

CAPITULO 7

RESULTADOS Y DISCUSION.

7.1 Introducción.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación, así como la discusión de éstos. Este capítulo se dividirá en las secciones: caracterización del material, propiedades mecánicas y simulación por elemento finito, la cual se subdividirá a su vez en el modelo MALLA y GRANOS.

7.2 Caracterización del material.

El material seleccionado es un acero de bajo carbono galvanizado por inmersión en caliente, al cual se le efectuó un análisis químico cualitativo y cuantitativo al acero base (sin recubrimiento), por medio de un espectrómetro de rayos X marca Rigaku modelo 3270 y para la evaluación del carbono se empleo un indicador LECO modelo 444. Ambos equipos se encuentran en las instalaciones de COMIMSA Saltillo. En la Tabla 7.1 se señalan los datos obtenidos de este análisis.

Tabla 7.1 Composición química del acero base (% en peso).

% C	% S	% Mn	% P	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% V	% Nb	% Ti
0.064	0.005	0.03	<0.010	0.010	<0.010	0.12	<0.010	0.103	<0.010	<0.010	<0.010

De la Tabla 7.1 se confirmó que se trata de un acero de bajo carbono tipo AISI 1005 [28].

Otro dato que se evaluó fue el espesor del recubrimiento, esto con el fin de poder considerar en el modelo matemático al recubrimiento como una sola capa de granos. Para esto se empleó un microscopio electrónico de barrido (SEM). En la Figura 7.1 se muestra la imagen obtenida en el SEM, se realizaron 4 lecturas (Tabla 7.2) del espesor obteniendo un promedio de 20 μm . Además, se practicó un análisis semi-cuantitativo de la composición del recubrimiento, véase el espectro de la Figura 7.2. Este espectro indica que el recubrimiento del acero estudiado es un galvanizado clásico, ya que su componente principal es el Zn, con trazos de Al y Fe los cuales se pueden deber al acero, ó bien el trazo de Al, puede ser por dos causas: el contenido de Al en el baño o la contaminación en el proceso metalográfico al pulir con alúmina.

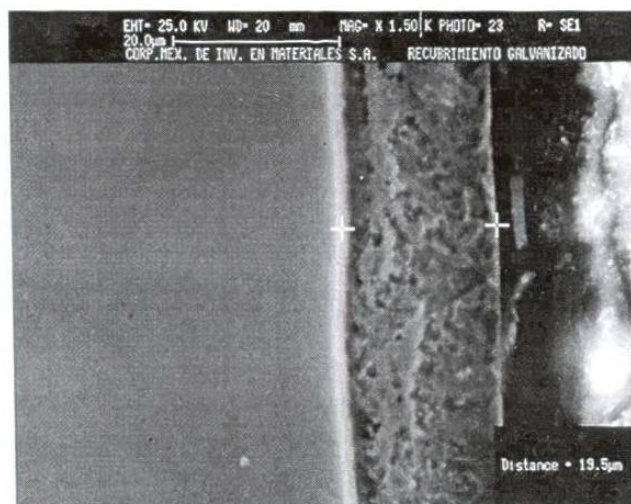


Figura 7.1 Micrografía del acero de bajo carbono galvanizado a 1500X.

Tabla 7.2 Mediciones por medio del SEM del espesor del recubrimiento de Zn del acero de bajo carbono.

