

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD NUMERICA DEL PROBLEMA DE FLUENCIA LENTA DEL HORMIGON EN TRACCION UNIAXIAL

Victor Fares^a, Ricardo Lorefice^a y Rodrigo Ruiz Lopez^a

^a*Centro de Mecanica Aplicada y Estructuras (CMAE), Universidad Nacional de Santiago del Estero, Avda. General Savio s/n , 4300 La Banda – Santiago del Estero, Argentina, rlorefice@gmail.com, <http://www.unse.edu.ar/>*

Palabras clave: elementos de junta, estabilidad numérica, fluencia lenta, tracción uniaxial.

Resumen. Se presenta el análisis computacional comparativo de la influencia del método de integración numérica en el comportamiento de falla diferida ante cargas de larga duración (fluencia lenta) bajo estados de tracción uniaxial empleando mallas mesomecánicas de elementos finitos que representan la mesoestructura del hormigón convencional. El estudio computacional revela la marcada incidencia de la regla de integración considerada en los elementos de junta en la estabilidad del proceso de falla durante las etapas de creep secundario y terciario, presentándose resultados comparativos para elementos de junta situados en las distintas interfases de la mesoestructura mortero-mortero y mortero-agregado. Finalmente, se presentan conclusiones acerca de la conveniencia del empleo de uno u otro método de integración para las distintos tipos de juntas en el análisis de problemas de fluencia lenta a nivel mesomecánico.

1. INTRODUCCION

El estudio del comportamiento mecánico de materiales con fuerte comportamiento reológico tales como el hormigón es de gran importancia en el caso de estructuras esbeltas sometidas a cargas importantes, dado que dichas deformaciones diferidas en el tiempo conllevan a un incremento de las sollicitaciones actuantes con la consiguiente reducción del grado de seguridad de la estructura. En particular, el fenómeno de creep o fluencia lenta en el hormigón interactúa con problemas de transporte de humedad y temperatura, generando estados de tensiones complejos debido a la evolución de la rigidez y porosidad de la pasta cementicia que compone el mortero. En el caso que nos ocupa, la atención se concentra en el fenómeno de creep básico, concentrando la atención en la respuesta diferida del material bajo cargas de larga duración. Dado que los estudios experimentales realizados por diversos investigadores indican que el fenómeno de creep es mucho más pronunciado cuando el material es sometido a estados tensionales de tracción, se estudia en este trabajo la estabilidad numérica del problema, considerando una probeta mesomecánica representativa de la mesoestructura típica del material. El estudio de la estabilidad numérica de los procesos de cálculo cuando se ven involucrados elementos de junta o interfase de espesor nulo en la modelización de falla material a nivel de observación mesomecánica implica ventajas y desventajas, ver Fares et al. (2007, 2008). Trabajos realizados por diversos investigadores han tratado el problema de la estabilidad numérica de este tipo de aproximaciones al proceso de fisuración, ver entre otros Carol y Alonso (1983), Gens et al, (1995), Amadei (1990), Potts (1994), López (1999, 2001). Los resultados de estas investigaciones indican que la combinación de elementos finitos de medio continuo y de interfase o junta conducen a oscilaciones en los valores de las tensiones a nivel de punto de integración, las cuales se deben a uno o varios factores relacionados con los elementos de junta, tales como la gran diferencia de rigidez entre los elementos de interfase y los elementos de medio continuo adyacentes, la velocidad del proceso de carga, incidencia de las condiciones de borde del problema mismo y la evolución temporal del tamaño del dominio elástico en problemas tiempo/tasa dependientes. Considerando que los antecedentes existentes se limitan en general a formulaciones elastoplásticas o bien a leyes de fractura simple, se aborda en este trabajo el estudio de la performance numérico-computacional del problema de creep básico en tracción uniaxial considerando un modelo de fisura cohesivo friccional basada en la elasto-viscoplasticidad, (Lorefice 2006, 2007, 2008).

2. ANALISIS NUMERICO

A fin de evaluar el comportamiento numérico de las diversas reglas de integración usuales en este tipo de elementos finitos de interfase, (Figura 1), se estudia el modelo mesomecánico representado por la malla ilustrada en Figura 2, con una discretización de elementos finitos compuesta por 1902 elementos de continuo de forma triangular y 1122 elementos de junta dispuestos como interfaces en la matriz (juntas mortero-mortero) y juntas agregado-mortero. Dichos elementos obedecen a la ley constitutiva elasto-viscoplastica descrita en trabajos anteriores (Lorefice 2006, 2007, 2008). A fin de aproximar las condiciones del ensayo numérico al experimental, se agrega a la parte superior de la malla mesomecánica un cabezal rígido (ver Figura 2), el cual permite la generación de un estado tensional más homogéneo y con menos concentración de tensiones en la mesoestructura misma. Dicho cabezal se vincula a la malla mesomecánica por medio de una interfase horizontal con juntas de alta rigidez normal y muy baja rigidez tangencial, permitiendo movimientos en dicho sentido, ver Lopez

et al (2001). La aplicación de las cargas de tracción se realiza en los nodos superiores, mientras que la cara inferior de la probeta se asume fija. La carga de tracción se aplica gradualmente en 40 pasos de carga. Una vez alcanzada la carga máxima se consideran 75 pasos de tiempo con 90 incrementos cada uno. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a 5 nodos de elementos de interfase mortero – agregado y mortero-mortero cuyas localizaciones en la malla se indican en la misma figura. Para su elección se ha tenido en cuenta su ubicación e inclinación dentro de la malla, y la observación de que estas tres juntas se hallan en las líneas de falla del ensayo de tracción como se puede apreciar en la Figura 3, la cual ilustra la malla deformada para el estado ultimo considerado. El ensayo numérico consiste en la aplicación de las cargas verticales a fin de imponer un estado de tensión capaz de activar el proceso de fluencia, dejando luego esta carga fija en el tiempo a fin de estudiar la evolución temporal del fenómeno. Las graficas de tensiones normales y de corte que se presentan a continuación se han obtenido considerando seis instantes de tiempo posteriores a la aplicación de la carga. La energía disipada para los instantes inicial y final del proceso se presentan en las Figuras 3 y 4.

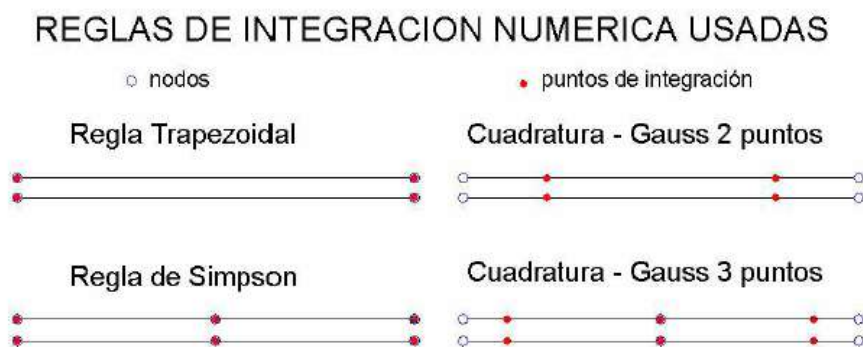


Figura 1: Reglas de integración numérica y elemento de junta isoparamétrico

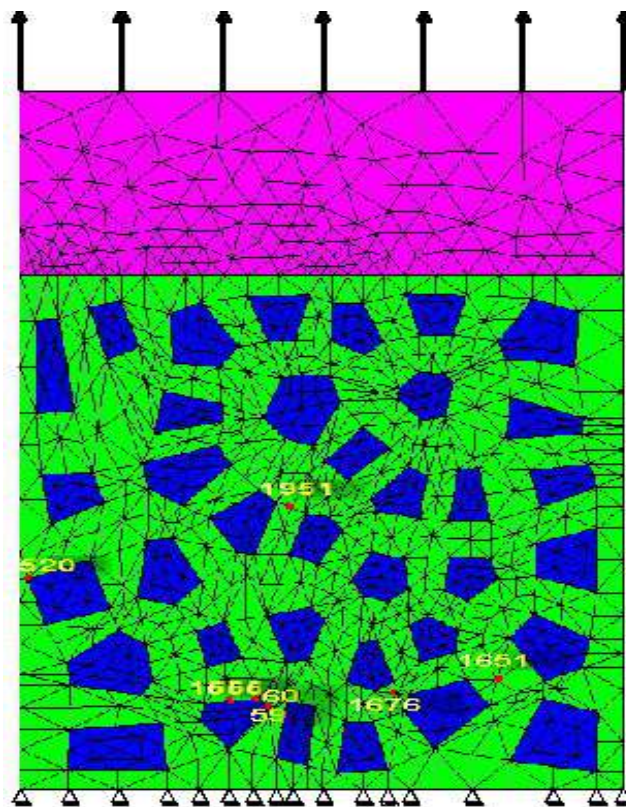


Figura 2: Malla mesomecánica. Esquema de cargas y restricciones.

