

Método de Elementos Finitos

Pedro H A Konzen

20 de setembro de 2018

Licença

Este trabalho está licenciado sob a Licença Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional Creative Commons. Para visualizar uma cópia desta licença, visite http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt_BR ou mande uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Prefácio

Nestas notas de aula são abordados temas introdutórios sobre o método de elementos finitos para a simulação de equações diferenciais. Como ferramenta computacional de apoio didático, faço uso de códigos em [python](#) com suporte da biblioteca [FEniCS](#).

Agradeço aos(às) estudantes e colegas que assiduamente ou esporadicamente contribuem com correções, sugestões e críticas em prol do desenvolvimento deste material didático.

Pedro H A Konzen

Sumário

Capa	i
Licença	ii
Prefácio	iii
Sumário	iv
1 Método de elementos finitos em 1D	1
1.1 Interpolação e projeção	1
1.1.1 Interpolação	2
1.1.2 Projeção L^2	10
1.2 Problema modelo	15
1.2.1 Formulação fraca	15
1.2.2 Formulação de elementos finitos	16
1.2.3 Estimativa <i>a priori</i>	19
1.3 Condições de contorno	23
1.3.1 Condições de Dirichlet	23
1.3.2 Condições de Neumann	26
1.3.3 Condições de Robin	31
Respostas dos Exercícios	35
Referências Bibliográficas	36
Índice Remissivo	37

Capítulo 1

Método de elementos finitos em 1D

1.1 Interpolação e projeção

Seja dado um intervalo $I = [x_0, x_1] \subset \mathbb{R}$, $x_0 \neq x_1$. O espaço vetorial das funções lineares em I é definido por

$$P_1(I) := \{v : v(x) = c_0 + c_1x, x \in I, c_0, c_1 \in \mathbb{R}\}. \quad (1.1)$$

Observamos que dado $v \in P_1(I)$, temos que v é unicamente determinada pelos valores $\alpha_0 = v(x_0)$ e $\alpha_1 = v(x_1)$. Como consequência, existe exatamente uma única função $v \in P_1(I)$ para quaisquer dados valores α_0 e α_1 . Desta observação, introduzimos a chamada base nodal $\{\varphi_0, \varphi_1\}$ para $P_1(I)$, definida por

$$\varphi_j(x_i) = \begin{cases} 1 & , i = j, \\ 0 & , i \neq j \end{cases}, \quad (1.2)$$

com $i, j = 0, 1$. Com esta base, toda função $v \in P_1(I)$ pode ser escrita como uma combinação linear das funções φ_0 e φ_1 com coeficientes α_0 e α_1 (**graus de liberdade**), i.e.

$$v(x) = \alpha_0\varphi_0(x) + \alpha_1\varphi_1(x). \quad (1.3)$$

Além disso, observamos que

$$\varphi_0(x) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}, \quad \varphi_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (1.4)$$

Uma extensão do espaço $P_1(I)$ é o espaço das funções lineares por partes. Dado $I = [l_0, l_1]$, $l_0 \neq l_1$, consideremos uma partição (**malha**) de I com $n + 1$ pontos $\mathcal{I} = \{l_0 = x_0, x_1, \dots, x_n = l_1\}$ e, portanto, com n subintervalos $I_i = [x_{i-1}, x_i]$ de comprimento $h_i = x_i - x_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Na malha \mathcal{I} definimos o seguinte espaço das funções lineares por partes

$$V_h := \{v : v \in C^0(\mathcal{I}), v|_{I_i} \in P_1(I_i), i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (1.5)$$

Observamos que toda função $v \in V_h$ é unicamente determinada por seus valores nodais $\{\alpha_i = v(x_i)\}_{i=0}^n$. Reciprocamente, todo conjunto de valores nodais $\{\alpha_i\}_{i=0}^n$ determina unicamente uma função $v \in V_h$. Desta observação, temos que os valores nodais determinam os graus de liberdade com a base nodal $\{\varphi_j\}_{j=0}^n$ para V_h definida por

$$\varphi_j(x_i) = \begin{cases} 1 & , i = j, \\ 0 & , i \neq j \end{cases}, \quad (1.6)$$

com $i, j = 0, 1, \dots, n$. Podemos verificar que

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} (x - x_{i-1})/h_i & , x \in I_i, \\ (x_{i+1} - x)/h_{i+1} & , x \in I_{i+1}, \\ 0 & , \text{noutros casos} \end{cases} \quad (1.7)$$

veja, Figura 1.1. É notável que $\phi_i(x)$ tem suporte compacto $I_i \cup I_{i+1}$.

1.1.1 Interpolação

A interpolação é uma das técnicas de aproximação de funções. Dada uma função contínua f em $I = [x_0, x_1]$, definimos o **operador de interpolação linear** $\pi : C^0(I) \rightarrow P_1(I)$ por

$$\pi f(x) = f(x_0)\varphi_0(x) + f(x_1)\varphi_1(x). \quad (1.8)$$

Observamos que πf é igual a f nos nodos x_0 e x_1 .

Exemplo 1.1.1. A Figura 1.2 ilustra a interpolação da função $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço $P_1([1/4, 3/4])$. Neste caso

$$\pi f(x) = f\left(\frac{1}{4}\right) \frac{3/4 - x}{1/2} + f\left(\frac{3}{4}\right) \frac{x - 1/4}{1/2}. \quad (1.9)$$

Com o [FENiCS](#), podemos computar a função interpolada πf com o seguinte código:

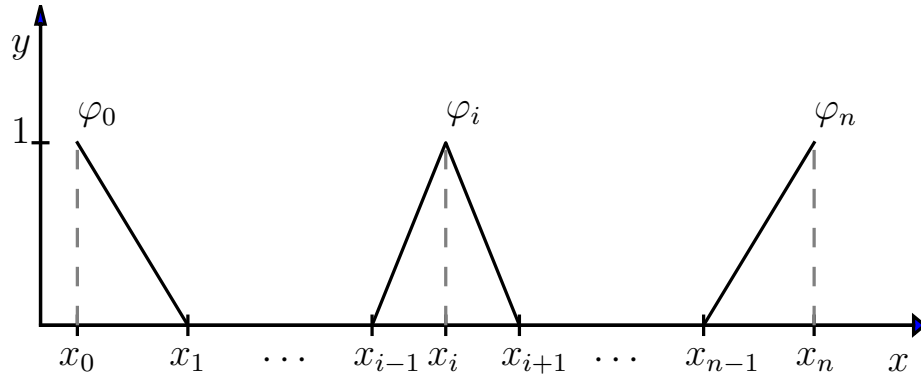


Figura 1.1: Base nodal para o espaço das funções lineares por parte.

