

## APLICACIÓN DEL MEF: PREDICCIÓN DEL PATRÓN DE FRACTURA DE LA CÁSCARA DE GIRASOL

Luis F. Hernández<sup>\*,§</sup>, Patricia M. Bellés<sup>†,§</sup> y Lilia I. Lindström<sup>\*</sup>

\* Laboratorio de Morfología Vegetal, Depto. de Agronomía, Universidad Nacional del Sur. Altos del Palihue, 8000. Bahía Blanca, Argentina. TE: 54-(0291)-4566131 – Interno 4387  
e-mail: [lhernan@criba.edu.ar](mailto:lhernan@criba.edu.ar), web page: <http://www.criba.edu.ar/girasol>

† Depto. de Ingeniería - IMA, Universidad Nacional del Sur. Avda. Alem 1253. 8000 Bahía Blanca, Argentina. TE: 54-(0291)-4595100– Interno 3219. e-mail: [pbelles@criba.edu.ar](mailto:pbelles@criba.edu.ar)

§ Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Pcia. de Buenos Aires. Calle 526, 10 y 11. 1900 La Plata, Argentina, web page: <http://www.cicgba.gov.ar>

**Palabras clave:** Aptitud al descascarado, cáscara, girasol, pericarpio, mecánica de fractura, modelado.

**Resumen.** *Previo a la extracción del aceite de girasol por prensado, se realiza el descascarado de sus granos. Este proceso consiste en separar la cáscara (pericarpio) de la semilla, haciendo impactar los granos a alta velocidad contra una superficie rígida. El grado de facilidad con que la cáscara se fractura y se separa de la semilla se denomina aptitud para el descascarado (AD). La AD es un parámetro importante para el proceso industrial y puede ser mejorada genéticamente. La cáscara es una estructura poco elástica, compuesta por diversos tejidos con diferentes propiedades mecánicas. Poder modelar el comportamiento mecánico de la cáscara, identificando la magnitud y distribución de tensiones generadas en la misma como resultado del impacto, permitiría definir la conformación óptima de sus tejidos y contribuiría a acelerar el mejoramiento biotecnológico de esta característica industrial.*

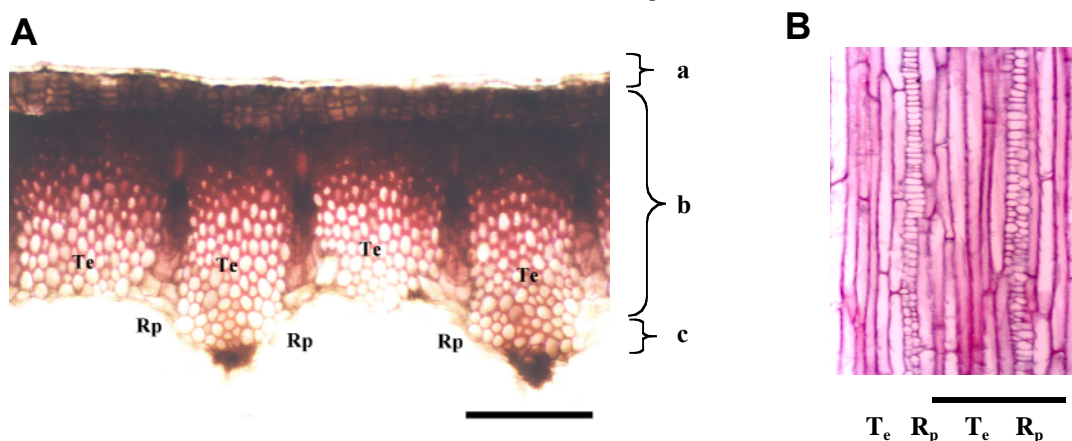
*La presente aplicación del método de elementos finitos (MEF) comprende la simulación del impacto a alta velocidad de los granos de girasol contra una superficie rígida en la primera etapa del proceso de descascarado. El impacto del grano producido por la acción del equipo de descascarado, se simuló con el módulo de simulación de eventos mecánicos (MES) del software Algor. Se presentan resultados de la magnitud y distribución de tensiones en la cáscara como consecuencia de impactos con diferentes orientaciones y su comparación con resultados experimentales.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Previo a la extracción de aceite de girasol por el prensado de sus semillas, se realiza el descascarado de sus granos, proceso que consiste en separar la cáscara (pericarpio) de la semilla. Ello permite obtener, además del aceite, subproductos de calidad para la alimentación animal, incrementa la eficiencia de la extracción<sup>14</sup> y reduce el desgaste de la maquinaria que la realiza<sup>4,7,19,21</sup>.

El pericarpio de los granos comprende entre 20 y 26% de su peso total. Es una estructura con baja elasticidad, quebradiza a la madurez del grano y compuesta por tejidos dispuestos en sentido longitudinal interrumpidos a intervalos regulares por otros de disposición radial (radios)<sup>12</sup>. Estos tejidos, con diferentes propiedades físicas y bioquímicas, son definidos botánicamente como esclerénquima y parénquima respectivamente<sup>8</sup>.

