

Historia del Marc

Un homenaje a Pedro Vicente Marcal

“Pedro Marcal opened my eyes to computational mechanics”
James Rice (en su discurso de aceptación de la Medalla Timoshenko en 1994)

ÍNDICE

0.	Prólogo	4
1.	Introducción.....	5
2.	El comienzo de la historia: el <i>Solid Mechanics Group</i> de la Universidad de Brown	6
3.	Fundación de MARC Analysis Research Corporation.....	11
4.	Adquisición de MARC Analysis por MacNeal-Schwendler Corp.....	14
5.	Marc y Abaqus: dos programas con historias muy entrecruzadas	15
6.	La “era post-Marc” y presente de Marc. Características actuales notables.....	17
7.	Lo último del “viejo” Marc	23
8.	Agradecimientos.....	24
9.	Referencias	25

0. Prólogo

Cierto día Miguel Angel, con la gentileza que le caracteriza, me comentó que le gustaría saber más detalles acerca de los orígenes del programa Marc. Aparte, esto coincidió con mis reflexiones que por entonces tenía sobre los profundos cambios que estaba experimentando Ingeciber, en particular sobre los nuevos *software* que se iban a distribuir, y más en concreto, el contrato de distribución y colaboración tecnológica con la empresa pionera del CAE MSC.Software. Uno de sus programas, el cual se va a convertir en la herramienta de análisis para ingeniería y en el motor de cálculo o *solver* para el *Structural Designer*, es un programa tan desconocido para nosotros como legendario en la historia de los elementos finitos: Marc.

Fue así como decidí bucear a grandes profundidades para documentarme todo lo posible y poder contar (a grandes pinceladas) la historia de un programa que ha sido testigo y banco de pruebas de algunos de los logros más importantes en la mecánica no lineal. Como ya veremos, pese a que fue concebido en la costa Este, prácticamente todos sus progresos tuvieron lugar en California, más en concreto, en la localidad de Palo Alto, cerca de la mítica Universidad de Stanford donde MARC Analysis Research Corp. tuvo sus oficinas hasta su adquisición por MSC (actual MSC Software Corp.). Es por ello por lo que en una muy genuina clasificación, a este *códice* (perdón, *código*) lo encuadro dentro de la llamada “Escuela de California”.

Como indica el subtítulo, este trabajo también es un homenaje a Pedro Vicente Marcal, no sólo por ser el creador de Marc y al que bautizó con su apellido; también por una larga y muy fructífera trayectoria científica y comercial que le ha hecho formar parte del Olimpo de los creadores de programas de elementos finitos: John Swanson (Ansys), John Hallquist (LS-Dyna), Klaus J. Bathe (Adina), David Hibbitt (Abaqus) y Richard MacNeal (MSC/Nastran). Sino además, porque pese a su “breve” pero muy influyente carrera como profesor en Brown, fue mentor de su más brillante alumno de doctorado: David Hibbitt, creador junto con Marcal de la primera versión de Marc, y también creador y “mano de hierro” hasta su retiro del mítico Abaqus. Tal vez, y esto es una suposición muy personal no exenta de romanticismo, la decisión de Marcal de dejar su puesto de profesor y trasladar la compañía a California, tuvo mucho que ver con la decisión de Hibbitt de montar la suya propia y por lo tanto con la existencia de Abaqus (al que algunas veces me refiero, llevado por mi fanatismo, como “obra de arte”). La duda queda... A título muy personal, diré que las figuras de Hibbitt y Bathe han influido profundamente en mi manera de entender el uso y la implementación de los métodos no lineales en elementos finitos

Salvo las muy personales opiniones y “sentires” expresados en este prólogo, en el resto de este breve trabajo no ha habido cabida a opiniones o consideraciones que no estuvieran perfectamente documentadas. En eso he sido inflexible, como dejan bien claras las diversas referencias empleadas.

Finalmente, espero y deseo profundamente que este trabajo cumpla su objetivo: dar a conocer a un formidable programa, y si es posible, a acogerlo con entusiasmo. Para esto último, reconozco que son necesarios otros factores que están fuera de mi control y alcance. En lo que a mí respecta he disfrutado enormemente haciéndolo y he puesto todo mi cariño.

Una última cosa, esta es una historia de pioneros, y pionera del CAE en España lo es esta casa, tengámoslo presente...

1. Introducción

Existen numerosos documentos relacionados con la historia del MEF, algunos de ellos escritos por sus propios protagonistas [1, 2]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se centran en la primera etapa de la evolución del método, la cual podríamos fechar desde mediados de los años 50 hasta 1970. No hay un estudio sistemático de la evolución del método en los años posteriores a esta última fecha pese a los grandes avances que tuvieron lugar desde entonces y que la han convertido en la técnica tan poderosa que es hoy en día. Así por ejemplo, la forma definitiva de las formulaciones incrementales lagrangianas a principios de los '70, la tecnología de elementos hasta llegar al grado de robustez de nuestros días, los algoritmos de integración para comportamiento no elástico o el desarrollo de formulaciones y sus correspondientes algoritmos de resolución para contactos en la década de los '80 y principios de los '90.

Cualquier intento de abordar dicho estudio teniendo sólo en cuenta las contribuciones procedentes del mundo académico sin considerar las aportaciones de la industria del software, sería incompleto. Dado que importantes contribuciones teóricas y prácticas fueron realizadas por desarrolladores (J. Nagtegaal, N. Rebelo, D. Hibbitt, P. Marcal, R. MacNeal, etc.) quienes siempre estuvieron vinculados a compañías privadas dedicadas al desarrollo de códigos de elementos finitos, llegando incluso a patentar algunos de sus desarrollos [3, 4].

Tal vez fue Belytschko [5] el primero en describir la evolución de los métodos no lineales en elementos finitos a través de la historia de los propios programas, tanto académicos (Sap, Nonsap), de centros de investigación (Dyna3D, Pronto) o comerciales (Abaqus, Adina, Ansys o Marc). Dado que en opinión del autor y usando sus propias palabras: “... *in this information-computer age, the software often represents a better guide to the state of the art than the literature*”.

Este breve trabajo no pretende ser tan ambicioso, es decir, no acomete un estudio del desarrollo de los métodos no lineales en elementos finitos y sólo se centra en la historia del más antiguo de sus protagonistas: Marc. Considerado como el primer programa no lineal de elementos finitos comercial, este venerable código en sus 40 años de historia, ha sido uno de los principales protagonistas del desarrollo y devenir de los métodos no lineales en elementos finitos. De hecho, como veremos posteriormente, ha sido un verdadero laboratorio donde por primera vez se implementó la formulación lagrangiana actualizada [7], la simulación de conformado de metales empleando contactos [8] o se implementaron las formulaciones hiperelásticas en plasticidad [9].

