

MODELIZACIÓN DE DAÑO Y RUPTURA EN PROCESOS CON UNA FUERTE COMPONENTE DE CORTE.

Javier Signorelli*, Pierre-Olivier Bouchard**

* Instituto de Física Rosario (IFIR – CONICET)
Bv. 27 de Febrero 210bis. 2000 Rosario – Argentina: <http://www.ifir.edu.ar>

** Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF) - Ecole des Mines de Paris UMR 7635
BP 207, 06904 Sophia Antipolis Cedex, Francia

Palabras claves: Simulación numérica 3D, Modelo elastoplástico con daño, Cisallado

Resumen. *En el presente trabajo se muestran aplicaciones de modelos de daño a un material elastoplástico. Los modelos que se analizan son los propuestos originalmente por LeMaître y Gurson respectivamente. La formulación de elementos finitos empleada es del tipo Lagrangiana actualizada con la posibilidad de realizar remallado automático de la pieza durante la simulación. Con el objeto de mejorar las prestaciones de esta técnica, se utiliza un criterio de refinamiento adaptativo acoplado con la variable de daño a fin de poder tener una descripción adecuada en las zonas sometidas a un esfuerzo de corte importante. Finalmente, la ruptura de la pieza se modeliza mediante la técnica conocida como “kill element”, la cual consiste en eliminar los elementos completamente dañados de la malla. Ejemplos de estampado y corte por cisallado son presentados.*

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos que involucran fuerte esfuerzos de corte son de gran utilidad y de uso frecuente en diversos sectores industriales, particularmente en el automotor. No obstante, más allá de la importancia del proceso, su mejoramiento sigue siendo en buena medida fundado en el ensayo y error. Los desarrollos recientes en el área de la modelización numérica por elementos finitos permiten representar y comprender mejor la deformación, el daño y la posterior ruptura del material en el curso del proceso de conformado. Sin embargo, los principales trabajos efectuados en este área están concentrados mayoritariamente en casos 2D o con simetría axial.

Un enfoque posible al problema consiste en definir una ley de daño desacoplada del comportamiento mecánico del material y estudiar la localización del mismo: Cockcroft y Latham¹, Mc Clintock², Rice y Tracey³, Oyane⁴ son ejemplos de criterios de daño difundidos y discutidos ampliamente en la literatura. Esta metodología tiene la ventaja de ser de muy fácil implementación en los códigos de elementos finitos; sin embargo, su principal desventaja es no acoplar la evolución del deterioro del material a su respuesta mecánica global. Consecuentemente, no permite modelizar el ablandamiento progresivo del material debido al daño producido. Un segundo enfoque, más realista, requiere acoplar el daño a la respuesta intrínseca del material. Dentro de esta línea de trabajo dos modelos merecen ser destacados: el modelo propuesto por LeMaître⁵ basado en el concepto de tensión efectiva y el modelo de plasticidad en materiales porosos desarrollado originalmente por Gurson⁶ y expandido por Tvergaard y Needleman⁷. Este último tiene la ventaja de ser una descripción más física del problema del deterioro progresivo del material.

Cuando la magnitud del daño en el material alcanza un valor crítico, es necesario modelizar su ruptura. La modelización de esta etapa requiere la simulación del inicio y de la propagación de la fisura a través de la malla de la pieza, lo cual puede ser tratado en forma precisa en el caso bidimensional^{8,9,10}. Ahora bien, la modelización 3D es de por sí mucho más compleja dado que necesita propagar un frente de fisura que implica la definición de superficies en el espacio en cada incremento en el proceso de propagación de la fisura. Una técnica alternativa que permita modelizar la ruptura total de la pieza consiste en eliminar los elementos de la malla que estén sobre el valor de daño crítico de forma tal que no contribuyan a la matriz de rigidez global (técnica “kill-element”).

En el presente trabajo se presentan desarrollos recientes realizados en el código de elementos finitos 3D FORGE3® a fin de modelizar con precisión el daño y la ruptura de piezas metálicas sometidas a procesos que involucren una fuerte componente de corte. En una primera parte se introduce brevemente los conocidos modelos de LeMaître y de Gurson-Tvergaard-Needleman, los cuales han sido implementados en el código FORGE3®.

2. MODELOS DE DAÑO ACOPLADOS

2.1 Modelo de LeMaître

El modelo propuesto por LeMaître está basado en el concepto de propiedades efectivas y utiliza una aproximación de tipo fenomenológica para el cálculo del parámetro de daño D .

