

FORMULACION CONSISTENTE DE UN MODELO TERMOQUIMICO - ELASTOPLASTICO ACOPLADO PARA HORMIGONES EN EDAD TEMPRANA

Marcia Rizo Patrón^{*}, Alejandro Carosio[†] y Guillermo Etse^{††}

^{*} Grupo de Mecánica Computacional - Universidad Nacional de Santiago del Estero
Avda. Belgrano (s) 1912- TE: 54-0385-4509560 Int 1905- Sgo. del Estero- Argentina
e-mail: marciarp@unse.edu.ar, web page: <http://www.unse.edu.ar/>

[†] Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Nacional de Cuyo – Mendoza - Argentina

^{††} Departamento de Construcciones y Obras Civiles

Universidad Nacional de Tucumán - Avda. Roca 1800 -Tucumán- Argentina

e-mail: getse@herera.unt.edu.ar, web page: <http://www.unt.edu.ar/>

Palabras clave: Plasticidad – Acoplamiento termoquímico - Modelación constitutiva

Resumen. *Muchos son los problemas ingenieriles en los cuales es de gran importancia la historia de deformación y/o tensión a que es sometido el hormigón en su período inicial de maduración. En este tipo de situaciones, es común el asumir que el material se comporta siguiendo leyes empíricas o formulaciones simplificadas basadas en la viscoelasticidad, por ejemplo. Esto conlleva a que las hipótesis acerca del comportamiento del hormigón en esta etapa de hidratación, donde los cambios en la masa del material debido al avance del proceso termoquímico son muy importantes, no evolucionen de acuerdo a las predicciones de los modelos simplificados mencionados anteriormente. En este sentido, es de suma importancia el contar con herramientas computacionales capaces de predecir adecuadamente el comportamiento en edades tempranas del hormigón. Para esto, es necesario que el acoplamiento entre el proceso termoquímico y el mecánico- elastoplástico se resuelva de manera consistente desde el inicio, es decir, considerando correctamente la interacción de los procesos a nivel constitutivo.*

En este trabajo se presenta una formulación constitutiva para hormigones en edad temprana en la que se resuelve el acoplamiento del problema termoquímico-elastoplástico de manera consistente considerando que el hormigón es representado mediante una formulación parabólica de Drucker-Prager modificada..

1 INTRODUCCIÓN

La complejidad de la microestructura del hormigón es una de las causas de las particularidades de su comportamiento mecánico. Este comportamiento muy complejo y los mecanismos que conducen a su modificación pueden ser adecuadamente identificados solamente estudiando el hormigón a nivel microscópico y teniendo en consideración sus modificaciones físico-químicas, las reacciones que tienen lugar durante la carga y sus consecuencias sobre el comportamiento macroscópico.

El deterioro en edad temprana del hormigón es un problema persistente que aparece debido a que este material interactúa con el medio y experimenta complejos cambios físicos y químicos. La inestabilidad volumétrica es perjudicial para la durabilidad y funcionalidad de las estructuras de hormigón debido a que éstas están generalmente restringidas. Las tensiones inducidas pueden causar la aparición inmediata de fisuras o subsistir como “tensiones residuales” que van a limitar la capacidad del hormigón. Tal deterioro prematuro afecta la integridad, la durabilidad y la vida útil de las estructuras.

Los recientes avances en técnicas constructivas rápidas, en tecnología de hormigón de alta resistencia inicial, nuevos cementos y mezclas, han renovado la importancia de la estabilidad volumétrica inicial del hormigón. Por ejemplo el uso de hormigones HPC (high-performance concrete) los cuales poseen una baja relación a/c agravan el problema de la fisuración a edad temprana debido a que la retracción por fraguado es mayor en éstos que en los hormigones normales.

El comportamiento del hormigón en edades tempranas es importante no solamente para el caso de los hormigones de alta resistencia sino que se considera uno de los períodos más críticos en la vida de todos los tipos de hormigones. El hormigón en esta etapa sufre cambios volumétricos rápidos y complejos tales como la retracción por fraguado y las deformaciones térmicas que conducen a una rápida aparición de tensiones de tracción en el material. Al mismo tiempo la resistencia y la rigidez del material son relativamente bajas pero van aumentando mientras avanza el proceso de hidratación. Hay una competencia interna dentro del material entre el desarrollo de las tensiones de tracción y el desarrollo de resistencia, ambas evolucionando con el tiempo. En esta competencia está en juego el potencial para el deterioro prematuro.