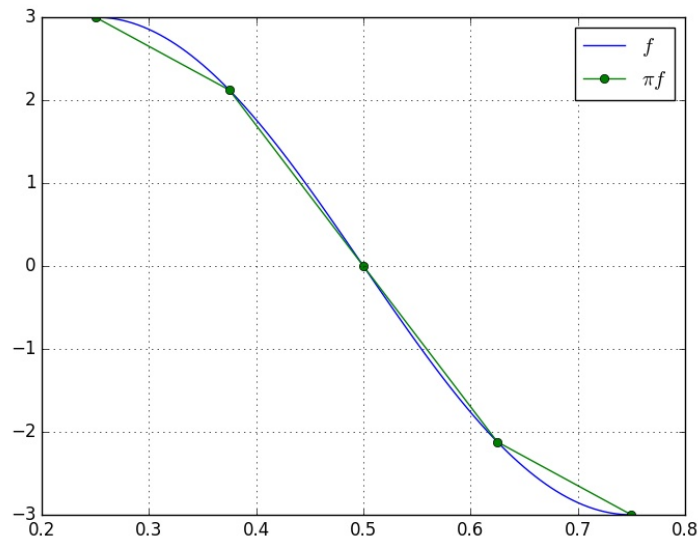


Figura 1.2: Interpolação linear de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço $P_1([1/4, 3/4])$.

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(4,0.25,0.75)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# interpolacao
pif = interpolate(f,V)

# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(pif,mesh=mesh,
     marker='o',label="$\pi f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

Agora, vamos buscar medir o erro de interpolação, i.e. $f - \pi f$. Para tanto, podemos usar a norma L^2 definida por

$$\|v\|_{L^2(I)} = \left(\int_I v^2 dx \right)^{1/2}. \quad (1.10)$$

Lembramos que valem as desigualdades triangular

$$\|v + w\|_{L^2(I)} \leq \|v\|_{L^2(I)} + \|w\|_{L^2(I)} \quad (1.11)$$

e a de Cauchy-Schwarz¹

$$\int_I vw dx \leq \|v\|_{L^2(I)} \|w\|_{L^2(I)}, \quad (1.12)$$

¹Também conhecida como desigualdade de Cauchy–Bunyakovsky–Schwarz. Augustin-Louis Cauchy, 1789 - 1857, matemático francês. Viktor Yakovlevich Bunyakovsky, 1804 - 1889, matemático Russo. Karl Hermann Amandus Schwarz, 1843 - 1921, matemático alemão.

para qualquer funções $v, w \in L^2(I)$.

Proposição 1.1.1. (Erro da interpolação linear) O interpolador πf satisfaz as estimativas

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)} \leq Ch^2 \|f''\|_{L^2(I)}, \quad (1.13)$$

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)} \leq Ch \|f''\|_{L^2(I)}, \quad (1.14)$$

onde C é uma constante e $h = x_1 - x_0$.

Demonstração. Denotemos o erro de interpolação por $e = f - \pi f$. Do teorema fundamental do cálculo, temos

$$e(y) = e(x_0) + \int_{x_0}^y e'(x) dx, \quad (1.15)$$

onde $e(x_0) = f(x_0) - \pi f(x_0) = 0$. Daí, usando a desigualdade de Cauchy-Schwarz (1.12), temos

$$e(y) = \int_{x_0}^y e' dx \quad (1.16)$$

$$\leq \int_{x_0}^y |e'| dx \quad (1.17)$$

$$\leq \int_I 1 \cdot |e'| dx \quad (1.18)$$

$$\leq \left(\int_I 1^2 dx \right)^{1/2} \left(\int_I e'^2 dx \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

$$= h^{1/2} \left(\int_I e'^2 dx \right)^{1/2}, \quad (1.20)$$

donde

$$e(y)^2 \leq h \int_I e'^2 dx = h \|e'\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.21)$$

Então, integrando em I obtemos

$$\|e\|_{L^2(I)}^2 = \int_I e^2(y) dy \leq \int_I h \|e'\|_{L^2(I)}^2 dy = h^2 \|e'\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.22)$$

ou seja,

$$\|e\|_{L^2(I)} \leq h \|e'\|_{L^2(I)}. \quad (1.23)$$

Agora, observando que $e(x_0) = e(x_1) = 0$, o teorema de Rolle² garante a existência de um ponto $\tilde{x} \in I$ tal que $e'(\tilde{x}) = 0$, donde do teorema fundamental do cálculo e da desigualdade de Cauchy-Schwarz, segue

$$e'(y) = e'(\tilde{x}) + \int_{\tilde{x}}^y e'' dx \quad (1.24)$$

$$= \int_{\tilde{x}}^y e'' dx \quad (1.25)$$

$$\leq \int_I 1 \cdot |e''| dx \quad (1.26)$$

$$\leq h^{1/2} \left(\int_I e''^2 \right)^{1/2}. \quad (1.27)$$

Então, integrando em I , obtemos

$$\|e'\|_{L^2(I)}^2 \leq h^2 \|e''\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.28)$$

a qual, observando que $e'' = f''$, equivale a segunda estimativa procurada, i.e.

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)} \leq Ch \|f''\|_{L^2(I)}. \quad (1.29)$$

Por fim, de (1.23) e de (1.29), obtemos a primeira estimativa desejada

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)} \leq Ch^2 \|f''\|_{L^2(I)}. \quad (1.30)$$

□

Exemplo 1.1.2. A Figura 1.3 mostra a evolução do erro na norma L^2 da interpolação de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço $P_1([0, h])$ para $h = 10^{-5}, 10^{-4}, \dots, 10^{-1}$. Com o FENiCS, podemos computar os erros de interpolação com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)
```

²Michel Rolle, 1652 - 1719, matemático francês.

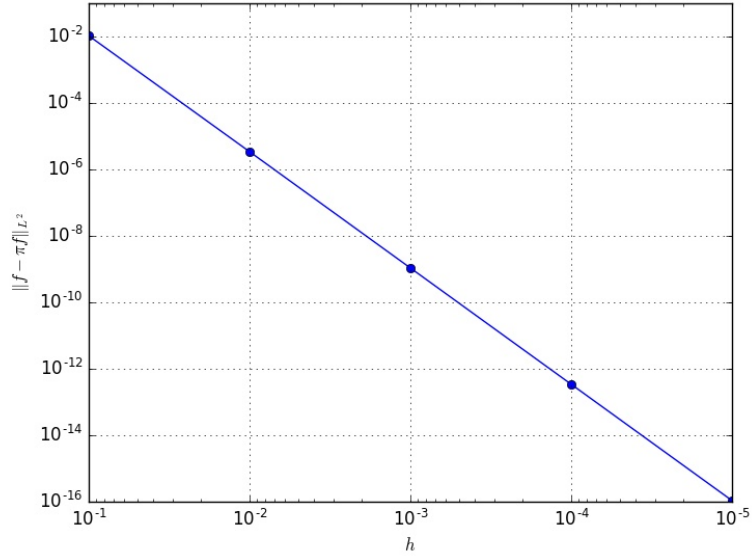


Figura 1.3: Erro de interpolação de $f(x) = 3\sin(2\pi x)$ no espaço $P_1([0, h])$.