Asimismo, el parámetro de daño D modifica el módulo de Young y la tensión de fluencia con el objeto de modelizar el ablandamiento progresivo del material. El parámetro D asume un valor nulo en el caso de un material no dañado y un valor unitario para un material completamente dañado. En el modelo de LeMaître la tensión efectiva $\tilde{\sigma}$ representa la tensión que deberá aplicarse al material no dañado para obtener la misma respuesta que en el material dañado:

$$\tilde{\sigma} = \sigma / (1 - D) \quad (1)$$

La ley de evolución incremental de la variable de daño D puede expresarse en la forma siguiente:

$$dD = \begin{cases} 0 & \epsilon_p \leq \epsilon_D \\ \frac{D_C}{\epsilon_R - \epsilon_D} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] (\epsilon_{eq})^{2/r} d\epsilon_p & \epsilon_p > \epsilon_D \end{cases} \quad (2)$$

donde σ_H es la tensión hidrostática, σ_{eq} es la tensión equivalente, $\bar{\epsilon}^p$ es la deformación plástica equivalente, ϵ_D es el valor de deformación a partir del cual el daño aparece, ϵ_C y D_C representan el valor de deformación y de daño a ruptura y r es un parámetro del modelo que puede ser ajustado a partir de un ensayo de tracción.

2.1 Modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman

El segundo modelo al cual nos referiremos fue propuesto inicialmente por Gurson y retomado posteriormente por Tvergaard y Needleman. Se base en la definición de un potencial elastoplástico donde el daño se describe en función de la fracción de cavidades f presentes en el material. Asimismo, el potencial propuesto por Gurson depende explícitamente de la presión hidrostática p :

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 + 2q_1 f^*(f) \cosh \left(\frac{-3q_2 p}{\sigma_0} \right) - (1 + q_3 f^*(f)^2) \quad (3)$$

donde q_1 , q_2 y q_3 son constantes del modelo dependientes del material. En el caso de materiales dúctiles, la ruptura final se alcanza por coalescencia de cavidades o microfisuras que se desarrollan en el material. A fin de poder modelizar dicho proceso se define la función de evolución de cavidades de la forma siguiente:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & si f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & si f > f_c \end{cases} \quad (4)$$

donde f_F es la fracción de volumen de cavidades a ruptura y f_c , f_u son constantes del material que permiten describir el proceso de coalescencia. La evolución de las cavidades se

describe a través de una ley que tiene en cuenta simultáneamente la fase de crecimiento y nucleación de las mismas. La función de evolución propuesta considera que el crecimiento es controlado por la velocidad de deformación plástica y la nucleación depende a la vez de la deformación plástica y de corte presente ^{11,12}:

$$\hat{f} = \hat{f}_{\text{crecimiento}} + \hat{f}_{\text{nucleacion}} + \hat{f}_{\text{cisallamiento}} \quad \text{donde} \quad \begin{cases} \hat{f}_{\text{crecimiento}} = (1-f)\dot{\epsilon}_v \\ \hat{f}_{\text{nucleacion}} = \frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \epsilon_p \\ \hat{f}_{\text{cisallamiento}} = \frac{f_C}{s_C\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\epsilon_{xy} - \epsilon_C}{s_C}\right)^2\right] \epsilon_{xy} \end{cases} \quad (5)$$

donde $\dot{\epsilon}_v$ representa la parte volumétrica de la velocidad de deformación; f_N y f_C son la fracción de volumen de cavidades nucleadas por deformación plástica y por cisallamiento respectivamente; s_N y s_C representan la amplitud de la distribución; ϵ_N y ϵ_C son la deformación plástica media y la deformación tangencial para la cual la distribución normal de Gauss presenta su valor máximo y ϵ_{xy} , $\dot{\epsilon}_{xy}$ caracterizan la deformación y la velocidad de deformación tangencial.

3. CASOS DE APLICACION

Los modelos mencionados anteriormente han sido implementados con éxito en el código de elementos finitos FORGE3®. Los elementos utilizados son del tipo tetraédricos lineales P1+/P1. Debido a los altos valores de deformación plástica y cisallamiento que se desarrollan en zonas muy localizadas de la pieza existe la tendencia a la degeneración de elementos. La utilización del remallado automático disponible en el código permite asegurar, vía un remallado periódico, una malla de buena calidad a fin de mantener una calidad aceptable en la solución.