Medición	Espesor (μm)
1	22
2	19.3
3	19.2
4	19.5
Promedio	20

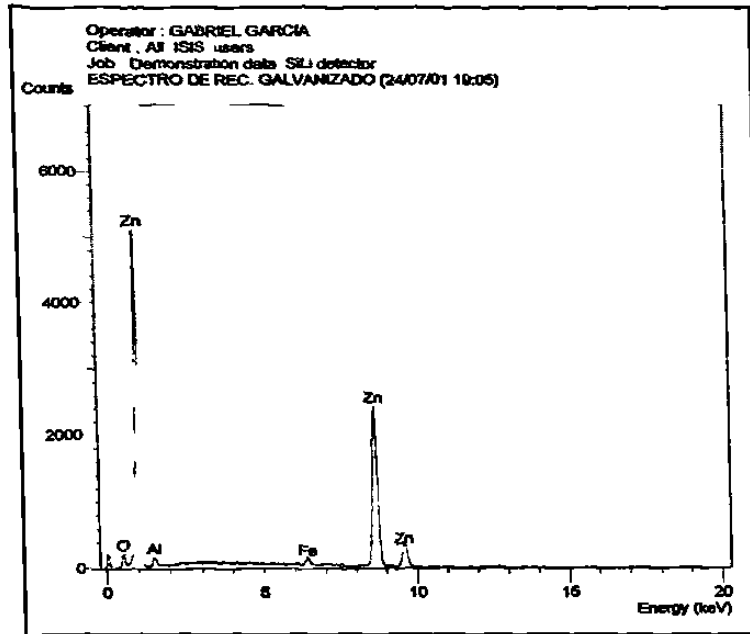


Figura 7.2 Espectro del análisis semi-cuantitativo del recubrimiento de zinc.

7.3 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas utilizadas en los modelos por elemento finito, fueron obtenidas del promedio del ensayo de tensión de las 5 probetas ensayadas hasta la ruptura descritas en la sección 6.4. Cabe señalar que la probeta mallada y atacada químicamente se encuentra dentro de estas pruebas y no presenta cambios significativos. La curva esfuerzo-deformación tanto del promedio del ensayo de tensión de las 5 probetas, como de la probeta mallada se muestra en la Figura 7.3.

El juego de curvas esfuerzo-deformación del ensayo interrumpido de la muestra seleccionada (paso 1 espécimen B) para la simulación se presentan en la Figura 7.4. Aunque el primer paso se suponía que era de 180 s, se determinó que el tiempo real que se había deformado fue de sólo 21.70 s, debido al problema del deslizamiento de la probeta al momento de estar realizando la prueba.

El esfuerzo máximo registrado en el material original (Figura 7.3 línea de color rojo) fue de 352.64 MPa, mientras que el material mallado y atacado químicamente línea

de color azul de la Figura 7.3, presenta un esfuerzo máximo de 367.44 MPa , entre estos valores no existe una diferencia significativa (14.8 MPa), pero comparándolos con el esfuerzo máximo de la prueba interrumpida que fue de 400.10 MPa esta diferencia se incrementa a 47.46 MPa con respecto al material original y 32.66 MPa relacionándolo con el material mallado y atacado químicamente. Estas diferencias se deben al endurecimiento por deformación que experimenta la probeta al ser ensayada una y otra vez

