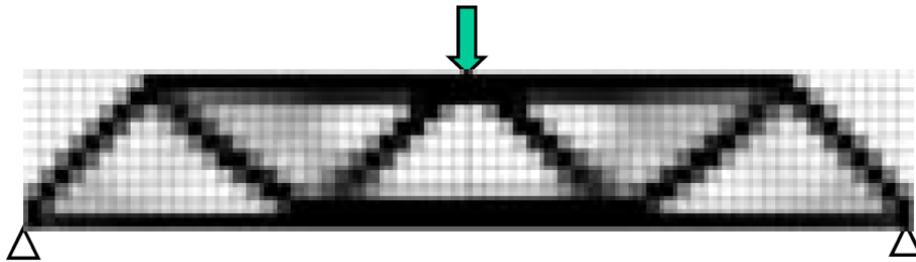


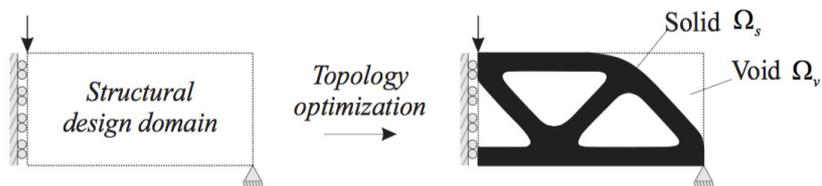
Método SIMP



Emilio Silva e Renato Picelli

Otimização Estrutural Topológica

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & f(\mathbf{x}) \\ \text{subject to} & g_j(\mathbf{x}) \leq \bar{g}_j \\ & x_i(\mathbf{x}) = (0, 1) \end{array} \quad x_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{for } \Omega_s \\ 0 & \text{for } \Omega_v \end{cases}$$



Exemplo: estrutura o mais rígida possível sob um certo volume prescrito.

Emilio Silva e Renato Picelli

Relaxação do Problema de Otimização ³

Como variar o material de zero a um?

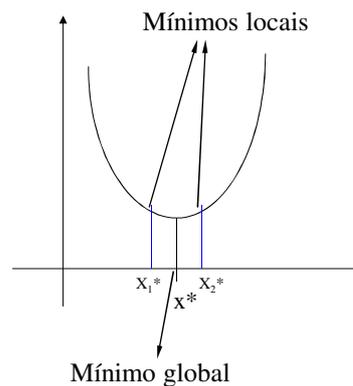


0



1

O problema de otimização topológica considerando valores discretos (zero ou um) é mal-posto, ou seja, NÃO apresenta solução. Essencialmente, o que acontece é que a utilização de valores discretos origina múltiplos mínimos locais causando instabilidades numéricas. Isso também origina uma dependência da solução em relação a discretização do problema.



Emilio Silva e Renato Picelli

Relaxação do Problema de Otimização ⁴

Assim é necessário permitir que o material assumira valores intermediários durante a otimização ➡ lei de mistura ou modelo de material.

A formulação do modelo de material para materiais intermediários define o grau de relaxação do problema.

Problema
Discreto

Modelo de
Material

Problema
Contínuo

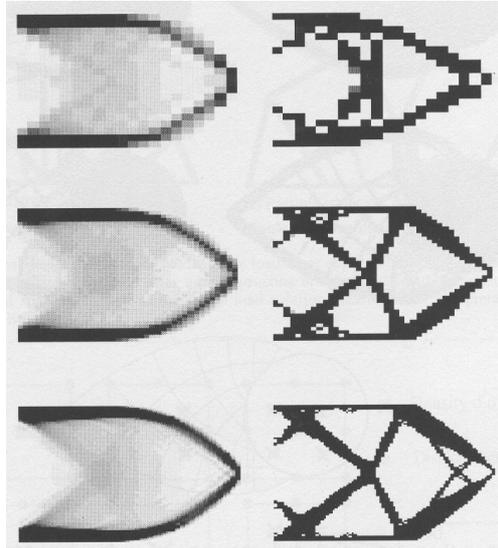
Solução terá
valores
intermediários
de material

No entanto desejamos uma solução discreta que possa ser fabricada ➡ penalização dos valores intermediários.

Emilio Silva e Renato Picelli

Relaxação do Problema de Otimização ⁵

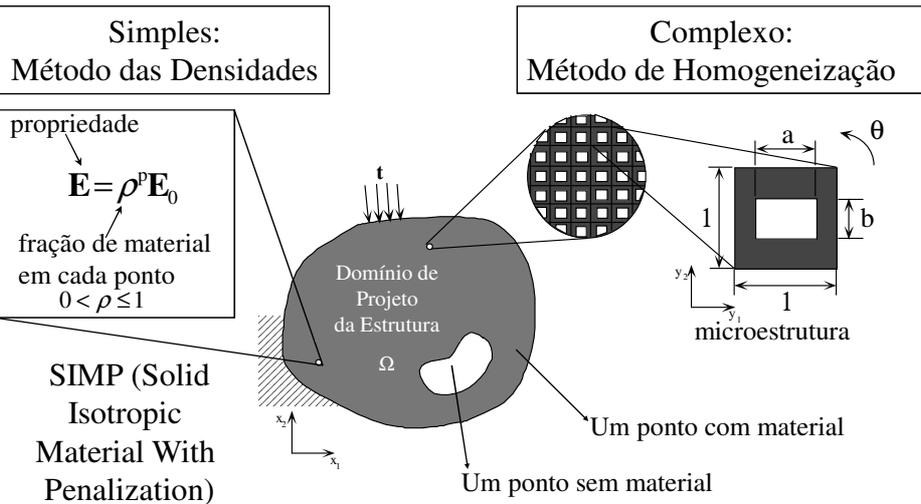
Problema Relaxado Problema Discreto



Emilio Silva e Renato Picelli

Exemplos de Modelos de Material ⁶

Modelos de material mais usados atualmente

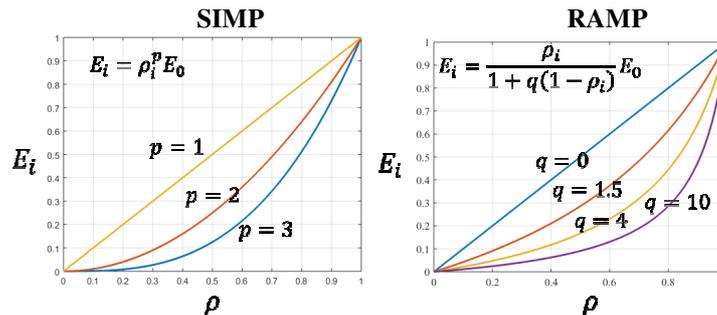


Emilio Silva e Renato Picelli

Relaxação do Problema de Otimização 7

Exemplo de modelo de material com penalização:
 SIMP (“Solid Isotropic Material With Penalization”)
 RAMP (“Rational Approximation of Material Properties”)