Es aquí donde reside la importancia de la correcta modelación computacional del comportamiento de los hormigones a edad temprana que nos dará la posibilidad de predecir y prevenir la fisuración en los mismos, ya que ésta tendrá consecuencias fundamentales en la durabilidad y funcionalidad de las estructuras afectadas.

2 MODELACIÓN MACROSCÓPICA DE LA REACCIÓN DE HIDRATACIÓN

En esta sección se describen las relaciones básicas de la teoría de medios porosos reactivos parcialmente saturados que se utiliza para representar, a nivel macroscópico, la reacción química de hidratación del cemento. Se supone que el sólido a estudiar es un medio poroso. Los poros se encuentran saturados por dos fases fluidas, la fase reactiva y la fase producto. Estas fases fluidas pueden reaccionar químicamente entre sí. Es decir que el medio poroso

reactivo puede verse como la superposición de diferentes medios continuos. En el caso particular de estudio, se superponen el esqueleto sólido y las dos fases fluidas.

2.1 Continuidad y conservación de la masa

Se considera una única fase reactante y una única fase producto de tal forma que ocurre una reacción química entre ellas cuando: $A \rightarrow B$, siendo A la fase reactante y B la fase producto (ver Prato^[3]). La hipótesis de conservación de la masa se expresa localmente a través de la ecuación de continuidad que exige que, en un sistema químico cerrado, para cada fase fluida se cumpla que:

$$\frac{dm_A}{dt} = -m_{A \rightarrow B}^0 \quad \frac{dm_B}{dt} = m_{A \rightarrow B}^0 \quad (1)$$

donde $m_{A \rightarrow B}^0$: tasa de formación de la masa B debido a la reacción química

m_A y m_B : masa reactiva (A) y masa reactante (B).

Si se aplican estas ecuaciones al caso particular del hormigón, la reacción química corresponde al proceso de hidratación del cemento, cuya fase A es el agua libre y la B es el agua combinada con el cemento, formando los hidratos.

2.2 Amplitud de hidratación. Ley de evolución.

Se define la tasa de reacción química ξ^0 como:

$$\xi^0 = \frac{m_{A \rightarrow B}^0}{k} \quad (2)$$

siendo k una constante que relaciona la tasa de formación de masa con la tasa de reacción química. Tiene en cuenta la estequiometría y las masas molares de las sustancias que constituyen las fases reactante y producto.

De acuerdo a (3), la tasa de formación de masa $m_{A \rightarrow B}^0$ es una derivada temporal, así como también lo es la tasa de reacción ξ^0 . De esta manera, se puede escribir:

$$m_{A \rightarrow B}^0 = -\dot{m}_A = \dot{m}_B = k\dot{\xi} \quad (3)$$

La variable $\dot{\xi}$, denominada amplitud de hidratación, puede considerarse como una variable interna ya que su evolución es espontánea y no depende del flujo externo. La misma da una medida del progreso de la reacción considerada. Para definir su ley de evolución se adopta una expresión del tipo de Arrhenius (ver Prato^[3]) de la forma:

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\eta} \langle A_m \rangle e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (4)$$

donde η es un parámetro del material, E_a es la energía de hidratación, R la constante

universal de los gases y A_m es la afinidad química. Esta expresión desde el punto de vista físico-químico tiene en cuenta dos fenómenos distintos:

- la velocidad de hidratación depende de la difusión del agua a través de los hidratos recién formados y ésta depende del gradiente del potencial químico entre el agua libre y la combinada en la fase sólida. A nivel macroscópico este gradiente se expresa a través de los dos primeros factores de la ecuación anterior. Los “Macaulay brackets” expresan aquí que la reacción de hidratación evoluciona si y sólo si la fuerza termodinámica relacionada con el equilibrio químico entre el producto y el reactivo es positiva.
- la reacción está activada por la temperatura a través del término exponencial.

2.3 La segunda ley de la termodinámica

La termodinámica es el estudio de las transformaciones que afectan la energía de un sistema en evolución. La primera ley expresa la conservación de la energía en todas sus formas. La segunda ley, en cambio, expresa, a través de una desigualdad, que la calidad de la energía, es decir, su transformabilidad en trabajo mecánico eficiente, sólo puede deteriorarse. Todo modelo matemático que pretenda representar la evolución de un proceso termodinámicamente admisible debe respetar estos dos principios de la termodinámica.