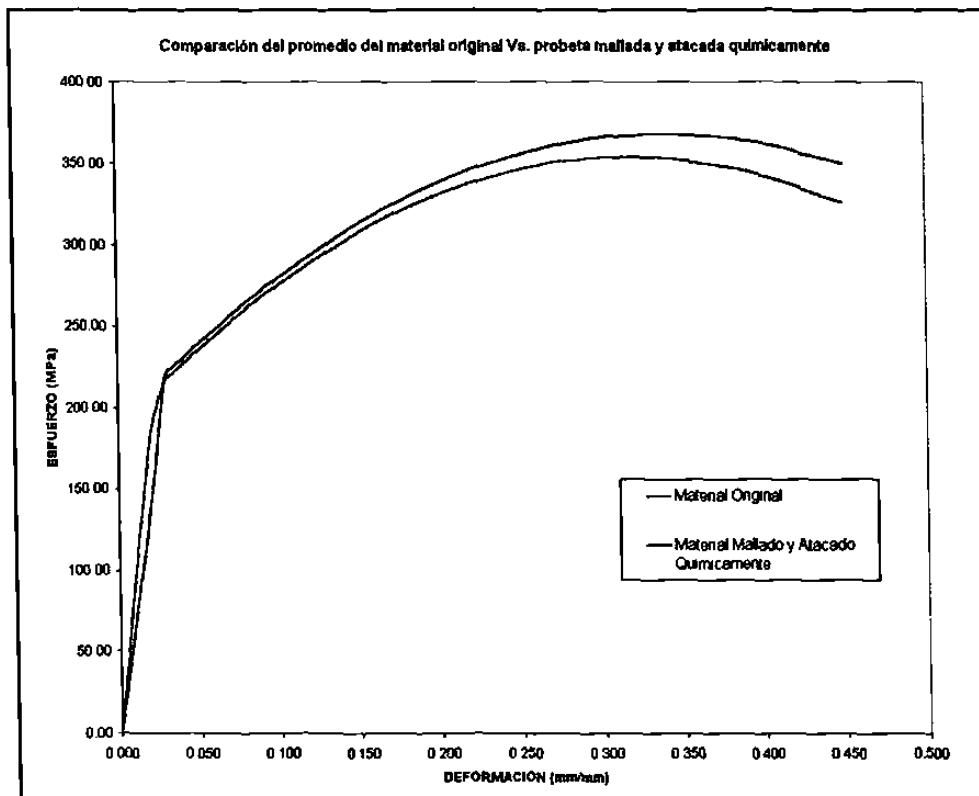


Figura 7.3 Comparativo de las curvas esfuerzo-deformación del promedio de las 5 probetas ensayadas del material original y de la probeta mallada y atacada químicamente.

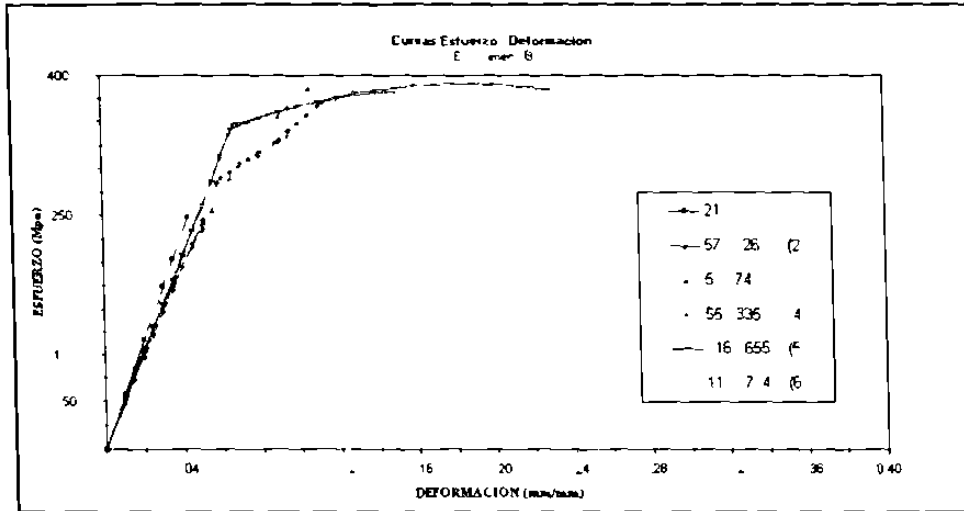


Figura 7.4 Curvas esfuerzo-deformación del ensayo interrumpido de la muestra a simular, se obtienen seis paros antes de llegar a la fractura, 1) 21.70 s, 2) 57.03 s, 3) 53.87 s, 4) 55.13 s, 5) 116.16 s y 6) 119.97 s.

7.4 Estimación de la deformación.

Se evaluó la deformación tanto en la malla como en los granos de la probeta, a continuación se presentan los cálculos obtenidos en el desarrollo experimental, así como la discusión de éstos.

Deformación en malla.

Se utilizaron dos técnicas para evaluar la deformación en la malla de 2 mm x 2 mm. La primera consistió en evaluar la deformación real de acuerdo a la fórmula,

$$\varepsilon = \frac{2}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (7.1)$$

donde,

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0} + 1\right) \quad (7.2)$$

y

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (7.3)$$

Estas mediciones se realizaron solamente en x y y, y la deformación en z se considero despreciable.