ρ – coeficiente de penalização

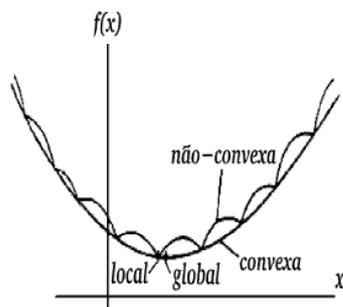


No entanto, ao penalizar os valores intermediários podemos retornar ao problema discreto \Rightarrow dependência da discretização (malha)

Emilio Silva e Renato Picelli

Relaxação do Problema de Otimização 8

O problema anterior é por natureza convexo com um mínimo global, caso não se penalize as variáveis de projeto ρ_i . Com a utilização do SIMP a convexidade é destruída e vários mínimos locais aparecem.



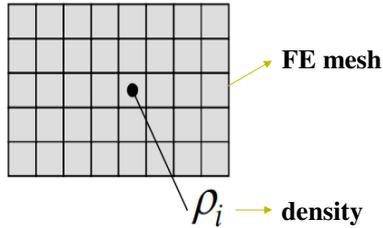
Uma forma de evitar o mínimos locais é usar o “método da continuação”. Nesse caso a penalização é feita de forma gradual ($p=1; 1,5; 1,5; 2; 2,5; 3$)

Emilio Silva e Renato Picelli

Density-based methods

- **The Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) method**

- Assign **density variables** to every element



- Young's modulus depends on density

$$E_i = \rho_i^p E_0$$

E : Young's modulus

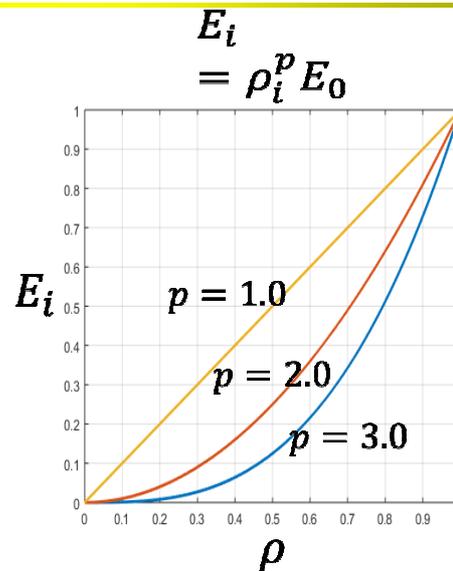
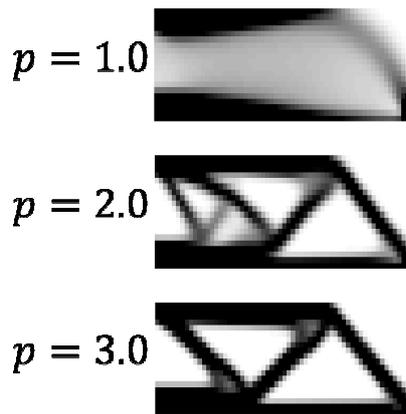
p : Penalty

- Penalizes intermediate densities to make them unattractive
- Final goal is to obtain a $\{0,1\}$, black and white



Emilio Silva e Renato Picelli

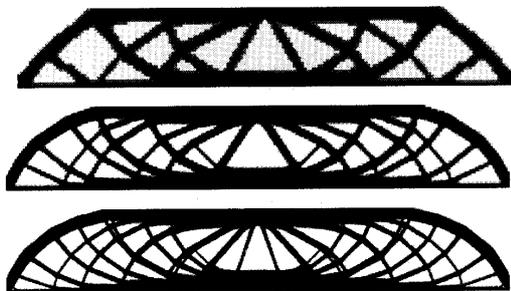
SIMP method



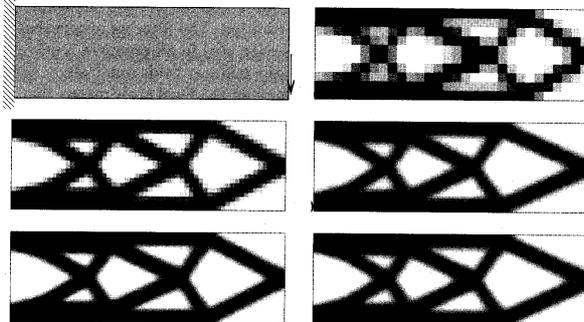
Emilio Silva e Renato Picelli

Dependência da Discretização da Malha

11



Solução dependente da discretização



Solução independente da discretização (usando filtros)

Emilio Silva e Renato Picelli

Dependência da malha



60 x 20



120 x 40



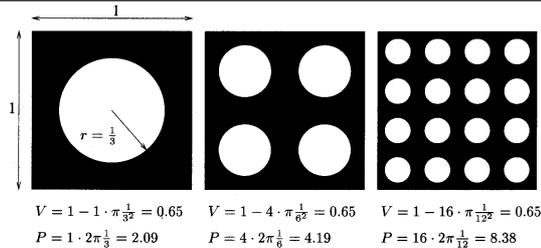
240 x 80

Emilio Silva e Renato Picelli

Dependência da Discretização da Malha

13

Dessa forma, o problema de dependência da discretização da malha é difícil de resolver. Uma solução proposta foi a inclusão de uma restrição de perímetro dos “buracos” (Haber 1989).



Perímetro total dos furos aumenta

Quantidade de material intermediário (microfuros) aumenta

Isso resolveu o problema mal-posto do MOT, mas é muito difícil de implementar. Outra solução é a utilização de técnicas de filtragem.