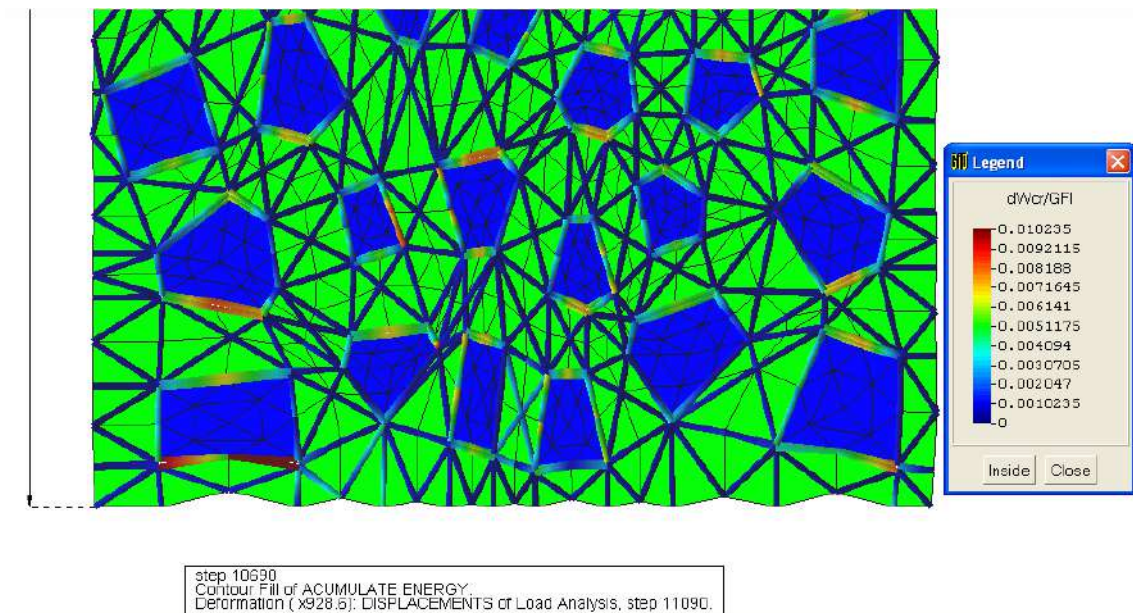


Figura 3: Vista parcial - Malla mesomecánica. Energía disipada en estado inicial.