En la Fig.1 se muestran, en un corte transversal del pericarpio (Fig. 1A), la distribución de los diferentes estratos que lo componen. En sección tangencial longitudinal (Fig. 1B) se observa la disposición alternada de los radios de parénquima ( $R_p$ ) y de tejido esclerificado ( $T_e$ ).



**Figura 1:** Histología del pericarpio. **A.** Sección transversal del pericarpio, mostrando la distribución de los tejidos diferentes estratos de tejidos (**a**: epidermis + hipodermis; **b**: células esclerificadas; **c**: células del parénquima interior comprimidas) **B.** Sección tangencial longitudinal, mostrando la distribución de los radios de parénquima ( $R_p$ ) y el tejido esclerificado ( $T_e$ ). Escala = 200  $\mu$ m

Los equipos para realizar el descascarado funcionan bajo distintos principios. El más utilizado en la industria aceitera se basa en hacer impactar los granos por efecto centrífugo y a alta velocidad (entre 5 y 10  $m \cdot s^{-1}$ ) contra una superficie rígida donde se fracturan. Las cáscaras sueltas se separan luego de las semillas total o parcialmente descascaradas.

La facilidad con que la cáscara se fractura y se separa de la semilla se define como la “aptitud para el descascarado” (AD). Este índice surge de relacionar el peso de cáscara obtenido por medios mecánicos ( $PDM$ ), con descascaradoras de pequeño tamaño que simulan el proceso industrial y el peso total de cáscara ( $PTC$ ) obtenido mediante separación manual<sup>5</sup> según la ecuación:

$$AD = (PDM/PTC) \times 100 \quad (1)$$

## 2. VARIABLES QUE INCIDEN SOBRE LA AD

En la expresión de la AD inciden significativamente las características estructurales del pericarpio como por ejemplo su espesor<sup>6</sup>, la cantidad de radios parenquimáticos, el grado de lignificación de sus células y la humedad del mismo en el momento de efectuar el descascarado<sup>11</sup>. Estas características están sujetas a variabilidad genética y también pueden modificarse de acuerdo a las condiciones de crecimiento en las que se desarrolló el cultivo<sup>3,4,7,18,19</sup>.

El tamaño de los granos y su grado de llenado (magnitud con que la semilla se ha desarrollado en el interior del grano)<sup>19</sup> influyen también sobre la AD. Un grano relativamente grande se descascara más fácilmente que uno pequeño<sup>18</sup>. Ello es debido a que, en general, los últimos están casi siempre llenos y tienen generalmente un pericarpio fino, flexible y adherido a la semilla<sup>11,12</sup>. Cuando la semilla ocupa casi el total del volumen interno, le confiere al grano una mayor resistencia mecánica al impacto y, por lo tanto, una menor facilidad para fracturarse. El concepto más generalizado es que granos que presentan una muy buena AD se caracterizan por tener un pericarpio relativamente grueso y poco adherido a la semilla<sup>2</sup>.

Las mejoras genéticas recientes, que han llevado a incrementar el contenido de aceite actual en los granos de girasol, han producido paralelamente una disminución en la proporción relativa de pericarpio y, como consecuencia, la producción de granos de pericarpio sensiblemente fino<sup>18</sup>. Es así entonces, que para la mayoría de los híbridos actuales, un alto contenido de materia grasa se correlaciona negativamente con la AD<sup>1,2,3,5,6,18</sup>.

El sentido de impacto del grano dentro de la descascaradora tiene también incidencia en la magnitud de la fractura del pericarpio y se complementa con una particular AD. Si el impacto se produce en sentido longitudinal al eje mayor del grano, la eficiencia de descascarado es mayor que si el grano impacta sobre uno de sus lados convexos<sup>11</sup>.

## 3. POSIBILIDADES DE MEJORAR LA AD

En los últimos años se ha presentado la posibilidad de manipular genéticamente las propiedades mecánicas de tejidos vegetales<sup>9,10,16</sup>, por lo que las herramientas biotecnológicas, como así también la definición precisa de la arquitectura original del pericarpio y de los materiales que la conforman se encuentran disponibles. Frente a este promisorio escenario, y existiendo una estrecha relación entre la AD y la distribución de los tejidos constitutivos del pericarpio y sus propiedades mecánicas<sup>20</sup>, sería muy útil trabajar con modelos del comportamiento mecánico de la cáscara del grano de girasol. De esa forma se podría determinar, en cáscaras con diferente arquitectura histológica, la magnitud y distribución de las tensiones generadas por el impacto producido durante el proceso de descascarado, lo que proveería la información indispensable para definir la distribución y composición óptimas de sus tejidos. Ello permitiría ajustar la magnitud de algunas de las variables involucradas en el ideotipo de arquitectura de pericarpio y, a partir de allí, utilizar los medios biotecnológicos disponibles para optimizar este parámetro.

## 4. FRACTURA DE LA CÁSCARA: ENFOQUE TEÓRICO DEL ESTUDIO

Los modelos simplificados de comportamiento mecánico de estructuras utilizados en ingeniería, son muy útiles en el momento de plantear diferentes compromisos de diseño de

estructuras biológicas tales como el esqueleto de los vertebrados o la calidad de las maderas en especies forestales<sup>16,20</sup>.