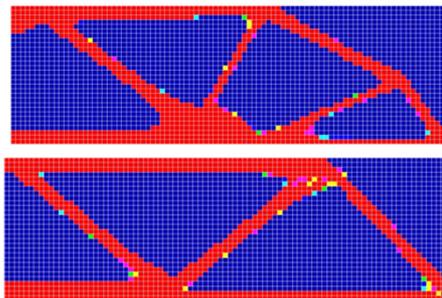
Emilio Silva e Renato Picelli

Dependência da Discretização da Malha

14

Restrição de perímetro

$$\int_{\Omega} \|\nabla \rho\| dx \leq P \quad \text{onde: } P = \sum_{k=1}^K l_k \left(\sqrt{\langle \rho \rangle_k^2 + \varepsilon^2} - \varepsilon \right)$$



Controle dos furos

No entanto, o SIMP sem penalização com restrição de perímetro é de difícil implementação, não sendo usado em geral.

Emilio Silva e Renato Picelli

Dependência da Discretização da Malha

15

Técnicas de filtragem alternativas

- Restrição de gradientes:

$$\left| \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right| \leq G \quad (i = 1, 2, 3) \quad (\text{local}) \quad \int_{\Omega} (\rho^2 + \|\nabla \rho\|^2) d\Omega \leq M \quad (\text{global})$$

- Restrição por limites móveis: $\rho_i^{K+1} \geq \max\{\rho_{\min}, \rho_j^K - d_{i,j}G\}$

- Filtragem de sensibilidade:

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho \sum_{i=1}^N \hat{H}_i} \sum_{i=1}^N \hat{H}_i \rho_i \frac{\partial f}{\partial \rho_i} \quad \text{e} \quad \hat{H}_i = r_{\min} - \text{dist}(k, i)$$

Emilio Silva e Renato Picelli

Compliance minimization

(Minimização de Flexibilidade)

- **Stiff structure = structure with minimal compliance**
 - **Linear elasticity: $\mathbf{Ku} = \mathbf{f}$**
 - **Compliance: $C = \mathbf{f}^T \mathbf{u} = \mathbf{u}^T \mathbf{Ku}$**
- **Optimization problem:**

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{f}^T \mathbf{u} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{Ku} = \mathbf{f} \\ & m_{\text{total}} \leq m_{\text{allowed}} \\ & \text{Structural mass} \end{aligned}$$

Emilio Silva e Renato Picelli

Compliance sensitivity

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\rho_i} \{ \mathbf{f}^T \mathbf{u} \} &= \frac{d}{d\rho_i} \{ \mathbf{f}^T \mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{f}) \} \\ &= \mathbf{f}^T \frac{d\mathbf{u}}{d\rho_i} + \boldsymbol{\lambda}^T \left(\frac{d\mathbf{K}}{d\rho_i} \mathbf{u} + \mathbf{K} \frac{d\mathbf{u}}{d\rho_i} \right) \\ &= (\mathbf{f}^T + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{K}) \frac{d\mathbf{u}}{d\rho_i} + \boldsymbol{\lambda}^T \frac{d\mathbf{K}}{d\rho_i} \mathbf{u} \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}^T + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{K} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{K}^T \boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{f} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{u}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{d\mathbf{f}^T \mathbf{u}}{d\rho_i} = -\mathbf{u}^T \frac{d\mathbf{K}}{d\rho_i} \mathbf{u} = \boxed{-\mathbf{u}_{(i)}^T \frac{d\mathbf{k}_{(i)}}{d\rho_i} \mathbf{u}_{(i)}}$$

Emilio Silva e Renato Picelli

SIMP compliance sensitivities

- **General compliance sensitivity:**

$$\frac{dC}{d\rho_i} = -\mathbf{u}_{(i)}^T \frac{d\mathbf{k}_{(i)}}{d\rho_i} \mathbf{u}_{(i)}$$

- **In SIMP:** $E_{(i)} = \rho_i^p E_0$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{k}_{(i)} = \rho_i^p \mathbf{k}_0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\mathbf{k}_{(i)}}{d\rho_i} = \frac{d\rho_i^p}{d\rho_i} \mathbf{k}_0 = p\rho_i^{p-1} \mathbf{k}_0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{dC}{d\rho_i} = -p\rho_i^{p-1} \mathbf{u}_{(i)}^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_{(i)} = -\frac{p}{\rho_i} \mathbf{u}_{(i)}^T \mathbf{k}_{(i)} \mathbf{u}_{(i)}$$

Emilio Silva e Renato Picelli

MOT Formulation for Compliance

19

Min $\mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}$

ρ_i
tal que $\sum_{i=1}^N \rho_i V_i \leq V_0$

$0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1$

Solução: Considere o Lagrangeano do problema

$$L = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} + \Lambda \left(\sum_{i=1}^N \rho_i V_i - V_0 \right) + \sum_{i=1}^N \lambda_i^+ (\rho_i - 1) V_i + \sum_{i=1}^N \lambda_i^- (\rho_{\min} - \rho_i) V_i \Rightarrow$$

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_i} = \frac{\partial (\mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U})}{\partial \rho_i} + (\Lambda + \lambda_i^+ - \lambda_i^-) V_i = 0 \Rightarrow \mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} \mathbf{U} = (\Lambda + \lambda_i^+ - \lambda_i^-) V_i$$

e $\lambda_i^- \geq 0; \lambda_i^+ \geq 0, \lambda_i^- (\rho_{\min} - \rho_i) = 0, \lambda_i^+ (\rho_i - 1) = 0$

Para $\rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \Rightarrow \lambda_i^+ = \lambda_i^- = 0$

Emilio Silva e Renato Picelli

Exemplo de Formulação do MOT

20

Além disso: $\mathbf{E} = \rho_i^p \mathbf{E}_0 \Rightarrow \mathbf{K} = \rho_i^p \mathbf{K}_{0e} \Rightarrow \mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} \mathbf{U} = p \rho_i^{p-1} \mathbf{U}^T \mathbf{K}_{0e} \mathbf{U} = \Lambda V_i$

Nesse problema específico, podemos definir um algoritmo empírico de atualização de variáveis, denominado “critério de optimalidade” para a solução do problema:

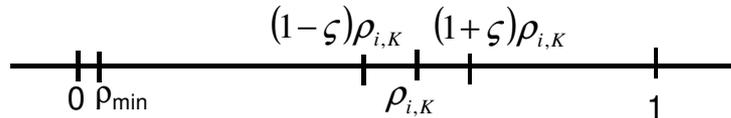
$$\rho_{i,K+1} = \begin{cases} \max \{ (1-\zeta) \rho_{i,K}, \rho_{\min} \} & \text{se } \rho_{i,K} B_K^\eta \leq \max \{ (1-\zeta) \rho_{i,K}, \rho_{\min} \} \\ \min \{ (1+\zeta) \rho_{i,K}, 1 \} & \text{se } \max \{ (1+\zeta) \rho_{i,K}, 1 \} \leq \rho_{i,K} B_K^\eta \\ \rho_{i,K} B_K^\eta & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde: $B_K = \frac{p \rho_i^{p-1} \mathbf{U}^T \mathbf{K}_{0e} \mathbf{U}}{\Lambda_K V_i}$, Além disso: $\sum_{i=1}^N \rho_i V_i = V_0 \Rightarrow \Lambda_K \Rightarrow \rho_{i,K}$

