procédure serait peut-être réaliste pour les projets plus petits, mais elle ne convient pas pour les projets étendus et complexes.

Optimalisation de systèmes

L'optimalisation est principalement recherchée dans le secteur 'automotive' et l'industrie spatiale, où l'on se concentre essentiellement sur le calcul de la dynamique des fluides et l'optimalisation structurelle, surtout de la forme.

Il y a de nombreuses méthodes mathématiques répondant parfaitement aux exigences de l'industrie de construction. Le système est généralement décrit au moyen d'un nombre de paramètres. Ensuite, il faut déterminer le but de l'optimalisation – quel est l'objectif, qu'est-ce qu'il faut minimaliser ou maximaliser ? S'y ajoute la condition supplémentaire qu'il faut pouvoir calculer le but avec n'importe quel ensemble de paramètres. Ainsi, la "fonction cible" ou la "fonction prix" est définie.

Après la définition d'un ensemble de paramètres et de la fonction cible, on peut utiliser les méthodes mathématiques courantes pour l'optimalisation, pour optimaliser par exemple le poids d'une navette spatiale ou la circulation routière.

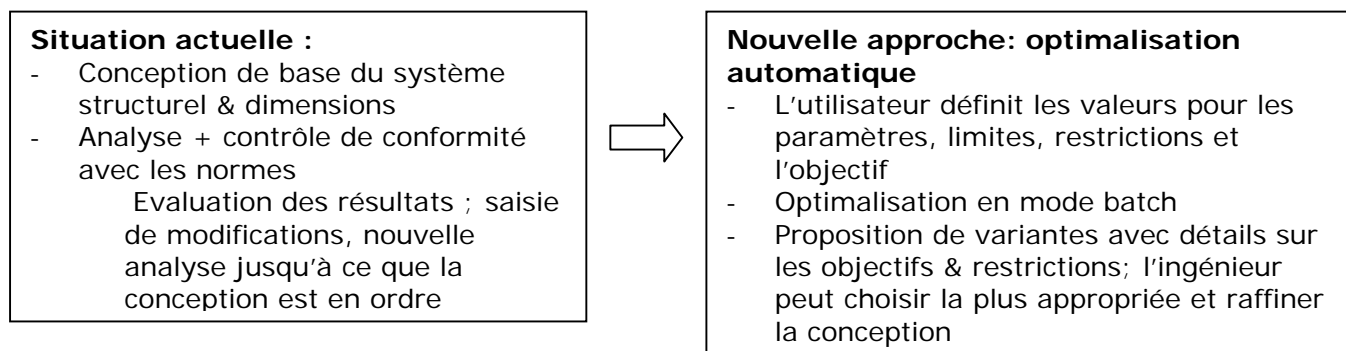
Conception optimale de structures

Si des logiciels puissants et des méthodes mathématiques claires sont disponibles pour la conception d'éléments structurels et l'optimalisation de systèmes, pourquoi l'optimalisation de structures n'est donc pas une chose courante?

Les logiciels IAO actuels possèdent insuffisamment d'outils pour permettre une optimalisation structurelle appropriée. Ils devraient intégrer un nombre de fonctions indispensables. Un sommaire:

1. Fonctions pour la conception optimale d'éléments structurels spécifiques, tels que des poutres en acier et en béton, des assemblages métalliques, des blocs de fondation, etc.
Généralement, on cherche les dimensions, mesures ou quantités minimales. L'élément doit en outre répondre aux critères du code relevant.
2. Le programme doit intégrer une fonctionnalité permettant le paramétrage de la structure. Le concepteur doit définir les éléments fixes et variables de la structure – travées, hauteurs, dimensions de sections, épaisseur de plaques et murs, charges... Il faut pouvoir décrire chaque élément susceptible de varier, au moyen d'un paramètre indépendant.
3. Il faut pouvoir définir la fonction cible, c'est-à-dire le poids de l'acier requis, le volume de béton, le poids de l'armature, mais également le déplacement maximal et ainsi de suite.
4. Le logiciel doit pouvoir évaluer la fonction cible pour un ensemble de paramètres spécifique. Le logiciel doit donc intégrer une fonction qui peut lire les ensembles de paramètres et générer une valeur cible.
5. Le programme doit également intégrer ou offrir un résolveur d'optimalisation, c'est-à-dire un outil générant les différents ensembles de paramètres, calculant la fonction cible et proposant finalement l'ensemble de paramètres optimal.