En el caso particular de un grano de girasol, se necesita predefinir valores de módulos de elasticidad con el fin de predecir los sitios de la estructura donde se producirán las fracturas cuando el grano impacta, bajo las condiciones del proceso de descascarado mecánico. El eslabón ausente en esta línea de trabajo es el desarrollo de un modelo numérico que permita, bajo diferentes combinaciones de parámetros estructurales, poder simular en tiempo real, las respuestas del mismo frente a este proceso.

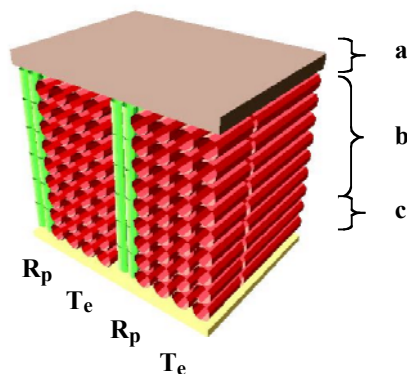
El objetivo del presente estudio consistió en la identificación de los sitios donde el grano mostrara sitios de la cáscara que pudieran predecir el colapso de la estructura, validando los resultados al comparar la magnitud de las tensiones generadas en la simulación con las obtenidas en pruebas de ensayo mecánico de laboratorio.

Se realizaron ensayos de compresión con granos enteros en laboratorio y se construyó un modelo de elementos finitos (EF) de la cáscara el cual se analizó utilizando el programa ALGOR FEMS (Finite element modeling software, vers. 12, ALGOR Inc., Pittsburgh, USA). El análisis con EF consistió en la simulación dinámica de impacto en diferentes direcciones.

## 5. MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL DESCASCARADO

### a) Definición de la histología del pericarpio:

El espesor y distribución de los tejidos se obtuvo a partir de microfotografías de secciones finas cortadas en sentido transversal y tangencial al eje longitudinal de los granos (Fig. 1).



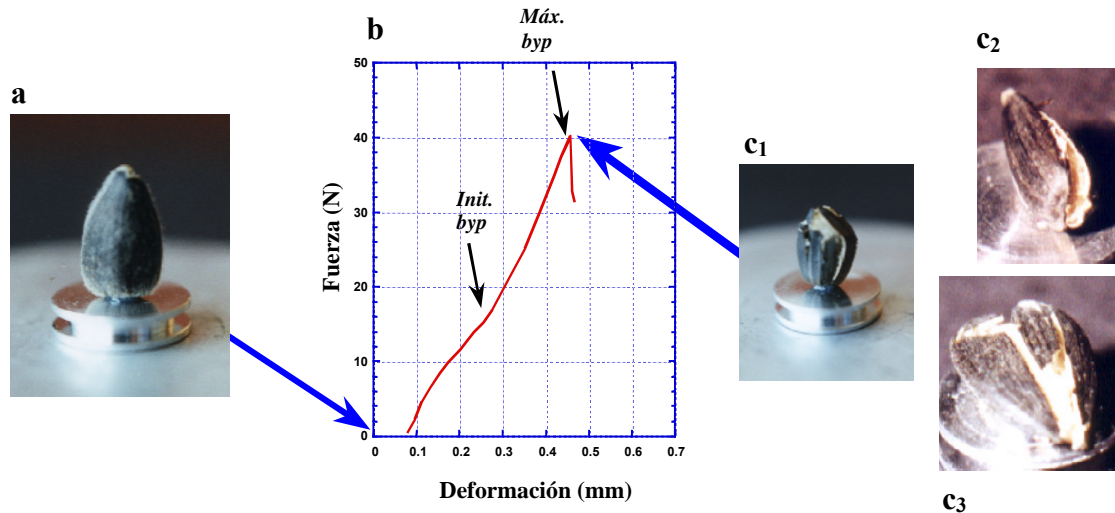
**Figura 2:** Representación esquemática de los tejidos del pericarpio descritos en la Fig. 1.  $R_p$ : radios de parénquima;  $T_e$ : tejido esclerificado. Los estratos **a**, **b** y **c** se corresponden con los definidos en la Fig. 1a

Estas secciones fueron teñidas con colorantes específicos lo que permitió obtener una descripción detallada de la disposición sus principales tejidos y definir su distribución de acuerdo a su grado de lignificación (Fig. 1). Esta información se utilizó para modelar la distribución estructural histológica del mismo (Fig. 2).

### b) Pruebas estáticas de fractura de granos enteros en laboratorio.

Se realizaron ensayos de compresión uniaxial, en granos de diferente arquitectura histológica orientados según tres direcciones, longitudinal, transversal y lateral, utilizando para ello un

equipo de ensayo mecánico Instron, mod. 1122, con celda de carga para compresión de 0-100 Kg, y velocidad de la celda de 1,0 mm.min<sup>-1</sup>. Para cada tipo de grano y orientación, fueron evaluados 25 granos. Se obtuvieron así las magnitudes de carga necesaria hasta lograr la fractura de la cáscara. En Fig. 3 se sintetizan los resultados de la prueba de fuerza/deformación en granos maduros.