Trata-se de um algoritmo rápido porém específico para o problema em questão

Emilio Silva e Renato Picelli

Critério de Optimalidade



$$B_K = \frac{p\rho_i^{p-1} \mathbf{U}^T \mathbf{K}_{0e} \mathbf{U}}{\Lambda_K V_i} \quad \sum_{i=1}^N \rho_i V_i = V_0 \Rightarrow \Lambda_K \Rightarrow \rho_{i,K}$$

$$\rho_{i,K+1} = \begin{cases} \max \{ (1-\zeta)\rho_{i,K}, \rho_{\min} \} & \text{se } \rho_{i,K} B_K^\eta \leq \max \{ (1-\zeta)\rho_{i,K}, \rho_{\min} \} \\ \min \{ (1+\zeta)\rho_{i,K}, 1 \} & \text{se } \max \{ (1+\zeta)\rho_{i,K}, 1 \} \leq \rho_{i,K} B_K^\eta \\ \rho_{i,K} B_K^\eta & \text{caso contrário} \end{cases}$$

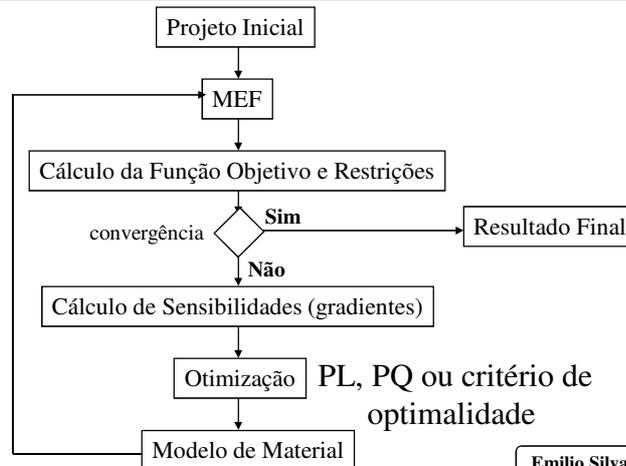
Emilio Silva e Renato Picelli

Implementação Numérica

22

A OT combina:

- Método de Elementos Finitos (MEF);
- Algoritmos de Otimização (em geral baseados em programação Sequencial – PLS, PQS -, ou critério de optimalidade);



Emilio Silva e Renato Picelli

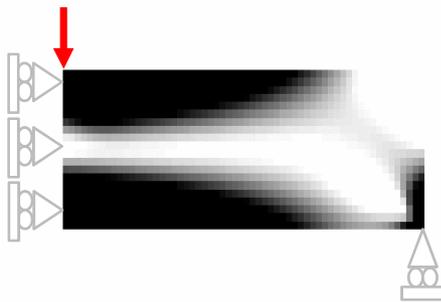
Implementação Numérica

Educational article

Struct Multidisc Optim 21, 120–127 © Springer-Verlag 2001

A 99 line topology optimization code written in Matlab

O. Sigmund



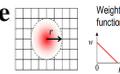
1. Define material and optimization parameters;
2. Define design domain and generate FE mesh;
3. Perform FE analysis;

$$E_i = \rho_i^p E_0 \quad \mathbf{Ku} = \mathbf{f}$$

4. Compute compliance sensitivities;

$$\frac{dC}{d\rho_i} = -p\rho_i^{p-1} \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i$$

5. Filter se



6. Apply Optimality Criteria (OC solver);

7. Update densities;

8. Converged?

Emilio Silva e Renato Picelli

Implementação Numérica

24

99 linhas de
MOT em Matlab
(Ole Sigmund,
2000)

```

%%% A 99 LINE TOPOLOGY OPTIMIZATION CODE BY OLE SIGMUND, JANUARY 2000 %%%
function top(nelx,nely,volfrac,penal,rmin);
% INITIALIZE
x(1:nely,1:nelx) = volfrac;
loop = 0;
change = 1.;
% START ITERATION
while change > 0.01
    loop = loop + 1;
    xold = x;
% FE-ANALYSIS
[U]=FE(nelx,nely,x,penal);
% OBJECTIVE FUNCTION AND SENSITIVITY ANALYSIS
[KE] = lk;
c = 0.;
for eiy = 1:nely
    for elix = 1:nelx
        n1 = (nely+1)*(elix-1)+eiy;
        n2 = (nely+1)* elix +eiy;
        Ue = U([2*n1-1,2*n1; 2*n2-1,2*n2; 2*n2+1,2*n2+2; 2*n1+1,2*n1+2],1);
        c = c + x(elix,elix)^penal*Ue'*KE*Ue;
        dc(elix,elix) = -penal*x(elix,elix)^(penal-1)*Ue'*KE*Ue;
    end
end
% FILTERING OF SENSITIVITIES
[dc] = check(nelx,nely,rmin,x,dc);
% DESIGN UPDATE BY THE OPTIMALITY CRITERIA METHOD
[x] = OC(nelx,nely,x,volfrac,dc);
% PRINT RESULTS
change = max(max(abs(x-xold)));
disp([' It.: ' sprintf('%4i',loop) ' Obj.: ' sprintf('%10.4f',c) ...
      ' Vol.: ' sprintf('%6.3f',sum(sum(x))/(nelx*nely)) ...
      ' ch.: ' sprintf('%6.3f',change) ]);
% PLOT DENSITIES
colormap(gray); imagesc(-x); axis equal; axis tight; axis off; pause(1e-6);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [xnew]=OC(nelx,nely,x,volfrac,dc)
l1 = 0; l2 = 10000; move = 0.2;
while (l2-l1 > 1e-4)
    lmid = 0.5*(l2+l1);
    xnew = max(0.001,max(x-move,min(1.,min(x+move,x.*sqrt(-dc./lmid)))));
    if sum(sum(xnew)) - volfrac*nelx*nely > 0;
        l1 = lmid;
    else
        l2 = lmid;
    end
end
end
    
```