La segunda forma para medir la deformación fue mediante un programa de Turbo Pascal, el cual con las coordenadas obtenidas del análisis de imagen de la probeta a simular 1B (véase la Figura 7.5), evalúa los componentes de la deformación y su deformación.

Los componentes de la deformación se evalúan con el cambio en longitud que sufre los nodos que componen la malla en las direcciones x y y , mediante la ecuación 7.2.

Para evaluar la deformación z se considera volumen constante, es decir,

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (7.4)$$

por lo tanto la deformación en z será de

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (7.5)$$

De los resultados obtenidos para cada nodo en sus tres componentes, el programa calcula un promedio de la deformación cuadro por cuadro, obteniendo los esquemas que se pueden apreciar en las Figuras 7.7, 7.8, y 7.9 especificados como ε_1 para x , ε_2 para y , ε_3 para z .

El programa, también estima el esfuerzo cortante xy (γ_{xy} , o en las Figuras 7.7, 7.8, y 7.9 como γ_{12}).

Para finalmente calcular la deformación promedio mediante la fórmula,

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \left[\frac{1}{2} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2) + \frac{3}{4} (\gamma_{12})^2 \right] \quad (7.6)$$

Tabla 7.3 Deformación real de cada paso de deformación.

Paso	1	2	3	4	5	6
ε (mm/mm)	0.03427	0.03649	0.03998	0.04194	0.08838	0.136930

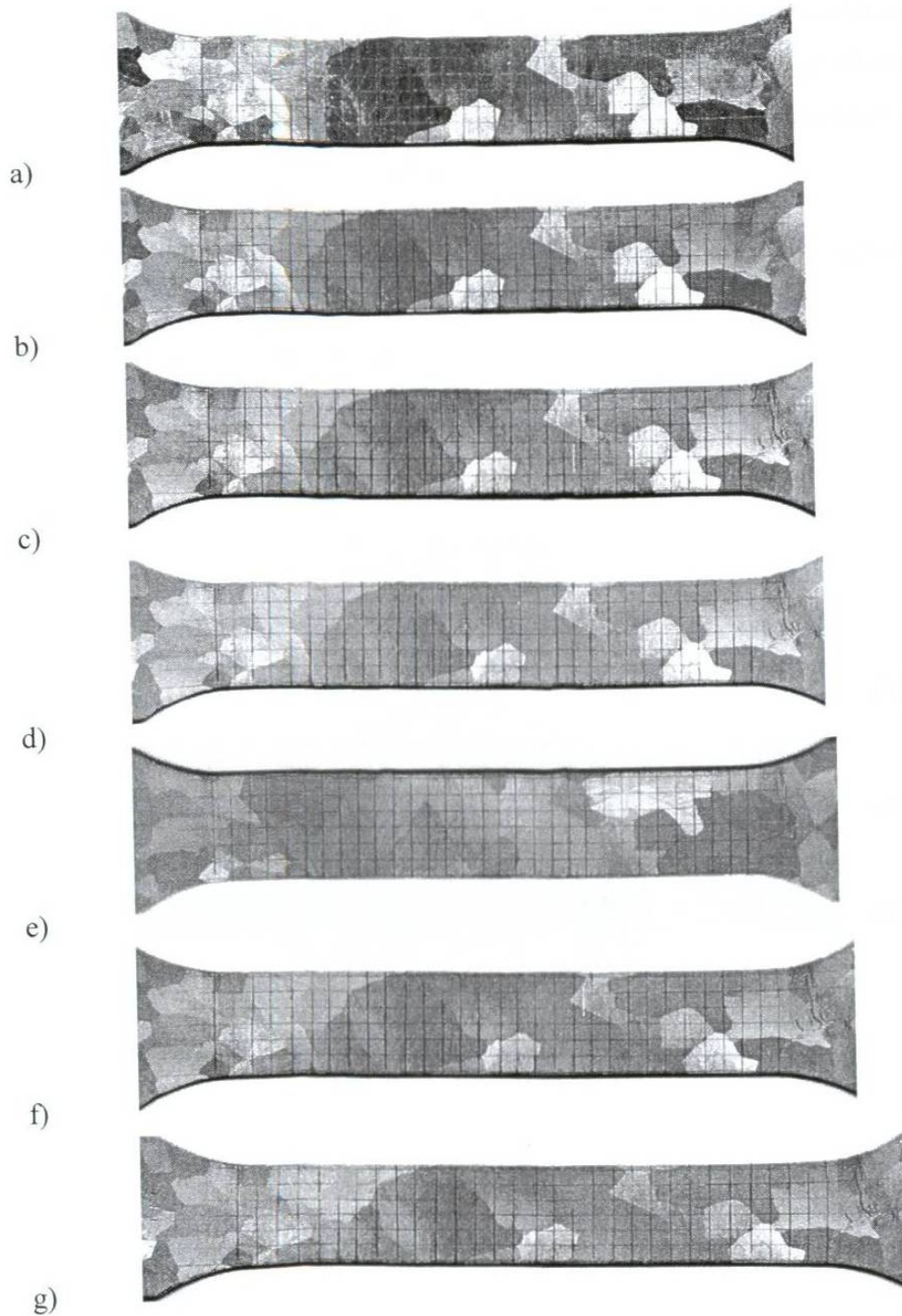


Figura 7.5 Secuencia de la probeta ensayada a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

En la Figura 7.6 y en la Tabla 7.4 se presentan los resultados de la deformación media de todos los pasos de deformación calculados por el programa en Turbo Pascal. Debido a que los ensayos se determinaron por tiempo y no por deslizamiento, para este

programa se omitieron 3 de los pasos (57.03 s, 53.87 s, 55.13 s) ya que la diferencia entre sus desplazamientos era muy pequeña. En la Figura 7.7 se muestran las componentes de deformación en x , y , z del paso 1, lo mismo se presenta en las Figura 7.8 y 7.9 para los pasos 5 y 6 respectivamente.

Tabla 7.4 Deformación media de los pasos 1, 5, 6, calculada por el programa Turbo Pascal.

Paso	1	5	6
ϵ (mm mm)	0.0400	0.101	0.153

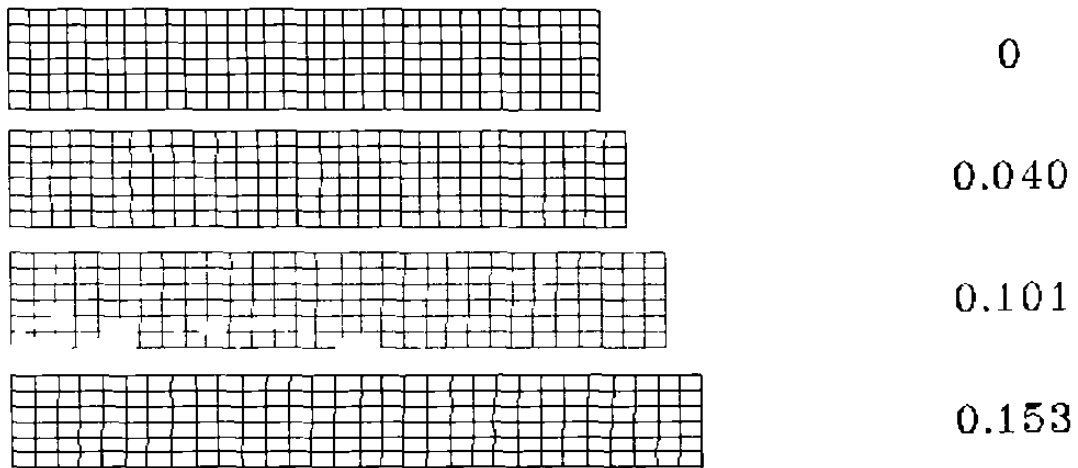


Figura 7.6 Mediciones de la deformación media en los diferentes pasos.