```
n=5
for k in np.arange(1,n+1):
    h = 10**-k
    mesh = IntervalMesh(1,0,h)
    V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
    pif = interpolate(f,V)
    e = errornorm(f,pif,'L2')
    print("%d %1.0E %1.1E" % (k,h,e))
```

Vamos, agora, generalizar o resultado da Proposição 1.1.1 para a interpolação no espaço V_h das funções lineares por parte. Dada uma função contínua f em $I = [l_0, l_1]$, definimos o operador interpolador $\pi : C^0(I) \rightarrow V_h$ na malha \mathcal{I} de I por

$$\pi f(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \varphi_i(x). \quad (1.31)$$

Exemplo 1.1.3. A Figura 1.4 ilustra a interpolação da função $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes em uma malha uniforme do intervalo $I = [1/4, 3/4]$ com $n = 4$ subintervalos (5 pontos).

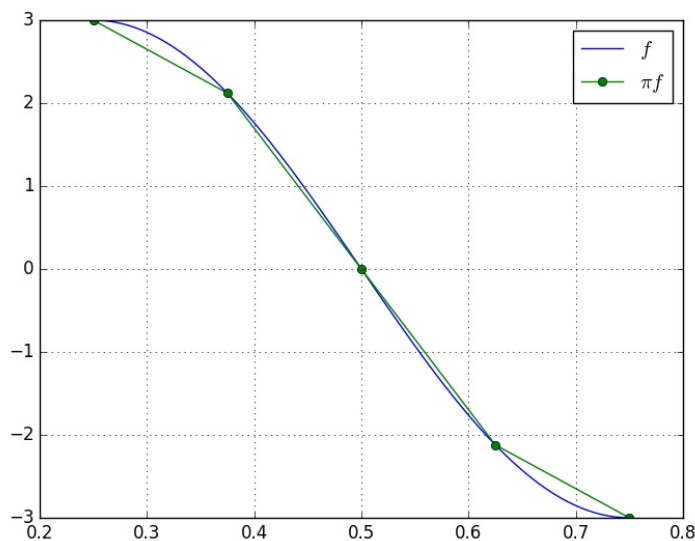


Figura 1.4: Interpolação linear de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes sobre uma malha com 5 pontos.

Com o [FENiCS](#), podemos computar a função interpolada πf com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(4, 0.25, 0.75)

# espaço
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
```

```

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# interpolacao
pif = interpolate(f,V)

# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(pif,mesh=mesh,
     marker='o',label="$\pi f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

O seguinte resultado fornece uma estimativa do erro de interpolação em relação ao tamanho h_i de cada elemento da malha.

Proposição 1.1.2. *O interpolador πf satisfaz as estimativas*

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.32)$$

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|f''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.33)$$

$$(1.34)$$

Demonstração. Ambas desigualdades seguem da desigualdade triangular e da Proposição 1.1.1. Por exemplo, para a primeira desigualdade, temos

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \leq \sum_{i=1}^n \|f - \pi f\|_{L^2(I_i)}^2 \quad (1.35)$$

$$\leq \sum_{i=1}^n C h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}^2. \quad (1.36)$$

□

1.1.2 Projeção L^2

Dada uma função $f \in L^2(I)$, definimos o **operador de projeção** L^2 $P_h : L^2(I) \rightarrow V_h$ por

$$\int_I (f - P_h f) v \, dx = 0, \quad \forall v \in V_h. \quad (1.37)$$

Como V_h é um espaço de dimensão finita, a condição (1.38) é equivalente a

$$\int_I (f - P_h f) \varphi_i \, dx = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (1.38)$$

onde φ_i é a i -ésima função base de V_h . Além disso, como $P_h f \in V_h$, temos

$$P_h f = \sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.39)$$

onde ξ_j , $j = 0, 1, \dots, n$, são $n + 1$ incógnitas a determinar. Logo,

$$\int_I (f - P_h f) \varphi_i \, dx = 0 \Leftrightarrow \int_I f \varphi_i \, dx = \int_I P_h f \varphi_i \, dx \quad (1.40)$$

$$\Leftrightarrow \int_I f \varphi_i \, dx = \int_I \left(\sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j \right) \varphi_i \, dx \quad (1.41)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{j=0}^n \xi_j \int_I \varphi_j \varphi_i \, dx = \int_I f \varphi_i \, dx, \quad (1.42)$$

para $i = 0, 1, \dots, n$.

Observemos, agora, que (1.42) consiste em um sistema de $n + 1$ equações lineares para as $n + 1$ incógnitas ξ_j , $j = 0, 1, \dots, n$. Este, por sua vez, pode ser escrito na seguinte forma matricial

$$M \xi = b, \quad (1.43)$$

onde $M = [m_{i,j}]_{i,j=0}^{n+1}$ é chamada de matriz de massa

$$m_{i,j} = \int_I \varphi_j \varphi_i \, dx \quad (1.44)$$

e $b = (b_0, b_1, \dots, b_n)$ é chamado de vetor de carregamento

$$b_i = \int_I f \varphi_i \, dx. \quad (1.45)$$

Ou seja, a projeção L^2 de f no espaço V_h é

$$P_h f = \sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.46)$$

onde $\xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_n)$ é solução do sistema (1.43).

Exemplo 1.1.4. A Figura 1.5 ilustra a projeção L^2 da função $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes em uma malha uniforme do intervalo $I = [1/4, 3/4]$ com $n = 4$ subintervalos (5 pontos).

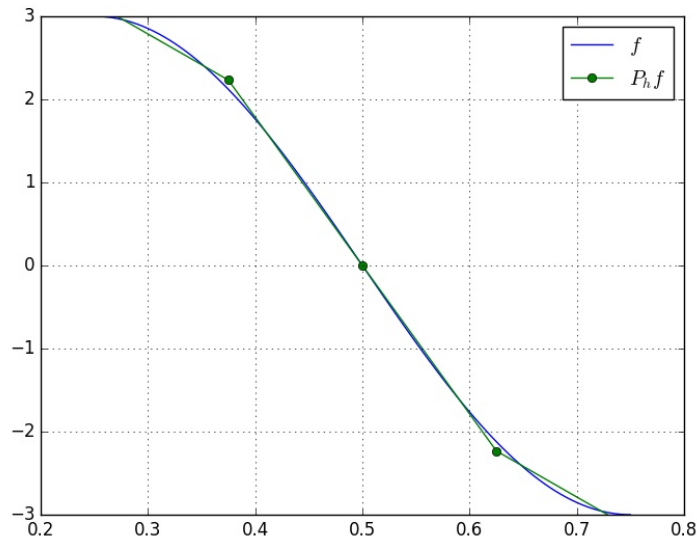


Figura 1.5: Projeção L^2 de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes sobre uma malha com 5 pontos.

Com o [FENiCS](#), podemos computar $P_h f$ com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
```

```

mesh = IntervalMesh(4,0.25,0.75)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# projecao
Phf = project(f, V)

# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(Phf,mesh=mesh,
     marker='o',label="$P_h f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

O próximo teorema mostra que $P_h f$ é a função que melhor aproxima f dentre todas as funções do espaço V_h .

Teorema 1.1.1. (A melhor aproximação.) A projeção L^2 satisfaz

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)} \leq \|f - v\|_{L^2(I)}, \quad \forall v \in V_h. \quad (1.47)$$

Demonstração. Dado $v \in V_h$, temos

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)}^2 = \int_I |f - P_h f|^2 dx \quad (1.48)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v + v - P_h f) dx \quad (1.49)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v) dx + \int_I (f - P_h f)(v - P_h f) dx \quad (1.50)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v) dx \quad (1.51)$$

$$\leq \|f - P_h f\|_{L^2(I)} \|f - v\|_{L^2(I)}, \quad (1.52)$$

donde segue o resultado. \square

O próximo teorema fornece uma estimativa *a-priori* do erro $\|f - P_h f\|_{L^2(I)}$ em relação ao tamanho da malha.

Teorema 1.1.2. *A projeção L^2 satisfaz*

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)} \leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}^2. \quad (1.53)$$

Demonstração. Tomando a interpolação $\pi f \in V_h$, temos do Teorema da melhor aproximação (Teorema 1.1.1) e da estimativa do erro de interpolação (Proposição 1.1.2) que

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)}^2 \leq \|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \quad (1.54)$$

$$\leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}^2. \quad (1.55)$$

□

Exemplo 1.1.5. A Figura 1.6 mostra a evolução do erro na norma L^2 da projeção de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h em malhas uniformes de $h = 10^{-5}, 10^{-4}, \dots, 10^{-1}$ no intervalo $[1/4, 3/4]$.

Com o [FENiCS](#), podemos computar os erros de projeção com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

n=5
for k in np.arange(0,n):
    mesh = IntervalMesh(5*10**k,0.25,0.75)
    h = mesh.hmax()
    V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
    Phf = project(f,V)
    e = errornorm(f,Phf,'L2')

    print("%d %1.0E %1.1E" % (k,h,e))
```