Emilio Silva e Renato Picelli

Implementação Numérica

25

99 linhas de
MOT em Matlab.

```
***** MESH-INDEPENDENCY FILTER *****
function [dcn]=check(nelx,nely,rmin,x,dc)
dcn=zeros(nely,nelx);
for i = 1:nelx
    sum=0;
    for j = 1:nely
        for k = max(i-round(rmin),1):min(i+round(rmin),nelx)
            for l = max(j-round(rmin),1):min(j+round(rmin),nely)
                fac = rmin-sqrt((i-k)^2+(j-l)^2);
                sum = sum+max(0,fac);
                dcn(j,i) = dcn(j,i) + max(0,fac)*x(l,k)*dc(l,k);
            end
        end
        dcn(j,i) = dcn(j,i)/(x(j,i)*sum);
    end
end
***** FE-ANALYSIS *****
function [U]=FE(nelx,nely,x,penal)
[KE] = lk;
K = sparse(2*(nelx+1)*(nely+1), 2*(nelx+1)*(nely+1));
F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),1); U = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),1);
for ely = 1:nely
    for elx = 1:nelx
        n1 = (nely+1)*(ely-1)+ely;
        n2 = (nely+1)*elx +nely;
        edof = [2*n1-1; 2*n1; 2*n2-1; 2*n2; 2*n2+1; 2*n2+2; 2*n1+1; 2*n1+2];
        K(edof,edof) = K(edof,edof) + x(ely,elx)*penal*KE;
    end
end
% DEFINE LOADS AND SUPPORTS (HALF MBB-BEAM)
F(2,1) = -1;
fixeddofs = union([1:2*(nely+1)], [2*(nelx+1)*(nely+1)]);
alldofs = [1:2*(nely+1)*(nelx+1)];
freedofs = setdiff(alldofs, fixeddofs);
% SOLVING
U(freedofs,:) = K(freedofs,freedofs) \ F(freedofs,:);
U(fixeddofs,:)= 0;
***** ELEMENT STIFFNESS MATRIX *****
function [KE]=lk
E = 1;
nu = 0.3;
k=[ 1/2+nu/6 1/8+nu/8 -1/4-nu/12 -1/8+3*nu/8 ...
   -1/4+nu/12 -1/8-nu/8 nu/6 1/8-3*nu/8];
```

Emilio Silva e Renato Picelli

Implementação Numérica

26

99 linhas de
MOT em Matlab.

```
KE = E/(1-nu^2)*[ k(1) k(2) k(3) k(4) k(5) k(6) k(7) k(8)
k(2) k(1) k(8) k(7) k(6) k(5) k(4) k(3)
k(3) k(8) k(1) k(6) k(7) k(4) k(5) k(2)
k(4) k(7) k(6) k(1) k(8) k(3) k(2) k(5)
k(5) k(6) k(7) k(8) k(1) k(2) k(3) k(4)
k(6) k(5) k(4) k(3) k(2) k(1) k(8) k(7)
k(7) k(4) k(5) k(2) k(3) k(8) k(1) k(6)
k(8) k(3) k(2) k(5) k(4) k(7) k(6) k(1)];
%
*****
% This Matlab code was written by Ole Sigmund, Department of Solid
% Mechanics, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark.
% Please send your comments to the author: sigmund@fam.dtu.dk
%
% The code is intended for educational purposes and theoretical details
% are discussed in the paper
% "A 99 line topology optimization code written in Matlab"
% by Ole Sigmund (To appear in Structural Optimization).
%
% The code as well as a postscript version of the paper can be
% downloaded from the web-site: http://www.topopt.dtu.dk
%
% Disclaimer:
% The author reserves all rights but does not guaranty that the code is
% free from errors. Furthermore, he shall not be liable in any event
% caused by the use of the program.
*****
```

Emilio Silva e Renato Picelli

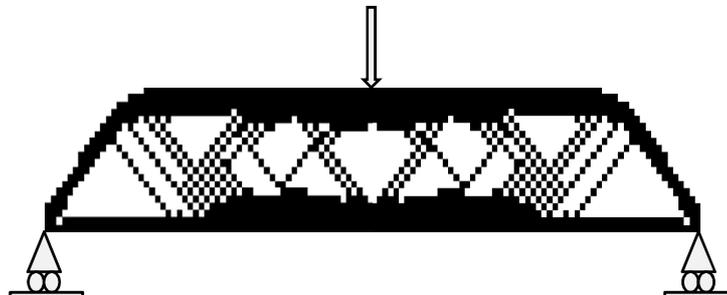
Problemas numéricos em otimização topológica

- Solver de MEF eficiente.
 - “Gargalo” computacional da otimização topológica.
- Algoritmos de otimização (otimizadores) eficientes.
- Formação de Tabuleiro de Xadrez.
- Dependência da malha.

Emilio Silva e Renato Picelli

Tabuleiro de Xadrez

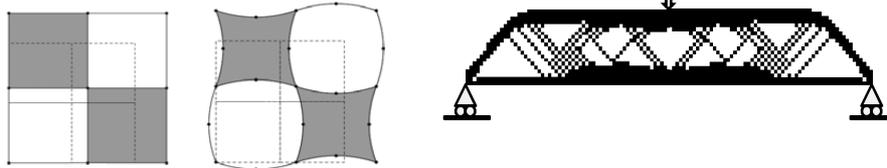
- Rigidez numérica artificial dos elementos



Emilio Silva e Renato Picelli

Tabuleiro de Xadrez

- Uma solução:

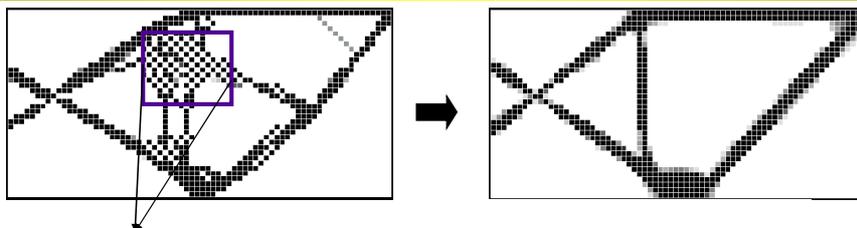


Elementos finitos de alta ordem

Em contrapartida, maior custo computacional

Emilio Silva e Renato Picelli

Instabilidade de Xadrez – “Checkerboard” 30



Instabilidade
de xadrez



Caso 3D

Razões	Solução
<ul style="list-style-type: none"> • Grau da função interpoladora do material é superior ao grau da função interpoladora do deslocamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usar elementos de maior ordem (9 nós) • Usar técnicas de filtragem