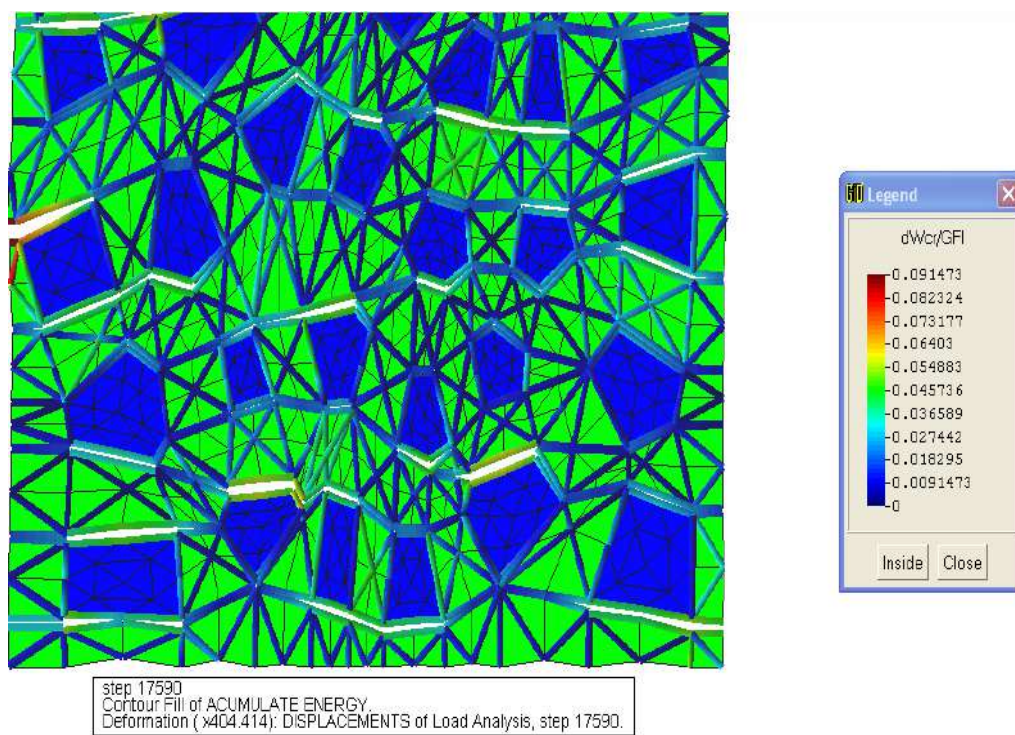


Figura 4: Proceso de fisuración en tracción – deformada y energía disipada

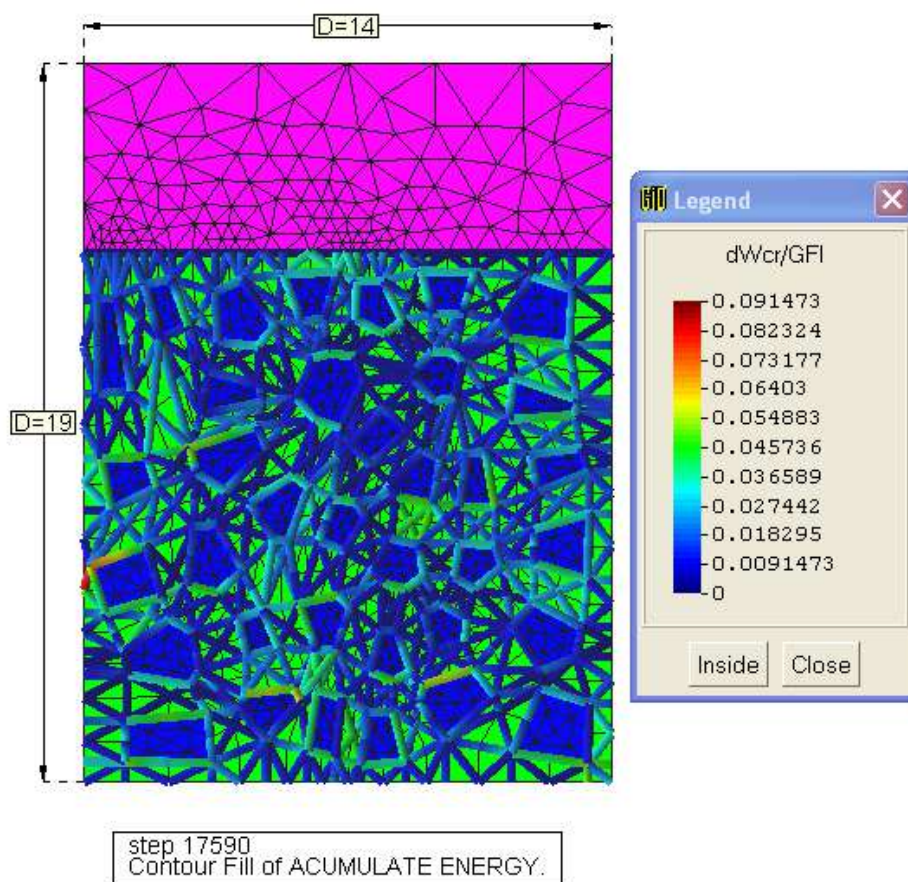


Figura 5: Malla mesomecanica y energía disipada en estado final

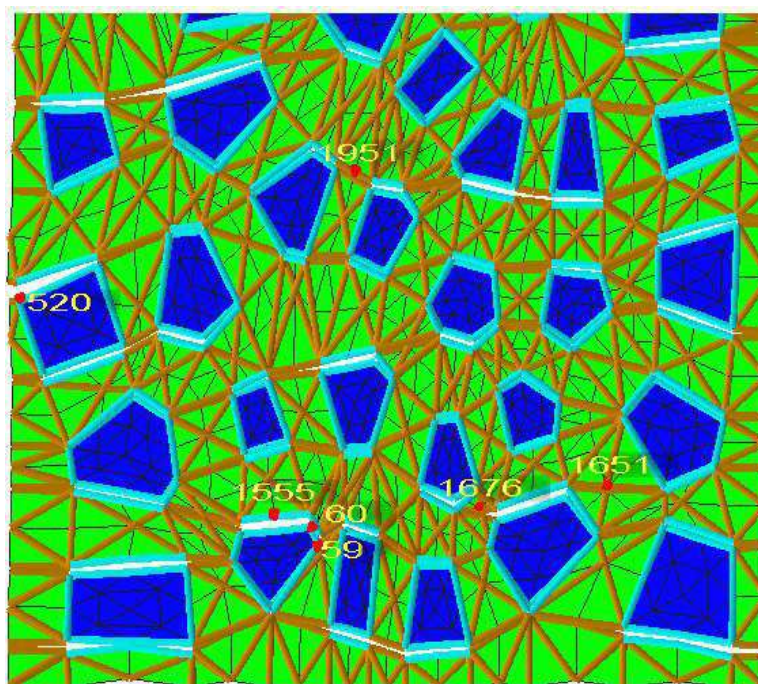


Figura 6: Ubicación de nodos elegidos para el análisis.

El estudio de estabilidad de la solución para las diferentes reglas de integración se presenta en términos de la evolución temporal de las tensiones en las juntas en 6 instantes de tiempo para los pasos 5, 20, 35, 50, 65 y 75, ver Figuras 7 a 20. Del análisis realizado se desprende que la magnitud de la inestabilidad numérica de cada regla es función de la ubicación de las juntas y de su posición relativa respecto a la dirección de aplicación de las cargas. La mayor inestabilidad del proceso se produce inmediatamente después de aplicada la carga normal, debido a que en los instantes posteriores se produce un rápido proceso de transferencia de las tensiones aplicadas desde los elementos de medio continuo a las juntas, disipándose la energía en estas últimas. El grado de inestabilidad que se observa en el proceso numérico depende de la posición de la junta en la mesoestructura. Esto se aprecia tanto para tensiones normales como para esfuerzos de corte, disminuyendo las diferencias a medida que el proceso de creep reduce su tasa de deformación con el paso del tiempo. Para el nodo 520 perteneciente a una junta mortero-agregado dispuesta en dirección horizontal, cerca del borde izquierdo de la malla, se observan las menores diferencias en el valor de la tensión normal entre las distintas reglas de integración. Idénticas conclusiones valen para el nodo 1555, correspondiente a una junta horizontal mortero - agregado del recorrido de una de las grietas del sector inferior de la malla, ver Figura 6. Asimismo, el monitoreo de la evolución de los estados tensionales de las juntas durante la fluencia permite apreciar claramente que diversas juntas de la malla invierten el signo del estado tensional durante el proceso de deformación y transferencia de carga, lo cual es producto de la apertura/cierre de juntas, combinado en las juntas inclinadas con deslizamiento relativo entre las caras de la fisura.