Si un système IAO possède ces fonctions, le terrain est préparé pour l'optimalisation. Nous présentons une technologie innovatrice, offrant une méthodologie de conception améliorée en plus d'un programme IAO général, ce qui permet une modification graduelle.



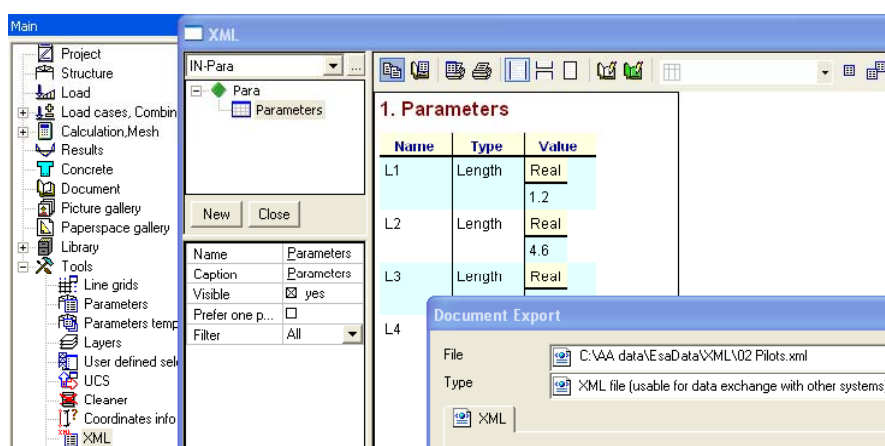
Optimalisation dans SCIA • ESA PT

SCIA • ESA PT 2007 intègre toutes les fonctions exigées décrites ci-dessus.

Les poutres en acier et en béton peuvent être conçues de manière optimale. L'optimisation de sections métalliques est une chose consacrée depuis des années ; la conception optimale de l'armature n'a été introduite que récemment. On peut également optimiser différents assemblages métalliques et concevoir l'armature minimalement requise dans les plaques et les murs. SCIA • ESA PT permet de définir toutes les optimisations d'élément nécessaires, il les mémorise et les répète après chaque modification des données de saisie de la structure.

Le paramétrage de la structure est une option de modelage de base dans SCIA • ESA PT. A peu près chaque entité, chaque élément du projet conçu peut être défini au moyen d'un paramètre défini par l'utilisateur. Les paramètres sont attribués à des variables, des dimensions des éléments structurels et sections, charges et masses par le temps nécessaire à couler le béton jusqu'au diamètre ou à la couverture des barres d'armature.

SCIA • ESA PT possède également une interface de texte XML générale, qui permet la modification "de l'extérieur" des données de la structure ainsi que la lecture de chaque valeur nécessaire au projet. L'utilisateur définit les valeurs de conception à intégrer dans le document XML. Tous les documents de sortie ESA sont des documents 'vivants', qui peuvent être mis à jour et actualisés après la modification et le recalcul du projet. Le document XML joue le rôle de fonction cible sans aucune restriction. L'exemple pratique ci-après montre la définition du fichier XML.



SCIA • ESA PT peut également travailler en mode "caché". Le projet peut être modifié, le processus de calcul peut être démarré, tous les documents définis peuvent être actualisés et mis à jour et toutes les valeurs du document peuvent être importées, tout ceci à partir d'un programme autre que SCIA • ESA PT. A cet effet, une application supplémentaire, ESA_XML.exe, permettant d'établir une liaison avec l'application informatique extérieure, est prévue.