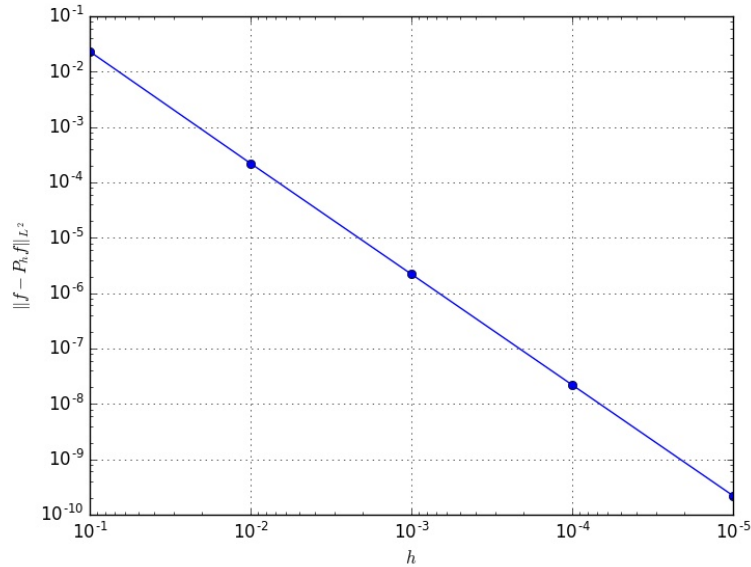


Figura 1.6: Erro de interpolação de $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h .

Exercícios

E 1.1.1. Faça um código para verificar a segunda estimativa da Proposição 1.1.1 no caso da interpolação da função $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço P_1 das funções lineares.

E 1.1.2. Faça um código para verificar as estimativas da Proposição 1.1.2 no caso da interpolação da função $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes.

E 1.1.3. Faça um código para computar a projeção L^2 $P_h f$ da função $f(x) = x - \cos(x)$ no espaço V_h das funções lineares por partes em uma malha com 10 células no intervalo $[0, \pi]$. Faça o esboço dos gráficos de f e $P_h f$ e compute o erro $\|f - P_h f\|_{L^2}$.

1.2 Problema modelo

Nesta seção, discutiremos sobre a aplicação do método de elementos finitos para o seguinte problema de valor de contorno: encontrar u tal que

$$-u'' = f, \quad x \in I = [0, L], \quad (1.56)$$

$$u(0) = u(L) = 0, \quad (1.57)$$

onde f é uma função dada.

1.2.1 Formulação fraca

A derivação de um método de elementos finitos inicia-se da formulação fraca do problema em um espaço de funções apropriado. No caso do problema (1.56)-(1.57), tomamos o espaço

$$V_0 = \{v \in H^1(I) : v(0) = v(L) = 0\}. \quad (1.58)$$

Ou seja, se $v \in H^1(I)$, então $\|v\|_{L^2(I)} < \infty$, $\|v'\|_{L^2(I)} < \infty$, bem como v satisfaz as condições de contorno do problema.

A formulação fraca é, então, obtida multiplicando-se a equação (1.56) por uma função teste $v \in V_0$ (arbitrária) e integrando-se por partes, i.e.

$$\int_I f v \, dx = - \int_I u'' v \, dx \quad (1.59)$$

$$= \int_I u' v' \, dx - u'(L)v(L) + u'(0)v(0) \quad (1.60)$$

$$(1.61)$$

Donde, das condições de contorno, temos

$$\int_I u' v' \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.62)$$

Desta forma, o problema fraco associado a (1.56)-(1.57) lê-se: encontrar $u \in V_0$ tal que

$$a(u, v) = L(v), \quad \forall v \in V_0, \quad (1.63)$$

onde

$$a(u, v) = \int_I u' v' \, dx \quad (1.64)$$

$$L(v) = \int_I f v \, dx, \quad (1.65)$$

são chamadas de forma bilinear e forma linear, respectivamente.