Para contar la historia de Marc se ha creído conveniente dividir ésta en varias partes que en cierta medida tratan de seguir un orden cronológico. En la primera se habla del *Solid Mechanics Group* de la División de Ingeniería de la Universidad de Brown, verdadero semillero de ideas donde se incubaron las primeras versiones no comerciales de Marc (¿hasta Marc 2?).

A continuación se habla de la fundación por Pedro Marcal de MARC Analysis Research Corp. Se hace hincapié en la característica que la convertía en una empresa genuina: su plena dedicación a labores de investigación, tal vez al precio de dejar en segundo plano objetivos comerciales, de tal manera que sus principales desarrolladores publicaban sus trabajos en revistas internacionales.

En una tercera se describe la adquisición de MARC Analysis por MacNeal-Schwendler Corp. (actualmente MSC Software Corp.). En la siguiente sección se hace un breve análisis de las similitudes con su gran competidor: Abaqus.

Posteriormente se analiza el periodo comprendido entre lo que aquí se ha llamado la etapa “post-Marcal” hasta la actualidad, haciendo una descripción de los avances más importantes del programa. Finalmente se hace un repaso a las más recientes líneas de investigación y de trabajo de Marcal, quien como ya veremos, ¡sigue plenamente activo!.

2. El comienzo de la historia: el *Solid Mechanics Group* de la Universidad de Brown

A mediados de los años 60 y en plena explosión del MEF existían tres lugares en los que se concentraban buena parte de los avances fundamentales en elementos finitos:

- a) la Universidad de Berkeley, con Ed Wilson, Ray Clough y Bob Taylor,
- b) la Universidad de Swansea, con Olgierd Zienkiewicz, y
- c) la Universidad de Stuttgart, con John Argyris.

Todos estos grupos de investigación tenían en común dos cosas:

- estar formados por ingenieros civiles y
- centrar sus investigaciones en las aplicaciones estructurales del *método*.

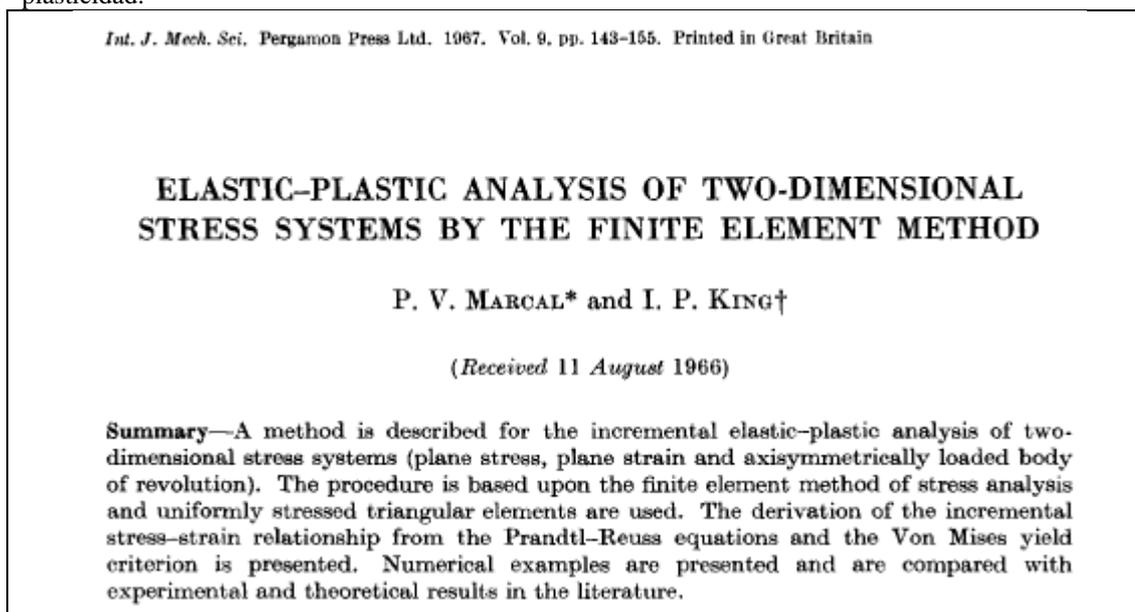
Paralelamente en la Universidad de Brown, en torno al departamento de mecánica del sólido de la división de ingeniería se congregaba un buen número de especialistas a nivel mundial en mecánica teórica y aplicada. Entre ellos se encontraban Daniel Drucker, William Prager, Morton Gurtin [11], Harry Kolsky, Josep Kestin, Alan Pipkin, Ronald Rivlin, Paul Symonds, James Rice [12, 13], Alan Needleman y Robert Asaro.

Este grupo multidisciplinar estaba constituido por físicos e ingenieros de diversas ramas cuyos temas de investigación cubrían numerosos tópicos, todos ellos relacionados con aspectos fundamentales de la mecánica del sólido deformable: modelos constitutivos, termo-mecánica de medios continuos, plasticidad, mecánica de la fractura (la integral J proviene de “J”ames Rice), fatiga, propagación de ondas, etc. Ninguno de ellos relacionados con elementos finitos.

Una nueva línea de investigación en este grupo se abrió con la llegada en 1967 de Pedro Vicente Marcal, un joven y entusiasta profesor procedente del Imperial College de Londres, muy interesado en la aplicación de los elementos finitos a problemas de mecánica del sólido. Marcal, quien ya había realizado trabajos pioneros sobre plasticidad computacional durante su etapa en el Imperial College [14, 15], despertó el interés de Rice por lo elementos finitos y juntos atrajeron estudiantes con los que crearon un equipo de investigación dedicado al desarrollo de técnicas de elementos finitos para problemas del continuo.

Uno de aquellos primeros estudiantes fue David Hibbitt, quien procedente de la Universidad de Cambridge fue a Brown, textualmente, “*to learn more mechanics*”, y quien años más tarde crearía Abaqus.

Figura 1. Uno de los primeros trabajos sobre aplicación del método de elementos finitos en plasticidad.



Marcál y Hibbitt iniciaron la implementación de Marc como banco de pruebas de los desarrollos que en mecánica computacional realizaba el equipo que ellos lideraban. Dichas trabajos fueron numerosos y ejercieron enorme influencia, otorgando a Brown un gran prestigio en cuanto al desarrollo de métodos no lineales para elementos finitos a comienzos de los 70. Así arranca la historia de Marc: un código de investigación, pensado para la resolución de complejos problemas no lineales utilizando para ello las formulaciones que se venían desarrollando en ese momento en la universidad de Brown.

Figura 2. Uno de los magníficos trabajos que a finales de los años 60 y principios de los 70 dieron forma casi definitiva a las formulaciones incrementales en elementos finitos tal y como se emplean hoy en día [6, 16, 17]. En particular este artículo trata sobre la aquí llamada formulación lagrangiana, desde [17] conocida como lagrangiana total.