### c) Propiedades mecánicas de los tejidos que conforman el modelo.

Para la definición de la densidad del material y los módulos de elasticidad de los tejidos considerados en el modelo [radios de parénquima ( $R_p$ ) y esclerénquima ( $T_e$ )], se adoptaron las magnitudes especificadas en diversos trabajos publicados<sup>15,17,20</sup>. Para el ajuste de estos parámetros, se hicieron además pruebas de tracción y compresión en porciones de pericarpio de dimensiones conocidas, utilizando una máquina de carga para pequeñas muestras de material vegetal diseñada en nuestro Laboratorio. Sintéticamente, la misma consta de una balanza electrónica acoplada a una PC con software de Captura (BALINT, Precisa Ind.) y un sistema de palancas que permite realizar tracción y compresión de las muestras. En este caso se probaron segmentos de pericarpio de 7,0 mm de longitud y 2 mm de ancho y cuyo espesor natural de los mismos osciló entre 100 y 300  $\mu\text{m}$ .

En base a las relaciones de fuerza/deformación transformadas a tensión/deformación específica, se calculó el módulo de elasticidad estructural ( $E_{es}$ )<sup>15,25</sup> para el grano entero con 11,0 % de humedad relativa y se determinaron las tensiones críticas de fractura (Módulo de Ruptura) para cada orientación (Fig. 1; Tabla 1).

En la Tabla 1 se describen las propiedades mecánicas de los componentes histológicos del modelo de la Fig. 2, para tres direcciones de impacto del grano. En la primera columna se muestra la orientación del grano en el impacto y una representación de cómo la carga aplicada actúa sobre los tejidos definidos en el modelo (Fig. 2). Las leyendas corresponden a: E: Módulo

de elasticidad estructural,  $R_p$ : Radio de parénquima.  $T_e$ : Tejido esclerificado (esclerénquima, ver Fig. 1C y Fig. 4). Las propiedades mecánicas utilizadas (Módulo de elasticidad estructural ( $E_{es}$ ), y módulos de elasticidad de los distintos tejidos constitutivos (Radios de parénquima ( $ER_p$ ) y tejido esclerificado ( $ET_e$ ), fueron calculadas a partir de valores descriptos para cada tejido<sup>15</sup> y de las pruebas de carga de laboratorio con granos enteros y utilizando segmentos longitudinales del pericarpio de frutos de pericarpio fino (100  $\mu\text{m}$  de espesor) y grueso (300  $\mu\text{m}$  de espesor) respectivamente. Estas magnitudes fueron ajustadas conforme a la orientación del impacto. Los valores de VonMises emergentes de la MES corresponden al momento del impacto simulando dos espesores de pericarpio ( $R_p$ : 100 y 300  $\mu\text{m}$  y  $T_e$ : 100 y 300  $\mu\text{m}$ ) para valores reales de granos con pericarpio grueso y fino respectivamente.  $E$  = Mód. de elasticidad;  $E_{es}$  = Módulo de elasticidad estructural;  $\delta$  = densidad ( $\text{Kg. m}^{-3}$ );  $\nu$  = coeficiente de Poisson; esp = espesor en  $\mu\text{m}$ . TCF = tensión crítica de fractura determinada a partir del ensayo mecánico (EM) de carga; MR = Módulo de ruptura; VM = Tensión de VonMises calculada del modelo. Los valores definidos para cada orientación del grano son el promedio de 25 granos.

## 6. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA CÁSCARA.

### a) Geometría del modelo.

El modelo de la cáscara cuenta con dos planos de simetría. Su construcción se realizó utilizando granos elegidos al azar de diferentes genotipos. Los mismos fueron digitalizados en dos planos ortogonales cuya intersección coincide con el eje longitudinal del grano. Utilizando un software apropiado se obtuvieron las coordenadas del contorno de los perfiles. Luego se diseñó el modelo 3D con software CAD (Fig. 4) y se importó a través del pre-procesador gráfico del programa de EF Algor.

### b) Malla de elementos finitos.

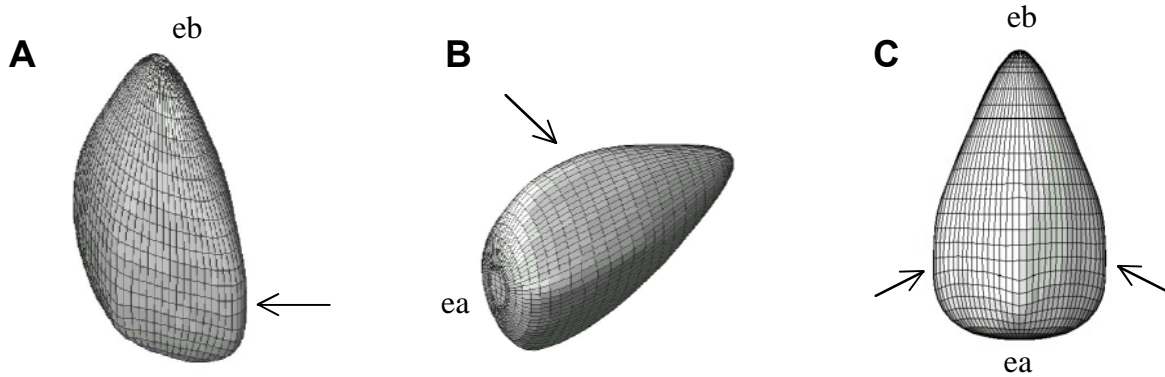
El modelo (Fig. 4) consta de 2131 elementos tipo “plate/shell” y 2080 nodos. Se emplearon triángulos de 3 nodos y cuadriláteros de 4 nodos, elementos formulados en el espacio 3D con 5 grados de libertad por nodo: 3 traslaciones y 2 rotaciones (no está definida la rotación perpendicular al plano de la placa).