Le résolveur d'optimisation le plus simple est celui générant tous les ensembles de paramètres de saisie possibles et calculant une fonction cible pour chaque ensemble. Ainsi, la valeur cible minimale (ou maximale) est trouvée avec l'ensemble de paramètres de saisie optimal. Cette méthode est simple et fiable. Si l'on calcule toutes les variantes possibles, on finit par trouver la plus appropriée. Le seul problème pour les systèmes à nombreux paramètres est une augmentation considérable du nombre de variantes.

Ce type de "batch optimiser" est maintenant disponible dans SCIA • ESA PT. L'utilisateur ne doit définir que les limites et l'étape de variation pour ses paramètres. Toutes les variantes sont calculées et les diagrammes des résultats sont générés dans Excel.

La dernière fonctionnalité pour l'optimisation est le résolveur d'optimisation proprement dit. Ce résolveur se sert de la même saisie que le "batch optimiser" – y compris les limites et étapes pour les paramètres. Il ne calcule cependant pas toutes les variantes, il "propose" seulement quelques-unes ; l'ensemble de paramètres optimal est alors dérivé des résultats de la fonction

cible. La magie de la qualité de ce résolveur est son excellente "capacité de proposition". Au mieux le résolveur, au moins de variantes qu'il doit calculer.

Pour ce projet, SCIA a mis sur pied une collaboration avec le département 'Génie Civil' de l'université de Prague. Dans la situation actuelle, le résolveur d'optimisation de l'université est relié à SCIA • ESA PT. Le résolveur utilise un algorithme stochastique de "Annealing simulé" à partir d'algorithmes génétiques généraux. Ainsi, une optimisation multi-paramètres devient possible, ce qui permet de vérifier une quantité supérieure de valeurs résultantes. Cette méthode garantit de trouver plus de solutions "optimales", car elle cherche des extrêmes locaux qui sont utiles du point de vue de la conception.

Exemples pratiques d'optimisation

Il y a 4 différents types d'optimisation structurelle:

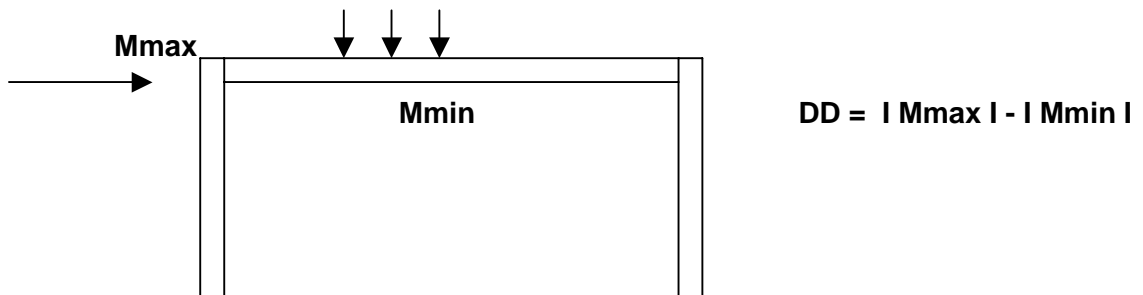
- Optimisation de la **topologie**, c'est-à-dire trouver une structure sans connaître sa forme finale. Ceci implique que des éléments ou des composants du treillis FEM sont ajoutés/enlevés pendant le calcul des solutions des variantes.
- Optimisation de la **forme**: la topologie de la structure est connue dès le début, mais elle comprend certains éléments, où, par exemple, des contraintes élevées peuvent causer des problèmes. Les paramètres de la forme sont donc optimisés pour minimaliser les contraintes.
- Optimisation des **dimensions**: une structure est définie par un ensemble de dimensions, mesures ou sections, qui sont combinés pour répondre aux critères optimaux désirés.
- Optimisation de la **topographie**, c'est-à-dire trouver une forme appropriée pour une structure (p.ex. tente, membrane, pont).

