

TAREAS

Teoría de Elementos Finitos (408634).

Segundo Semestre de 2012

Prof. Gabriel N. Gatica.

1. Sea Ω^- un abierto conexo y acotado de \mathbf{R}^2 con frontera Γ , y sea Ω^+ la region anular acotada por Γ y una curva cerrada Σ cuyo interior contiene a Γ . Además, sean $\gamma_0^- : H^1(\Omega^-) \rightarrow H^{1/2}(\Gamma)$ y $\gamma_0^+ : H^1(\Omega^+) \rightarrow H^{1/2}(\partial\Omega^+) \equiv H^{1/2}(\Gamma) \times H^{1/2}(\Sigma)$ los operadores de trazas respectivos, y denote $\Omega := \Omega^- \cup \Gamma \cup \Omega^+$.

a) Demuestre que $v \in H^1(\Omega)$ si y sólo si:

$$v \in L^2(\Omega), \quad v|_{\Omega^-} \in H^1(\Omega^-), \quad v|_{\Omega^+} \in H^1(\Omega^+), \quad \text{y} \quad \gamma_0^-(v|_{\Omega^-}) = \gamma_0^+(v|_{\Omega^+}) \quad \text{en} \quad \Gamma.$$

Dados $f^- \in L^2(\Omega^-)$, $f^+ \in L^2(\Omega^+)$, $g_\Gamma \in H^{-1/2}(\Gamma)$, y $g_\Sigma \in H^{-1/2}(\Sigma)$, considere el problema de transmisión: Hallar $(u^-, u^+) \in H^1(\Omega^-) \times H^1(\Omega^+)$ tales que

$$\begin{aligned} -\Delta u^- &= f^- \quad \text{en} \quad \Omega^-, \quad -\Delta u^+ = f^+ \quad \text{en} \quad \Omega^+, \\ \gamma_0^-(u^-) &= \gamma_0^+(u^+) \quad \text{en} \quad \Gamma, \quad \gamma_{\boldsymbol{\nu}}^-(\nabla u^-) - \gamma_{\boldsymbol{\nu}}^+(\nabla u^+) = g_\Gamma \quad \text{en} \quad \Gamma, \\ \gamma_{\boldsymbol{\nu}}^+(\nabla u^+) &= g_\Sigma \quad \text{en} \quad \Sigma, \quad \text{y} \quad \int_{\Omega^-} u^- + \int_{\Omega^+} u^+ = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

donde $\gamma_{\boldsymbol{\nu}}^- : H(\text{div}; \Omega^-) \rightarrow H^{-1/2}(\Gamma)$ y $\gamma_{\boldsymbol{\nu}}^+ : H(\text{div}; \Omega^+) \rightarrow H^{-1/2}(\partial\Omega^+) \equiv H^{-1/2}(\Gamma) \times H^{-1/2}(\Sigma)$ son los operadores de trazas normales respectivos ($\boldsymbol{\nu}$ apunta hacia Ω^+ en Γ y hacia el exterior de Ω^+ en Σ).

- b) Utilice identidades de Green en espacios de Sobolev convenientes y deduzca una formulación variacional de (1) con incógnita en un subespacio cerrado V de $H^1(\Omega)$.
- c) Identifique una condición de compatibilidad sobre los datos, y demuestre en tal caso que la formulación obtenida en b) posee una única solución, la cual depende continuamente de f^- , f^+ , g_Γ , y g_Σ .
- d) Pruebe que el esquema de Galerkin asociado es convergente para cualquier familia numerable $\{V_h\}_{h>0}$ de subespacios de dimensión finita de V tales que $\lim_{h \rightarrow 0} \text{dist}(v, V_h) = 0 \quad \forall v \in V$.
- e) Demuestre que la formulación obtenida en b) es equivalente a una formulación variacional mixta con incógnita en $H^1(\Omega) \times \mathbf{R}$, y verifique que ella satisface las hipótesis del Teorema de Babuška-Brezzi.

2. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera Γ Lipschitz-continua y defina

$$\mathcal{D}(\Gamma) := \{v|_{\Gamma} : v \in C_0^\infty(\mathbf{R}^n)\}.$$

Pruebe que $H^{1/2}(\Gamma) \subseteq \overline{\mathcal{D}(\Gamma)}^{\|\cdot\|_{0,\Gamma}}$ y $H^{1/2}(\Gamma) = \overline{\mathcal{D}(\Gamma)}^{\|\cdot\|_{1/2,\Gamma}}$.

3. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera Γ Lipschitz-continua, y considere la aplicación $\|\cdot\| : H^1(\Omega) \rightarrow \mathbf{R}$ definida por

$$\|\|v\|\| := \left\{ |v|_{1,\Omega}^2 + \|\gamma_0(v)\|_{0,\Gamma}^2 \right\}^{1/2} \quad \forall v \in H^1(\Omega),$$

donde $\gamma_0 : H^1(\Omega) \rightarrow H^{1/2}(\Gamma)$ es el operador de trazas usual. Utilice un argumento análogo al de la demostración de la desigualdad de Poincaré generalizada para probar que $\|\cdot\|_{1,\Omega}$ y $\|\| \cdot \|\|$ son equivalentes en $H^1(\Omega)$.

4. Sean $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle_H, \|\cdot\|_H)$ un espacio de Hilbert real y $A : H \times H \rightarrow \mathbf{R}$ una forma bilineal acotada con operador inducido $\mathbf{A} \in \mathcal{L}(H, H)$. Suponga que existen operadores $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2 \in \mathcal{L}(H, H)$ y constantes $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ tales que

$$\langle \mathbf{S}_1^* \mathbf{A}(\tau), \tau \rangle_H \geq \alpha_1 \|\tau\|_H^2 \quad \text{y} \quad \langle \mathbf{A} \mathbf{S}_2(\tau), \tau \rangle_H \geq \alpha_2 \|\tau\|_H^2 \quad \forall \tau \in H.$$

a) Pruebe que para todo $F \in H'$ existe un único $\sigma \in H$ tal que

$$A(\sigma, \tau) = F(\tau) \quad \forall \tau \in H, \quad (2)$$

y deduzca la existencia de $C > 0$, independiente de F , tal que

$$\|\sigma\|_H \leq C \|F\|_{H'}.$$

b) Sea $\{H_h\}_{h>0}$ una familia numerable de subespacios de dimensión finita de H tal que $\lim_{h \rightarrow 0} \text{dist}(\tau, H_h) = 0 \quad \forall \tau \in H$, y, dado $F \in H'$, considere el esquema de Galerkin: Hallar $\sigma_h \in H_h$ tal que

$$A(\sigma_h, \tau_h) = F(\tau_h) \quad \forall \tau_h \in H_h. \quad (3)$$

Suponga que para $i = 1$ o para $i = 2$ (pero no para ambos), existen operadores inyectivos $\mathbf{S}_{i,h} \in \mathcal{L}(H_h, H_h)$ para todo $h > 0$, y constantes $C_i, \delta > 0$, independientes de h , tales que

$$\|\mathbf{S}_i(\tau_h) - \mathbf{S}_{i,h}(\tau_h)\|_H \leq C_i h^\delta \|\mathbf{S}_i(\tau_h)\|_H \quad \forall \tau_h \in H_h.$$

Demuestre que existe $h_0 > 0$ tal que para todo $h \leq h_0$ el problema (21) tiene solución única, es estable, y se verifica la estimación de Cea.

c) Qué puede decir sobre las hipótesis para a) y b) si A es simétrica ?

5. Sean $(X, \langle \cdot, \cdot \rangle_X)$, $(Y, \langle \cdot, \cdot \rangle_Y)$ espacios de Hilbert y considere operadores $\mathbf{P} \in \mathcal{L}(X, X)$, $Q \in \mathcal{L}(X, Y)$ y $\mathbf{S} \in \mathcal{L}(Y, Y)$. Suponga que \mathbf{S} es semi-definido positivo, esto es $\langle \mathbf{S}(y), y \rangle_Y \geq 0 \quad \forall y \in Y$, y que existen constantes $\alpha, \beta > 0$ tales que

$$\langle \mathbf{P}x, x \rangle_X \geq \alpha \|x\|_X^2 \quad \forall x \in X \quad \text{y} \quad \sup_{\substack{x \in X \\ x \neq 0}} \frac{\langle Q(x), y \rangle_Y}{\|x\|_X} \geq \beta \|y\|_Y \quad \forall y \in Y.$$

- a) Dados $f \in X$ y $g \in Y$, demuestre que existe un único par $(\bar{x}, \bar{y}) \in X \times Y$ tal que

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} & Q^* \\ Q & -\mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix}.$$

- b) Sea $X_h \times Y_h$ un subespacio de dimensión finita de $X \times Y$. Defina explícitamente el esquema de Galerkin asociado y demuestre que se satisface la estimación de Céa correspondiente.