Int. J. Solids Structures, 1970, Vol. 6, pp. 1069 to 1086. Pergamon Press. Printed in Great Britain

A FINITE ELEMENT FORMULATION FOR PROBLEMS OF LARGE STRAIN AND LARGE DISPLACEMENT

H. D. HIBBITT, P. V. MARCAL and J. R. RICE

Brown University

Abstract—An incremental and piecewise linear finite element theory is developed for the large displacement, large strain regime with particular reference to elastic-plastic behavior in metals. The resulting equations, though more complex, are in a similar form to those previously developed for large displacement, small strain problems, the only additional term being an initial load stiffness matrix which is dependent on current loads. This similarity in form means that existing nonlinear general purpose programs may easily be extended to include finite strains. A large displacement, small strain formulation (as applicable to problems of structural stability) is obtained from this theory by assuming that changes in length of line elements and relative rotation of orthogonal line elements are negligible compared to unity. The simplified equations are in essential agreement with previous formulations in the literature. The only difference which is observed is the persistence of the initial load stiffness matrix, which may be significant in some cases.

Figura 3. Artículo en el que se muestra el empleo a problemas de láminas de las formulaciones lagrangianas desarrolladas por el equipo de Marcal [18] (ver Figura 2. Uno de los magníficos trabajos que a finales de los años 60 y principios de los 70 dieron forma casi definitiva a las formulaciones incrementales en elementos finitos tal y como se emplean hoy en día [6, 16, 17]. En particular este artículo trata sobre la aquí llamada formulación lagrangiana, desde [17] conocida como lagrangiana total.). Abajo se muestra la referencia a Marc.

Computers & Structures, Vol. 1, pp. 223-239. Pergamon Press 1971. Printed in Great Britain

NONLINEAR MATERIAL AND GEOMETRIC BEHAVIOR OF SHELL STRUCTURES†

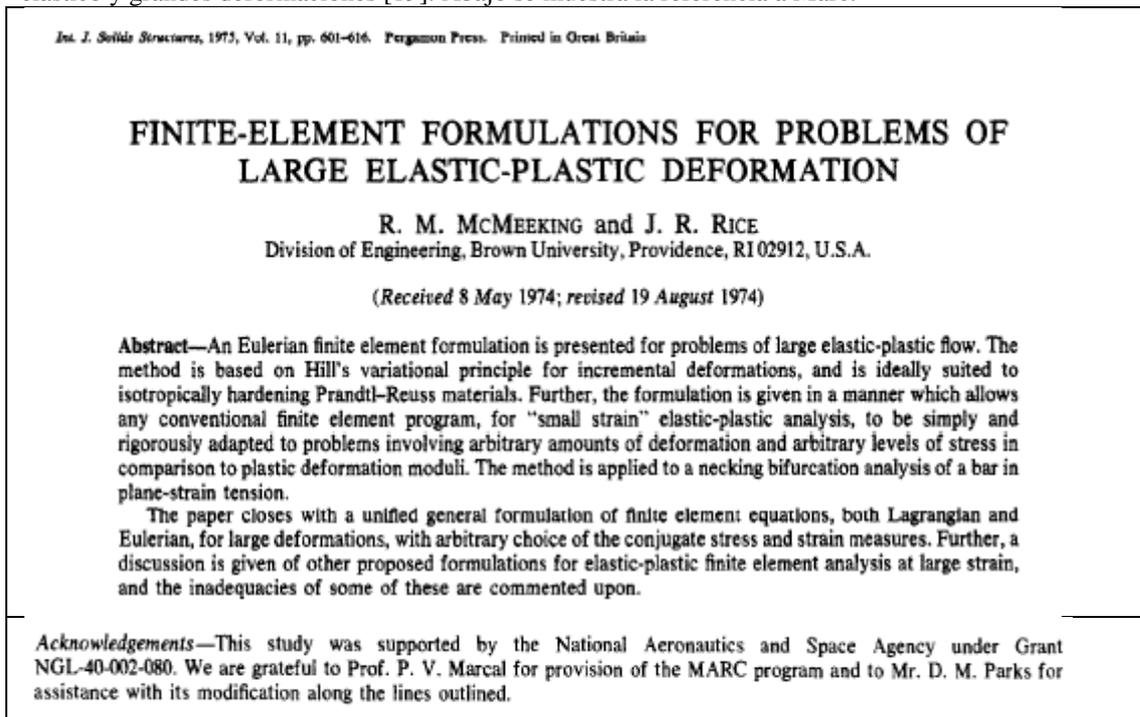
G. A. DUPUIS, H. D. HIBBITT, S. F. MCNAMARA and P. V. MARCAL

Division of Engineering, Brown University, Providence, R. I. 02912, U.S.A.

Abstract—The nonlinear analysis of shell structures is studied by both the Eulerian and the Lagrangian approach. Current methods are discussed on the basis of both formulations. It is found that the widely used updated procedure is a combination of both approaches. From the current standpoint it makes use of a mixture of incremental stiffnesses derived by both approaches. The 'bowing' effect was found to be the main source of error in this updated procedure, and this effect was shown to be negligible when a large number of elements were used. Case studies investigate various aspects of the nonlinear behavior of arches, axisymmetric shells of revolution, flat plates, and arbitrary shells.

the more promising numerical methods. Much of the above has also been implemented in a few general purpose programs. (As far as is known to the authors the full range of the above features is available in ASKA and MARC 2). Therefore, the state-of-the-art is such

Figura 4. Artículo en el que por primera vez se desarrolla una formulación, aquí llamada *euleriana*, para problemas de plasticidad con grandes deformaciones. El término *euleriana*, desde [17], corresponde a lo que en la actualidad se denomina lagrangiana actualizada. Hoy en día es la formulación empleada en exclusividad por todos los programas, en problemas con comportamiento no elástico y grandes deformaciones [19]. Abajo se muestra la referencia a Marc.



A continuación se indican las tesis doctorales que dirigió Marcal durante su etapa de profesor en Brown (1967-1974). También se ha incluido la que dirigió W. Prager a Joop Nagtegaal, ya que como veremos con posterioridad, Nagtegaal años después llegaría a ser director de desarrollo de MARC Analysis, y tras su posterior marcha a Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc. (HKS), un verdadero *gurú* de Abaqus.