RESULTADOS EN EL NODO 1951 – JUNTA MORTERO- MORTERO 697

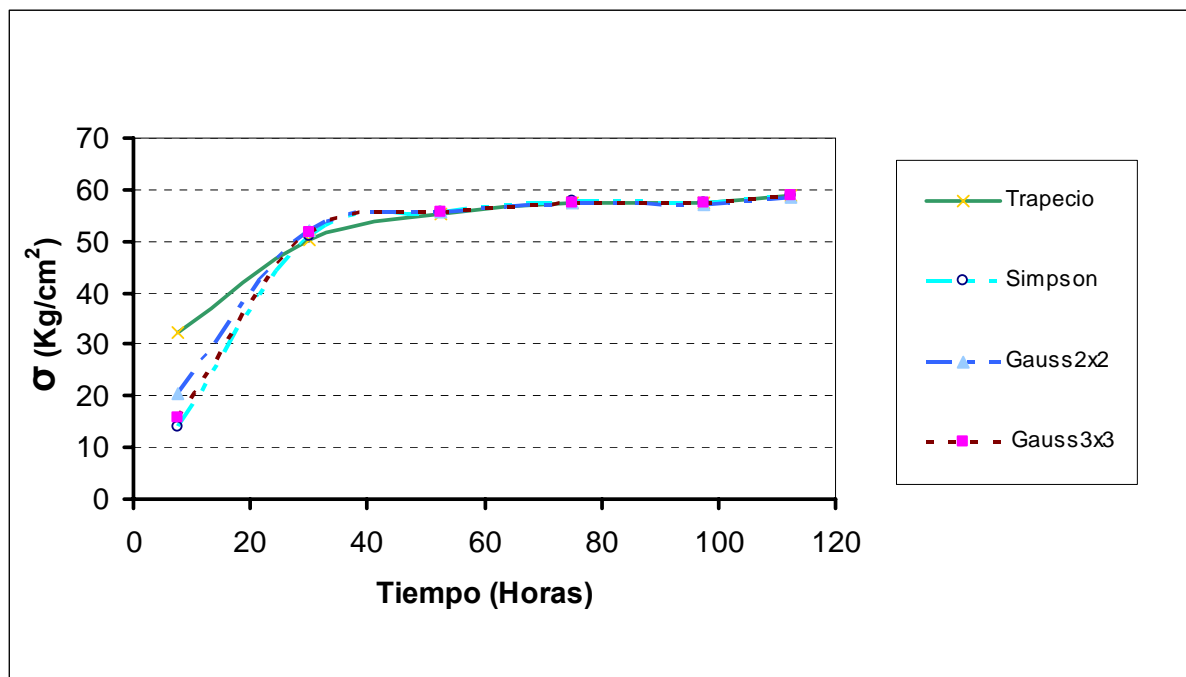


Figura 7: Tensiones Normales – Junta Mortero – Mortero N° 697

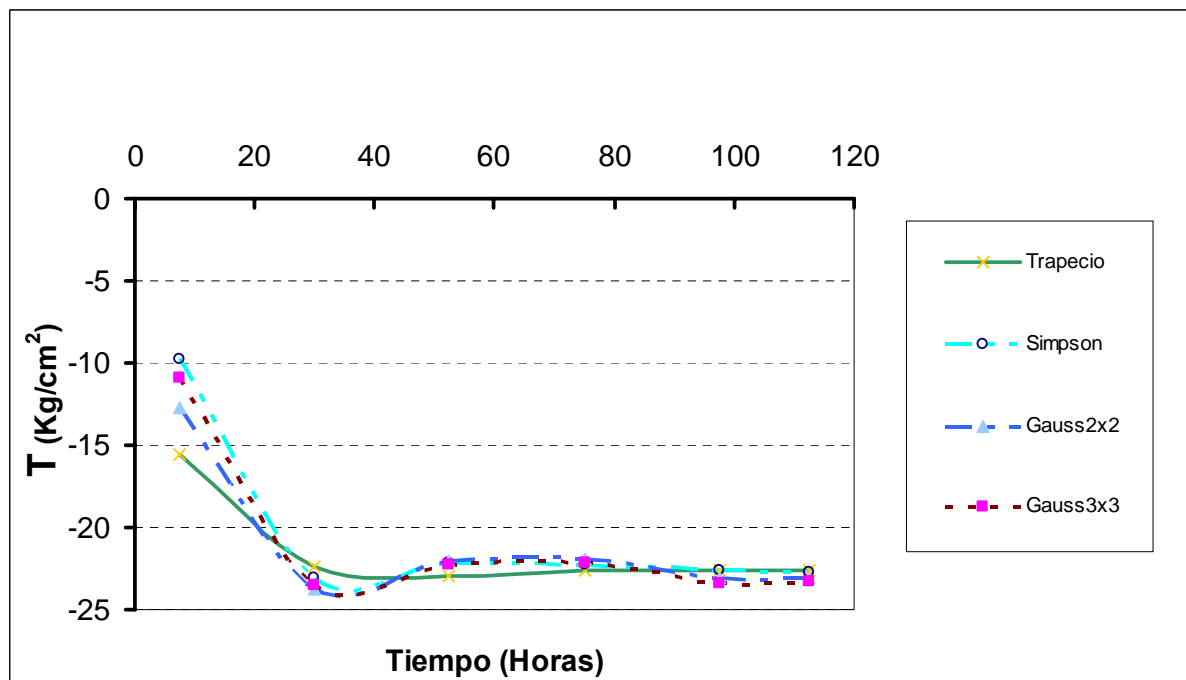


Figura 8: Tensiones de Corte – Junta Mortero – Mortero N° 697

RESULTADOS EN EL NODO 520 – JUNTA MORTERO - AGREGADO 676

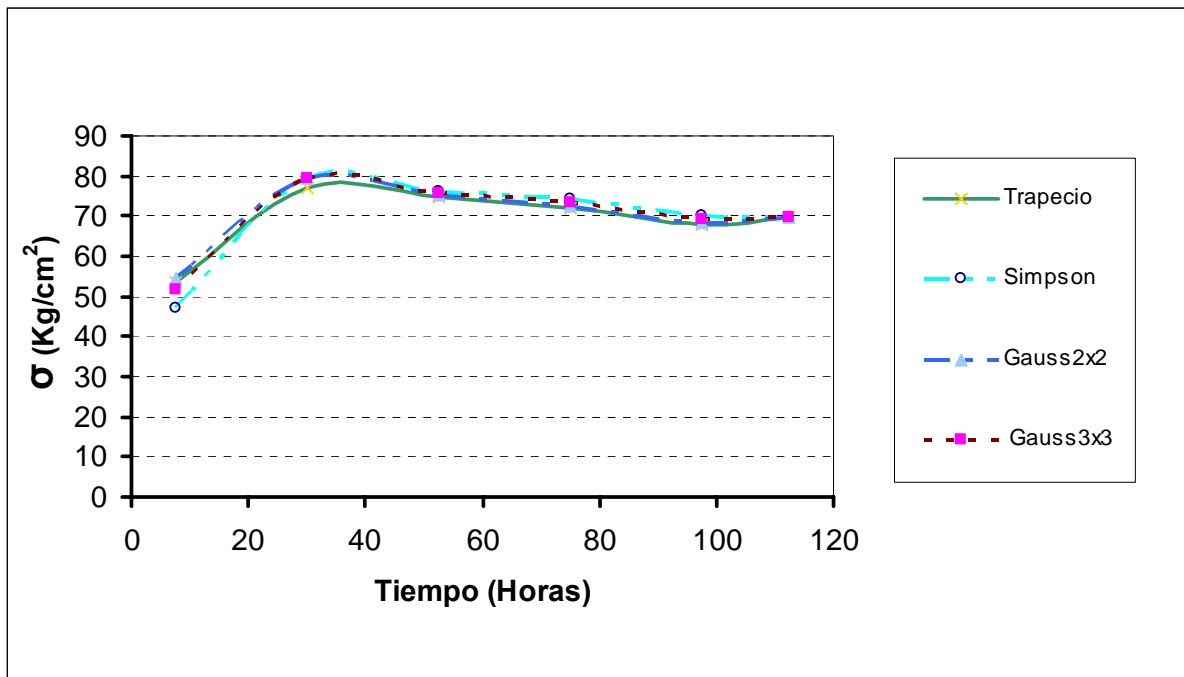


Figura 9: Tensiones Normales – Junta Mortero – Agregado N° 676

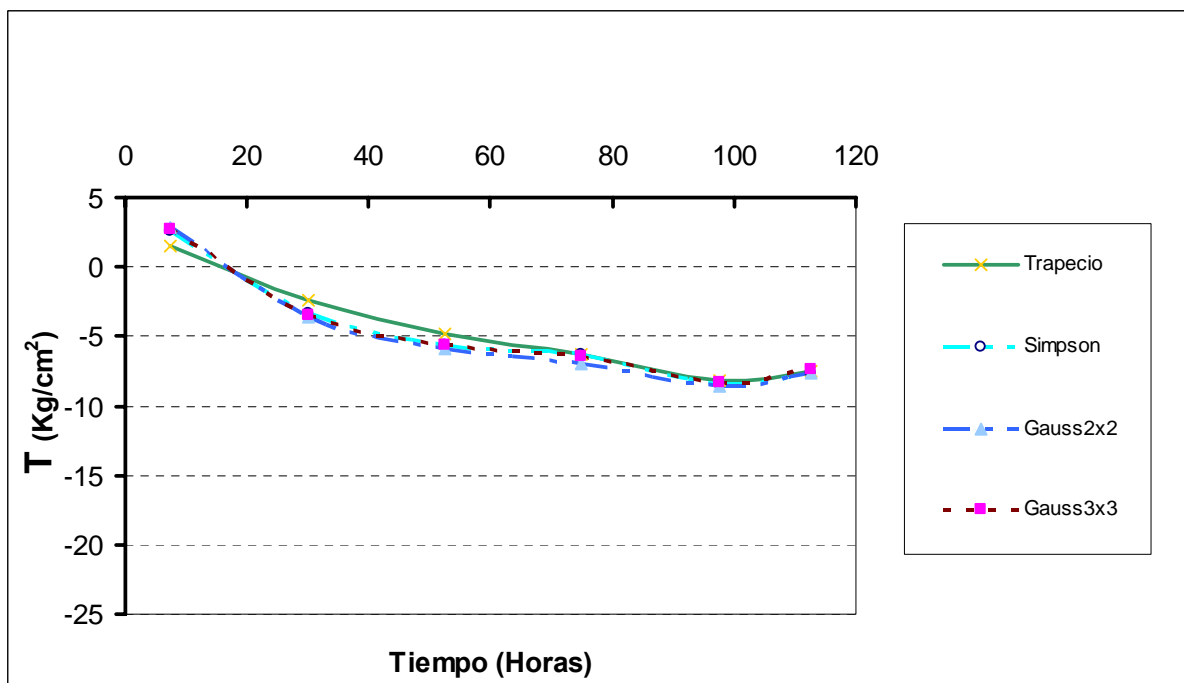


Figura 10: Tensiones de Corte – Junta Mortero – Agregado N° 676

RESULTADOS EN EL NODO 1555 – JUNTA MORTERO - AGREGADO 12

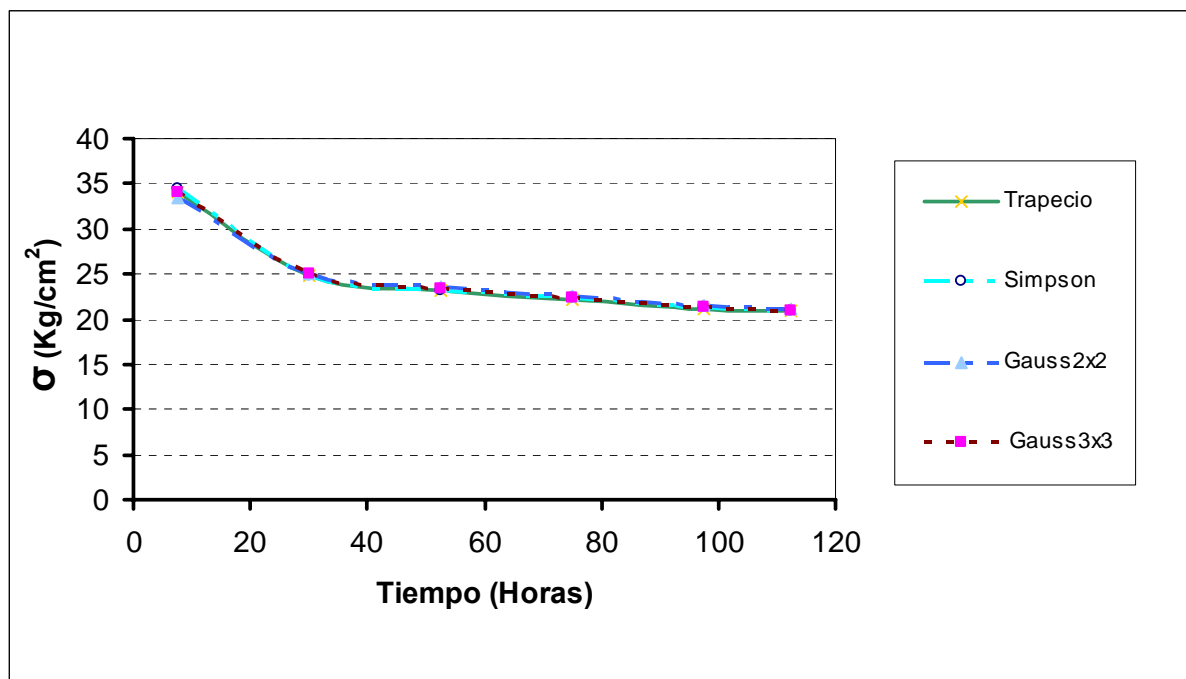


Figura 11: Tensiones Normales – Junta Mortero – Agregado N° 12

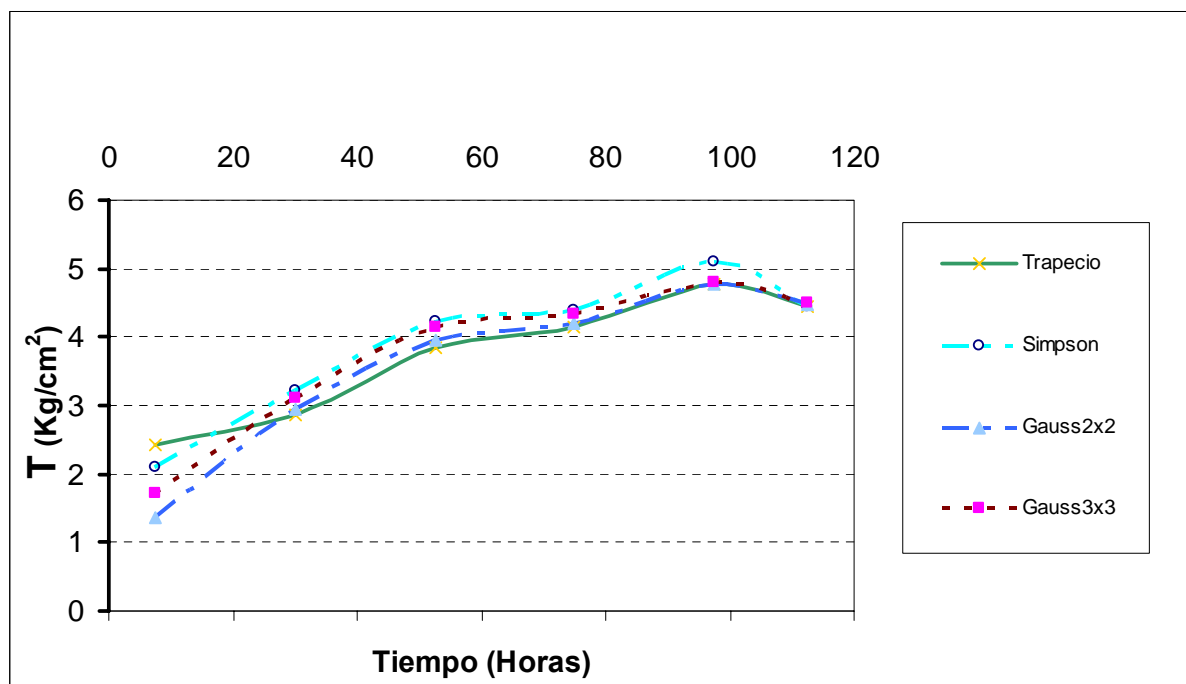


Figura 12: Tensiones de Corte – Junta Mortero – Agregado N° 12

RESULTADOS EN EL NODO 59 – JUNTA MORTERO - AGREGADO 9

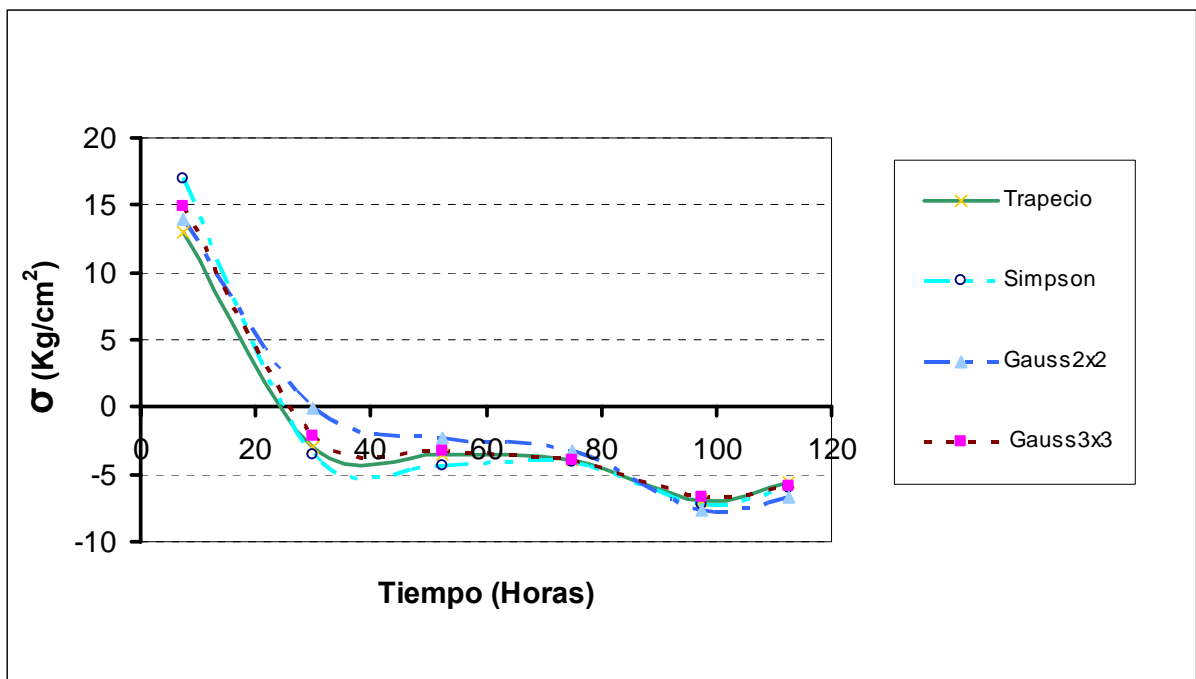


Figura 13: Tensiones Normales – Junta Mortero – Agregado N° 9

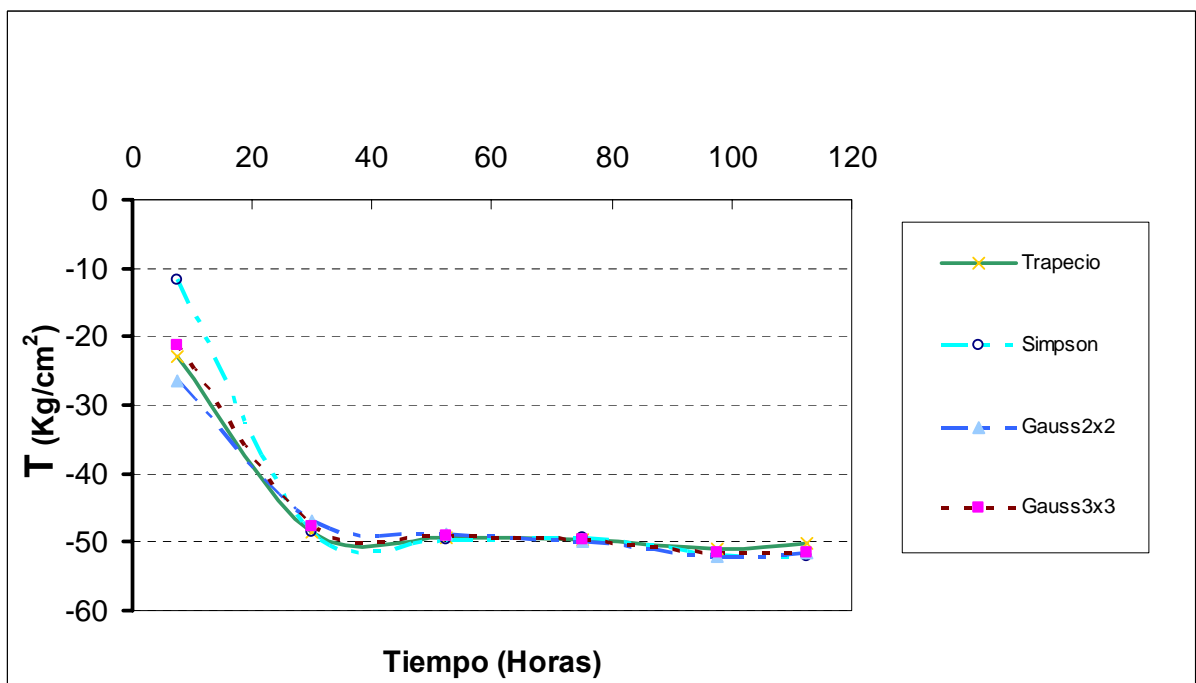


Figura 14: Tensiones de Corte – Junta Mortero – Agregado N° 9

RESULTADOS EN EL NODO 60 – JUNTA MORTERO - AGREGADO 10

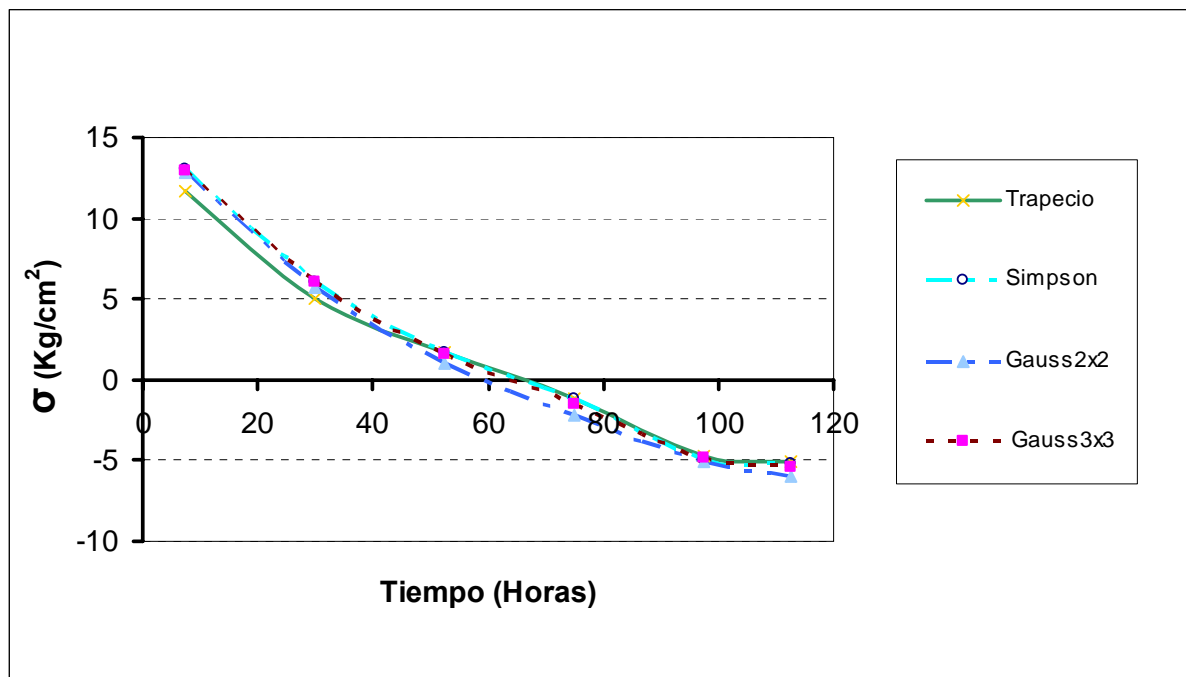


Figura 15: Tensiones Normales – Junta Mortero – Agregado N° 10