1.2.2 Formulação de elementos finitos

Uma formulação de elementos finitos é uma aproximação do problema fraco (1.63) em um espaço de dimensão finita. Aqui, vamos usar o espaço $V_{h,0}$ das funções lineares por partes em I que satisfazem as condições de contorno, i.e.

$$V_{h,0} = \{v \in V_h : v(0) = v(L) = 0\}. \quad (1.66)$$

Então, substituindo o espaço V_0 pelo subespaço $V_{h,0} \subset V_0$ em (1.63), obtemos o seguinte problema de elementos finitos: encontrar $u_h \in V_{h,0}$ tal que

$$a(u_h, v) = L(v), \quad \forall v \in V_{h,0}. \quad (1.67)$$

Observação 1.2.1. A formulação de elementos finitos não é única, podendo-se trabalhar com outros espaços de funções. No caso em que o espaço da solução é igual ao espaço das funções testes, a abordagem é chamada de método de Galerkin³.

Observemos que o problema (1.67) é equivalente a: encontrar $u_h \in V_{h,0}$ tal que

$$a(u_h, \varphi_i) = L(\varphi_i), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (1.68)$$

onde φ_i , $i = 1, \dots, n-1$, são as funções base de $V_{h,0}$. Então, como $u_h \in V_{h,0}$, temos

$$u_h = \sum_{j=1}^{n-1} \xi_j \varphi_j, \quad (1.69)$$

onde ξ_j , $j = 1, 2, \dots, n-1$, são incógnitas a determinar. I.e., ao computarmos ξ_j , $j = 1, 2, \dots, n-1$, temos obtido a solução u_h do problema de elementos finitos 1.67.

Agora, da forma bilinear (1.64), temos

$$a(u_h, \varphi_i) = a \left(\sum_{j=1}^{n-1} \xi_j \varphi_j, \varphi_i \right) \quad (1.70)$$

$$= \sum_{j=1}^{n-1} \xi_j a(\varphi_j, \varphi_i). \quad (1.71)$$

Daí, o problema (1.67) é equivalente a resolvermos o seguinte sistema de equações lineares

$$A\xi = b, \quad (1.72)$$

³Boris Grigoryevich Galerkin, matemático e engenheiro soviético. Fonte: [Wikipédia](#).

onde $A = [a_{i,j}]_{i,j=1}^{n-1}$ é a matriz de rigidez com

$$a_{i,j} = a(\varphi_j, \varphi_i) = \int_I \varphi_j' \varphi_i' dx, \quad (1.73)$$

$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-1})$ é o vetor das incógnitas e $b = (b_i)_{i=1}^{n-1}$ é o vetor de carregamento com

$$b_i = L(\varphi_i) = \int_I \varphi_i dx. \quad (1.74)$$

Exemplo 1.2.1. Consideremos o problema (1.56)-(1.57) com $f \equiv 1$ e $L = 1$, i.e.

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.75)$$

$$u(0) = u(1) = 0. \quad (1.76)$$

Neste caso, a solução analítica $u(x) = -x^2/2 + x/2$ pode ser facilmente obtida por integração. Agora, vamos computar uma aproximação de elementos finitos no espaço das funções contínuas por partes $V_{h,0}$ construído numa malha uniforme de 5 células no intervalo $I = [0, 1]$. Para tanto, montamos o sistema de elementos finitos (1.72), resolvemo-lo e computamos a solução com

$$u_h = \sum_{j=1}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.77)$$

onde a j -ésima função de base é

$$\varphi_j = \begin{cases} (x - x_{j-1})/(x_j - x_{j-1}) & , x_{j-1} \leq x < x_j, \\ (x_j - x)/(x_j - x_{j+1}) & , x_j \leq x \leq x_{j+1} \end{cases} \quad (1.78)$$

A Figura 1.7 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica u e da sua aproximação de elementos finitos u_h .

Com o [FENiCS](#), a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte [código](#):

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
```



Figura 1.7: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.2.1.

```

mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaço
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# condicoes de contorno
def boundary(x,on_boundary):
    return on_boundary

bc = DirichletBC(V,Constant(0.0),boundary)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = dot(grad(u), grad(v))*dx
L = f*v*dx

```

```

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#grafico
plot(u,marker="o",label="$u_h$")

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]/2',
                degree=2)
xx = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=xx,label="$u$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

1.2.3 Estimativa *a priori*

Existem dois tipos de estimativas do erro $e := u - u_h$. Estimativas *a priori*, são aqueles em que o erro é dado em relação da solução u , enquanto que nas estimativas *a posteriori* o erro é expresso em relação a solução de elementos finitos u_h .

Teorema 1.2.1. (Ortogonalidade de Galerkin) A solução de elementos finitos u_h de (1.67) satisfaz a seguinte propriedade de ortogonalidade

$$a(u - u_h, v) := \int_I (u - u_h)' v' dx = 0, \quad v \in V_{h,0}, \quad (1.79)$$

onde u é a solução de (1.63).

Demonstração. De (1.67), (1.63) e lembrando que $V_{h,0} \subset V_0$, temos

$$a(u, v) = L(v) = a(u_h, v) \Rightarrow a(u - u_h, v) = 0, \quad (1.80)$$

para todo $v \in V_{h,0}$. □

Teorema 1.2.2. (A melhor aproximação) A solução de elementos finitos u_h dada por (1.67) satisfaz a seguinte propriedade de melhor aproximação

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \leq \|(u - v)'\|_{L^2(I)}, \quad v \in V_{h,0}, \quad (1.81)$$

onde u é a solução de (1.63).

Demonstração. Escrevendo $u - u_h = u - v + v - u_h$ para qualquer $v \in V_{h,0}$ e usando a ortogonalidade de Galerkin (Teorema 1.2.1), temos

$$\|(u - u_h)'\|^2 = \int_I (u - u_h)'(u - u_h)' dx \quad (1.82)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v + v - u_h)' dx \quad (1.83)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v)' dx + \int_I (u - u_h)'(v - u_h)' dx \quad (1.84)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v)' dx \quad (1.85)$$

$$\leq \|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \|(u - v)'\|_{L^2(I)}. \quad (1.86)$$

□

Teorema 1.2.3. (Estimativa *a priori*) O erro em se aproximar a solução u de (1.63) pela solução de elementos finitos u_h dada por (1.67) satisfaz a seguinte estimativa *a priori*

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|u''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.87)$$

Demonstração. Tomando $v = \pi u$ no teorema da melhor aproximação (Teorema 1.2.2), obtemos

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \leq \|(u - \pi u)'\|_{L^2(I)}. \quad (1.88)$$

Daí, da estimativa do erro de interpolação (Proposição 1.1.2), temos

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|u''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.89)$$

□

Exemplo 1.2.2. A Figura 1.8 apresenta o esboço da evolução do erro $\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)}$ da solução de elementos finitos do problema (1.75)-(1.76) para malhas uniformes com $n = 2, 4, 8, \dots, 128$ células.