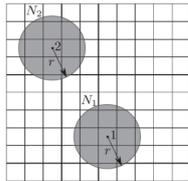
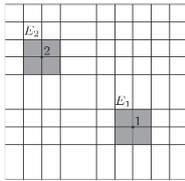
Emilio Silva e Renato Picelli

Tabuleiro de Xadrez

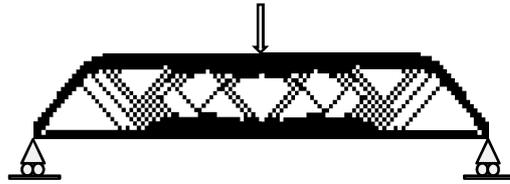
- Filtro numérico:**

$$\frac{\partial C}{\partial y_n} = \frac{1}{|E|} \sum_{e \in E} \frac{\partial C}{\partial x_e}$$

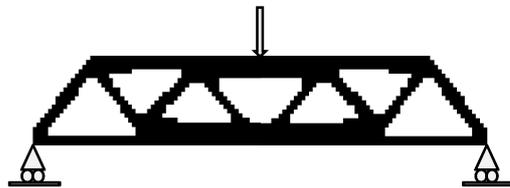
$$\frac{\partial \widetilde{C}}{\partial x_j} = \frac{\sum_{i \in N} w_{ji} \frac{\partial C}{\partial y_i}}{\sum_{i \in N} w_{ji}}$$



Sem filtro

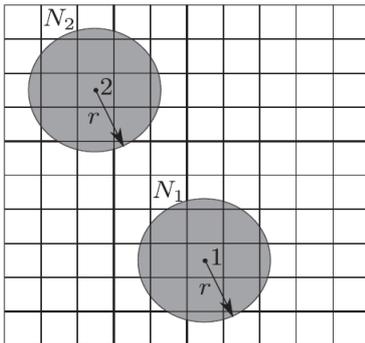


Com filtro



Emilio Silva e Renato Picelli

Implementação do filtro numérico



```
function fea =  
BuildFilterMatrix (fea, radius)
```

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial \widetilde{C}}{\partial x_j} = \frac{\sum_{i \in N} w_{ji} \frac{\partial C}{\partial y_i}}{\sum_{i \in N} w_{ji}}$$

nel x nel

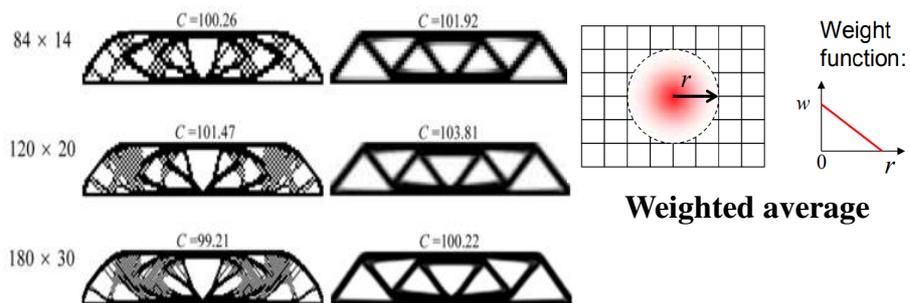
Aplicação do filtro:

```
dfdx = fea.H*dfdx;
```

Emilio Silva e Renato Picelli

SIMP method

- **Problems: mesh-dependency and artificial stiffness (checkerboard)**
- **Remedy: numerical filtering.**



Emilio Silva e Renato Picelli

Exemplo método adjunto em tensão – Le et al (2010)

Struct Multidisc Optim (2010) 41:605–620
DOI 10.1007/s00158-009-0440-y

RESEARCH PAPER

Stress-based topology optimization for continua

Chau Le · Julian Norato · Tyler Bruns ·
Christopher Ha · Daniel Tortorelli

Emilio Silva e Renato Picelli

Método SIMP – tensão

minimizar $V(\rho_i)$

tal que
$$\sum_{e=1}^{nel} (v_e \sigma_e^P)^{1/P} \leq \bar{\sigma}_{PN}$$

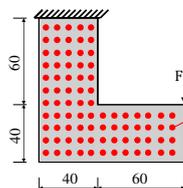
$$0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1$$

Por que é possível minimizar o volume sujeito a uma outra restrição de tensão? Onde está a compliance?

Emilio Silva e Renato Picelli

Stress problem

- Very frequent **goal** in structural design.
- **Avoid re-design** due to failure.
- Design **light-weight** structures but **avoid stress concentrations**.
- Control stress limits in all locations:



As many constraints as control points.
Too many and hard to solve!

$$\sigma_i \leq \bar{\sigma}$$

- **Global stress measure: the p-norm function.**

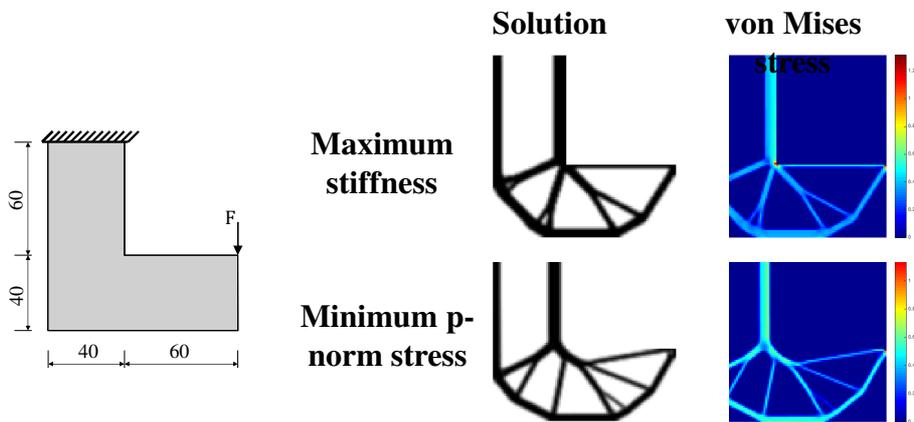
$$\sigma_{PN} = \left(\sum_{e=1}^N v_e \sigma_e^P \right)^{1/P} \leq \bar{\sigma}_{PN}$$

- Aggregate all stress control points in one single constraint.
- The function approximates the maximum stress when P is increased.