- Hugh David **Hibbitt** (Ph.D.: Engineering, 1972)
Título: A numerical thermo-mechanical model for the welding and subsequent leading of a fabricated structure
Director: Pedro V. Marcal
- John Francis McNamara (Ph.D.: Engineering, 1972)
Título: Incremental stiffness method for finite element analysis of the nonlinear dynamic problem
Director: Pedro V. Marcal
- Richard H. Messier (Ph.D.: Engineering, 1975)
Título: A finite element algorithm for the determination of dynamic stability
Director: Pedro V. Marcal
- Erik Paul **Sorensen**, (M.Sc.: Engineering, 1975)
Título: A solid mechanics approach to the solution of fluid-solid vibration problems by finite elements
Director: Pedro V. Marcal
- Johannes Catharinus **Nagtegaal** (Ph.D.: Engineering, 1973)
Título: Use of optimality conditions in structural design
Director: William Prager

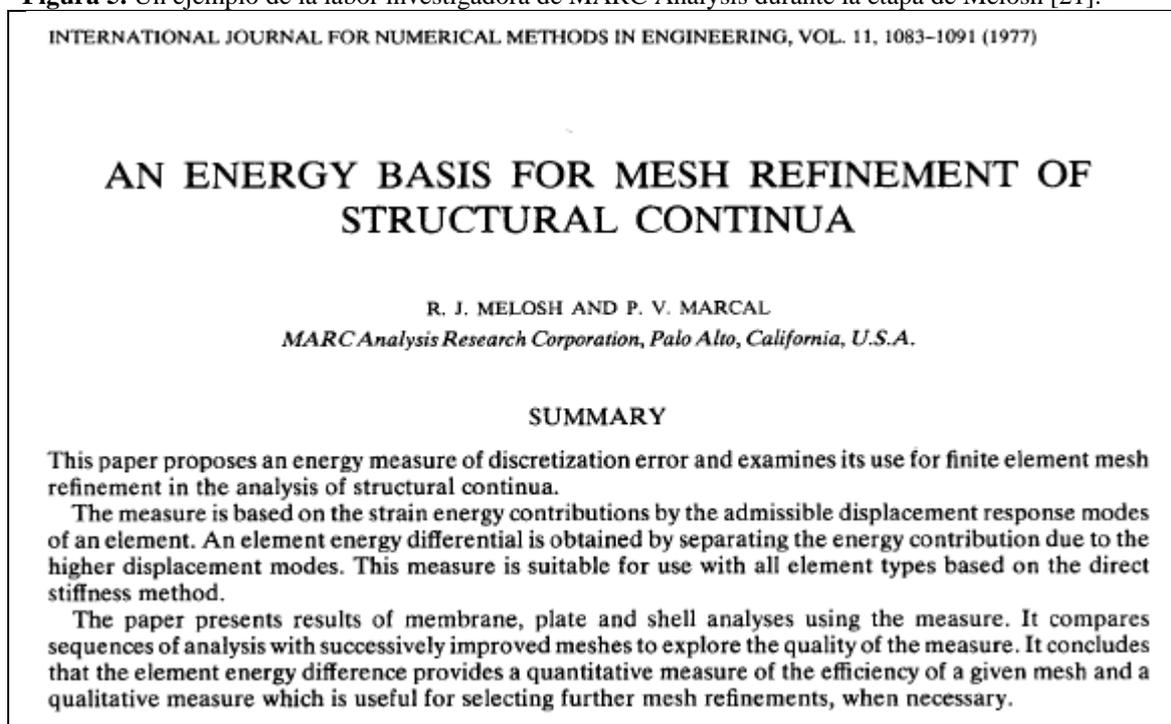
3. Fundación de MARC Analysis Research Corporation

En 1971 Marcal funda MARC Analysis Research Corp. con la idea de comercializar el programa Marc. La sede de la compañía estaba en Providence, cerca de la Universidad de Brown, y su primer y único empleado fue su alumno de doctorado Hibbitt [20]. Tiempo después se le uniría otro estudiante de Brown, Paul Sorensen, quien estuvo poco tiempo y dejó la compañía para completar su tesis que dirigió el propio Marcal. Finalmente, a este equipo de los comienzos de MARC Analysis se le unió en 1976 Bengt Karlsson, quien trabajaba en la sede de Control Data Corporation en Suecia (CDC). Karlsson y Sorensen, junto a Hibbitt, serían los que años después fundarían HKS para desarrollar Abaqus.

Alrededor de 1976 y siguiendo el halo del Silicon Valley, Marcal decide trasladar su compañía a Palo Alto, California. Hibbitt y Karlsson deciden no proseguir y optaron por montar su propia compañía. La nueva andadura comercial del programa MARC no supuso un detrimento de la labor de investigación de la propia compañía. Muy al contrario, en su equipo de desarrollo se encontraban gente tan prestigiosa como Robert Melosh (director de desarrollo) o M. Burke (profesor de Stanford), cuyos desarrollos para MARC Analysis eran publicados en revistas internacionales.

Un ejemplo muy ilustrativo de esta labor fue la creación en 1978, en colaboración con la Universidad de Stanford, del sistema SACON, uno de los primeros sistemas expertos para el análisis estructural, basado en elementos finitos. Aquí es interesante comentar que tal vez este proyecto despertó el interés de Marcal por el empleo de la inteligencia artificial en los elementos finitos y que le ha acompañado hasta la actualidad.

Figura 5. Un ejemplo de la labor investigadora de MARC Analysis durante la etapa de Melosh [21].



En 1980, tras la marcha de Melosh, se incorpora como nuevo jefe de desarrollo J. Nagtegaal, quien hasta entonces dirigía desde Holanda las oficinas de MARC Analysis en Europa. Hasta su marcha a HKS en 1987, Nagtegaal lideró los nuevos desarrollos de Marc, haciendo importantes contribuciones en la implementación de algoritmos para problemas de plasticidad y de contactos.

Figura 6. Dos ejemplos de las contribuciones de Nagtegaal en plasticidad computacional [22, 23].

SOME COMPUTATIONAL ASPECTS OF ELASTIC-PLASTIC LARGE STRAIN ANALYSIS

J. C. NAGTEGAAL†

MARC Analysis Research Corporation, Rijswijk, The Netherlands

J. E. DE JONG

Philips Research Laboratories, Eindhoven, The Netherlands

SUMMARY

The governing equations for large strain analysis of elastic-plastic problems are reconsidered. An improved form of these equations is derived, which is valid for small increments of strain and large increments of rotation. Special attention is paid to the integration procedures for these equations in the deformation history. It is shown that the tangent modulus procedure for integration of the constitutive equations is conditionally stable, and that implicit methods, such as the 'mean normal' method, are to be preferred. A novel procedure is introduced for the treatment of nonlinear geometric effects. The performance of various element types is examined, with specific attention to effects of 'locking' and distortion. Several applications are discussed to illustrate the various aspects of the formulation developed in this paper.

COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING 33 (1982) 469-484
NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY

ON THE IMPLEMENTATION OF INELASTIC CONSTITUTIVE EQUATIONS WITH SPECIAL REFERENCE TO LARGE DEFORMATION PROBLEMS

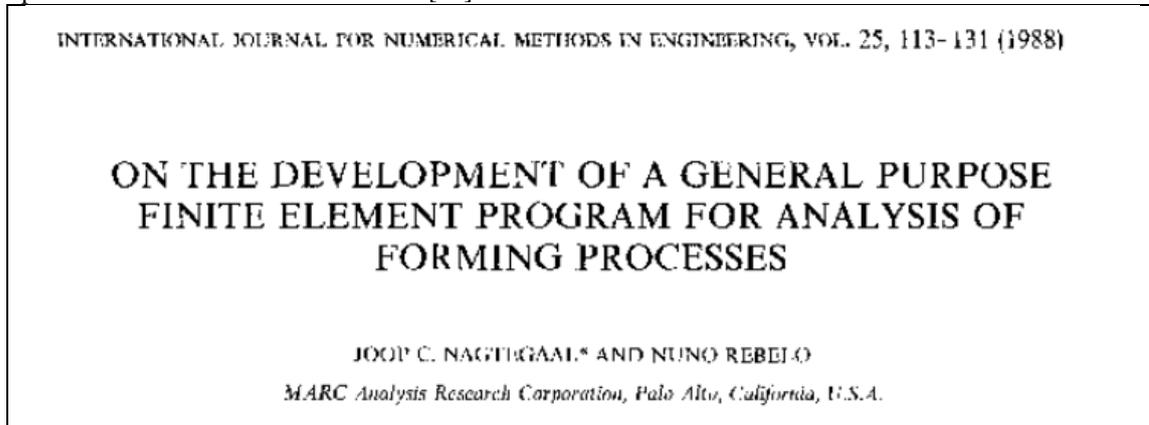
Joop C. NAGTEGAAL

MARC Analysis Research Corporation, 260 Sheridan Avenue, Palo Alto, CA 94306, U.S.A.

Methods for finite element analysis of inelastic problems are reviewed. Problems with currently popular methods, based on rate principles of virtual work, are pointed out. A formulation is presented based on the exact (incremental) virtual work equation. The procedure for integration of the constitutive rate equations to obtain incremental constitutive equations is based on the assumption of a constant strain rate (or straight strain path) during the increment. Full Newton-Raphson iteration is used to solve the resulting set of nonlinear equations. The treatment of the constitutive equations in this Newton-Raphson scheme leads to a linearized form which is substantially different from the classical rate equations. The procedure is implemented in a finite element program and its effectiveness is shown in a number of examples.

En 1984 se incorpora al equipo de desarrollo Nuno Rebelo, quien junto a Nagtegaal harían de Marc el primer programa de elementos finitos capaz de simular problemas de conformado de metales en 3D. Rebelo fue desarrollador de manera simultánea de Marc y Abaqus hasta 2001, fecha en la que se incorporó plenamente al equipo de desarrollo de este último. Aquí hay que llamar la atención sobre el hecho de que a mediados de los 80 las formulaciones para problemas de contacto, en especial para grandes deformaciones, todavía no estaban desarrolladas del todo y eran objeto de activa investigación.

Figura 7. Trabajo en el que se describe el sistema desarrollado por MARC Analysis para simular problemas de conformado de metales [24].



4. Adquisición de MARC Analysis por MacNeal-Schwendler Corp.

Aunque nunca llegó a ser una empresa líder en el mercado del CAE, Marc Analysis en el periodo desde su fundación hasta 1992 se caracterizó por ser una compañía muy respetada pero con un mercado pequeño. Tal vez la principal explicación a esto, estuviera en la propia filosofía que había regido el funcionamiento de la compañía desde sus orígenes hasta entonces: la investigación y el desarrollo, en detrimento de nuevas capacidades requeridas por los usuarios (al contrario de lo que hizo HKS con Abaqus).

En 1992, la compañía nombró a Lou Crain como presidente y CEO. Crain había estado en PDA Engineering desde 1975 hasta 1989, a quien como director de la división encargada del desarrollo de Patran se le reconoce como su principal artífice. Durante su gestión la compañía trata de aumentar su base de clientes con el desarrollo de aplicaciones específicas como MARC/Autoforge, para laminado en frío o caliente de aceros, o mediante el desarrollo de su propio pre- y post-procesador Mentat.

De este modo la compañía llegó a la cifra de 20 millones de dólares en ingresos en 1996, cifra que se mantendría durante los siguientes años. Finalmente los accionistas de la compañía decidieron que ésta había tocado su techo comercial y Crain dejó su puesto directivo a finales de 1998. Finalmente, en mayo de 1999 la compañía es adquirida por MSC por un valor de 36 millones de dólares. Aquí acaba la historia de MARC Analysis como compañía independiente.

A comienzo de los años 90 MSC contaba con varios programas estructurales con capacidades no lineales de diversa amplitud:

- MSC/Nastran, con no linealidad geométrica y un número limitado de modelos de material, ambos superpuestos a posteriori al antiguo *solver* lineal.
- MSC/Dytran, para dinámica explícita y cuyo *solver* era LS-Dyna y
- MSC/Aries FEM con capacidades no lineales mucho más amplias e integradas, cuyo *solver* era Abaqus/Standard [25].

Finalmente MSC en su deseo de tener un *solver* propio no lineal de propósito general, adquiere MARC Analysis como ya se indicó en el párrafo anterior.

5. Marc y Abaqus: dos programas con historias muy entrecruzadas

Como ya se ha visto, los creadores de Abaqus, en especial Hibbitt, estuvieron muy vinculados a los comienzos de Marc. Ambos comparten el hecho de ser programas concebidos desde su inicio para la resolución de complejos problemas no lineales, y esto se refleja en su estructura interna y manera de organizar los tipos de análisis y la información del modelo. Así a modo de ejemplo, Abaqus organiza los datos en dos bloques perfectamente diferenciados, que empleando su nomenclatura son:

- A. *Model data*: que agrupa toda la información independiente del tipo de análisis (mallado, materiales, condiciones de contorno fijas) y del tiempo.
- B. *History data*: tipos de análisis, información de control diversa para la resolución y post-proceso, cargas temporales, etc.