6. Sean $(X, \langle \cdot, \cdot \rangle_X)$, $(Y, \langle \cdot, \cdot \rangle_Y)$ espacios de Hilbert y considere operadores $\mathbf{P} : X \rightarrow X$, $Q \in \mathcal{L}(X, Y)$ y $\mathbf{S} \in \mathcal{L}(Y, Y)$. Suponga que \mathbf{S} es semi-definido positivo, esto es $\langle \mathbf{S}(y), y \rangle_Y \geq 0 \quad \forall y \in Y$, que \mathbf{P} es **NOLINEAL**, y que existen constantes $M, \alpha, \beta > 0$ tales que

$$\|\mathbf{P}x - \mathbf{P}\bar{x}\|_X \leq M \|x - \bar{x}\|_X \quad , \quad \langle \mathbf{P}x - \mathbf{P}\bar{x}, x - \bar{x} \rangle_X \geq \alpha \|x - \bar{x}\|_X^2 \quad \forall x, \bar{x} \in X,$$

y

$$\sup_{\substack{x \in X \\ x \neq 0}} \frac{\langle Q(x), y \rangle_Y}{\|x\|_X} \geq \beta \|y\|_Y \quad \forall y \in Y.$$

- a) Dados $f \in X$ y $g \in Y$, demuestre que existe un único par $(\tilde{x}, \tilde{y}) \in X \times Y$ tal que

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} & Q^* \\ Q & -\mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix}.$$

- b) Sea $X_h \times Y_h$ un subespacio de dimensión finita de $X \times Y$. Defina explícitamente el esquema de Galerkin asociado y demuestre que se satisface la estimación de Céa correspondiente.

7. a) Sea S un subespacio de un Hilbert H . Demuestre que $S^\perp = \bar{S}^\perp$.
 b) Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera suave Γ , y considere el espacio de Sobolev $H^1(\Omega)$. Encuentre y caracterice el subespacio V de $H^1(\Omega)$ tal que $H^1(\Omega) = H_0^1(\Omega) \oplus V$.

8. (LEMA DE STRANG). Sean H un espacio de Hilbert, $A : H \times H \rightarrow \mathbf{R}$ una forma bilineal acotada y H -elíptica, y $F \in H'$. Además, sea $\{H_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ una sucesión de subespacios de dimensión finita de H , y para cada $n \in \mathbf{N}$ considere un funcional

$F_n \in H'_n$ y una forma bilineal acotada $A_n : H_n \times H_n \rightarrow \mathbf{R}$. Suponga también que existe $\tilde{\alpha} > 0$, independiente de n , tal que $A_n(v_n, v_n) \geq \tilde{\alpha} \|v_n\|_H^2 \quad \forall v_n \in H_n, \forall n \in \mathbf{N}$.

a) Pruebe que existen únicos $u \in H$ y $u_n \in H_n$ tales que

$$A(u, v) = F(v) \quad \forall v \in H \quad \text{y} \quad A_n(u_n, v_n) = F_n(v_n) \quad \forall v_n \in H_n.$$

b) Demuestre que existe $C > 0$, independiente de $n \in \mathbf{N}$, tal que

$$\|u - u_n\|_H \leq C \inf_{v_n \in H_n} \left\{ \|u - v_n\|_H + \sup_{\substack{w_n \in H_n \\ w_n \neq 0}} \frac{|A(v_n, w_n) - A_n(v_n, w_n)|}{\|w_n\|_H} \right\} \\ + C \left\{ \sup_{\substack{w_n \in H_n \\ w_n \neq 0}} \frac{|F(w_n) - F_n(w_n)|}{\|w_n\|_H} \right\}.$$

9. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera Γ suficientemente suave, y defina

$$V := \left\{ v \in H^2(\Omega) : \int_{\Omega} v p dx = 0 \quad \forall p \in \mathbf{P}_1(\Omega) \right\},$$

donde $\mathbf{P}_1(\Omega)$ es el espacio de polinomios de grado ≤ 1 sobre Ω . Demuestre que la norma $\|\cdot\|_{H^2(\Omega)}$ y la seminorma $|\cdot|_{H^2(\Omega)}$ son equivalentes en V .

10. Sean $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle_H)$ y $(Q, \langle \cdot, \cdot \rangle_Q)$ espacios de Hilbert, y sea $\mathbf{B} \in \mathcal{L}(H, Q)$ con espacio nulo $V := N(\mathbf{B})$.

a) Demuestre que $\sup_{\substack{v \in H \\ v \neq 0}} \frac{\langle \mathbf{B}(v), q \rangle_Q}{\|v\|_H} = \sup_{\substack{v \in V^\perp \\ v \neq 0}} \frac{\langle \mathbf{B}(v), q \rangle_Q}{\|v\|_H} \quad \forall q \in Q$.

b) Suponga que existe $\beta > 0$ tal que $\sup_{\substack{v \in V^\perp \\ v \neq 0}} \frac{\langle \mathbf{B}(v), q \rangle_Q}{\|v\|_H} \geq \beta \|q\|_Q \quad \forall q \in Q$, y pruebe que $H = R(\mathbf{B}^*) \oplus V$.

11. (LEMA DE AUBIN-NITSCHÉ). Sean $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle_H)$, $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$ espacios de Hilbert tal que $V \subseteq H$ y el operador identidad $\mathbf{i} : V \rightarrow H$ es continuo. Sea $A : V \times V \rightarrow \mathbf{R}$ una forma bilineal acotada y V -elíptica, y considere el operador $\mathbf{P} : H \rightarrow V$, donde para todo $g \in H$, $\mathbf{P}(g)$ es el único elemento en V que satisface

$$A(v, \mathbf{P}(g)) = \langle g, v \rangle_H \quad \forall v \in V.$$

Dados $F \in V'$ y V_h un subespacio de dimensión finita de V , denote por $u \in V$ y $u_h \in V_h$ las únicas soluciones de los esquemas continuo y de Galerkin, respectivamente, esto es

$$A(u, v) = F(v) \quad \forall v \in V,$$

y

$$A(u_h, v_h) = F(v_h) \quad \forall v_h \in V_h.$$

Demuestre que existe $C > 0$ tal que

$$\|u - u_h\|_H \leq C \|u - u_h\|_V \sup_{g \in H} \left\{ \frac{1}{\|g\|_H} \inf_{v_h \in V_h} \|\mathbf{P}(g) - v_h\|_V \right\}.$$

12. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera Γ de clase $C^{0,1}$. Dada $f \in [L^2(\Omega)]^2$, nos interesa el siguiente problema de elasticidad lineal: *Hallar el desplazamiento $u \in [H^1(\Omega)]^2$ y el tensor de esfuerzos $\sigma \in H(\text{div}; \Omega)$ tal que*

$$\sigma = \mathcal{C} \mathbf{e}(u) := \lambda \text{tr} \mathbf{e}(u) I_2 + 2\mu \mathbf{e}(u) \quad \text{en } \Omega,$$

$$\text{div} \sigma = -f \quad \text{en } \Omega, \quad u = 0 \quad \text{en } \Gamma,$$

donde $\lambda, \mu > 0$ son las constantes de Lamé, I_2 es la matriz identidad de $\mathbf{R}^{2 \times 2}$, y $\mathbf{e}(u) := \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^\mathbf{t})$ es el tensor de deformaciones. Es fácil verificar que $\mathbf{e}(u)$ puede re-escribirse como

$$\mathbf{e}(u) = \nabla u - \gamma \quad \text{en } \Omega,$$

donde $\gamma := \frac{1}{2} (\nabla u - (\nabla u)^\mathbf{t})$ es una nueva incógnita (llamada rotación) que vive en el espacio $\mathcal{R} := \{ \eta \in [L^2(\Omega)]^{2 \times 2} : \eta + \eta^\mathbf{t} = 0 \}$.

- a) Demuestre que una formulación variacional MIXTA de este problema se reduce a: *Hallar $(\sigma, (u, \gamma)) \in H \times Q$ tal que*

$$\begin{aligned} a(\sigma, \tau) + b(\tau, (u, \gamma)) &= 0 \quad \forall \tau \in H, \\ b(\sigma, (v, \eta)) &= - \int_{\Omega} f \cdot v \, dx \quad \forall (v, \eta) \in Q, \end{aligned} \quad (4)$$

donde $H := \{ \tau \in H(\text{div}; \Omega) : \int_{\Omega} \text{tr}(\tau) = 0 \}$, $Q := [L^2(\Omega)]^2 \times \mathcal{R}$, $a : [L^2(\Omega)]^{2 \times 2} \times [L^2(\Omega)]^{2 \times 2} \rightarrow \mathbf{R}$, $b : H(\text{div}; \Omega) \times Q \rightarrow \mathbf{R}$ son las formas bilineales definidas por:

$$a(\sigma, \tau) := \frac{1}{2\mu} \int_{\Omega} \sigma : \tau \, dx - \frac{\lambda}{4\mu(\lambda + \mu)} \int_{\Omega} \text{tr}(\sigma) \text{tr}(\tau) \, dx \quad \forall \sigma, \tau \in [L^2(\Omega)]^{2 \times 2},$$

$$b(\tau, (v, \eta)) := \int_{\Omega} v \cdot \text{div} \tau \, dx + \int_{\Omega} \tau : \eta \, dx \quad \forall (\tau, (v, \eta)) \in H(\text{div}; \Omega) \times Q.$$