Tgji University – May 9, 2019, Shanghai, Chinaon

Emilio Silva e Renato Picelli

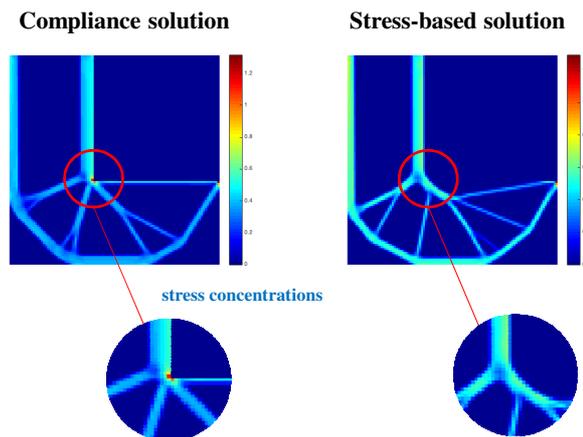
Stress problem



Tongji University – May 9, 2019, Shanghai, China

Emilio Silva e Renato Picelli

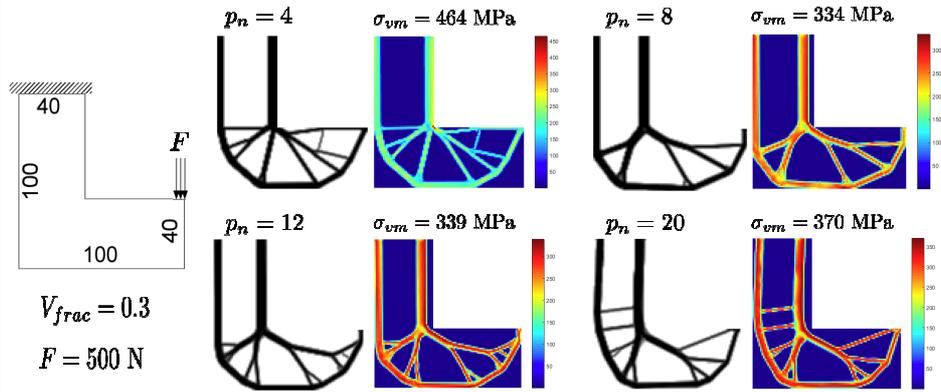
Compliance minimization



Tongji University – May 9, 2019, Shanghai, China

Emilio Silva e Renato Picelli

“L” Domain Design



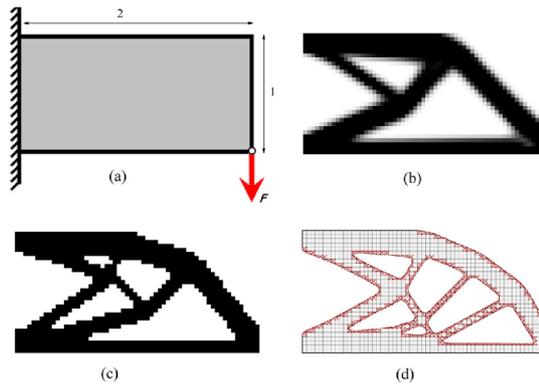
Kiyono, C.Y.; Vatanabe, S.L.; Silva, E.C.N.; Reddy, J.N. . A new multi-p-norm formulation approach for stress-based topology optimization design. Composite Structures, v. 156, p. 10-19, 2016.

Researcher: Cesar Yukishigue Kiyono **Emilio Silva e Renato Picelli**

Métodos de densidade

x

Métodos binários



40

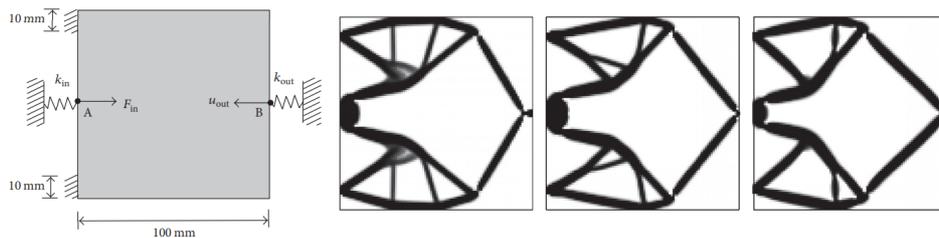
Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos de densidade: vantagens.

- Mais populares.
 - Conseqüentemente mais desenvolvidos. Ex: problemas de tensão, transferência de calor, mecanismos flexíveis, escoamento de fluidos, flambagem, etc.
- Maior número de otimizadores.
- Disponíveis em códigos comerciais.
- Maior espaço de soluções (densidades intermediárias).
 - Menos problemáticos quanto à desconexão (“quebra”) da estrutura.

Emilio Silva e Renato Picelli

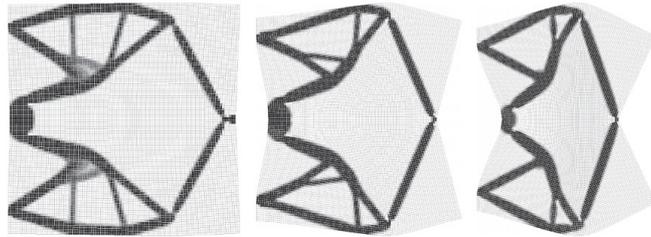
Métodos de densidade: vantagens.



Liu et al (2017)

Emilio Silva e Renato Picelli

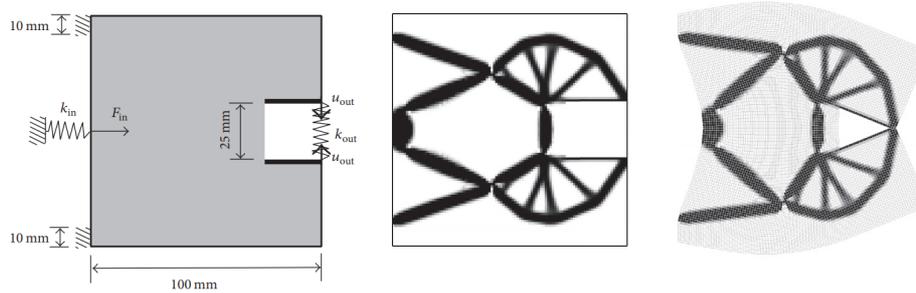
Métodos de densidade: vantagens.



Liu et al (2017)

Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos de densidade: vantagens.