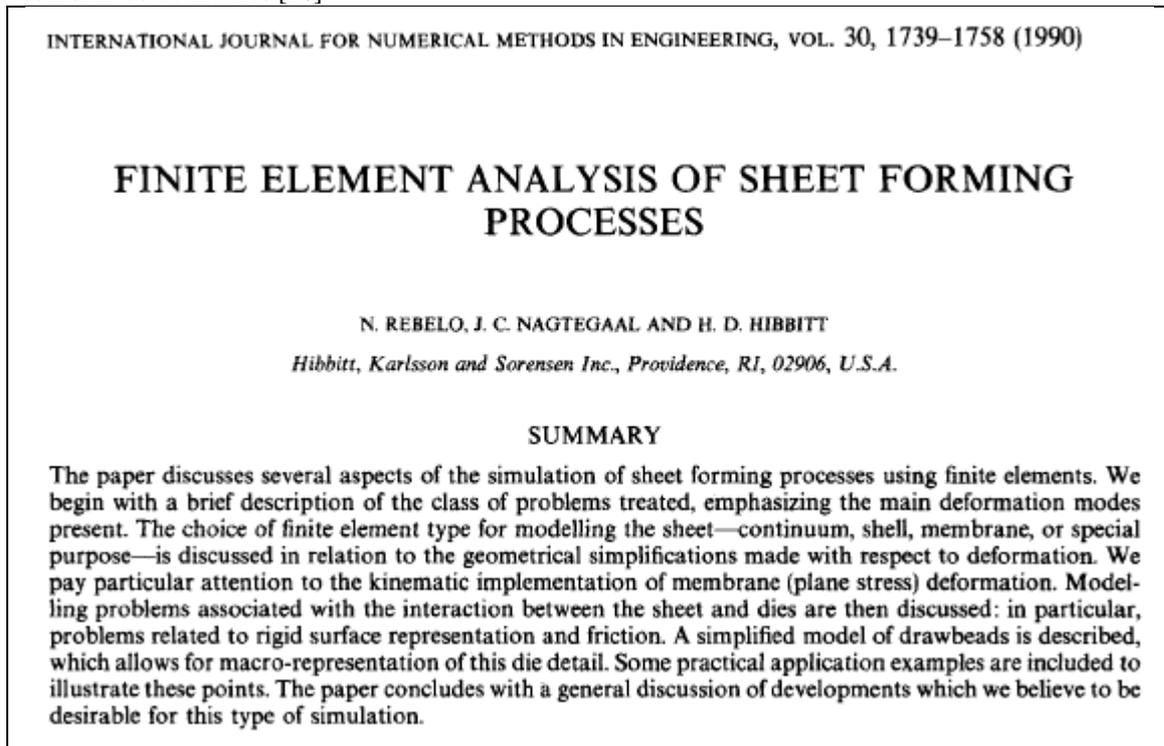
Por otro lado Marc organiza la información de idéntica manera, que en su nomenclatura son:

- A. *Model definition*
- B. *History definition*

Aquí uno puede sospechar de la mano de un mismo (y extraordinario) arquitecto... ¿Hibbitt?

Otro punto en común es el hecho de haber compartido desarrolladores (Nagtegaal y Rebelo), los mismos que tras implementar en Marc el sistema para el análisis de conformado de metales (Figura 7) pocos años después harían lo mismo en Abaqus.

Figura 8. Trabajo en el que se describe el sistema desarrollado en Abaqus para simular problemas de conformado de metales [26].



Finalmente, señalar el hecho de ser los primeros programas en haber desarrollado un sistema basado en el lenguaje Python para interactuar con sus bases de datos y archivos de resultados.

6. La “era post-Marc” y presente de Marc. Características actuales notables

En el momento de realizar el presente trabajo no se ha podido determinar la fecha exacta de la marcha de Marcal de MARC Analysis. La fecha más antigua que se ha podido datar es 1990, cuando aparece como consultor independiente en un congreso de la ASME.

Como ya hemos visto Marc tuvo su propia interfaz gráfica, Mentat, en 1994, lo cual vino a cubrir una importante carencia respecto a su competidor más directo Abaqus. Por otro lado, los desarrolladores de Marc continuaron dando muestras de su alto nivel científico como se demuestra en [9] (ver Figura 9. Trabajo presentado en el 4º Congreso de la Asociación de Mecánica Computacional de Estados Unidos USACM (1997). Actualmente Choudhry forma parte del equipo directivo y Wertheimer es *principal developer* de MSC Software.).

Así por ejemplo, fue el primer programa comercial en implementar una formulación hiperelástica en plasticidad [10]. Además es el único programa que permite la formulación lagrangiana actual en hiperelasticidad, la cual también se ha comprobado que es más robusta en problemas de grandes deformaciones aunque más costosa numéricamente para frente a la total para este tipo de comportamiento material.

Finalmente y como buena muestra del carácter pionero de Marc, es la nomenclatura sui géneris y un tanto arcaica que emplea para dominar a los elementos con formulación mixta: *elementos Herrmann*. Estos elementos están diseñados para comportamientos de material con incompresibilidad total o cuasi-incompresibilidad como ocurre en ciertos modelos de hiperelasticidad o en plasticidad perfecta. El profesor L. R. Herrmann en una serie de trabajos publicados a mediados de los años 60 desarrolló una formulación variacional para abordar este tipo de comportamientos. Marc, basándose en esta formulación, fue el primer programa en tener elementos que soportasen este tipo de comportamientos materiales.

Hyperelasticity Based Finite Strain Plasticity Algorithms in MARC

S. Choudhry, S. Krishnaswami and T.B. Wertheimer

MARC Analysis Research Corporation

260 Sheridan Avenue, Suite 309

Palo Alto, CA 94306

Computational algorithms for plane and three dimensional large deformation elasto-plastic problems implemented in the commercial finite element program MARC are outlined in this work. Traditional approaches have largely focused on hypoelastic formulations. However, when elastic strains are not infinitesimal, the hypoelastic approach has been shown to be inaccurate. Under a closed deformation loop, the hypoelastic formulation shows a dissipation in energy even for a purely elastic material. Also, objectivity must be enforced explicitly. In addition, it is not possible to linearize the kinematics exactly in the hypoelasticity based approaches.

The present approach is based on hyperelastic characterization of the elasticity with a multiplicative decomposition of the deformation gradient into elastic and plastic components. A logarithmic strain measure based on the principal stretches is used. For incompressible problems, a mixed variational principle has been employed. Classical small strain return mapping schemes and algorithmic consistent small strain tangents may directly be used within the hyperelastic framework. Extra terms are added to the tangent based on a fully consistent linearization that includes the kinematics. The tangents have also been rendered singularity free. The accuracy of the tangent allows the full Newton Raphson method to converge quadratically for finite deformation problems.

This model has been implemented in the general purpose finite element code MARC, for plane stress and three dimensional applications. It has been used to simulate the coupled elasto-plasticity and heat transfer in various metal forming problems. This framework is also general enough to allow the handling of other materials in MARC, such as rubbers and elastomers. The model is robust and allows MARC to use large time steps and obtain rapid convergence to equilibrium.

Figura 10. En 1995 MARC Analysis y Axel Products crean el primer curso sobre análisis experimental de elastómeros combinado con técnicas de simulación. Daniel Wolf sigue formando parte de MSC Software.

Elastomer Analysis Using MARC

**Prepared for: Elastomer - Fea Forum '99 3rd International Symposium on
Finite Element Analysis of Rubber and Rubber-like Materials**

 **May 19th and 20th, 1999
The University of Akron
E. J. Thomas Hall
Akron, Ohio USA**

Organized by: Akron Rubber Development Laboratory, Inc. (ARDL)



**Prepared by: Daniel S. Wolf
MARC Analysis Research Corp.
260 Sheridan Ave., Suite 309
Palo Alto, CA 94306**

Page 1 

Figura 11. Avances más importantes de Marc desde su creación. Se han recuadrado aquellos que se han estimado más significativos [27].