- b) Demuestre que a y b satisfacen las hipótesis de la teoría de Babuska-Brezzi.
c) Sea $(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3)$ un vector de parámetros positivos y considere las siguientes ecuaciones del tipo Galerkin-residuales:

$$\kappa_1 \int_{\Omega} (\mathbf{e}(u) - \mathcal{C}^{-1} \sigma) : (\mathbf{e}(v) + \mathcal{C}^{-1} \tau) = 0, \quad (5)$$

$$\kappa_2 \int_{\Omega} \operatorname{div}(\sigma) \cdot \operatorname{div}(\tau) = -\kappa_2 \int_{\Omega} f \cdot \operatorname{div}(\tau), \quad (6)$$

y

$$\kappa_3 \int_{\Omega} \left(\gamma - \frac{1}{2}(\nabla u - (\nabla u)^{\dagger}) \right) : \left(\eta + \frac{1}{2}(\nabla v - (\nabla v)^{\dagger}) \right) = 0, \quad (7)$$

para todo $(\tau, v, \eta) \in H \times [H_0^1(\Omega)]^2 \times \mathcal{R}$. Demuestre que κ_1 , κ_2 y κ_3 pueden elegirse explícitamente, y dependiendo sólo de μ , de modo que la formulación variacional que resulta al restar la segunda de la primera ecuación en (4), y luego sumar (5), (6) y (7), satisface las hipótesis del Lema de Lax-Milgram.

13. Sea $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n < x_{n+1} = b$ una partición del intervalo $\Omega := (a, b)$. Sea H_n un espacio de funciones definidas sobre Ω y para cada $i \in \{1, \dots, n+1\}$ denote por $H_{n,i}$ el espacio de restricciones de H_n al subintervalo $[x_{i-1}, x_i]$.

- a) Demuestre que si $H_n \subseteq C(\bar{\Omega})$ y $H_{n,i} \subseteq H^1(x_{i-1}, x_i) \forall i \in \{1, \dots, n+1\}$, entonces $H_n \subseteq H^1(\Omega)$.
- b) Demuestre que si $H_n \subseteq C^1(\bar{\Omega})$ y $H_{n,i} \subseteq H^2(x_{i-1}, x_i) \forall i \in \{1, \dots, n+1\}$, entonces $H_n \subseteq H^2(\Omega)$.

14. a) Para cada $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ encuentre el único polinomio p_j de grado ≤ 3 tal que $(p_j(0), p_j'(0), p_j(1), p_j'(1))^{\dagger} = \mathbf{e}_j^{\dagger}$, donde \mathbf{e}_j es el j -ésimo vector de la base canónica de \mathbf{R}^4 .

b) Sea $0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n < x_{n+1} = 1$ una partición UNIFORME de $\Omega := (0, 1)$. Para todo $i \in \{1, \dots, n+1\}$ y para cada $j \in \{1, 2, 3, 4\}$, encuentre el polinomio $p_{i,j}$ de grado ≤ 3 tal que $(p_{i,j}(x_{i-1}), p_{i,j}'(x_{i-1}), p_{i,j}(x_i), p_{i,j}'(x_i))^{\dagger} = \mathbf{e}_j^{\dagger}$. (INDICACIÓN: Denote $h := \frac{1}{n+1}$ y utilice lo obtenido en a) en conjunto con un cambio de variable afin entre $[0, 1]$ y $[x_{i-1}, x_i]$).

c) Para cada $i \in \{1, \dots, n+1\}$ denote por \mathcal{P}_i al espacio de funciones definidas sobre $[x_{i-1}, x_i]$, generado por los polinomios $p_{i,j}$, $j \in \{1, 2, 3, 4\}$, y defina el espacio de elementos finitos

$$H_n := \{v \in C^1(\bar{\Omega}) : v(0) = v'(0) = v(1) = v'(1) = 0, \quad y \\ v|_{[x_{i-1}, x_i]} \in \mathcal{P}_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n+1\}\}.$$

Pruebe que $H_n \subseteq H_0^2(\Omega) := \{v \in H^2(\Omega) : v(0) = v'(0) = v(1) = v'(1) = 0\}$, y defina explícitamente una base de H_1 .

d) Considere el problema de valores de contorno

$$\begin{aligned} u^{(4)} &= f \quad \text{en } \Omega, \\ u(0) = u'(0) &= u(1) = u'(1) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

donde $f(x) = x$ para todo $x \in \Omega$. Demuestre que la formulación débil de (8) se reduce a encontrar $u \in H_0^2(\Omega)$ tal que

$$\int_{\Omega} u'' v'' dx = \int_{\Omega} x v dx \quad \forall v \in H_0^2(\Omega). \quad (9)$$

Establezca el esquema de Galerkin asociado a (9) utilizando el espacio de elementos finitos H_1 definido en c), y calcule el vector de carga respectivo.

15. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera Γ de clase $C^{0,1}$, y defina el espacio $V := \{v \in H^2(\Omega) : \gamma_0 v = 0 \text{ en } \Gamma\}$. Demuestre que existe $C > 0$ tal que $\|v\|_{H^1(\Omega)} \leq C \|\Delta v\|_{L^2(\Omega)} \quad \forall v \in V$. Concluya que la norma $\|\cdot\|_{H^2(\Omega)}$ y la seminorma $|\cdot|_{H^2(\Omega)}$ son equivalentes en V .

16. Sea H un espacio de Hilbert, y sea $\{H_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ una sucesión de subespacios de dimensión finita de H tal que $H_{n-1} \subset H_n \quad \forall n \in \mathbf{N}$, y $\cup_{n \in \mathbf{N}} H_n$ es denso en H . Sea $B : H \times H \rightarrow \mathbf{R}$ una forma bilineal acotada y suponga que para todo $f \in H'$ existe una única sucesión $\{u_n(f)\}_{n \in \mathbf{N}} \subseteq H$ tal que

$$u_n(f) \in H_n \quad , \quad B(u_n(f), v_n) = f(v_n) \quad \forall v_n \in H_n ,$$

y $\|u_n(f)\| \leq C_0 \|f\| \quad \forall n \in \mathbf{N}$, donde C_0 es una constante positiva independiente de n y de f . Suponga además que para todo $f \in H'$ existe un único $u(f) \in H$ tal que

$$B(u(f), v) = f(v) \quad \forall v \in H .$$

Demuestre que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \|u(f) - u_n(f)\| = 0 \quad \forall f \in H' .$$

IND.: Defina la proyección de Galerkin $P_n : H \rightarrow H_n$, donde $\forall v \in H$, $P_n v$ denota la única solución de $B(P_n v, w_n) = B(v, w_n) \quad \forall w_n \in H_n$ y observe que $P_n u(f) = u_n(f)$.

17. Sea Ω un dominio acotado de \mathbf{R}^2 con frontera suave Γ . Considere el problema de valores de contorno:

$$-\Delta u = f \quad \text{en } \Omega$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} = g \quad \text{en } \Gamma \tag{10}$$

$$\int_{\Omega} u \, dx = a_1 ,$$

donde $a_1 \in \mathbf{R}$, $f \in L^2(\Omega)$, y $g \in L^2(\Gamma)$ satisfacen la condición de compatibilidad

$$\int_{\Omega} f \, dx + \int_{\Gamma} g \, ds = 0 .$$

Demuestre que una formulación débil de (10) consiste en: Hallar $(u, \lambda) \in H^1(\Omega) \times \mathbf{R}$ tal que

$$\int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx + \lambda \int_{\Omega} v \, dx = \int_{\Omega} f v \, dx + \int_{\Gamma} g v \, ds ,$$

$$\mu \int_{\Omega} u \, dx = \mu a_1 ,$$

para todo $(v, \mu) \in H^1(\Omega) \times \mathbf{R}$. Utilice la teoría de Babuska-Brezzi para probar que este problema tiene única solución, la cual depende continuamente de los datos.

18. Sea $\Omega := (0, 3)$ y considere el problema de valores de contorno: $-u'' + (x+1)u = x$ en Ω , $u(0) = u(3) = 0$. Deduzca la formulación débil respectiva y demuestre que ella tiene una única solución $u \in H_0^1(\Omega)$. Considere la partición uniforme $0 = x_0 < x_1 = 1 < x_2 = 2 < x_3 = 3$ y establezca el sistema de Galerkin asociado usando el subespacio

$$H_2 := \{v \in C(\bar{\Omega}) : v(0) = v(3) = 0 \text{ y } v|_{[x_j, x_{j-1}]} \text{ es un polinomio de grado } \leq 1, \forall j \in \{1, 2, 3\}\}.$$

IND.: Notar que $H_2 = \langle \{e_1, e_2\} \rangle$, donde $e_j \in H_2$ es tal que $e_j(x_i) = \delta_{ij}$ para todo $i, j \in \{1, 2\}$.

19. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera suave Γ , y sea $f \in [L^2(\Omega)]^2$. EL PROBLEMA DE STOKES consiste en encontrar el vector de velocidades $u := (u_1, u_2)$ y la presión p de un fluido, tales que

$$\begin{aligned} -\Delta u + \nabla p &= f \quad \text{en } \Omega, \\ \operatorname{div} u &= 0 \quad \text{en } \Omega, \end{aligned} \tag{11}$$

$$u = 0 \quad \text{en } \Gamma, \quad \int_{\Omega} p \, dx = 0.$$

- i) Defina los espacios $H := [H_0^1(\Omega)]^2$ y $Q := \{q \in L^2(\Omega) : \int_{\Omega} q \, dx = 0\}$, y demuestre que la formulación débil de (11) se reduce a: encontrar $(u, p) \in H \times Q$ tales que:

$$\begin{aligned} A(u, v) + B(v, p) &= F(v) \quad \forall v \in H, \\ B(u, q) &= 0 \quad \forall q \in Q, \end{aligned}$$

donde $A : H \times H \rightarrow \mathbf{R}$, $B : H \times Q \rightarrow \mathbf{R}$ y $F \in H'$, están definidos por

$$A(u, v) := \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} \nabla u_i \cdot \nabla v_i \, dx,$$

$$B(v, p) := - \int_{\Omega} p \operatorname{div} v \, dx, \quad F(v) = \int_{\Omega} f \cdot v \, dx.$$

- ii) Aplique la teoría de Babuška-Brezzi para probar que esta formulación tiene una única solución.
20. i) Calcule las funciones base locales del espacio de elementos finitos V_h asociado a una triangulación \mathcal{T}_h hecha de cuadrados de tipo (2).

- ii) Considere el operador Laplaciano y calcule la matriz de rigidez local para el caso particular de un cuadrado de tipo 1 con vértices $(0, 0)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$ y $(0, 1)$
21. Calcule las coordenadas baricéntricas del 3-simplex (tetraedro) K de \mathbf{R}^3 determinado por los vértices $(0, 0, 0)$, $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ y $(0, 0, 1)$, y calcule explícitamente las 4 funciones base de $P_2(K)$ asociadas a dichos vértices.
(Notar que $\dim P_2(K) = \text{card } \Sigma_2 = 10$).
22. Sea Ω un rectángulo de \mathbf{R}^2 , y sea \mathcal{T}_h una triangulación uniforme de $\bar{\Omega}$ hecha de cuadrados K con lados (de longitud h) paralelos a los ejes coordenados. Considere la formulación variacional en $H_0^1(\Omega)$ de la ecuación de Poisson con condiciones de Dirichlet homogéneas, y calcule la matriz de rigidez local para el cuadrado de tipo (1) con vértices (x_1, y_1) , $(x_1 + h, y_1)$, $(x_1 + h, y_1 + h)$ y $(x_1, y_1 + h)$.
23. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera poligonal Γ , y defina $H := H^1(\Omega)$ provisto de su producto escalar usual $\langle \cdot, \cdot \rangle_H$. Considere un operador **NONLINEAL** $T : H \rightarrow H$, **FUERTEMENTE MONÓTONO** y **LIPSCHITZ-CONTINUO**. Esto significa que existen constantes $\alpha, M > 0$ tales que

$$\langle T(v) - T(w), v - w \rangle_H \geq \alpha \|v - w\|_H^2 \quad \text{y} \quad \|T(v) - T(w)\|_H \leq M \|v - w\|_H$$

para todo $v, w \in H$.

- i) Dada $f \in H$, demuestre que existe un único $u \in H$ tal que $T(u) = f$.
- ii) Sea H_h el subespacio de elementos finitos de H que resulta de una triangulación regular \mathcal{T}_h de $\bar{\Omega}$ hecha con triángulos de tipo (1), y considere el esquema de Galerkin asociado: *Hallar $u_h \in H_h$ tal que*

$$\langle T(u_h), v_h \rangle_H = \langle f, v_h \rangle_H \quad \forall v_h \in H_h.$$

Suponga que $u \in H^2(\Omega)$ y demuestre que existe $C > 0$, independiente de h , tal que

$$\|u - u_h\|_H \leq C h |u|_{H^2(\Omega)}.$$

24. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera poligonal, y sea \mathcal{T}_h una triangulación regular de $\bar{\Omega}$ hecha de n -simplex o n -rectángulos, todos ellos afín-equivalentes a un elemento finito de referencia \hat{K} . Como es usual, el parámetro h está dado por $h := \max\{h_K : K \in \mathcal{T}_h\}$, donde h_K es el diámetro de K . Ahora, para todo $K \in \mathcal{T}_h$ se define el operador local $\Pi_K : H^1(K) \rightarrow L^2(K)$ como

$$\Pi_K(v) := \frac{1}{|K|} \int_K v(x) dx \quad \forall v \in H^1(K).$$

Además, se define el operador global $\Pi : H^1(\Omega) \rightarrow L^2(\Omega)$ como

$$\Pi(v)|_K := \Pi_K(v|_K) \quad \forall K \in \mathcal{T}_h, \forall v \in H^1(\Omega).$$

a) Demuestre que existe $C > 0$, que depende sólo de \hat{K} , tal que

$$\|v - \Pi(v)\|_{L^2(\Omega)} \leq C h |v|_{H^1(\Omega)} \quad \forall v \in H^1(\Omega).$$

b) Defina el espacio $H_h := \{v_h \in L^2(\Omega) : v_h|_K \in P_0(K) \forall K \in \mathcal{T}_h\}$, donde $P_0(K)$ denota el espacio de funciones constantes sobre K , y pruebe que

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left\{ \inf_{v_h \in H_h} \|v - v_h\|_{L^2(\Omega)} \right\} = 0 \quad \forall v \in L^2(\Omega).$$

25. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera poligonal Γ . Una formulación variacional MIXTA para la ecuación de Poisson en Ω , con dato $f \in L^2(\Omega)$, y condición de Dirichlet dada por $g \in H^{1/2}(\Gamma)$, consiste en: *Hallar* $(\sigma, u) \in X \times M$ tal que

$$\begin{aligned} A(\sigma, \tau) + B(\tau, u) &= \int_{\Gamma} g \tau \cdot \nu \, ds, \\ B(\sigma, v) &= - \int_{\Omega} f v \, dx, \end{aligned} \quad (1)$$

para todo $(\tau, v) \in X \times M$, donde $X := H(\text{div}; \Omega)$, $M := L^2(\Omega)$, ν es el vector normal unitario exterior a Γ , y las formas bilineales $A : X \times X \rightarrow \mathbf{R}$ y $B : X \times M \rightarrow \mathbf{R}$ están definidas por

$$A(\rho, \tau) := \int_{\Omega} \rho \cdot \tau \, dx \quad \forall \rho, \tau \in X,$$

$$B(\tau, v) := \int_{\Omega} v \, \text{div} \, \tau \, dx \quad \forall (\tau, v) \in X \times M.$$

a) Demuestre que A y B satisfacen las hipótesis de la teoría de Babuska-Brezzi, y concluya que existe $C_0 > 0$ tal que

$$\|(\rho, w)\|_{X \times M} \leq C_0 \sup_{\substack{(\tau, v) \in X \times M \\ \|(\tau, v)\| \leq 1}} \{ A(\rho, \tau) + B(\tau, w) + B(\rho, v) \} \quad (2)$$

para todo $(\rho, w) \in X \times M$.

b) El siguiente objetivo es deducir una ESTIMACIÓN DE ERROR A-POSTERIORI para (1). Para ello, sea $\{\mathcal{T}_h : h \in \mathbf{I}\}$ una familia regular de triangulaciones de $\bar{\Omega}$, donde \mathbf{I} es un conjunto finito de parámetros dado por $\{h_1, \dots, h_m\}$, con $h_j \geq h_{j+1} \forall j \in \{1, \dots, m\}$. Como es usual, el parámetro h está dado por $h := \max\{h_K : K \in \mathcal{T}_h\}$, donde h_K es el diámetro de K . Sea $X_h \times M_h$ un subespacio de elementos finitos de $X \times M$, asociado a la triangulación \mathcal{T}_h , y sea $(\sigma_h, u_h) \in X_h \times M_h$ la solución del esquema de Galerkin correspondiente para la formulación (1).