La conception pratique de tous les jours compte de nombreux exemples manifestes d'optimisation structurelle :

Chercher le rapport optimal entre les rigidités de poutres et poteaux
Trouver l'épaisseur optimale pour des plaques en béton
Déterminer les dimensions optimales pour des poutres en béton
Trouver la forme optimale pour un tendon resserré
Optimisation de la position des piliers de fondation
Analyse de sensibilité des paramètres du sous-sol
Concevoir l'assemblage métallique le plus économique
Minimaliser le poids d'une structure en acier pour un type de portique prédéfini
Chercher la définition optimale pour des travées de pont
Trouver la charge maximale admissible pour une grue dans différentes positions géométriques

Nous donnons quelques exemples concis pour illustrer le traitement par batch paramétrique discret dans SCIA • ESA PT:

A. Trouver dans un portique une poutre et un poteau de telles dimensions que le moment de fléchissement soit identique à l'extrémité et au milieu de la poutre.

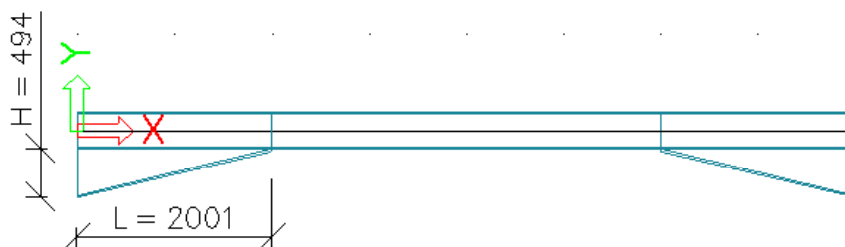


Le processus batch résulte dans le tableau de sortie suivant :

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	k
Hbeam [m]	Hcol [mm]	Max [kNm]	Min [kNm]	DD [kNm]						
380	280	136,03	-107,013	29,017						
380	290	132,287	-110,584	21,702						
380	300	128,773	-113,919	14,855						
380	310	125,483	-117,023	8,461						
380	320	122,407	-119,906	2,502						
380	330	119,54	-122,575	3,035						
380	340	116,868	-125,043	8,175						
380	350	114,378	-127,323	12,945						
380	360	112,064	-129,423	17,358						

B. Optimaliser la longueur et la profondeur d'une voûte

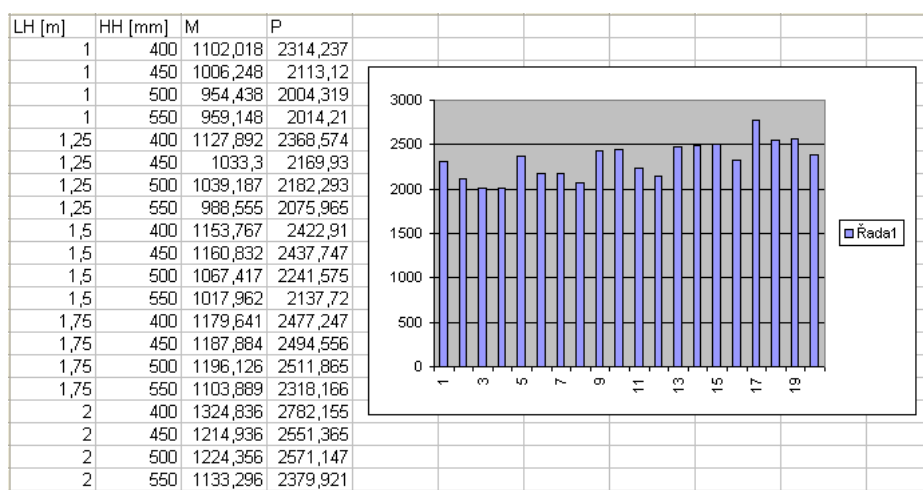
Prenons une poutre à voûtes; la poutre est un profilé HEA, la voûte un profilé IPE. Les dimensions de la voûte sont paramétrées; le profilé de la poutre principale a été optimisé au moyen d'une optimisation d'élément SCIA • ESA PT courante.