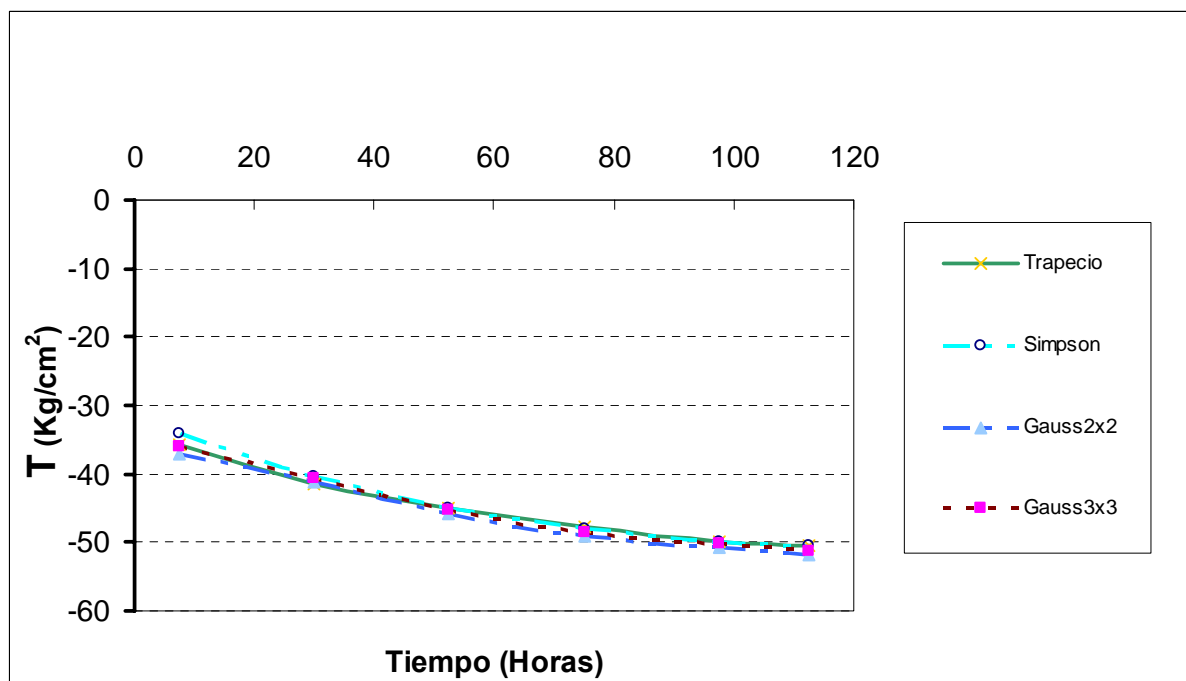


Figura 16: Tensiones de Corte – Junta Mortero – Agregado N° 10

RESULTADOS EN EL NODO 1651 – JUNTA MORTERO- MORTERO 475

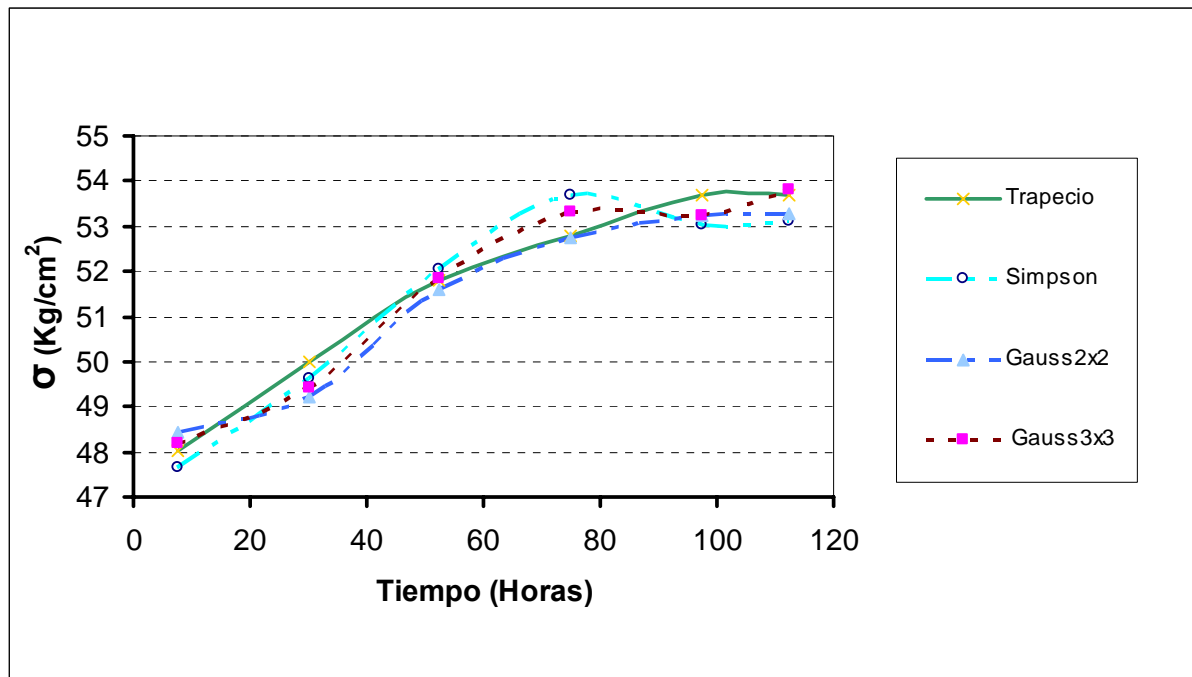


Figura 17: Tensiones Normales – Junta Mortero –Mortero N° 475

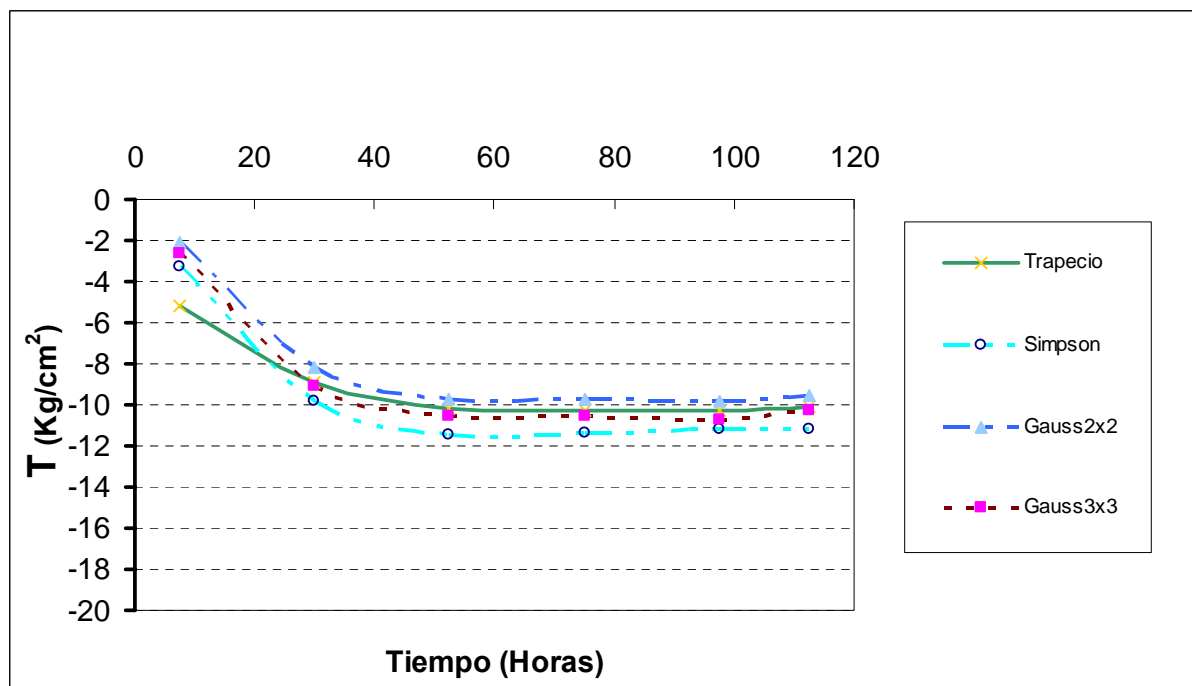


Figura 18: Tensiones de Corte – Junta Mortero –Mortero N° 475

RESULTADOS EN EL NODO 1676 – JUNTA MORTERO- MORTERO 496

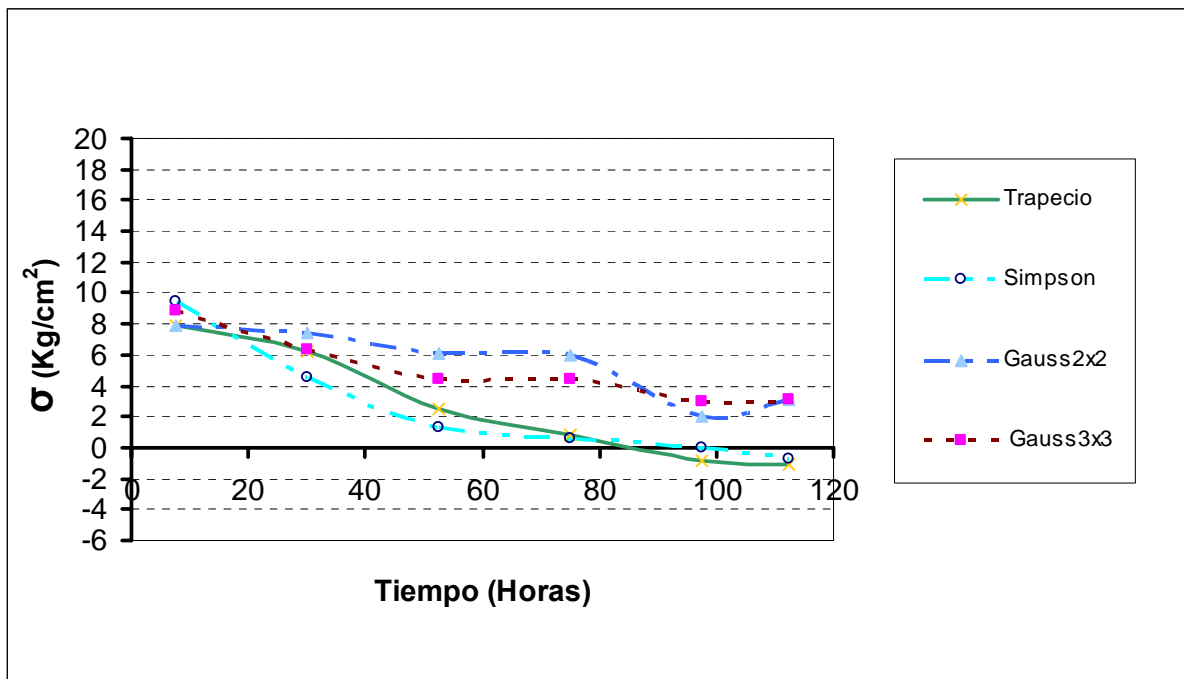


Figura 19: Tensiones Normales – Junta Mortero –Mortero N° 496

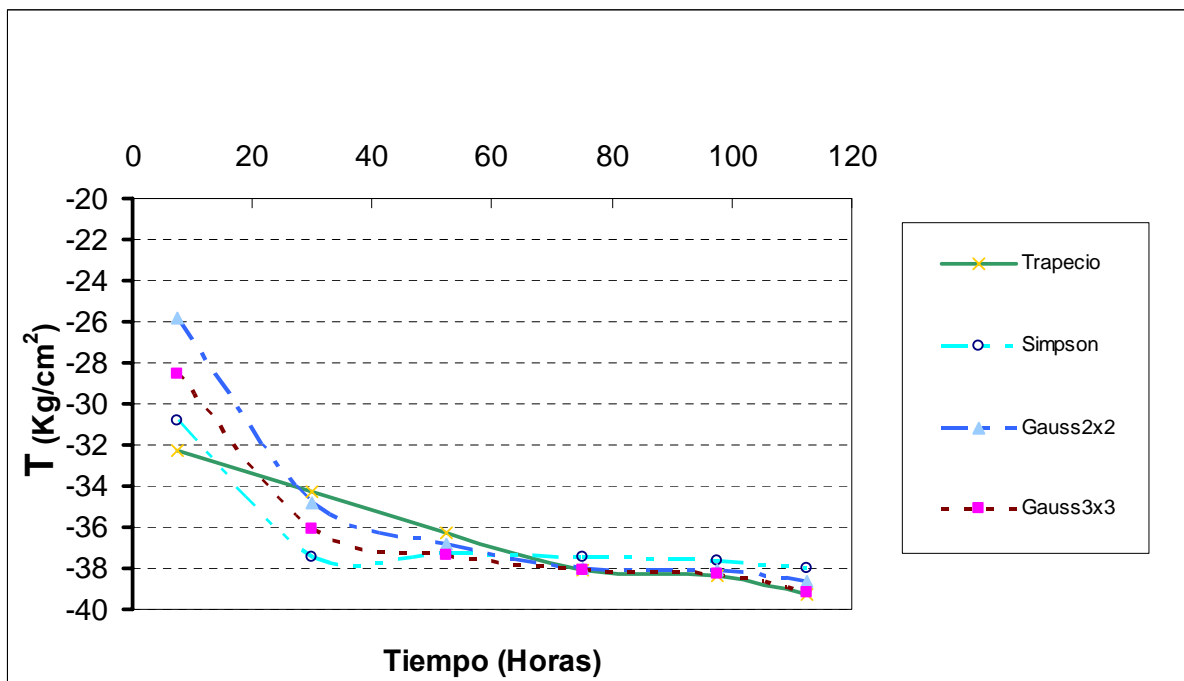


Figura 20: Tensiones de Corte – Junta Mortero –Mortero N° 496

3. CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis de la estabilidad numérica del proceso de fluencia básica considerando un criterio de modelación mesomecánico en probetas de hormigón bajo estado de tracción uniaxial. Los resultados obtenidos indican que el empleo de las diversas reglas de integración es relevante sobre todo en el inicio del proceso, correspondiendo este periodo al de mayor diferencia en la evaluación de los valores de las tensiones. Asimismo, el estudio numérico a nivel mesomecánico permite detectar situaciones de inversión