History of Nonlinear and Rubber FEA	
A National Research Council report on computational mechanics research needs in the 1990s [Oden, 1991] emphasized the "materials" field as a national critical technology for the United States, and that areas such as damage, crack initiation and propagation, nonlinear analysis, and coupled field problems still require extensive research.	
Before embarking on the issues related to the material behavior, it is interesting to review how the finite element method has matured in the past sixty years—paying special attention to recent improvements in nonlinear FEA techniques for handling rubber contact problems:	
1943	Applied mathematician Courant used triangular elements to solve a torsion problem.
1947	Prager and Synge used triangular elements to solve a 2-D elasticity problem using the "hypercircle method".
1954-55	Argyris published work on energy methods in structural analysis (creating the "Force Method" of FEA).
1956	Classical paper on the "Displacement (Stiffness) Method" of FEA by Turner, Clough, Martin, and Topp (using triangles).
1960	Clough first coined the term "Finite Element Method."
1965	Herrmann developed first "mixed method" solution for incompressible and nearly incompressible isotropic materials.
1968	Taylor, Pister, and Herrmann extended Herrmann's work to orthotropic materials. S.W. Key extended it to anisotropy [1969].
1971	First release of the Marc program by Marc Analysis Research Corporation, MARC. It was the world's first commercial, nonlinear general-purpose FEA code.
1970s-today	Most FEA codes claiming ability to analyze contact problems use "gap" or "interface" elements. (The user needs to know a priori where to specify these interface elements—not an easy task!)
1974	MARC introduced Mooney-Rivlin model and special Herrmann elements to analyze incompressible behavior.
1979	Special viscoelastic models for harmonic analysis to model damping behavior introduced by MARC. Generalized Maxwell model added shortly thereafter.
1985	<ul style="list-style-type: none"> • Oden and Martins published comprehensive treatise on modeling and computational issues for dynamic friction phenomena. • MARC pioneered use of rigid or deformable contact bodies in an automated solution procedure to solve 2-D variable contact problems—typically found in metal forming and rubber applications. Also, first introduction of large-strain viscoelastic capabilities for rubber materials by MARC.

- 1988
- Oden and Kikuchi published monograph on contact problems in elasticity—treating this class of problems as variational inequalities.
 - MARC extended automated contact FEA capability to 3-D problems.
- 1990
- Martins, Oden, and Simoes published exhaustive study on static and kinetic friction (concentrating on metal contact).
- 1991
- MARC introduced Ogden rubber model and rubber damage model.
- 1994
- MARC introduced Rubber Foam model.
- MARC introduced Adaptive Meshing Capability.
- 1995
- MARC and Axel Products, Inc. to create “Experimental Elastomer Analysis” course
- 1997
- MARC introduced Narayanswamy model for Glass Relaxation behavior.
- 1998
- MARC introduced fully parallel software based on domain decomposition.
- 1999
- MARC was acquired by MSC Software
- 2000
- Marc introduced the following:
- Boyce-Arruda and Gent rubber models
 - Special lower-order triangular and tetrahedral elements to handle incompressible materials
 - Global adaptive remeshing for rubber and metallic materials.
 - Coupled structural-acoustic model for harmonic analysis.
- 2003
- Marc introduced the following:
- Steady state tire rolling
 - Cavity pressure calculation
 - Insert option for tire chords
 - Global adaptive meshing in 3-D
 - The J-integral (Lorenzi option) now supports large strains, both in the total and the updated Lagrange formulation. This makes it possible to calculate the J-integral for rubber applications.
 - Strain energy is correctly output for rubber models in total Lagrangian analysis.
- 2005
- Marc introduced the following:
- Global adaptive meshing allows general boundary conditions in 3-D
 - New unified rubber model with improved volumetric behavior
 - Coupling with CFD using MPCCI
 - Global adaptive remeshing enhanced in two-dimensional analyses such that distributed loads and nodal boundary conditions are reapplied to the model after remeshing occurs.
 - A framework, based on the updated Lagrangian formulation, has been set up for hyperelastic material models. Within the framework, users can easily define their own generalized strain energy function models through a UELASTOMER user subroutine.
 - A new friction model, bilinear, is introduced which is more accurate than the model using the velocity-based smoothing function, arc tangent, and less expensive and more general than the stick-slip model.

2007	<p>Marc introduced the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Virtual Crack Closure Technique with remeshing to see crack growth during the loading. • Cohesive zone method (CZM) for delamination • Connector elements for assembly modeling • Steady state tire rolling • Puck and Hashin failure criteria • Crack propagation in 2-D using global adaptive remeshing • Simplified nonlinear elastic material models • Solid shell element which can be used with elastomeric materials • Nonlinear cyclic symmetry • Rubber example using volumetric strain energy function
2008	<p>Marc introduced the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simple material mixture model • Moment carrying glued contact • Hilbert-Hughes-Taylor Dynamic procedure • Interface elements added automatically on crack opening with adaptive meshing
2010	<p>Marc introduced the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incorporated generalized 5th order Mooney-Rivlin hyperelastic model • Parallel solver technology to utilize multi-core processors • Segment to segment contact • On-demand video training for the Mar103 Experimental Elastomer Analysis course where you can see and hear how eight of the experiments in Appendix C are conducted. Understand by involving yourself in the corresponding workshop problems to touch and feel the curve fitting of hyperelastic constants. Learn how to distinguish a good hyperelastic curve fit from a poor one. Click here for a four minute video summary.

7. Lo último del “viejo” Marcal

Desde que dejó su corta pero brillante etapa como profesor en Brown para iniciar su andadura empresarial con MARC Analysis hasta la actualidad, Pedro Marcal ha demostrado ser una persona con sobrado entusiasmo e iniciativa para embarcarse en nuevos proyectos, siempre relacionados con la mecánica computacional.

En 1992 se convierte en presidente de Phoenix North America, donde tiene oportunidad de introducirse y adquirir experiencia en el mundo de la CFD, alguien que como él siempre se movió en el campo del sólido deformable.

En 1995 fundó PVM Corp. (nuevamente su nombre) con el objeto de desarrollar Feva, programa de propósito general para multifísica. En 2004 fundó MPACT Corp. (<http://www.actact.co.jp/index.php?MPACT%20English>), esta vez para desarrollar MPave (Multiphysics Adaptive Visual Environment), un pre y post-procesador escrito enteramente en Python (<http://www.actact.co.jp/index.php?Mpave%20English>).