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación al caso de cisallado de una chapa. El comportamiento del material se describe a través de una ley elastoplástica acoplada al modelo de daño propuesto por LeMaître. El espesor de la chapa es de 3mm y los radios de usura de las herramientas se fijaron en 0.1mm. Los módulos elásticos del material son: Young $E = 210000$ MPa y coeficiente de Poisson $\nu=0.3$ respectivamente. La ley de endurecimiento se describe empleando una función potencial lineal $\sigma_e = K\sqrt{3}(1 + a\bar{\epsilon}^n)$ donde $K = 144,34$ MPa representa la consistencia del material, siendo los parámetros $a=4,192$ y $n=0,196$. Finalmente, las constantes asociadas al modelo de daño de LeMaître asumen los valores siguientes: $\epsilon_D = 0$, $\epsilon_R = 0,43$, $D_C = 0,35$ y $r = 0,20$.

La Figura 1 muestra la evolución de la deformación plástica, el daño y finalmente la ruptura de la pieza. El proceso de remallado automático es utilizado frecuentemente para

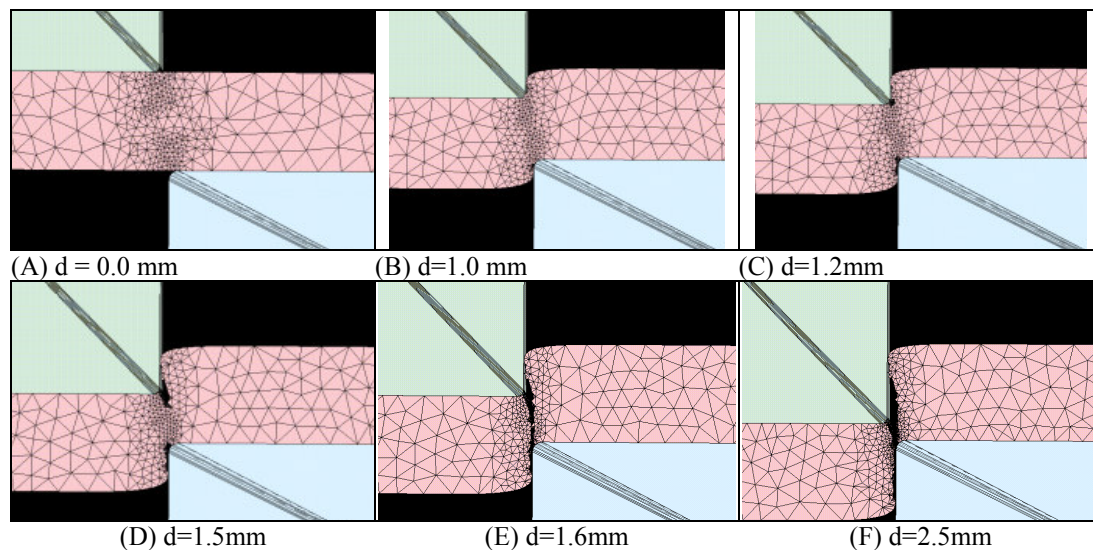


Figura 1: Evolución del daño durante el proceso de ruptura de una chapa.

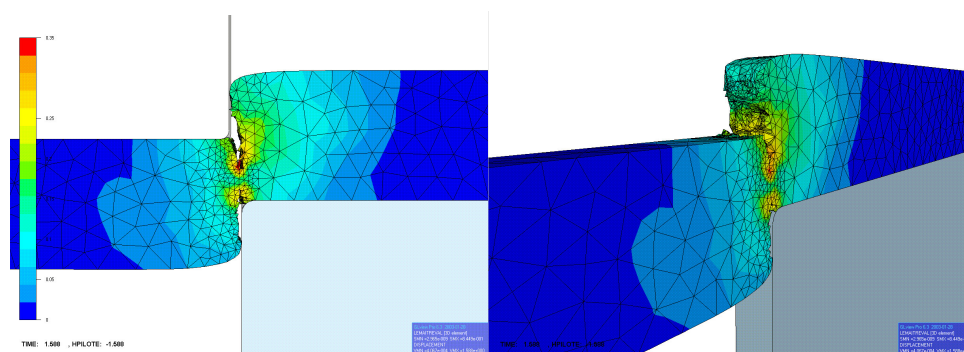


Figura 2: Contornos de igual valor de daño en el proceso de cisallado de una chapa.

remover el degeneramiento progresivo de los elementos de la malla situados en las zonas de alta concentración de la deformación. Para una penetración del pistón de 1mm, la acumulación de daño lleva a la ruptura del material a nivel de la herramienta inferior (Figura 1.B); a continuación, la ruptura aparece en la parte superior (Figura 1.C) y finalmente la fisura se propaga en la zona sometida a un fuerte estado de corte hasta producir la ruptura total de la chapa (Figura 1.E) alcanzada para un desplazamiento del pistón de 1,6mm. Las diferentes etapas de daño y ruptura obtenidas a través de la simulación describen satisfactoriamente lo observado experimentalmente. La Figura 2 muestra la distribución del parámetro de daño D .