Com o FENiCS, a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte código:

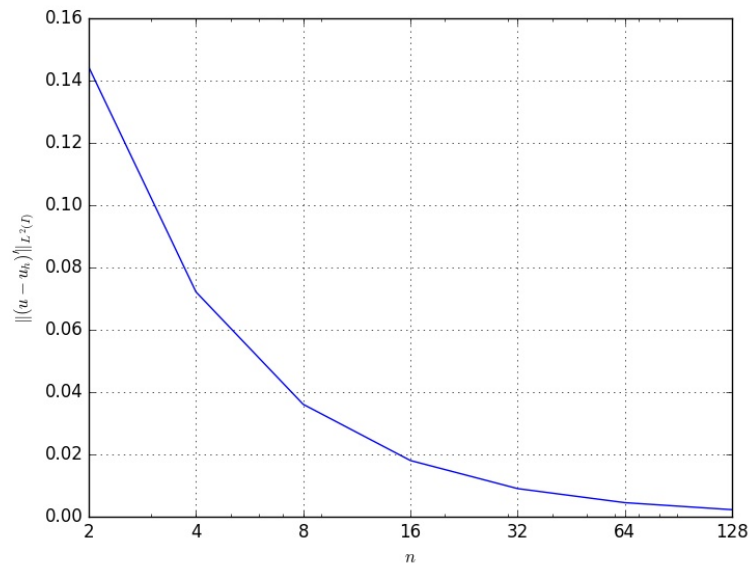


Figura 1.8: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.2.2.

```

from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def boundary(x,on_boundary):
    return on_boundary

def solver(n):
    # malha
    mesh = IntervalMesh(n,0,1)

    # espaco
    V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

    bc = DirichletBC(V,Constant(0.0),boundary)

    #MEF problem

```

```

u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = dot(grad(u), grad(v))*dx
L = f*v*dx

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

return u

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]/2',
                degree=2)

lerrors=[]
for n in [2,4,8,16,32,64,128]:
    u = solver(n)
    e = errornorm(u,ua,norm_type='H10')
    lerrors.append(e)

plt.plot([2,4,8,16,32,64,128],lerrors)
plt.xscale('log',base=2)
#plt.yscale('log',base=2)
plt.xlabel(r"$n$")
plt.ylabel(r"$\|(u-u_h)\|_{L^2(I)}$")
plt.xlim((2,128))
plt.xticks([2,4,8,16,32,64,128],[2,4,8,16,32,64,128])
plt.grid('on')
plt.show()

```

Exercícios

Em construção ...

1.3 Condições de contorno

Nesta seção, vamos discutir sobre soluções de elementos finitos para a equações diferencial

$$-u'' = f, \quad x \in I = [0, L], \quad (1.90)$$

com diferentes condições de contorno.

1.3.1 Condições de Dirichlet

Consideremos o seguinte problema com condições de contorno de Dirichlet⁴: encontrar u tal que

$$-u'' = f, \quad \forall x \in I = [0, L], \quad (1.91)$$

$$u(0) = u_0, \quad u(L) = u_L, \quad (1.92)$$

com u_0 , u_L e f dados.

Tomando uma função teste $v \in V_0 = H_0^1(I) := \{v \in H^1(I); v(0) = v(L) = 0\}$ e multiplicando-a em (1.91), obtemos

$$-\int_I u'' v \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.93)$$

Aplicando a integração por partes, temos

$$\int_I u' v' \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.94)$$

Desta forma, definimos o seguinte problema fraco associado: encontrar $u \in V := \{v \in H^1(I); v(0) = u_0, v(L) = u_L\}$ tal que

$$a(u, v) = L(v), \quad \forall v \in V_0, \quad (1.95)$$

onde $a(u, v)$ é a forma bilinear

$$a(u, v) = \int_I u' v' \, dx \quad (1.96)$$

e $L(v)$ é a forma linear

$$L(v) = \int_I f v \, dx. \quad (1.97)$$

⁴Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet, 1805 - 1859, matemático alemão. Fonte: [Wikipedia](#).

Exemplo 1.3.1. Consideremos o problema

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.98)$$

$$u(0) = 1/2, \quad u(1) = 1. \quad (1.99)$$

Sua solução analítica é $u(x) = -x^2/2 + x + 1/2$. A Figura 1.9 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica u e da sua aproximação de elementos finitos u_h , esta construída no espaço dos polinômios lineares por partes sobre uma malha uniforme de 5 células.

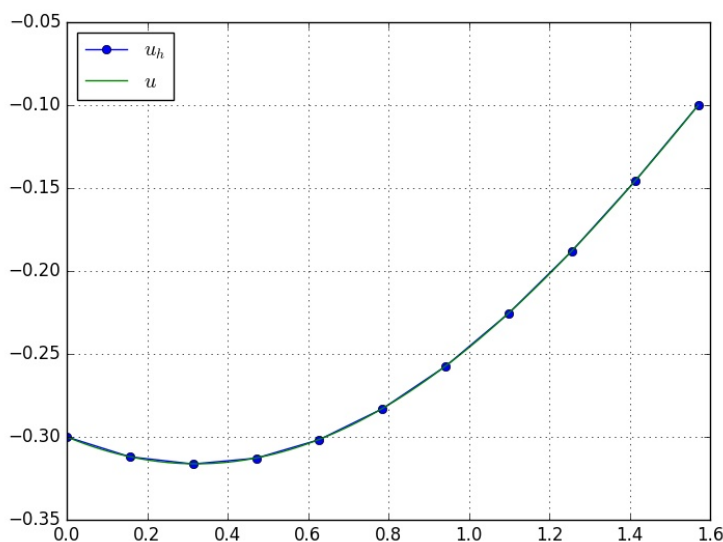


Figura 1.9: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.3.1.