En el caso de un sistema cerrado, el aporte de entropía se debe sólo al intercambio de calor con el exterior $Q^0 dt$, por lo tanto en torno a la temperatura de referencia T_0 se cumple^[7]

$$\frac{dS}{dt} \geq \frac{Q^0}{T_0} \quad (5)$$

Esta desigualdad se debe a la producción de entropía interna asociada con el fenómeno disipativo. El balance de entropía es, en consecuencia:

$$T_0 \frac{dS}{dt} = Q^0 + \varphi \quad (6)$$

donde φ es la disipación. Considerando el hormigón en edades tempranas, esta disipación puede ser primariamente atribuida a las evoluciones irreversibles del esqueleto y a la acción de la reacción de hidratación. Esta última se expresa

$$\varphi_{\rightarrow esq} = (g^l - G) \frac{dm}{dt} \geq 0 \quad (7)$$

con g^l : entalpía de masa libre (o potencial químico) del agua libre;

G : potencial químico del agua combinada en la fase sólida.

La diferencia de potenciales $g^l - G$ expresa, entonces, el desbalance termodinámico entre el agua libre y el agua combinada en la fase sólida y es la fuerza de conducción del proceso de microdifusión que gobierna la reacción de hidratación. La ec. (7) puede ser escrita alternativamente como

$$\varphi_{\rightarrow esq} = A_m \frac{dm}{dt} \geq 0 \quad (8)$$

Desde el punto de vista de la termodinámica estándar la expresión previa de la disipación de la reacción de hidratación, conduce a identificar formalmente a la afinidad A_m como la fuerza termodinámica asociada con la tasa de solidificación del esqueleto \dot{m} . Considerando la expresión de disipación del sistema cerrado que incluye, tanto la disipación debida a la evolución permanente del esqueleto como la asociada con la reacción de hidratación (ec.8), la disipación resulta

$$\varphi = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - S\dot{T} - \dot{\Psi} \geq 0 \quad (9)$$

con Ψ : energía libre de Helmholtz. Esta define el estado termodinámico en función de las variables de estado. Se puede expresar de la forma

$$\Psi = \Psi(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \boldsymbol{\chi}, m) \quad (10)$$

donde $\boldsymbol{\chi}$ es un vector de variables internas relacionadas con el comportamiento irreversible del material.

Usando la (10) en la (9) se obtiene (ver Ulm^[7])

$$\varphi = \left(\boldsymbol{\sigma} - \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \right) : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \left(S + \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right) \dot{T} + \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p + \zeta \dot{\boldsymbol{\chi}} + A_m \dot{m} \geq 0 \quad (11)$$

El último término de la (11) surge de la (8) e implica que

$$A_m = -\frac{\partial \Psi}{\partial m} = -\frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (12)$$

es decir, establece que el desbalance entre el agua libre y el agua combinada en la fase sólida proviene, en el caso de un sistema químico cerrado, de la energía libre Ψ .

3 MODELO TERMOQUÍMICO

3.1 Grado de hidratación

Se define el grado de hidratación como

$$r(t) = \frac{\xi(t)}{\xi_\infty} \quad (13)$$

donde $\xi(t)$: amplitud de hidratación en un tiempo t arbitrario

ξ_∞ : amplitud de hidratación para $t = \infty$, en condiciones ideales.

3.2 Evolución del grado de hidratación

Derivando la expresión de la energía libre de Helmholtz adoptada, con respecto a la amplitud de hidratación, (ec. (12)) y escribiendo la ecuación resultante en función del grado de hidratación se obtiene la expresión matemática para la evolución de r :

$$\dot{r} = \bar{\kappa} \left\langle \left[(\bar{A} + r)(r_{\infty} - r) - \bar{\alpha} \frac{T - T_0}{T_0} \right] \right\rangle e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (14)$$