i) Pruebe que existe un único $\bar{\sigma} \in X$ tal que

$$\langle \bar{\sigma}, \tau \rangle_X = A(\sigma - \sigma_h, \tau) + B(\tau, u - u_h) \quad \forall \tau \in X.$$

ii) Defina $\mathbf{J}(\tau) := \frac{1}{2} \|\tau\|_X^2 - \langle \bar{\sigma}, \tau \rangle_X \quad \forall \tau \in X$, y demuestre que

$$-\frac{1}{2} \|\bar{\sigma}\|_X^2 = \min_{\tau \in X} \mathbf{J}(\tau).$$

iii) Para cada $K \in \mathcal{T}_h$ defina $(\sigma_{h,K}, u_{h,K}) := (\sigma_h, u_h)|_K$, $X_K := H(\text{div}; K)$, $M_K := L^2(K)$, y denote por $A_K : X_K \times X_K \rightarrow \mathbf{R}$ y $B_K : X_K \times M_K \rightarrow \mathbf{R}$, respectivamente, las restricciones de A y B al elemento K . Además, sea $\varphi_h \in H^{1/2}(\cup_{K \in \mathcal{T}_h} \partial K)$ una aproximación de u sobre las fronteras de los elementos K tal que $\varphi_h = g$ en Γ . Entonces, pruebe que existe un único $\hat{\sigma}_K \in X_K$ tal que

$$\langle \hat{\sigma}_K, \tau \rangle_{X_K} = -A_K(\sigma_{h,K}, \tau) - B_K(\tau, u_{h,K}) - \int_{\partial K} \varphi_h \tau \cdot \nu \, ds \quad \forall \tau \in X_K.$$

iv) Defina

$$\mathbf{J}_K(\tau) := \frac{1}{2} \|\tau\|_{X_K}^2 + A_K(\sigma_{h,K}, \tau) + B_K(\tau, u_{h,K}) + \int_{\partial K} \varphi_h \tau \cdot \nu \, ds$$

para todo $\tau \in X_K$, y pruebe que

$$-\frac{1}{2} \|\hat{\sigma}_K\|_{X_K}^2 = \min_{\tau \in X_K} \mathbf{J}_K(\tau).$$

v) Use i), ii), iii) y iv) para demostrar que

$$\|\bar{\sigma}\|_X^2 \leq \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \|\hat{\sigma}_K\|_{X_K}^2.$$

vi) Aplique (2) y v) para concluir que existe $C > 0$, independiente de h , tal que

$$\|(\sigma, u) - (\sigma_h, u_h)\|_{X \times M} \leq C \left\{ \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \eta_K^2 \right\}^{1/2},$$

donde

$$\eta_K^2 := \|\hat{\sigma}_K\|_{X_K}^2 + \|f + \text{div } \sigma_h\|_{L^2(K)}^2 \quad \forall K \in \mathcal{T}_h.$$

26. Sean $\Omega =]a, b[$, $\varphi \in L^2(\Omega)$ tal que $\int_{\Omega} \varphi \, dx = 0$, y considere el problema de valores de contorno: $-z'' = \varphi$, $z'(a) = z'(b) = 0$, $\int_{\Omega} z \, dx = 0$. Defina el espacio $\tilde{H}^1(\Omega) := \{w \in H^1(\Omega) : \int_{\Omega} w \, dx = 0\}$, deduzca una formulación variacional asociada con incógnita y funciones test en $\tilde{H}^1(\Omega)$, y demuestre que ella tiene una única solución.

27. (LEMA DE FORTIN). Sean H, Q espacios de Hilbert, y sea $b : H \times Q \rightarrow \mathbf{R}$ una forma bilineal acotada que satisface la condición inf-sup, es decir, existe $\beta > 0$ tal que:

$$\sup_{\substack{v \in H \\ v \neq 0}} \frac{b(v, q)}{\|v\|_H} \geq \beta \|q\|_Q \quad \forall q \in Q. \quad (12)$$

Sean $\{H_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ y $\{Q_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ sucesiones de subespacios de dimensión finita de H y Q , respectivamente, y asuma que para cada $n \in \mathbf{N}$ existe un operador $\mathcal{P}_n \in \mathcal{L}(H, H_n)$ tal que $b(v - \mathcal{P}_n(v), q_n) = 0 \quad \forall q_n \in Q_n$. Suponga que la familia $\{\mathcal{P}_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ es uniformemente acotada, es decir existe $C > 0$ tal que $\|\mathcal{P}_n\|_{\mathcal{L}(H, H_n)} \leq C$ para todo $n \in \mathbf{N}$, y demuestre que existe $\beta^* > 0$, independiente de n , tal que

$$\sup_{\substack{v_n \in H_n \\ v_n \neq 0}} \frac{b(v_n, q_n)}{\|v_n\|_H} \geq \beta^* \|q_n\|_Q \quad \forall q_n \in Q_n, \quad \forall n \in \mathbf{N}.$$

28. Sea $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ un Hilbert y sea $\mathbf{P} \in \mathcal{L}(H, H)$, no trivial, distinto del operador identidad $\mathbf{I} : H \rightarrow H$, y tal que $\mathbf{P}^2 = \mathbf{P}$. El objetivo de este ejercicio es probar que $\|\mathbf{P}\|_{\mathcal{L}(H, H)} = \|I - \mathbf{P}\|_{\mathcal{L}(H, H)}$, para cuyo efecto se pide proceder como se indica a continuación.

a) Sea S un subespacio de dimensión 2 de H y sea $Q \in \mathcal{L}(S, S)$, no trivial, distinto del operador identidad $I : S \rightarrow S$, y tal que $Q^2 = Q$. Pruebe que $S = R(Q) \oplus R(I - Q)$ y concluya que existen vectores no nulos $p, q, r, s \in S$ que satisfacen $\langle p, q \rangle = \langle r, s \rangle = 1$, tales que

$$Q(v) = \langle q, v \rangle p \quad \text{y} \quad (I - Q)(v) = \langle s, v \rangle r \quad \forall v \in S.$$

b) A partir de la identidad $v = Q(v) + (I - Q)(v) \quad \forall v \in S$, deduzca que $\|p\|^2 \|q\|^2 = \|r\|^2 \|s\|^2 = 1 - \langle p, r \rangle \langle q, s \rangle$ y concluya así que

$$\|Q\|_{\mathcal{L}(S, S)} = \|I - Q\|_{\mathcal{L}(S, S)}.$$

c) Dado $x \in H$ tal que $\|x\| = 1$, considere el subespacio S generado por los vectores x y $\mathbf{P}(x)$ y defina $Q := \mathbf{P}|_S$. Demuestre que $Q \in \mathcal{L}(S, S)$, observe que la dimensión de S es ≤ 2 , y luego pruebe, usando b), que $\|(I - \mathbf{P})(x)\| \leq \|\mathbf{P}\|_{\mathcal{L}(H, H)}$.

d) Concluya, a partir de c), que $\|\mathbf{P}\|_{\mathcal{L}(H, H)} = \|I - \mathbf{P}\|_{\mathcal{L}(H, H)}$.

29. Sea $\Omega :=]a, b[$ y para cada $n \in \mathbf{N}$ introduzca una partición

$$a = x_0 < x_1 < \cdots < x_{n-1} < x_n = b.$$

Además, denote $h := \max \{x_j - x_{j-1} : j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$, defina el espacio

$$V_h := \left\{ v \in L^2(\Omega) : v|_{[x_{j-1}, x_j]} \in \mathbf{P}_0([x_{j-1}, x_j]) \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \right\},$$

y considere el operador $\Pi_h : L^2(\Omega) \rightarrow V_h$ que a cada $v \in L^2(\Omega)$ le asigna su mejor aproximación $\Pi_h(v) \in V_h$ con respecto al producto escalar de $L^2(\Omega)$. Demuestre que existe una constante $C > 0$, independiente de n y de h , tal que

$$\|v - \Pi_h(v)\|_{L^2(\Omega)} \leq C h |v|_{H^1(\Omega)} \quad \forall v \in H^1(\Omega).$$

30. Sean $\Omega :=]0, 1[$, $f \in L^2(\Omega)$, $\kappa \in]0, 2[$, y considere el problema de valores de contorno:

$$u'' + \kappa u = f \quad \text{en } \Omega, \quad u(0) = u(1) = 0. \quad (13)$$

Además, para cada $n \in \mathbf{N}$ introduzca la partición uniforme

$$0 = x_0 < x_1 < \cdots < x_n < x_{n+1} = 1,$$

con $x_j - x_{j-1} = \frac{1}{n+1} \forall j \in \{1, 2, \dots, n+1\}$, y defina el espacio

$$H_n := \left\{ v \in C(\bar{\Omega}) : \begin{array}{l} v|_{[x_{j-1}, x_j]} \in \mathbf{P}_1([x_{j-1}, x_j]) \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n+1\} \\ y \quad v(0) = v(1) = 0 \end{array} \right\}.$$

- a) Establezca la formulación variacional de (13) y demuestre que ella posee una única solución $u \in H_0^1(\Omega)$.
- b) Denote por $u_n \in H_n$ la solución (cuando ella existe) del esquema de Galerkin asociado y pruebe que $\lim_{n \rightarrow \infty} \|u - u_n\|_{H^1(\Omega)} = 0$.
31. Sean Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera Γ de clase $C^{0,1}$, $f \in L^2(\Omega)$, y considere el problema de valores de contorno:

$$-\Delta u = f \quad \text{en } \Omega, \quad u = 0 \quad \text{en } \Gamma.$$

- a) Demuestre que una formulación variacional mixta de este problema se reduce a: Hallar $(\sigma, u) \in H(\text{div}; \Omega) \times L^2(\Omega)$ tal que

$$\int_{\Omega} \sigma \cdot \tau \, dx + \int_{\Omega} u \, \text{div}(\tau) \, dx - \int_{\Omega} v \, \text{div}(\sigma) \, dx = \int_{\Omega} f v \, dx \quad (14)$$

para todo $(\tau, v) \in H(\text{div}; \Omega) \times L^2(\Omega)$.