Se distinguieron dos grupos distintos de elementos del mismo tipo para modelar los diferentes tejidos ( $R_p$  y  $T_e$ ), asignando a cada uno sus respectivas propiedades (Fig. 2, Tabla 1) y espesores. Otros tres grupos de elementos fueron definidos a fin de considerar características estructurales secundarias de la cáscara tales como los extremos del grano y el borde dorsal del mismo. En la Tabla 1 se describe a magnitud de las tensiones resultantes bajo tres sentidos de impacto.

## 7. SIMULACIÓN DINÁMICA DEL IMPACTO

La simulación dinámica, se realizó utilizando el módulo para cálculo no lineal (ACCUPACK/VE) de Algor, mediante un tipo particular de análisis denominado Simulación de Eventos Mecánicos (MES). El mismo permite realizar análisis de tensiones con elementos finitos de tipo lineal o no lineal, estático o dinámico. Tanto el modelo analizado, como las acciones

externas, pueden ser modelados asumiendo ciertas hipótesis básicas que permiten realizar un ensayo virtual del impacto de la cáscara.



**Figura 4:** Modelo de EF de un grano de girasol, utilizado para este trabajo.  
**A y B:** Vista isométrica ortogonal, **C.** Vista lateral. **eb:** extremo basal; **ea:** extremo apical.  
 Las flechas indican el borde dorsal del grano.

Básicamente, la simulación de eventos consiste en los tres pasos que se describen a continuación:

**a)** El preproceso consiste en la generación del modelo y la configuración del evento. En primer término se construye la malla de elementos finitos, luego se especifican las propiedades de los materiales y se aplican las condiciones de borde, que en este caso son planos de impacto. También es necesario especificar ciertos parámetros como, por ejemplo, el tiempo de observación del evento, la cantidad de registros que se obtendrán por segundo de observación y las velocidades iniciales.

**b)** Con la ejecución de la simulación se inicia el proceso del desarrollo del evento. Pueden monitorearse desplazamientos, deformaciones y tensiones a medida que se producen y también pueden verse las velocidades y aceleraciones en distintos puntos del modelo.

**c)** El post-proceso consiste en el examen de los resultados incluyendo su historia animada. Se pueden obtener gráficos de tensiones, movimiento y deformaciones para cada instante y también es posible reproducir una animación temporal del proceso. Este tipo de análisis genera además, información sobre desplazamientos, velocidad, aceleración y tensiones en cualquier punto del modelo.

## 8. RESULTADOS

### a) Resultados de la prueba de carga en granos enteros en ensayos de laboratorio

En las pruebas de laboratorio, aplicando cargas crecientes y continuas a los granos enteros, la primera porción de la curva de fuerza/deformación mostró una respuesta lineal con un patrón similar al de un material quebradizo, manteniéndose así hasta que se produjo su fractura (Fig. 3). En este caso particular, aplicando la cargas con los granos orientados en 3 direcciones, se observó que las líneas de colapso se orientaron en sentido paralelo al eje mayor del grano (Fig. 3c1-c3).

Este patrón de fractura respondió a la disposición longitudinal alternada de los distintos tejidos que conforman el pericarpio con propiedades mecánicas diferentes.

### b) Resultados de la simulación de eventos

Por tratarse de un modelo tridimensional en el cual se dificulta la orientación de las direcciones principales de los elementos, se consideró apropiado evaluar la distribución de tensiones en el mismo tomando como referencia la tensión de VonMises ( $\sigma_{VM}$ )<sup>22</sup>. La misma está basada en la energía de distorsión y su relación con las tensiones principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

El software ALGOR permite observar la magnitud y el gradiente que presentan las tensiones, identificándose las zonas más comprometidas bajo los diferentes estados de carga. La tensión de VonMises permite identificar las zonas donde es más probable que se inicie la falla.

La descripción gráfica de las tensiones obtenidas de la simulación para tres orientaciones del grano se presentan en la Figura 5. En la Tabla 1 se muestran los valores de tensiones de VonMises, obtenidos de la simulación.

La comparación de resultados entre el modelo de EF y el ensayo de laboratorio se realizó en base a la distribución de tensiones, y las magnitudes observadas y calculadas de los módulos de ruptura (Tabla 1), observándose una concordancia satisfactoria.