3.3 Ecuación de equilibrio térmico

La ecuación de balance de entropía de un medio poroso cerrado con respecto a la temperatura de referencia T_0 es:

$$T_0 \dot{S} = Q^0 + \varphi \quad (15)$$

donde $\frac{Q^0}{T_0}$ es la tasa de la entropía externa debida al intercambio de calor con el exterior y $\frac{\varphi}{T_0}$ es la variación de la producción de energía interna debido a la disipación. Teniendo en cuenta que:

$$S = -\frac{\partial \Psi}{\partial T} \quad (16)$$

reteniendo sólo los términos de la derivada temporal de la entropía de primer orden y suponiendo que el calor debido a la disipación y el calor debido a las deformaciones son despreciables respecto al término que representa el calor latente de hidratación, la ecuación (15) puede escribirse como:

$$C\dot{T} - \dot{q} = \hat{r} - \nabla \cdot \hat{\mathbf{q}} \quad (17)$$

\dot{q} : calor latente de hidratación

\hat{r} : aporte de calor debido a fuentes térmicas

$\nabla \cdot \hat{\mathbf{q}}$: aporte de calor debido a conducción

La relación entre el flujo de calor y la temperatura está dada por la ley de Fourier

$$\hat{\mathbf{q}} = -\hat{\mathbf{K}} \nabla T \quad (18)$$

donde $\hat{\mathbf{K}}$ es el tensor de conductividad térmica, que para el caso isótropo es: $\hat{\mathbf{K}} = \hat{k} \mathbf{1}$

Sustituyendo la (18) en la (17), la ecuación de campo térmico queda:

$$\rho c \dot{T} = \hat{r} - \nabla \cdot (\hat{\mathbf{K}} \nabla T) + \dot{q} \quad (19)$$

Esta ecuación es la que gobierna el fenómeno de conducción del calor en régimen transitorio y en un medio continuo y homogéneo.

Teniendo en cuenta la definición de grado de hidratación, se puede escribir el último

término de la ec. (19) como:

$$\dot{q} = q_r \dot{r} \quad (20)$$

Finalmente, a la ecuación (19) adopta la forma:

$$\rho c \dot{T} = \hat{r} - \nabla \cdot (\hat{\mathbf{K}} \nabla T) + q_r \dot{r} \quad (21)$$

3.4 Acoplamiento termoquímico

La solución del acoplamiento termo-químico consiste en la solución de la ecuación del equilibrio térmico, ec. (21), y simultáneamente la ecuación diferencial que representa a la evolución de la reacción de hidratación, ec. (14), ver Prato^[3].

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales se utiliza en la presente implementación, el método de Euler implícito (*backward Euler*).

La evolución de los parámetros elásticos del material, en función del grado de hidratación, se obtienen usando el modelo de envejecimiento propuesto por Prato^[3].

4 MODELO TERMOQUÍMICO-ELASTOPLÁSTICO

La modelación del proceso químico plástico que se describe en esta sección se basa en la teoría propuesta originalmente por Ulm y Coussy^[7] para hormigones en edad temprana. A diferencia de aquella modelación en la que se considera el endurecimiento plástico debido solamente a la evolución del proceso de hidratación, aquí se considera también el endurecimiento plástico debido al efecto de las cargas aplicadas.

4.1 Criterio de Drucker-Prager modificado

Se adoptó un criterio plástico de superficie única definido por la función clásica de Drucker Prager que describe la máxima resistencia material en término del primer invariante del tensor de tensiones y del segundo invariante del desviador de tensiones. La función de carga para este criterio, considerando endurecimiento isótropo, es

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - 3\alpha \Upsilon \quad (22)$$

donde

$$\Upsilon = k_0 - \zeta = k_0 + r \left[(k_\infty - k_0) + \frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} \right] \quad (23)$$

$\zeta(r, \chi)$ es la fuerza de endurecimiento termoquímico y χ es la variable que representa la variación volumétrica plástica debido a la evolución del proceso de hidratación y es igual a la traza del tensor de deformaciones plásticas:

$$\chi = \varepsilon_p = tr(\boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (24)$$