- b) Dados $\delta_1, \delta_2 > 0$, fundamente la introducción de las ecuaciones

$$\delta_1 \int_{\Omega} (\nabla u - \sigma) \cdot (\nabla v + \tau) \, dx = 0 \quad \forall (\tau, v) \in \mathbf{H} := H(\text{div}; \Omega) \times H_0^1(\Omega), \quad (15)$$

$$\delta_2 \int_{\Omega} \text{div}(\sigma) \, \text{div}(\tau) \, dx = -\delta_2 \int_{\Omega} f \, \text{div}(\tau) \, dx \quad \forall \tau \in H(\text{div}; \Omega), \quad (16)$$

luego sume (14), (15) y (16), y obtenga una formulación variacional mixta modificada: Hallar $(\sigma, u) \in \mathbf{H}$ tal que

$$A((\sigma, u), (\tau, v)) = F(\tau, v) \quad \forall (\tau, v) \in \mathbf{H}, \quad (17)$$

donde $A : \mathbf{H} \times \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{R}$ es una forma bilineal y $F : \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{R}$ es un funcional lineal. Entonces, demuestre que, eligiendo δ_1 y δ_2 convenientemente, el problema (17) posee una única solución, la cual depende continuamente del dato f .

32. Demuestre que $\mathcal{D}(\overline{\mathbf{R}_+^n})$ es denso en $H^1(\mathbf{R}_+^n)$.

33. Sean $\hat{K} = [0, 1]$, $K = [x_{j-1}, x_j]$, $h_j := x_j - x_{j-1} > 0$, y considere la aplicación afín $F : \hat{K} \rightarrow K$ definida por

$$F(\hat{x}) = h_j \hat{x} + x_{j-1} \quad \forall \hat{x} \in \hat{K}.$$

(a) Dado un entero $r \geq 0$, demuestre que $v \in H^r(K)$ sí y sólo sí $\hat{v} := v \circ F \in H^r(\hat{K})$, y en tal caso pruebe que

$$|\hat{v}|_{H^r(\hat{K})} = h_j^{r-1/2} |v|_{H^r(K)}.$$

(b) Sean m, k enteros tal que $0 \leq m \leq k+1$, y sea $\hat{\Pi} \in \mathcal{L}(H^{k+1}(\hat{K}), H^m(\hat{K}))$ tal que $\hat{\Pi}\hat{p} = \hat{p} \quad \forall \hat{p} \in \mathbf{P}_k$, donde \mathbf{P}_k es el espacio de polinomios de grado $\leq k$. Además, sea Π el operador definido por

$$\Pi v = (\hat{\Pi}\hat{v}) \circ F^{-1} \quad \forall v \in H^{k+1}(K).$$

Demuestre que existe $C > 0$, que depende sólo de \hat{K} y $\hat{\Pi}$, tal que

$$\|v - \Pi v\|_{H^m(K)} \leq C h_j^{k+1-m} |v|_{H^{k+1}(K)}.$$

34. Sea Ω un dominio poligonal convexo de \mathbf{R}^2 con frontera Γ , y dado $f \in L^2(\Omega)$, considere la ecuación de Helmholtz con datos de Dirichlet:

$$\Delta u + u = f \quad \text{en } \Omega, \quad u = 0 \quad \text{en } \Gamma. \quad (18)$$

i) Introduzca la incógnita auxiliar $\sigma := \nabla u$ en Ω y pruebe que una formulación variacional mixta de (18) se reduce a: Hallar $\sigma \in H(\text{div}; \Omega)$ tal que

$$\int_{\Omega} \sigma \cdot \tau - \int_{\Omega} \text{div}(\sigma) \text{div}(\tau) = - \int_{\Omega} f \text{div}(\tau) \quad \forall \tau \in H(\text{div}; \Omega). \quad (19)$$

ii) Defina el operador $P : H(\text{div}; \Omega) \rightarrow [L^2(\Omega)]^2$ que a cada $\tau \in H(\text{div}; \Omega)$ le asigna $P(\tau) := \nabla z$, donde $z \in H_0^1(\Omega)$ es la única solución del problema de valores de contorno: $\Delta z = \text{div}(\tau)$ en Ω , $z = 0$ en Γ . Pruebe que P es compacto y que $H(\text{div}; \Omega) = P(H(\text{div}; \Omega)) \oplus (I - P)(H(\text{div}; \Omega))$.

iii) Utilice la descomposición anterior de $H(\text{div}; \Omega)$ para demostrar que (19) se reduce, equivalentemente, a: Hallar $\sigma \in H(\text{div}; \Omega)$ tal que

$$A(\sigma, \tau) + K(\sigma, \tau) = F(\tau) \quad \forall \tau \in H(\text{div}; \Omega), \quad (20)$$

donde A y B son formas bilineales acotadas cuyos operadores inducidos $\mathbf{A} : H(\text{div}; \Omega) \rightarrow H(\text{div}; \Omega)$ y $\mathbf{K} : H(\text{div}; \Omega) \rightarrow H(\text{div}; \Omega)$ son biyectivo y compacto, respectivamente, y F es el funcional dado a la derecha de (19).

IND. Defina el operador $S(\tau) := (I - 2P)(\tau)$ y considere la expresión $A(\tau, S(\tau))$ para probar que A satisface las condiciones inf-sup continuas.

- iv) Sea $\{H_h\}_{h>0}$ una familia de subespacios de dimensión finita de $H(\text{div}; \Omega)$ tal que $\lim_{h \rightarrow 0} \text{dist}(\tau, H_h) = 0$ para todo $\tau \in H(\text{div}; \Omega)$, y considere el esquema de Galerkin perturbado: Hallar $\sigma_h \in H_h$ tal que

$$A(\sigma_h, \tau_h) = F(\tau_h) \quad \forall \tau_h \in H_h. \quad (21)$$

Suponga que existen operadores lineales $\mathcal{E}_h : [H^1(\Omega)]^2 \rightarrow H_h$ tales que

$$\text{div}(\mathcal{E}_h P(\tau_h)) = \text{div}(\tau_h) \quad \forall \tau_h \in H_h,$$

y

$$\|\tau - \mathcal{E}_h(\tau)\|_{[L^2(\Omega)]^2} \leq Ch \|\tau\|_{[H^1(\Omega)]^2} \quad \forall \tau \in [H^1(\Omega)]^2.$$

Demuestre que existe $h_0 > 0$ tal que $\forall h \leq h_0$ el problema (21) tiene solución única, la cual es estable y convergente con constantes independientes de h .

IND. Defina el operador $S_h(\tau) := (I - 2\mathcal{E}_h P)(\tau_h)$ y considere la expresión $A(\tau, S_h(\tau)) = A(\tau, S(\tau)) - A(\tau, S(\tau) - S_h(\tau))$ para probar que A satisface las condiciones inf-sup discretas.

- v) Qué se puede decir del esquema de Galerkin respectivo para (20)?

35. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera Γ de clase $C^{0,1}$. El objetivo de este problema es demostrar que

$$\|\mathbf{e}(\mathbf{v})\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 \geq \frac{1}{2} |\mathbf{v}|_{[H^1(\Omega)]^2}^2 \quad \forall \mathbf{v} \in [H_0^1(\Omega)]^2, \quad (22)$$

donde $\mathbf{e}(\mathbf{v}) := \frac{1}{2} \left\{ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^t \right\}$. Para tal efecto, proceda como sigue.

- i) Dados $\sigma := (\sigma_{ij})$ y $\tau := (\tau_{ij})$ en $\mathbf{R}^{2 \times 2}$, se define el producto tensorial

$$\sigma : \tau := \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{ij} \tau_{ij} \quad \text{y se introducen los subespacios}$$

$$\mathbf{R}_{sim}^{2 \times 2} := \{ \tau \in \mathbf{R}^{2 \times 2} : \tau^t = \tau \} \quad \text{y} \quad \mathbf{R}_{asim}^{2 \times 2} := \{ \tau \in \mathbf{R}^{2 \times 2} : \tau^t = -\tau \}.$$

Pruebe que $\sigma : \tau = 0 \quad \forall \sigma \in \mathbf{R}_{sim}^{2 \times 2}, \quad \forall \tau \in \mathbf{R}_{asim}^{2 \times 2}$.

- ii) Note que $\nabla \mathbf{v} = \mathbf{e}(\mathbf{v}) + \mathbf{w}(\mathbf{v})$, con $\mathbf{w}(\mathbf{v}) := \frac{1}{2} \left\{ \nabla \mathbf{v} - (\nabla \mathbf{v})^t \right\}$, y

recuerde que $\|\tau\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 = \int_{\Omega} \tau : \tau \quad \forall \tau \in [L^2(\Omega)]^{2 \times 2}$, para probar que

$$\|\mathbf{e}(\mathbf{v})\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 - \|\mathbf{w}(\mathbf{v})\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{v} : (\nabla \mathbf{v})^t$$

y

$$\|\mathbf{e}(\mathbf{v})\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 + \|\mathbf{w}(\mathbf{v})\|_{[L^2(\Omega)]^{2 \times 2}}^2 = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{v} : \nabla \mathbf{v}.$$

iii) Deduzca la identidad $\nabla \mathbf{v} : (\nabla \mathbf{v})^t = \operatorname{div} \left\{ \nabla \mathbf{v} \mathbf{v} - \operatorname{div}(\mathbf{v}) \mathbf{v} \right\} + (\operatorname{div}(\mathbf{v}))^2$ y concluya la desigualdad (22).

36. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera Γ poligonal y sea $f \in [L^2(\Omega)]^2$. El problema de elasticidad lineal plana asociado a un sólido que ocupa Ω , y que está sometido a la fuerza f , consiste en encontrar el desplazamiento u tal que:

$$\operatorname{div} \left\{ \lambda \operatorname{tr} \mathbf{e}(u) I + 2\mu \mathbf{e}(u) \right\} = -f \quad \text{en } \Omega \quad \text{y} \quad u = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma, \quad (23)$$

donde $\lambda, \mu > 0$ son las constantes de Lamé, tr denota el operador de trazas matricial, $\mathbf{e}(u)$ es el tensor de deformaciones (definido en el problema anterior), e I es la matriz identidad de $\mathbf{R}^{2 \times 2}$. Demuestre que la formulación variacional de (29) se reduce a: Hallar $u \in [H_0^1(\Omega)]^2$ tal que

$$\int_{\Omega} \left\{ \lambda \operatorname{div}(u) \operatorname{div}(\mathbf{v}) + 2\mu \mathbf{e}(u) : \mathbf{e}(\mathbf{v}) \right\} = \int_{\Omega} f \cdot \mathbf{v} \quad \forall \mathbf{v} \in [H_0^1(\Omega)]^2,$$

y pruebe que ella tiene solución única, la cual depende continuamente del dato f . Utilice triángulos de tipo (1) para definir detalladamente un esquema de Galerkin asociado, pruebe que tiene solución única, establezca su convergencia e indique la razón de convergencia respectiva.

37. Sean $(X_1, \langle \cdot, \cdot \rangle_{X_1})$, $(X_2, \langle \cdot, \cdot \rangle_{X_2})$, e $(Y, \langle \cdot, \cdot \rangle_Y)$ espacios de Hilbert, defina el producto $X := X_1 \times X_2$, y considere operadores lineales y acotados $\mathbf{P} : X \rightarrow X$, $\mathbf{Q} : X \rightarrow Y$, $A : X_1 \rightarrow X_1$, $B : X_1 \rightarrow X_2$, y $C : X_2 \rightarrow X_2$, tales que:

$$\mathbf{P} := \begin{pmatrix} A & B^* \\ B & -C \end{pmatrix}.$$

Sea $V := V_1 \times V_2$ el kernel de \mathbf{Q} , donde $V_1 \subseteq X_1$ y $V_2 \subseteq X_2$, y suponga que:

- i) existe $\alpha > 0$ tal que $\langle A(x_1), x_1 \rangle_{X_1} \geq \alpha \|x_1\|_{X_1}^2 \quad \forall x_1 \in V_1$.
- ii) existe $\beta > 0$ tal que $\sup_{x_1 \in V_1 \setminus \mathbf{0}} \frac{\langle B(x_1), x_2 \rangle_{X_2}}{\|x_1\|_{X_1}} \geq \beta \|x_2\|_{X_2} \quad \forall x_2 \in V_2$.
- iii) $\langle C(x_2), x_2 \rangle_{X_2} \geq 0 \quad \forall x_2 \in V_2$.
- iv) existe $\tilde{\beta} > 0$ tal que $\|\mathbf{Q}^*(y)\|_X \geq \tilde{\beta} \|y\|_Y \quad \forall y \in Y$.

a) Pruebe que para todo $(f, g) \in X \times Y$ existe un único $(x, y) \in X \times Y$ tal que

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(x) + \mathbf{Q}^*(y) &= f, \\ \mathbf{Q}(x) &= g, \end{aligned} \quad (24)$$

y encuentre explícitamente una constante $C > 0$ tal que

$$\|(x, y)\|_{X \times Y} \leq C \left\{ \|f\|_X + \|g\|_Y \right\}.$$

- b) Defina un esquema de Galerkin para (24) y establezca condiciones suficientes que aseguren su solubilidad única y estabilidad.
- c) Demuestre la estimación de Cea para el esquema definido en b).

38. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera de clase $C^{0,1}$, y considere el espacio de Sobolev $H^2(\Omega)$, con producto escalar $\langle \cdot, \cdot \rangle_{H^2(\Omega)}$, norma inducida $\| \cdot \|_{H^2(\Omega)}$, y semi-norma $| \cdot |_{H^2(\Omega)}$. Además, sea $P_1(\Omega)$ el espacio de polinomios sobre Ω de grado ≤ 1 con base $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ donde $p_0(x) = 1$ y $p_i(x) = x_i \forall i \in \{1, \dots, n\}$, $\forall x := (x_1, \dots, x_n)^T \in \Omega$.

a) Defina la aplicación

$$|||v||| := \left\{ |v|_{H^2(\Omega)}^2 + \sum_{i=0}^n |\langle v, p_i \rangle_{H^2(\Omega)}|^2 \right\}^{1/2} \quad \forall v \in H^2(\Omega),$$

y demuestre que existen $C_1, C_2 > 0$ tales que

$$C_1 |||v||| \leq \|v\|_{H^2(\Omega)} \leq C_2 |||v||| \quad \forall v \in H^2(\Omega).$$

b) Considere el espacio cociente $H^2(\Omega)/P_1(\Omega)$ con norma $||[v]||_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)} := \inf_{p \in P_1(\Omega)} \|v - p\|_{H^2(\Omega)}$, y defina

$$|[v]|_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)} := |v|_{H^2(\Omega)} \quad \forall [v] \in H^2(\Omega)/P_1(\Omega).$$

Demuestre que $| \cdot |_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)}$ está bien definida y que existe $C > 0$ tal que

$$\begin{aligned} |[v]|_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)} &\leq ||[v]||_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)} \\ &\leq C ||[v]||_{H^2(\Omega)/P_1(\Omega)} \quad \forall [v] \in H^2(\Omega)/P_1(\Omega). \end{aligned}$$

c) Sea $\Pi \in \mathcal{L}(H^2(\Omega), H^1(\Omega))$ tal que $\Pi(p) = p \forall p \in P_1(\Omega)$. Demuestre que existe $C > 0$ tal que

$$\|v - \Pi(v)\|_{H^1(\Omega)} \leq C |v|_{H^2(\Omega)} \quad \forall v \in H^2(\Omega).$$

39. Sea T un triángulo de \mathbf{R}^2 con diámetro h_T y sea \hat{T} el triángulo canónico con vértices $(0,0)$, $(1,0)$ y $(0,1)$. A su vez, sea $F_T : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2$ una aplicación afín invertible tal que $F_T(\hat{T}) = T$, y defina $\psi_T := \hat{\psi} \circ F_T^{-1}$, donde $\hat{\psi}$ es la función burbuja de \hat{T} . Además, sea \mathcal{P}_0 el proyector ortogonal de $L^2(T)$ en $\mathbb{P}_0(T)$, el espacio de polinomios constantes sobre T , con respecto al producto escalar

$$\langle f, g \rangle := \int_T \psi_T f g \quad \forall f, g \in L^2(T).$$

Aplique los lemas de Bramble-Hilbert y Deny-Lions para demostrar que existe $C > 0$, independiente de T , tal que:

$$\|v - \mathcal{P}_0(v)\|_{0,T} \leq C h_T |v|_{1,T} \quad \forall v \in H^1(T).$$

Dado $s \in]0, 1[$, utilice argumentos de interpolación de espacios normados y el hecho que $(L^2(T), H^1(T))_{s,2} = H^s(T)$, para probar que existe $C_s > 0$, independiente de T , tal que

$$\|v - \mathcal{P}_0(v)\|_{0,T} \leq C_s h_T^s \|v\|_{s,T} \quad \forall v \in H^s(T).$$

40. Sean X, Y espacios de Hilbert, $A \in \mathcal{L}(X, Y)$ tal que $\mathcal{R}(A) = Y$, y sea $V = N(A)$. Dado el operador de proyección ortogonal $P : X \rightarrow V$, considere $B : Y \rightarrow X$ tal que $B(y) = x - P(x)$ para todo $y \in Y$, donde $x \in X$ es tal que $A(x) = y$.

- i) Demuestre que B está bien definido y que B es una biyección lineal y acotada de Y en V^\perp . Pruebe, además, que B es un *inverso a derecha* de A , esto es $AB(y) = y$ para todo $y \in Y$.
- ii) Defina $A_0 : V^\perp \rightarrow Y$ como $A_0(x) = A(x)$ para todo $x \in V^\perp$, es decir $A_0 = A|_{V^\perp}$, y pruebe que $A_0^{-1} = B$.
- iii) Aplique lo anterior para definir explícitamente un inverso a derecha del operador de trazas $\gamma : H^1(\Omega) \rightarrow H^{1/2}(\partial\Omega)$.

41. Sea Ω un abierto de \mathbf{R}^n . Asuma que la inyección $i : H^1(\Omega) \rightarrow L^2(\Omega)$ es compacta y demuestre que la inyección $i : H^m(\Omega) \rightarrow H^{m-1}(\Omega)$ también es compacta, para todo entero $m \geq 2$.