La Figura 3 muestra la evolución de la fuerza realizada en función de la penetración relativa en la chapa. De la comparación de ambas curvas se manifiesta rápidamente la importancia de realizar una modelización acoplado los modelos de comportamiento y daño. La curva obtenida por la simulación, si bien no se corresponde a un material específico, es representativa de las observaciones experimentales.

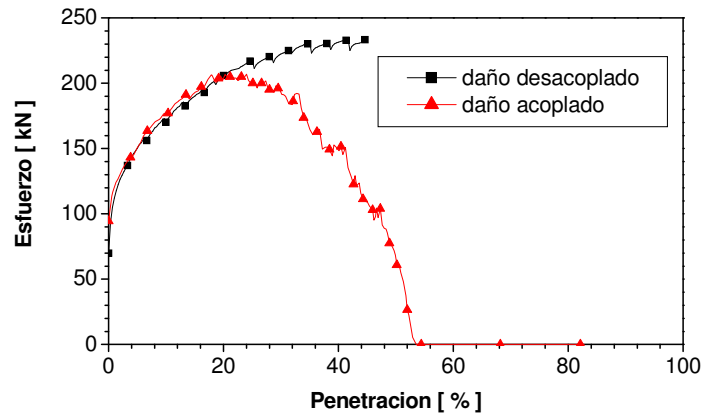


Figura 3: Comparación de las curvas Fuerza-Desplazamiento: en negro sin acople entre el modelo de comportamiento y el modelo de daño y en rojo el caso acoplado.

4. CONCLUSIONES

La implementación de los modelos de daño de LeMaître y de Gurson en el código de elementos finitos FORGE3® brindan una herramienta necesaria para poder modelizar y analizar la degradación progresiva del material en procesos con fuerte cisallamiento. El empleo de la técnica de “kill element” permite modelizar la ruptura completa de la pieza. Actualmente está en curso de implementación la posibilidad de utilizar un remallado adaptativo, lo cual permitirá mejorar la precisión de los cálculos en la zona donde la energía de deformación es importante y localizar adecuadamente el daño y la ruptura del material.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través del proyecto SIMULFORGE y con ayuda financiera de DIGITIP.

REFERENCIAS

- [1] Cockcroft, M.G., Latham, D.J. 1968 Ductility and the workability of metals J. Inst. Metals 96, 33-39.
- [2] McClintock, F.A. 1968 A criterion for ductile fracture by the growth of holes subjected to multi-axial stress-states J. Appl. Mech. 35, 363-371.
- [3] Rice, J.R., Tracey, D.M. 1969 On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields J. Mech. and Phys. of Solids 17, 201-217.
- [4] Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., Shima, S. 1980 Criteria for ductile fracture and their applications J. Mech. Working Techn. 4, 65-81.
- [5] Lemaître, J. 1985 A continuum damage mechanics model for ductile fracture J. Engrg. Mat. Techn. 107, 83-89.
- [6] Gurson, A. 1977 Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth :

- Part I- Yield criteria and flow rules of porous ductile media *J. Engrg. Mat. Techn.* 99, 2-15.
- [7] Tvergaard, V. 1990 Material Failure by void growth to coalescence *Adv. in Appl. Mech.* 27, 83-151.
- [8] Bouchard P.O. 2000 Contribution à la modélisation numérique en mécanique de la rupture et structures multimatériaux Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [9] Bouchard, P.O., Bay, F., Chastel, Y., Tovenà, I. 2000 Crack propagation using an advanced remeshing technique *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engng* 189, 723-742.
- [10] Fourment, L., Bouchard, P.O. 2000 Numerical simulation of chip formation and crack propagation during non-steady cutting processes *Int. J. of Forming Processes* 3 N°1, 59-76.
- [11] Chu, C., Needleman, A. 1980 Void nucleation effects in bi-axially stretched sheets *J. Eng. Mater. Technol.* 102, 249-256.
- [12] Croix, P. 2002 Endommagement et rupture des métaux anisotropes pour la dynamique et le crash de véhicules Thèse de l'Université de Valenciennes.