Marcal es *fellow* de la ASME desde 1975 y fue director de la Pressure Vessel and Piping Division en donde fue galardonado en 1989 con el premio Pressure Vessel Medal por sus contribuciones a los métodos no lineales en elementos finitos.

Hasta la fecha ha publicado alrededor de 80 trabajos científicos relacionados con elementos finitos, fatiga, fractura e inteligencia artificial. Trabajador incansable, ha ayudado a organizar numerosos congresos científicos. Aparte de los códigos de elementos finitos Marc, Feva, MPave y Sage (Superconvergent Adaptive General Elements), también ha desarrollado el sistemas de inteligencia artificial ANLAP: capaz de generar datos de entrada para códigos de elementos finitos o a de análisis estadístico a partir de informes de datos de ensayos de resistencia y fatiga escritos en japonés o inglés.

8. Agradecimientos

Varias personas de forma directa o indirecta han intervenido en este trabajo, y a quienes va dedicado.

A Miguel Ángel, cuyo *humanismo* (en el sentido más amplio del término) impregna el espíritu de Ingeciber y da sentido a proyectos de este tipo.

A los “saletes”: Eduardo “Padre” y Eduardo “Hijo”, por darme la oportunidad y toda su confianza en abordar problemas difíciles. En especial a Eduardo “P” por sus sabios consejos, uno de los cuales: “lo mejor es el peor enemigo de lo bueno” he tenido muy presente al elaborar este trabajo.

A Jorge Corpas, por compartir conmigo sus conocimientos del mercado del CAE y contarme cosas que tal vez “no debería oír”.

A Conchita, directora de la biblioteca de la Escuela de Caminos, quien de forma amable y generosa acepta todas mis propuestas de adquisición de libros para la escuela, y me consigue libros y artículos difíciles de encontrar. En concreto la presentación de los desarrolladores de MARC Analysis para el 4º Congreso de la USACM.

A mi amigo Pablo, quien desde su puesto en la Oficina de Patentes me consiguió las dos patentes que poseen Hibbitt y Nagtegaal en elementos finitos.

Y por último, de manera muy especial, a *ella*, que en cierta ocasión con una ingenuidad que me enterneció pensó que tal vez pudiera ser otro Bathe.

9. Referencias

- [1] R. W. Clough, E. L. Wilson, "Early finite element research at Berkeley". Fifth U.S. National Conference on Computational Mechanics (1999).
- [2] J. T. Oden, "Historical comments on finite element". Association for Computing Machinery, Inc. (1990)
- [3] H. D. Hibbitt, J. C. Nagtegaal, "Computer process for prescribing and assembly load to provide pre-tensioning simulation in the design analysis of load-bearing structures", U.S. Patent (1999).
- [4] J. C. Nagtegaal, "Computer process for prescribing second-order tetrahedral elements during deformation simulation in the design analysis of structures", U.S. Patent (2000).
- [5] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, Wiley (2000).
- [6] J. T. Oden, *Finite Elements for Nonlinear Continua*, McGraw-Hill (1972). Reimpreso por Dover (2006).
- [7] R. M. McMeeking, J. R. Rice, "Finite-element formulations for problems of large elastic-plastic deformation", *Int. J. Solid Structures*, Vol. 11, pp. 601-616 (1975).
- [8] J. C. Nagtegaal, Nuno Rebelo, "On the development of a general purpose finite element program for analysis of forming process", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 25, pp. 113-131 (1988).
- [9] S. Choudhry, S. Krishnaswami, T. B. Wertheimer, "Hyperelasticity based finite strain plasticity algorithms in MARC", *Proceedings of the Fourth US National Congress on Computational Mechanics* (1997).
- [10] J. C. Simó, "Algorithms for static and dynamic multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory", *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, Vol. 99, pp. 61-112 (1992).
- [11] M. E. Gurtin, "Confessions of a slightly frayed continuum mechanician", 2004 Timoshenko Medal Acceptance Speech by Morton E. Gurtin. (<http://imechanica.org/node/197>)
- [12] J. R. Rice, 1994 Timoshenko Medal Acceptance Speech by James R. Rice. (<http://imechanica.org/node/187>)
- [13] Tze-Jer Chuang, J. W. Rudnicki, "Biography of James R. Rice", *Multiscale Deformation and Fracture in Materials and Structures: The James R. Rice 60th Anniversary Volume*, Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 84, pp. 15-26 (2001).
- [14] P. V. Marcal, "A stiffness method for elastic-plastic problems", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 7 pp. 229-238 (1965).
- [15] P. V. Marcal, I. P. King, "Elastic-plastic analysis of two-dimensional stress systems by the finite element method", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 9, pp. 143-155 (1967).
- [16] H. D. Hibbitt, P. V. Marcal, J. R. Rice, "A finite element formulation for problems of large strain and large displacement", *Int. J. Solid Structures*, Vol. 6, pp. 1069-1086 (1970).
- [17] K. J. Bathe, E. Ramm, E. L. Wilson, "Finite element formulations for large deformation dynamic analysis", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 9, pp. 353-386 (1975).
- [18] G. A. Dupuis, H. D. Hibbitt, S. F. McNamara and P. V. Marcal, "Nonlinear material and geometric behavior of shell structures", *Computers & Structures*, Vol. 1, pp. 223-239 (1971).
- [19] R. M. McMeeking, J. R. Rice, "Finite-element formulations for problems of large elasto-plastic deformation", *Int. J. Solid Structures*, Vol. 11 pp. 601-616 (1975).
- [20] H. D. Hibbitt, "A perspective from a commercial finite element software vendor", 29 May 2007.
- [21] R. J. Melosh, P. V. Marcal, "An energy basis for mesh refinement of structural continua", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 11, 1083-1091 (1977).
- [22] J. C. Nagtegaal, "Some computational aspects of large-strain analysis", *J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 17, pp. 15-41 (1981).
- [23] J. C. Nagtegaal, "On the implementation of inelastic constitutive equations with special reference to large deformation problems", *Comp. Meth App. Mech. Eng.*, Vol. 33, pp. 469-484 (1982).

- [24] J. C. Nagtegaal, N. Rebelo, “On the development of a general purpose finite element program for analysis of forming processes”, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 25, pp. 113-131 (1988).
- [25] H. D. Hibbitt, “Production oriented nonlinear analysis of solids and structures”, MSC 1994 World Users’ Conference, Los Angeles, California.
- [26] N. Rebelo, J. C. Nagtegaal, H. D. Hibbitt, “Finite element analysis of sheet forming processes”, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 30, 1739-1758 (1990).
- [27] MSC.Software Whitepaper: “Nonlinear finite element analysis of elastomers”.
- [28] D. E. Weisberg, *The Engineering Design Revolution* (<http://www.cadhistory.net/>).
- [29] H. H. Fong, “From FEA to MCAE today – A 40-year personal Odyssey”, FEA News, April 2007, FEA Information Inc.