42. Sean $(X, \langle \cdot, \cdot \rangle_X)$, $(Y_1, \langle \cdot, \cdot \rangle_1)$ e $(Y_2, \langle \cdot, \cdot \rangle_2)$, espacios de Hilbert, y considere el espacio $Y = Y_1 \times Y_2$ provisto del producto escalar

$$\langle z, y \rangle_Y := \langle z_1, y_1 \rangle_1 + \langle z_2, y_2 \rangle_2 \quad \forall z := (z_1, z_2), y = (y_1, y_2) \in Y.$$

Entonces, dados $B_j \in \mathcal{L}(X, Y_j)$, $j \in \{1, 2\}$, defina el operador $B \in \mathcal{L}(X, Y)$ por $B(x) := (B_1(x), B_2(x)) \quad \forall x \in X$. Demuestre que B es sobreyectivo si y sólo si:

- i) B_1 y B_2 son sobreyectivos.
- ii) $X = N(B_1) + N(B_2)$.

43. Este problema constituye una versión particular del Lema de Peetre-Tartar.

(a) Sean $(X_1, \|\cdot\|_1)$, $(X_2, \|\cdot\|_2)$ y $(X_3, \|\cdot\|_3)$, espacios de Banach, y considere operadores $A \in \mathcal{L}(X_1, X_2)$ y $B \in \mathcal{L}(X_1, X_3)$, tales que B es compacto. Además, suponga que existe $c > 0$ tal que

$$\|x\|_1 \leq c \left\{ \|A(x)\|_2 + \|B(x)\|_3 \right\} \quad \forall x \in X_1.$$

Demuestre que $N(A)$ es de dimensión finita, y luego razone por contradicción para probar que existe $C > 0$ tal que

$$\text{dist}(x, N(A)) \leq C \|A(x)\|_2 \quad \forall x \in X_1.$$

- (b) Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^n con frontera suave Γ y considere la descomposición: $H^1(\Omega) = \tilde{H}^1(\Omega) \oplus \mathbb{P}_0(\Omega)$, donde $\mathbb{P}_0(\Omega)$ es el espacio de las funciones constantes sobre Ω y

$$\tilde{H}^1(\Omega) := \left\{ v \in H^1(\Omega) : \int_{\Omega} v = 0 \right\}.$$

Pruebe que existe $\alpha > 0$ tal que

$$\alpha \|v\|_{H^1(\Omega)} \leq |v|_{H^1(\Omega)} \quad \forall v \in \tilde{H}^1(\Omega). \quad (25)$$

- (c) Aplique (a), (25), y el teorema de trazas, para demostrar que existen constantes $C_1, C_2 > 0$, tales que

$$C_1 \|v\|_{H^1(\Omega)}^2 \leq |v|_{H^1(\Omega)}^2 + \|v\|_{L^2(\Gamma)}^2 \leq C_2 \|v\|_{H^1(\Omega)}^2 \quad \forall v \in H^1(\Omega). \quad (26)$$

INDICACIÓN: para la desigualdad (26) inferior defina operadores A y B apropiados utilizando los espacios $X_1 := H^1(\Omega)$, $X_2 := [L^2(\Omega)]^2 \times L^2(\Gamma)$ y $X_3 := \mathbb{P}_0(\Omega)$.

44. Sean Ω un abierto acotado y convexo de \mathbf{R}^2 con frontera poligonal Γ , $f \in L^2(\Omega)$, y $u \in H_0^1(\Omega) \cap H^2(\Omega)$ la única solución de: $-\Delta u = f$ en Ω , $u = 0$ en Γ . Dada una familia regular de triangulaciones $\{\mathcal{T}_h\}_{h>0}$ de $\bar{\Omega}$ hecha de triángulos K y lados e , se definen los espacios de LAGRANGE y de CROUZEIX-RAVIART, respectivamente, como sigue:

$$X_h := \left\{ v \in C(\bar{\Omega}) : v|_K \in \mathbf{P}_1(K) \quad \forall K \in \mathcal{T}_h, \quad v = 0 \quad \text{en } \Gamma \right\},$$

$$V_h := \left\{ v \in L^2(\Omega) : v|_K \in \mathbf{P}_1(K) \quad \forall K \in \mathcal{T}_h, \quad v \text{ es continua en los puntos medios de los lados } e \in \mathcal{T}_h, \quad v = 0 \text{ en los puntos medios de los lados } e \subseteq \Gamma \right\}.$$

- a) Defina $\|v_h\|_h := \left\{ \sum_{K \in \mathcal{T}_h} |v_h|_{1,K}^2 \right\}^{1/2} \quad \forall v_h \in V_h$, pruebe que $\|\cdot\|_h$ es una norma sobre V_h , y concluya que existe un único $u_h \in V_h$ tal que

$$a_h(u_h, v_h) := \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \int_K \nabla u_h \cdot \nabla v_h = F(v_h) := \int_{\Omega} f v_h \quad \forall v_h \in V_h.$$

- b) Demuestre que existe $C > 0$, independiente de h , tal que

$$\|u - u_h\|_h \leq C \left\{ \inf_{v_h \in V_h} \|u - v_h\|_h + \sup_{w_h \in V_h \setminus 0} \frac{|a_h(u, w_h) - F(w_h)|}{\|w_h\|_h} \right\}. \quad (27)$$

c) Integre por partes en cada $K \in \mathcal{T}_h$ y pruebe que

$$\begin{aligned} a_h(u, w_h) - F(w_h) &= \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \int_{\partial K} \nabla u \cdot \boldsymbol{\nu} w_h = \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \sum_{e \subseteq \partial K} \int_e \nabla u \cdot \boldsymbol{\nu} (w_h - \mathcal{P}_{0,e}(w_h)) \\ &= \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \sum_{e \subseteq \partial K} \int_e (\nabla u - \nabla \Pi_h(u)) \cdot \boldsymbol{\nu} (w_h - \mathcal{P}_{0,e}(w_h)) \quad \forall w_h \in V_h, \end{aligned} \quad (28)$$

donde $\Pi_h : H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega) \rightarrow X_h$ es el operador de interpolación global de Lagrange y $\mathcal{P}_{0,e} : L^2(e) \rightarrow \mathbf{P}_0(e)$ es el proyector ortogonal.

d) Deduzca a partir de (27) y (28) que existe $C > 0$, independiente de h , tal que

$$\|u - u_h\|_h \leq C h |u|_{2,\Omega}.$$

45. Sea Ω un abierto acotado de \mathbf{R}^2 con frontera poligonal Γ y sea $f \in [L^2(\Omega)]^2$. El problema de elasticidad lineal plana asociado a un sólido que ocupa Ω , y que está sometido a la fuerza f , consiste en encontrar el desplazamiento u tal que:

$$\operatorname{div} \left\{ \lambda \operatorname{tr} \mathbf{e}(u) I + 2\mu \mathbf{e}(u) \right\} = -f \quad \text{en } \Omega \quad \text{y} \quad u = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma, \quad (29)$$

donde $\lambda, \mu > 0$ son las constantes de Lamé, tr denota el operador de trazas matricial, $\mathbf{e}(u)$ es el tensor de deformaciones, e I es la matriz identidad de $\mathbf{R}^{2 \times 2}$.

a) Demuestre que la formulación variacional de (29) se reduce a: Hallar $u \in [H_0^1(\Omega)]^2$ tal que

$$\int_{\Omega} \left\{ \lambda \operatorname{div}(u) \operatorname{div}(\mathbf{v}) + 2\mu \mathbf{e}(u) : \mathbf{e}(\mathbf{v}) \right\} = \int_{\Omega} f \cdot \mathbf{v} \quad \forall \mathbf{v} \in [H_0^1(\Omega)]^2,$$

y pruebe que ella tiene solución única, la cual depende continuamente de f .

b) Utilice triángulos de tipo (1) para definir detalladamente un esquema de Galerkin asociado, pruebe que tiene solución única, establezca su convergencia e indique la razón de convergencia respectiva.

46. Sea T un triángulo de \mathbf{R}^2 con diámetro h_T y sea \widehat{T} el triángulo canónico con vértices $(0,0)$, $(1,0)$ y $(0,1)$. A su vez, sea $F_T : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2$ una aplicación afín invertible tal que $F_T(\widehat{T}) = T$, y defina $\psi_T := \widehat{\psi} \circ F_T^{-1}$, donde $\widehat{\psi}$ es la función burbuja de \widehat{T} . Además, sea \mathcal{P}_0 el proyector ortogonal de $L^2(T)$ en $\mathbb{P}_0(T)$ con respecto al producto escalar

$$\langle f, g \rangle := \int_T \psi_T f g \quad \forall f, g \in L^2(T).$$

Pruebe que para cada $s \in [0, 1]$ existe $C_s > 0$, independiente de T , tal que

$$\|v - \mathcal{P}_0(v)\|_{0,T} \leq C_s h_T^s \|v\|_{s,T} \quad \forall v \in H^s(T).$$