Los resultados obtenidos en la simulación de EF y presentados en la Fig. 5 para tres direcciones de impacto muestran, de acuerdo al patrón de distribución de las tensiones de VonMises, que las áreas más proclives a manifestar colapso se distribuyen en sentido longitudinal paralelo a los radios parenquimáticos y coincidieron con el patrón de fractura observado en los resultados experimentales en la prueba de carga realizada en granos enteros (Fig. 3c1-c3). La disposición alternada de los radios parenquimáticos y esclerenquimáticos (Fig. 1), fue la principal responsable de conferirle al modelo sus propiedades mecánicas y el patrón de distribución de tensiones observado (Fig. 5).

La magnitud de las tensiones en el sitio del impacto, registradas a una tasa de captura de 100 pasos por segundo, se presentan en una secuencia de tres imágenes, desde el inicio de la simulación ( $t_0$ ; Fig. 5a,d y g) y en dos momentos consecutivos (Fig. 5b-c, d-f y g-i). Se observa que la misma es creciente y, en un lapso extremadamente corto, se distribuye desde el sitio del impacto del grano, en forma radiada y respetando la alternancia de los radios de parénquima y esclerénquima (Fig. 2).



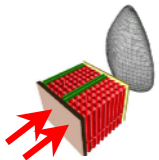
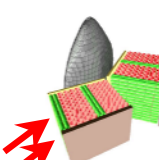
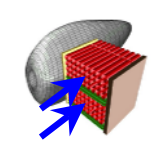
Veloc. y orientación del grano en el impacto	Espesor (Esp) de los tejidos		Dist. e/Rp (μm)	Propiedades mecánicas de los componentes del modelo					$E_{es}$ Calculado (Ensayo mecánico) HR%: 7,0 ( N.m <sup>-2</sup> )	TCF Tensión de fractura teórica (Ensayo mecánico) HR%: 7,0 (N.m <sup>-2</sup> = $E_{es} \cdot 0,0092$ ) <sup>15</sup>	MR Determinado experiment. (Ensayo mecánico) HR%: 7,0 (Máx. byp) ( N.m <sup>-2</sup> )	VM calculada en la simulación ( N.m <sup>-2</sup> )				
	Re (μm)	Rp (μm)		$E Re$ E=MN.m <sup>-2</sup>	$E Rp$ E=MN.m <sup>-2</sup>	Extr. Apic. E=MN.m <sup>-2</sup>	Extr. Bas. E=MN.m <sup>-2</sup>	Borde dorsal E=MN.m <sup>-2</sup>								
6 m.s <sup>-1</sup> 	100	100	300	$E: 57,0$ $\delta: 800$ $v: 0,25$	$E: 30,0$ $\delta: 300$ $v: 0,45$							9,11.10 <sup>6</sup>	0,84 . 10 <sup>5</sup>	1,53 . 10 <sup>5</sup>	0,88 . 10 <sup>5</sup>	
	300	300	300											35,10.10 <sup>6</sup>	3,22. 10 <sup>5</sup>	7,10. 10 <sup>5</sup>
6 m.s <sup>-1</sup> 	100	100	300	$E: 70,0$ $\delta: 800$ $v: 0,25$	$E: 40,0$ $\delta: 300$ $v: 0,45$							$E: 30,0$ $\delta: 600$ $v: 0,40$ Esp:300	$E: 30,0$ $\delta: 700$ $v: 0,25$ Esp:350	$E: 10,0$ $\delta: 600$ $v: 0,25$ Esp:300	22,33.10 <sup>6</sup>	2,05 . 10 <sup>5</sup>
	6 m.s <sup>-1</sup> 	100	100	300	$E: 230,0$ $\delta: 800$ $v: 0,25$	$E: 40,0$ $\delta: 300$ $v: 0,45$				37,48.10 <sup>6</sup>	3,44 . 10 <sup>5</sup>	3,34 . 10 <sup>5</sup>	3,51 . 10 <sup>5</sup>	66,25.10 <sup>6</sup>	6,09. 10 <sup>5</sup>	11,81 . 10 <sup>5</sup>
300		300	300													

TABLA 1

Analizando la magnitud de las tensiones, se observa que los valores más altos se manifestaron en la zona de contacto con el plano de impacto (Fig. 5b,e,h). Se presentan allí valores muy elevados y semejantes a los valores críticos calculados en las pruebas de laboratorio con granos enteros (Tabla 1), sugiriendo que luego del impacto, la estructura sufrirá en ese sitio un daño irreversible que se traducirá en su inmediata fractura.

## 9. CONCLUSIONES

El modelo numérico aquí descrito produce un patrón de distribución de tensiones con predicción de fractura similar a lo observado experimentalmente en granos enteros (Fig. 2c). La distribución de los tejidos de la cáscara, con propiedades mecánicas complejas, son las que determinan su respuesta bajo impacto.

Hasta donde sabemos, esta es la primera demostración simulada de un modelo de cáscara del girasol basado en las propiedades mecánicas y la distribución de sus principales tejidos.