Dans chaque étape, la voûte est modifiée, la structure calculée et la poutre optimisée. Le poids total est rapporté ; le prix du matériel pour la poutre et la voûte est calculé à partir du prix assumé pour un kilo d'acier (par exemple 2,1 euro).

Le tableau ci-après indique les valeurs du poids de la poutre (M) et du prix (P) pour la L (L voûte), H (hauteur voûte) calculée.

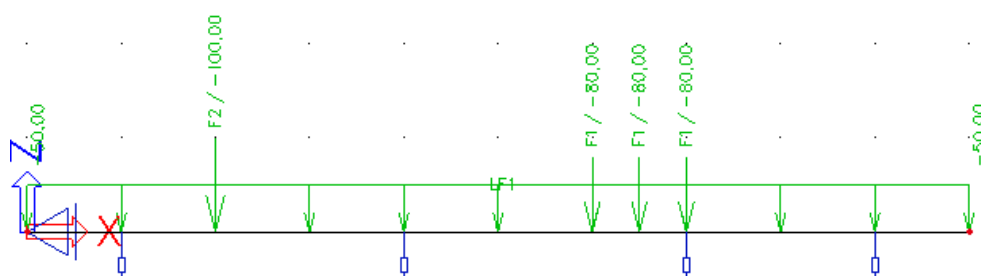
Pour chaque longueur de voûte, la hauteur optimale est calculée, ce qui signifie que le programme trouve plusieurs valeurs minimales locales.



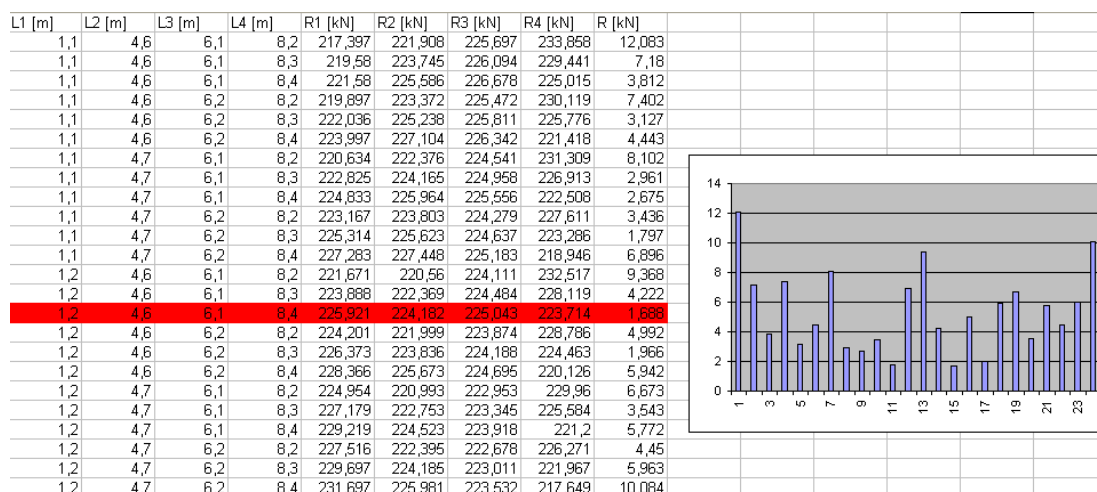
Vous remarquerez que toutes les variantes répondent aux exigences de la norme, mais que le prix varie considérablement.