La variable U representa la parte de la energía libre que está relacionada con fenómeno de endurecimiento-ablandamiento termoquímico. Se la denomina “*frozen energy*”. El término “*frozen*” se refiere a la disipación asociada a las evoluciones plásticas. La energía relacionada con las evoluciones irreversibles del esqueleto, la cual es disipada en forma de calor durante un cierto intervalo dt , ya no es más: $\varphi_1 dt = \varphi^p dt = \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\varepsilon}^p$ sino:

$$\varphi_1 dt = \varphi^p dt - dU \quad (25)$$

El diferencial de energía dU no se convierte en calor durante el intervalo dt del proceso de carga plástica ni se recupera como trabajo útil (elástico) durante la descarga sino que se “congela” debido al endurecimiento químico-plástico. Desde el punto de vista físico, según Ulm, el origen de esta energía congelada puede ser asociada con una microelasticidad de los materiales que constituyen el hormigón. En el nivel de la composición estructural (pasta de cemento, agregados), la retracción inducida por acción capilar, tanto como por los gradientes térmicos, durante el fraguado del hormigón no puede ser considerado como homogéneo y resulta un estado complejo de micro-tensiones, acompañado por la deformación irreversible del esqueleto. Debido a la geometría microscópica de la matriz, estas deformaciones permanentes del micro-esqueleto no son homogéneas ni cinemáticamente compatibles por sí solas, sin una deformación elástica que contribuya a la total, aún después de la descarga completa. Esto implica que una cierta cantidad de energía, asociada con la microelasticidad, la cual no ha sido convertida en calor durante la carga no se recupera ni se transforma en trabajo durante la descarga. Este es el origen de la energía congelada.

En la ecuación (23), U_∞ es la energía congelada en el material en hidratación completa. En el modelo, se adoptó:

$$\frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} = \frac{\partial U_\infty(\varepsilon_p)}{\partial \varepsilon_p} = \Omega \varepsilon_p \quad (26)$$

por lo que la expresión para Υ finalmente resulta:

$$\Upsilon = k_0 + r \left[(k_\infty - k_0) + \Omega \varepsilon_p \right] \quad (27)$$

donde k_∞ es la presión de cohesión en hidratación completa, k_0 es la presión de cohesión de referencia correspondiente al grado de hidratación r_0 y Ω es una constante.

4.2 Fuerza de endurecimiento/ablandamiento

Se considera a la fuerza de endurecimiento desacoplada aditivamente en dos términos: uno asociado al endurecimiento producido por la evolución del proceso de hidratación, el que se ha denominado aquí fuerza de endurecimiento termoquímico $\zeta_{iq}(\chi, r)$ y el otro término asociado al endurecimiento plástico debido al efecto de las cargas aplicadas denominado fuerza de endurecimiento mecánico $\zeta_m(q)$. La expresión para la primera de estas fuerzas está dada por:

$$\zeta_{iq}(\chi, r) = -\frac{\partial U(\chi, r)}{\partial \chi} = -r(k_{\infty} - k_0) - r \frac{\partial U_{\infty}(\chi)}{\partial \chi} \quad (28)$$

y la correspondiente a la segunda fuerza es:

$$\zeta_m(q) = q = \sqrt{\frac{2}{3}} \boldsymbol{\varepsilon}^p : \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (29)$$

4.3 Condición de consistencia

En general, la condición de consistencia clásica puede expresarse en la forma

$$\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} d\zeta = 0 \quad (30)$$

Mediante el empleo de la regla de la cadena de la diferenciación, la (30) puede expandirse para expresarla explícitamente en términos de la fuerza de endurecimiento mecánica y de la fuerza de endurecimiento termoquímica:

$$\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \zeta}{\partial \zeta_m} d\zeta_m + \frac{\partial \zeta}{\partial \zeta_{iq}} d\zeta_{iq} \right] = 0 \quad (31)$$

Agrupando términos, y recordando que debido a la hipótesis de descomposición aditiva de las contribuciones mecánica y termoquímica $\partial \zeta / \partial \zeta_{iq} = \partial \zeta / \partial \zeta_m = 1$, la (31) toma la forma

$$\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} [d\zeta_m + d\zeta_{iq}] = 0 \quad (32)$$

Descomponiendo ahora el término termoquímico en función del grado de hidratación y de la variable de endurecimiento/ablandamiento, la condición de consistencia termoquímico-plástica es

$$\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial r} dr + \frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial \chi} d\chi + \frac{\partial \zeta_m}{\partial q} dq \right] = 0 \quad (33)$$

La (33) expresa claramente que para lograr una integración consistente es necesario considerar la variación diferencial del grado de hidratación en forma acoplada con el resto de las variables de estado del proceso termoquímico-mecánico. Esto es necesario, debido a que aunque no existan acciones mecánicas sobre el material, igualmente la expansión de la superficie de fluencia ocurre por el avance del proceso de hidratación. Por otro lado, puede ocurrir que ambos procesos, el termoquímico y el mecánico, se den simultáneamente por ejemplo, cuando el hormigón es solicitado por acciones mecánicas sin haber concluido el proceso de fragüe. Por último la situación de carga a hidratación completa también queda contemplada en la condición de consistencia dada por la (33).