de tensiones en las juntas, incidiendo de este modo en el proceso de disipación de energía. Estos resultados evidencian una vez más la complejidad del fenómeno bajo estudio, sobre todo considerando que se analiza solo el creep básico sin incluir la interacción con el fenómeno de transporte que simultáneamente ocurre en la masa del hormigón, y que puede conducir a una inestabilidad mucho mayor del problema.

4. REFERENCIAS

- Carol, I., Prat, P. and López, C.M., "A Normal/Shear Cracking Model. Interface Implementation for Discrete Analysis". *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 123(8), pp. 765-773, (1997).
- Etse, G., Lorefice, R., Carosio, A. and Carol, I., "Rate Dependent Interface Model Formulation for Quasi-Brittle Materials". *Proc. International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures - FRAMCOS 5*. Boulder, Colorado, USA, pp. 301-305, (2004).
- Etse, G., Lorefice, R., López, C.M. and Carol, I., "Meso and Macromechanic Approaches for Rate Dependent Analysis of Concrete Behavior". International Workshop in Fracture Mechanics of Concrete Structures. Vail, Colorado, USA, (2004).
- Etse, G., Carosio, A. and Willam, K., "Limit State and Localization of Perzyna Viscoplastic Material". *Int. Journal on Cohesive and Frictional Materials*, (23), 1, pp. 32-42, (1997).
- Etse, G., Willam, K., "Failure Analysis of Elastoviscoplastic Material Models". *Journal of Engrg. Mechanics*, (125), 1, pp. 60-69, (1999).
- Fares, V.A., Lorefice, R.H., Boetto, L y Ruiz Lopez, R., "Estudio De La Estabilidad Numérica De Elementos De Interfase En Problemas Tiempo-Tasa Dependientes. *ENIEF 2007, Cordoba, Argentina*.
- López Garello, C.M., "Análisis Microestructural de la Fractura del Hormigón Utilizando Elementos Tipo Junta. Aplicación a diferentes Hormigones". *Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain*, (1999).
- Lorefice, R., Etse, G., C.M. Lopez and I. Carol, "Mesomechanic Analysis of Time Dependent Concrete Behavior". *EURO-C 2006, Computational Modeling of Concrete Structures*. Mayrhofen, Austria, (2006).
- Lorefice, R., Etse, G., Rizo Patron, M., "Influencia De La Tasa De Deformación En El Creep Y Relajacion De Hormigones Normales". *ENIEF 2007, Cordoba, Argentina*.
- Lorefice, R., "Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón Mediante los Criterios Meso y Macromecánicos". *Tesis Doctoral, CEMNCI - Univ. Nac. De Tucuman*, Agosto de 2007.
- Lorefice, R., Etse, G., and Carol, I., "Viscoplastic Approach for Rate-Dependent Failure Analysis of Concrete Joints and Interfaces". *International Journal of Solids and*

- Structures* 45 (2008) 2686–2705.
- Perzyna, P., “The Constitutive Equations for Rate Sensitive Materials”. *Quarter of Applied Mathematics*, Vol. 20, pp. 321-332, (1963).
- Perzyna, P., “Fundamental Problems in Viscoplasticity”. *Advances in Applied Mechanics*, 9, pp. 244-368, (1966).
- Day, R.A., Potts, D.M., “Zero thickness interface elements – Numerical Stability and Application”. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18. 689, 708 - 3341, 1994.
- Gens, A., Carol, I., Alonso, E.E., “Rock joints: FEM implementation and applications”. *Mechanics of Geomaterials and Interfaces*. A.P.S. Selvadurai and M.J. Boulon Editors. Elsevier Science B.V., 1995.
- Barenblatt, G. I. “The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture”. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55-129, 1962.
- Dugdale, D. S., “Yielding of steel sheets containing slits”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100-104, 1960.
- Rice, J. R., “Mathematical analysis in the mechanics of fracture”. *Academic Press*, San Diego, California, 1968.