C. Optimisation de la position de piliers

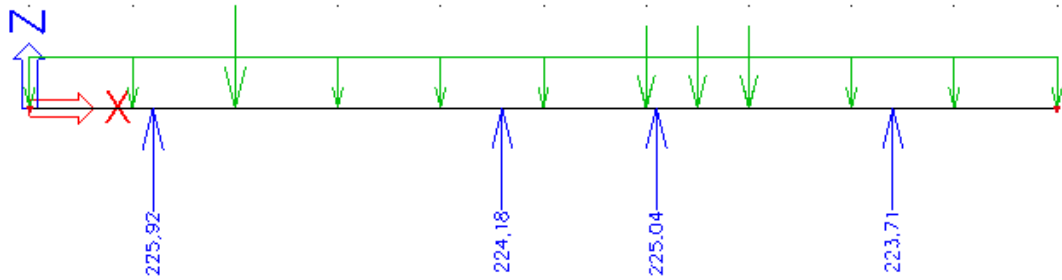
L'utilisateur doit concevoir une poutre de fondation appuyée par des piliers. Dans une situation idéale, la force de réaction est identique dans tous les piliers.



L'utilisateur peut définir les limites pour le déplacement des supports, chaque variante est calculée et les réactions sont évaluées. La fonction cible peut être une formule simple, calculant la somme des carrés des déviations d'une valeur de réaction moyenne.



Si nous minimalisons cette fonction, tous les piliers sont chargés avec la même force.



Recherche approfondie

Le Département 'Génie Civil' de l'université de Prague a un programme de recherche étendu au sujet de l'optimisation. La recherche se concentre sur des algorithmes qui conviennent pour des problèmes de construction pratiques avec des fonctions de saisie discrètes typiques (par exemple un ensemble de matériaux disponibles, profilés laminés ou tubes en acier), en liaison avec une dépendance compliquée de la fonction cible finale de ces variables. Puisqu'une structure doit en outre répondre à différents critères, il faut également pouvoir traiter des problèmes ainsi que des restrictions à plusieurs critères, qui sont généralement difficiles à décrire dans une forme mathématique close. Différents algorithmes d'optimisation ont déjà été développés, mais l'optimisation de structures 'real-life' exige toujours un temps de calcul assez long. Les méthodes offrant une percée à ce niveau sont basées sur des approches numériques minimisant le nombre de calculs – les dites méthodes "response surface". L'intelligence artificielle se sert généralement de méthodes telles que les réseaux neuraux, p.ex. le "réseau radial de fonctions de base".

Les méthodes d'optimisation présentées ici offrent, entre autres, l'avantage qu'elles cherchent les extrêmes locaux d'une fonction cible au lieu des extrêmes globaux, ce qui fait qu'un nombre supérieur d'extrêmes locaux est trouvé. Chacun de ces extrêmes a une certaine signification et il est du devoir du concepteur d'évaluer ces variantes du point de vue pratique, des aspects constructifs, etc.

Une autre approche pour réduire le temps de calcul est la méthode du calcul parallèle ou distribué. La plupart des utilisateurs des logiciels SCIA possèdent un réseau informatique comprenant plusieurs ordinateurs, qui sont utilisés moins de 24 heures par jour. Ils sont souvent coupés le jour et en tout cas la nuit. Surtout la nuit, ils n'exécutent pas des tâches de calcul. Des algorithmes qui sont capables d'utiliser cette capacité libre, sont donc un outil très intéressant. Le scénario est comme suit : le concepteur – qui se trouve dans une certaine phase de conception de la structure – définit les plages, les restrictions, les exigences, etc. L'algorithme d'optimisation est démarré la nuit et le lendemain, lorsque le concepteur rentre au bureau, il peut choisir une ou plusieurs variantes qui ont été calculées comme des solutions optimales pour la structure conçue.

Avantages pour les ingénieurs architectes

La conception optimale de structures modifiera le processus de conception de manière considérable; un "rêve utopique" devient réalité. Puisque les méthodes mathématiques sont développées en permanence et la vitesse des ordinateurs augmente sans cesse, l'optimisation augmente considérablement la qualité du processus de conception pratique.

Référence

Matej Leps, Optimisation d'objets simples et complexes dans le Génie Civil avec Applications, Thèse de PhD, Université Technique de Prague, 2004