Com o [FENiCS](#), a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte [código](#):

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#tolerance
tol=1e-14
```

```

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

u_D = Expression('x[0]<0.5 ? 0.5 : 1',degree=1)

def boundary(x,on_boundary):
    return on_boundary

bc = DirichletBC(V,u_D,boundary)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = u.dx(0)*v.dx(0)*dx
L = f*v*dx

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]+0.5',
                degree=2)

#erro L2
print("Erro L2: %1.2E\n" % errornorm(u,ua,norm_type="L2"))

plot(u,mesh=mesh,marker='o',label=r"$u_h$")
mesh = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=mesh,label=r"$u$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.show()

```

1.3.2 Condições de Neumann

Consideremos o seguinte problema com condições de contorno de Neumann⁵ homogênea em $x = L$: encontrar u tal que

$$-u'' = f, \quad \forall x \in I = [0, L], \quad (1.100)$$

$$u(0) = u_0, \quad u'(L) = 0, \quad (1.101)$$

com u_0 e f dados.

Tomando uma função teste $v \in V := \{v \in H^1(I); v(0) = 0\}$ e multiplicando-a em (1.100), obtemos

$$-\int_I u'' v \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.102)$$

Aplicando a integração por partes, temos

$$\int_I u' v' \, dx - \underbrace{u'(L)v(L)}_{u'(L)=0} + \underbrace{u'(0)v(0)}_{v(0)=0} = \int_I f v \, dx. \quad (1.103)$$

Desta forma, definimos o seguinte problema fraco associado: encontrar $u \in \tilde{V} := \{v \in H^1(I); v(0) = u_0\}$ tal que

$$a(u, v) = L(v), \quad \forall v \in V, \quad (1.104)$$

onde $a(u, v)$ é a forma bilinear

$$a(u, v) = \int_I u' v' \, dx \quad (1.105)$$

e $L(v)$ é a forma linear

$$L(v) = \int_I f v \, dx. \quad (1.106)$$

Exemplo 1.3.2. Consideremos o problema

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0, 1], \quad (1.107)$$

$$u(0) = 0, \quad u'(1) = 0. \quad (1.108)$$

Sua solução analítica é $u(x) = -x^2/2 + x$. A Figura 1.10 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica u e da sua aproximação de elementos finitos u_h , esta construída no espaço dos polinômios lineares por partes sobre uma malha uniforme de 5 células.

Com o **FENiCS**, a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte código:

⁵Carl Gottfried Neumann, 1832 - 1925, matemático alemão. Fonte: [Wikipedia](#).

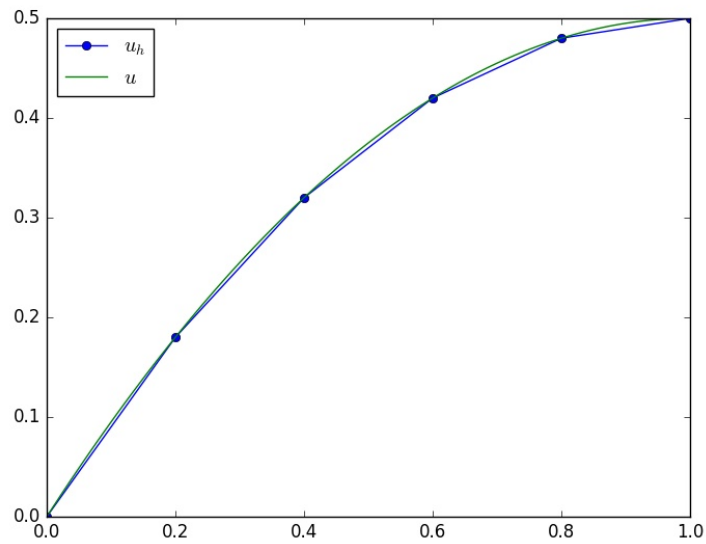


Figura 1.10: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.3.4.

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#tolerance
tol=1e-14

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaço
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

u_D = Constant(0.0)

def boundary(x,on_boundary):
    return near(x[0],0,tol)
```

```

bc = DirichletBC(V,u_D,boundary)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = u.dx(0)*v.dx(0)*dx
L = f*v*dx

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]',
                degree=2)

#erro L2
print("Erro L2: %1.2E\n" % errornorm(u,ua,norm_type="L2"))

plot(u,mesh=mesh,marker='o',label=r"$u_h$")
mesh = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=mesh,label=r"$u$")
plt.legend(numpoints=1,loc='upper left')
plt.show()

```

Agora, consideremos o seguinte problema com condições de Neumann não-homogênea em $x = L$: encontrar u tal que

$$-u'' = f, \quad \forall x \in I = [0, L], \quad (1.109)$$

$$u(0) = u_0, \quad u'(L) = \alpha, \quad (1.110)$$

com u_0 , α e f dados.

Tomando uma função teste $v \in V := \{v \in H^1(I); v(0) = 0\}$ e multiplicando-a em (1.109), obtemos

$$-\int_I u'' v \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.111)$$

Aplicando a integração por partes, temos

$$\int_I u'v' dx - \alpha v(L) = \int_I f c dx. \quad (1.112)$$

Desta forma, definimos o seguinte problema fraco associado: encontrar $u \in \tilde{V} := \{v \in H^1(I); v(0) = u_0\}$ tal que

$$a(u,v) - b(= L(v), \quad \forall v \in V, \quad (1.113)$$

onde $a(u,v)$ é a forma bilinear

$$a(u,v) = \int_I u'v' dx \quad (1.114)$$

e $L(v)$ é a forma linear

$$L(v) = \int_I f v dx + \alpha v(L). \quad (1.115)$$

Exemplo 1.3.3. Consideremos o problema

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.116)$$

$$u(0) = 0, \quad u'(1) = 1. \quad (1.117)$$

Sua solução analítica é $u(x) = -x^2/2 + 2x$. A Figura 1.11 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica u e da sua aproximação de elementos finitos u_h , esta construída no espaço dos polinômios lineares por partes sobre uma malha uniforme de 5 células.

Com o [FENiCS](#), a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte [código](#):

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#tolerance
tol=1e-14

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)
```

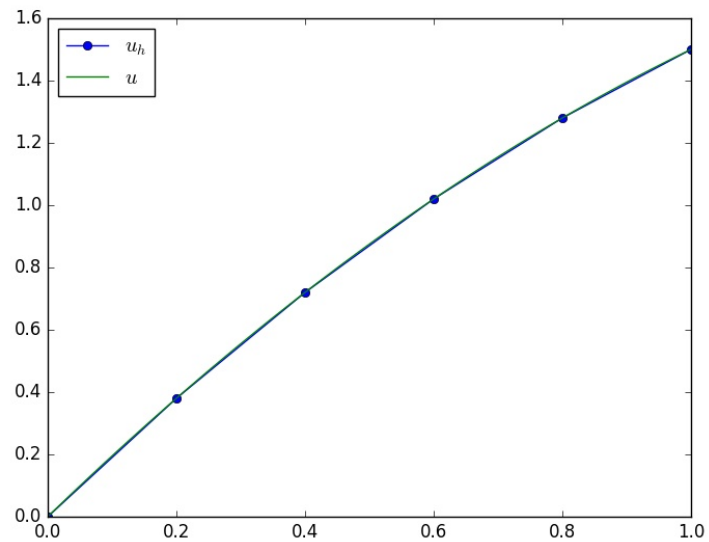


Figura 1.11: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.3.3.