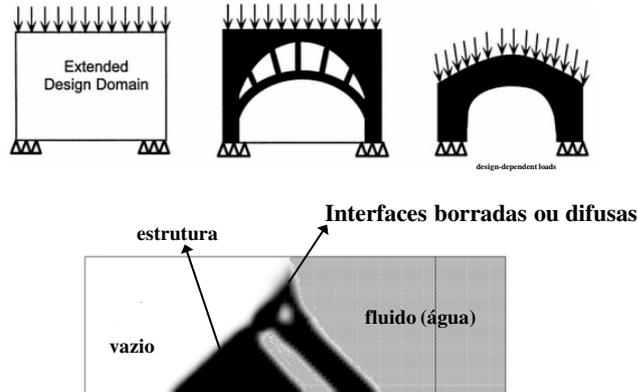


Liu et al (2017)

Emilio Silva e Renato Picelli

O problema da fronteira

- Carregamento de pressão e interface fluido-estrutura



Exemplo de otimização de barragem (carga de pressão de fluido)
SIMP (Sigmund e Clausen, 2007)

Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos de densidade: limitações.

- Fronteira (*boundary*) da estrutura desconhecida.
 - Interação fluido-estrutura.
 - Tensão (pós-processamento).
- Problemas de interferência do modelo de material.
 - Casos dinâmicos.
 - escoamento de fluidos com alta velocidade (turbulência).

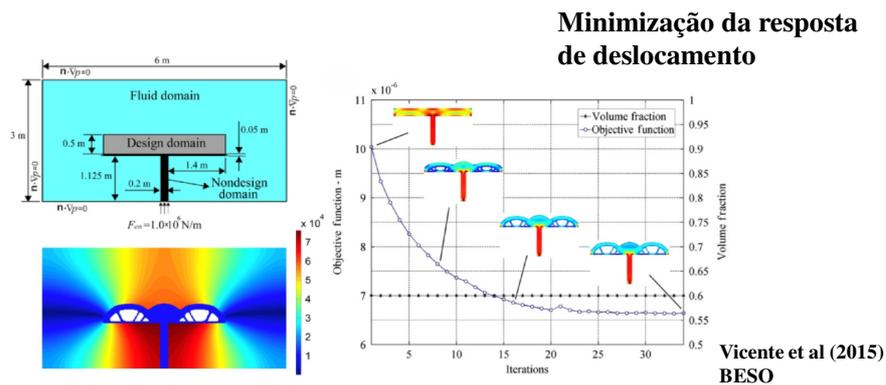
Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos binários: vantagens.

- Potencialmente mais simples e robustos onde se aplicam.
- Fáceis de serem combinados com softwares comerciais.
- Não são limitados à minimização da compliance. Em teoria, qualquer função objetivo que se tenha df/dx disponível pode funcionar.
- Vantajosos em problemas multifísicos onde a interface muda de localização durante a otimização.
- Não sofrem de problemas com interpolação do material.

Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos binários: vantagens.



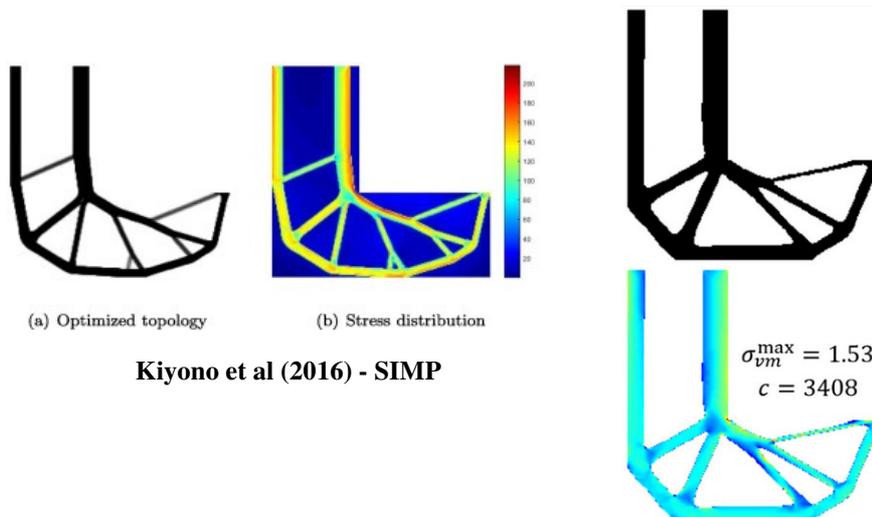
Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos binários: limitações.

- Restringem o espaço de soluções à variáveis binárias.
- Podem ter a convergência comprometida se houver a “quebra” da estrutura.
- Menos populares, conseqüentemente menos aplicações estudadas.
- Limitados a problemas com restrição de volume.
- Possivelmente difíceis de convergir em problemas não-lineares.

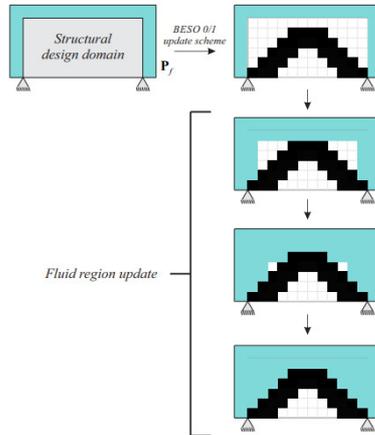
Emilio Silva e Renato Picelli

Métodos binários: limitações.



Emilio Silva e Renato Picelli

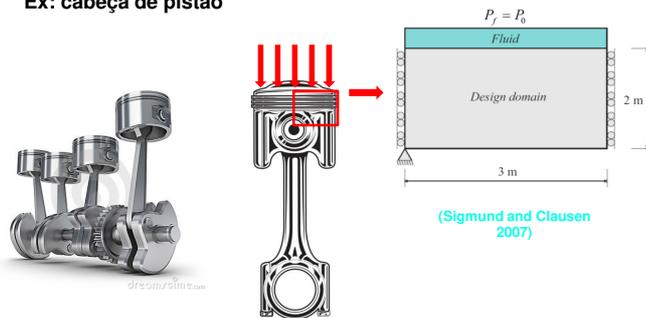
BESO em carregamento de pressão



Emilio Silva e Renato Picelli

BESO em carregamento de pressão

Ex: cabeça de pistão



Emilio Silva e Renato Picelli

Soluções para o caso do pistão



Picelli et al (2015)
BESO



Sigmund and Clausen (2007)
SIMP



Picelli et al (2019)
LSTO



Kumar et al (2020)
SIMP

Emilio Silva e Renato Picelli