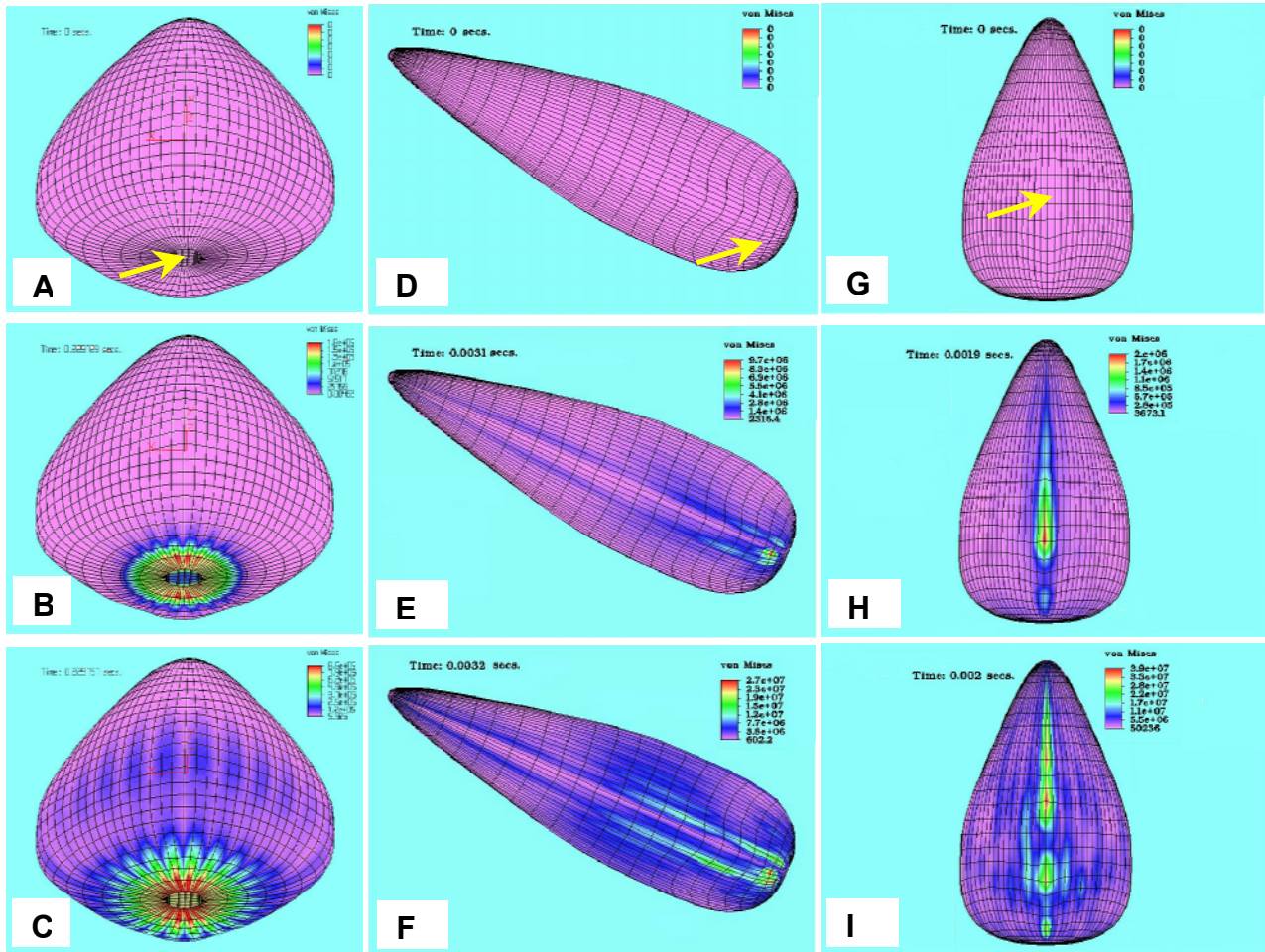
El desarrollo de este modelo puede considerarse el paso previo fundamental para definir en forma precisa las características morfológicas del pericarpio que determinan la AD, considerando diferentes estados de desarrollo estructural y de resistencia mecánica de sus tejidos constitutivos. Este conocimiento es necesario si se desea resolver el problema del descascarado y que sería muy difícil solucionarlo con una aproximación empírica.

El modelo del grano consistente en cáscara solamente, asume una semilla muy blanda que no llena completamente la cavidad interior, situación que se presenta frecuentemente en la realidad. Por lo tanto, la aplicación del MEF descrita en este trabajo está referida a un prototipo simplificado del grano. Sin embargo, los resultados logrados confirman la validez de la simulación de eventos para analizar los efectos del impacto durante el proceso de descascarado. Pueden ser tenidos en cuenta los efectos combinados de material, geometría y acciones dinámicas. Se comprueba que el MES constituye una técnica complementaria de gran utilidad para otras técnicas experimentales, especialmente cuando el comportamiento es complejo y no totalmente predecible.

Se pretende continuar con esta línea de trabajo tendiendo a optimizar el modelo de EF con la utilización de generación automática de la malla. Así se espera controlar la cantidad de elementos, mejorar el modelo y reducir los tiempos computacionales, especialmente en la simulación dinámica del impacto. Además, si bien en esta primera etapa se estudió la distribución de tensiones en el momento del impacto, está previsto continuar avanzando en el estudio de la fractura del pericarpio.