Agrupando términos y multiplicando por $d\lambda/d\lambda$ al segundo sumando:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial r} dr \right) + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial \chi} d\chi \frac{d\lambda}{d\lambda} + \frac{\partial \zeta_m}{\partial q} dq \frac{d\lambda}{d\lambda} \right] = 0 \quad (34)$$

entonces:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial r} dr \right) = - \frac{\partial F}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial \chi} \frac{d\chi}{d\lambda} + \frac{\partial \zeta_m}{\partial q} \frac{dq}{d\lambda} \right] d\lambda \quad (35)$$

Si llamamos H al módulo de endurecimiento-ablandamiento:

$$H = - \frac{\partial F}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial \chi} \frac{d\chi}{d\lambda} + \frac{\partial \zeta_m}{\partial q} \frac{dq}{d\lambda} \right] \quad (36)$$

el multiplicador plástico queda finalmente:

$$d\lambda = \frac{1}{H} \left[\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta_{iq}}{\partial r} dr \right] \quad (37)$$

El sistema de ecuaciones acopladas se resuelve en forma iterativa mediante el procedimiento de Newton-Raphson en el que se agrega un lazo exterior para considerar la actualización de la función de fluencia en la iteración i del paso n con el valor del cambio diferencial en el grado de hidratación. De este modo se presenta una formulación consistente para la integración de la ecuación de consistencia plástica.

5 CONCLUSIONES

Se han presentado los fundamentos teóricos de un modelo termoquímico-mecánico que combina un modelo químico para la hidratación del hormigón en edades tempranas con la formulación clásica elastoplástica de Drucker-Prager modificada. Se ha descrito en detalle las características del acoplamiento termoquímico-mecánico, incluyendo la modificación de la condición clásica de consistencia en la que se considera un término adicional para introducir la dependencia que en el crecimiento del dominio elástico tiene el proceso químico. Esto se logra a través de la inclusión del grado de hidratación como variable adicional en la integración de la ecuación constitutiva.

La implementación de esta formulación en un código de elementos finitos posibilitará la solución numérica de problemas termo-mecánicos acoplados en los que el comportamiento del hormigón deba ser considerado en edades tempranas

6 REFERENCIAS

- [1] Coussy, O. , “Mechanics of porous continua”. J. Wiley and Sons, Chichester, U.K. 1996.
- [2] Cervera M., Oliver J. y Prato T., “A thermo-chemo-mechanical model for concrete”. Public. CIMNE N°146. Barcelona, España, 1998.
- [3] Prato T., Cervera M. y Oliver J., “Simulación numérica del proceso de hidratación del hormigón”. Public. CIMNE N°114. Barcelona, España, 1997.
- [4] Prato T., Cervera M. y Oliver J., “Modelo termoquímico de hidratación del hormigón”. Mecánica Computacional, Volumen XVIII. Bariloche, 1997.
- [5] Simo J. & Hughes T. J. R., “Elastoplasticity and viscoplasticity. Computational aspects” (monograph). Springer, Berlin, 1997.
- [6] Ulm, F.-J. & Coussy, O. , “Modelling of thermo-chemo-mechanical couplings of concrete at early ages”. J. Engng. Mech. ASCE, 121. 1995.
- [7] Ulm, F.-J. & Coussy, O. , “Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete”. J. Engng. Mech. ASCE, 122. 1996.
- [8] Ulm, F.-J. & Coussy, O. , “Couplings in early-age concrete: from material modeling to structural design”. Int. J. Solids and Structures. Vol 35, pag 4295-4311. 1998.
- [9] Ulm, F.-J., Coussy, O. & Hellmich, C., “Chemoplasticity: a review of evidence”.
- [10] Ulm, F.-J., Elouard A. & Rossi P., “Modelling of early age concrete cracking due to thermo-chemo-mechanical couplings”. Fracture mechanics of concrete structures, Proceedings FRAMCOS-2, AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, 1995.