```
# espaço
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

u_D = Constant(0.0)

def boundary_D(x,on_boundary):
    return near(x[0],0,tol)

bc = DirichletBC(V,u_D,boundary_D)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = u.dx(0)*v.dx(0)*dx
L = f*v*dx + 1*v*ds
```

```

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+2*x[0]',
                 degree=2)

#erro L2
print("Erro L2: %1.2E\n" % errornorm(u,ua,norm_type="L2"))

plot(u,mesh=mesh,marker='o',label=r"$u_h$")
mesh = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=mesh,label=r"$u$")
plt.legend(numpoints=1,loc='upper left')
plt.show()

```

1.3.3 Condições de Robin

Consideremos o seguinte problema com condições de contorno de Robin⁶: encontrar u tal que

$$-u'' = f, \quad \forall x \in I = [0, L], \quad (1.118)$$

$$u'(0) = r_0(u(0) - s_0), \quad -u'(L) = r_L(u(L) - s_L), \quad (1.119)$$

com r_0, r_L, s_0, s_L e f dados.

Tomando uma função teste $v \in V = H^1(I)$ e multiplicando-a em (1.118), obtemos

$$-\int_I u'' v \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.120)$$

Aplicando a integração por partes, temos

$$\int_I u' v' \, dx - \underbrace{u'(L)v(L)}_{-u'(L)=r_L(u(L)-s_L)} + \underbrace{u'(0)v(0)}_{u'(0)=r_0(u(0)-s_0)} = \int_I f v \, dx. \quad (1.121)$$

ou, mais adequadamente,

$$\int_I u' v' \, dx + r_L u(L)v(L) + r_0 u(0)v(0) = \int_I f v \, dx + r_L s_L v(L) + r_0 s_0 v(0). \quad (1.122)$$

⁶Victor Gustave Robin, 1855 - 1897, matemático francês. Fonte: [Wikipedia](#).

Desta forma, definimos o seguinte problema fraco associado: encontrar $u \in H^1(I)$ tal que

$$a(u,v) = L(v), \quad \forall v \in V, \quad (1.123)$$

onde $a(u,v)$ é a forma bilinear

$$a(u,v) = \int_I u'v' dx + r_L u(L)v(L) + r_0 u(0)v(0) \quad (1.124)$$

e $L(v)$ é a forma linear

$$L(v) = \int_I f v dx + r_L s_L v(L) + r_0 s_0 v(0). \quad (1.125)$$

Exemplo 1.3.4. Consideremos o problema

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.126)$$

$$u'(0) = u(0), \quad -u'(1) = u(1) - 1. \quad (1.127)$$

Sua solução analítica é $u(x) = -x^2/2 + 5x/6 + 5/6$. A Figura 1.12 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica u e da sua aproximação de elementos finitos u_h , esta construída no espaço dos polinômios lineares por partes sobre uma malha uniforme de 5 células.

Com o [FENiCS](#), a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte [código](#):

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#tolerance
tol=1e-14

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
```

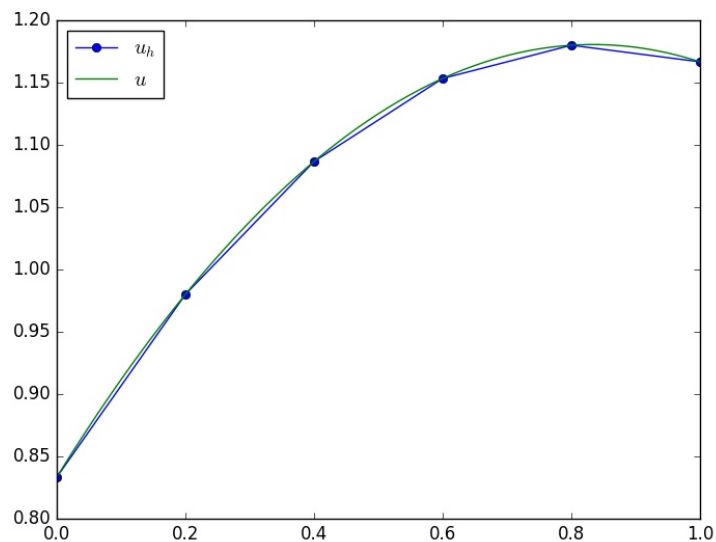


Figura 1.12: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo ??.

```
#marcadores de fronteiras
boundary_markers = FacetFunction('size_t', mesh)

class BoundaryX0(SubDomain):
    def inside(self, x, on_boundary):
        return on_boundary and near(x[0], 0, tol)
bx0 = BoundaryX0()
bx0.mark(boundary_markers, 0)

class BoundaryX1(SubDomain):
    def inside(self, x, on_boundary):
        return on_boundary and near(x[0], 1, tol)
bx1 = BoundaryX1()
bx1.mark(boundary_markers, 1)

ds = Measure('ds', domain=mesh, \
             subdomain_data=boundary_markers)
```

```

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = u.dx(0)*v.dx(0)*dx + u*v*ds(1) + u*v*ds(0)
L = f*v*dx + 1*v*ds(1)

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u)

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+5*x[0]/6+5./6',
                degree=2)

#erro L2
print("Erro L2: %1.2E\n" % errornorm(u,ua,norm_type="L2"))

plot(u,mesh=mesh,marker='o',label=r"$u_h$")
mesh = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=mesh,label=r"$u$")
plt.legend(numpoints=1,loc='upper left')
plt.show()

```

Exercícios

E 1.3.1. Considere o problema

$$-u'' + u' + 2u = -\cos(x), \quad x \in (0, \pi/2), \quad (1.128)$$

$$u(0) = -0,3, \quad u(\pi/2) = -0,1. \quad (1.129)$$

Obtenha uma aproximação por elementos finitos para a solução deste problema, empregando o espaço de elementos finitos linear sobre uma malha uniforme com 10 células. Então, compare a aproximação computada com sua solução analítica $u(x) = 0,1(\sin(x) + 3\cos(x))$, bem como, compute o erro $\|u - u_h\|_{L^2}$.

Em construção ...

Resposta dos Exercícios

E 1.3.1. [Código](#).

Referências Bibliográficas

- [1] Hans Petter Langtangen and Anders Logg. *Solving PDEs in Python*. Springer, 2017.
- [2] M.G. Larson and F. Bengson. *The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications*. Springer, 2013.

Índice Remissivo

graus de liberdade, [1](#)

malha, [2](#)

operador

interpolação linear, [2](#)

operador de

projecção L^2 , [10](#)