## 10. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de un proyecto financiado por la Secretaría Gral. de Ciencia y Tecnología de la UNS, la Asociación Argentina del Girasol (ASAGIR) y Dow AgroSciences de Argentina. Los autores agradecen a la Dra. C.N. Pellegrini (CIC) por el procesamiento histológico del material vegetal y al Ing. D. Ercoli y el Sr. G. Massimiliani, (Lab. De Polímeros, PLAPIQUI – CONICET) por su colaboración en el uso del equipo INSTRON.



**Figura 5. Análisis dinámico.** Resultados de la simulación de impacto del modelo a una velocidad de  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Las magnitudes de las tensiones se presentan para tres orientaciones de impacto: longitudinal (Fig. 5a-c), transversal (Fig. 5d-f) y lateral (Fig. 5g-i), en un secuencia de tres imágenes, desde el inicio de la simulación ( $t_0$ ; Fig. 5a,d y g) y en dos momentos consecutivos (Fig. 5b-c, e-f y h-i). Se observa que el patrón de tensiones se distribuye radialmente desde el sitio del impacto (flecha), siguiendo la disposición alternada de los radios de parénquima y las bandas de tejido esclerificado (Figs.1 y 2; Fig. 5b-c, e-f y h-i) y concuerda con el patrón de fractura observado en el pericarpio de granos enteros, tal como se muestra en la Fig. 3c1-c3.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BALDINI, M. y VANNOZZI, G.P. (1996). Crop management practices and environmental effects on hullability in sunflower hybrids. *Helia* 19, 47-62.
- [2] BEAUGUILLAUME, A. y CADEAC, F. (1992). Elements of explication of the variability of the hulling ability in sunflower. 13<sup>th</sup> International Sunflower Conf. Procs., Italia, p. 993-999.
- [3] DEDIO, W. y DORRELL, D.G. (1989). Factors affecting the hullability and physical characteristics of sunflower achenes. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 22, 143-146.

- [4] DENIS, L. y VEAR, F. (1996). Variation of hullability and other seed characteristics among sunflower lines and hybrids. *Euphytica* 87, 177-187.
- [5] DENIS, L., DOMINGUEZ, J. y VEAR, F. (1994a). Inheritance of “hullability” in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant Breeding* 113, 27-35.
- [6] DENIS, L., COELHO, V. y VEAR, F. (1994b). Pericarp structure and hullability in sunflower inbred lines and hybrids. *Agronomie* 14: 453-461.
- [7] DORRELL, D.G. y VICK, B.A. (1997). Properties and processing of oilseed sunflower. p. 709-745. En: A.A. Schneiter (Ed.). *Sunflower technology and production*. ASA, CSSA y SSSA, Madison, Wis.
- [8] ESAU, K. (1993). *Anatomía de las Plantas con Semilla*. Ed. Hemisferio Sur.
- [9] HEPWORTH, D.G. y VINCENT, J.F.V. (1998a). The mechanical properties of xylem tissue from tobacco plants (*Nicotiana tabacum* “Samsun”). *Annals of Botany* 81: 751-759
- [10] HEPWORTH, D.G. y VINCENT, J.F.V. (1998b). Modelling the mechanical properties of xylem tissue from tobacco plants (*Nicotiana tabacum* “Samsun”) by considering the importance of molecular and micromechanisms. *Annals of Botany* 81: 761-770.
- [11] LEPRINCE-BERNARD, M.N. (1990). *Aptitude au Decorticage de la Graine de Tournesol*. Tesis Doctoral, Univ. de Nantes, 136 pp.
- [12] LINDSTRÖM, L.I. , PELLEGRINI, C.N. y HERNÁNDEZ, L.F. ([20]). Anatomy and development of the pericarp in fruits of different sunflower (*Helianthus annuus* l.) genotypes. 15<sup>th</sup> International Sunflower Conf. Procs., Francia, p. D13-D18.
- [13] LOGAN, D.L. 2001. *A First Course in the Finite Element Method Using Algor*. Brooks-Cole.
- [14] MORRISON III, W.H., AKIN, D.E. y ROBERTSON, J.A. (1981). Open pollinated and hybrid sunflower seed structures that may effect processing for oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 58, 969-972.
- [15] NIKLAS, K.J. (1992). *Plant Biomechanics*. The Univ. of Chicago Press.
- [16] PILATE, G., GUINEY, E., y HALPIN, C. 2002. Field pulping performances of transgenic trees with altered lignification. *Natur. Biotech.* 20: 607-612.
- [17] PRESTON, R.D. (1974). *The Physical Biology of Plant Cell Walls*. Chapman.
- [18] ROATH, W.W., SNYDER, T.L. y MILLER, J.F. (1985). Variability in decortication of sunflower achenes and correlations with associated achene characters. 11<sup>th</sup> International Sunflower Conf. Procs, Argentina, p. 639-644.
- [19] TRANCHINO, L., MELLE, F. y SODINI, G. (1984). Almost complete dehulling of high oil sunflower seed. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 61, 1261-1265.
- [20] WAINWRIGHT, S.A., BIGGS, W.D., CURREY, J.D. y GOSLINE, J.M. (1982). *Mechanical Design of Organisms*. Princeton Univ. Press.
- [21] WARD, J.A. (1984). Pre-pressing of oil from rapeseed and sunflower. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 61, 1358-1361.