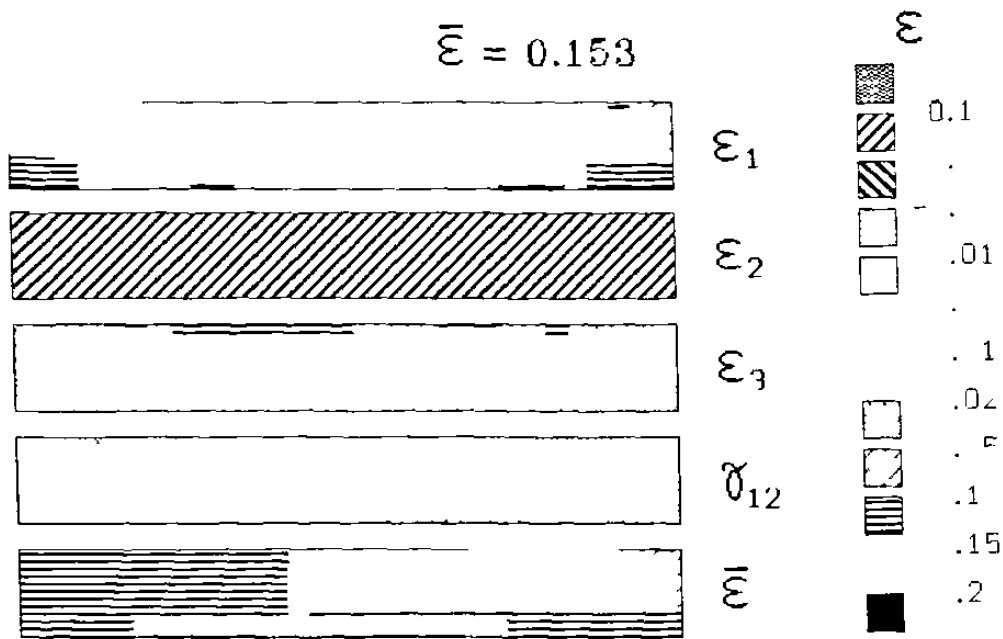


Figura 7.9 Mediciones de los componente de deformación en x, y, z en el paso 6.

Deformación en granos.

De acuerdo a la técnica de Gifkins y Hensler [21] para la estimación de la deformación de los granos, se midieron los anchos y alturas máximas de 15 granos de los 6 diferentes pasos de deformación y posteriormente se evaluaron sus promedios, utilizando para el cálculo la fórmula de la ecuación 5.4. Los resultados obtenidos de estas mediciones se resumen en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 Tabla de las deformaciones equivalentes obtenidas mediante el método Gifkins y Hensler [21].

Paso	1	2	3	4	5	6
Deformación Equivalente (ϵ)	0.03868	0.03890	0.05378	0.05577	0.1041	0.1506

Examinando los resultados de las Tablas 7.3, 7.4 y 7.5, se observa diferencias, por ejemplo, en el paso 6 comparando la Tabla 7.3 con la 7.4 la diferencia es de 10.52 % y con respecto a la Tabla 7.5 es de 10.00 %, se puede observar que las medidas de la deformación de la Tabla 7.3 son mas pequeñas que las de las Tablas 7.4 y 7.5, lo cual se

debe a que en la Tabla 7.4 el programa de Turbo Pascal evalúa los tres componentes de la deformación, además de tomar en cuenta al esfuerzo cortante para cada uno de los puntos (nodos) que forman la malla, lo cual lleva a un valor más real de la deformación total que sufre la muestra. Y la Tabla 7.5 evalúa la deformación a partir del cambio de alto y ancho que sufren los granos al ser deformados una y otra vez.

7.5 Simulación por elemento finito mediante ABAQUS/CAE ^{MR}.

Como se mencionó se realizaron dos modelos, uno de acuerdo a la malla cuadrada de 2 mm x 2 mm dibujada en la sección entre marcas (60 mm) de las probetas, al cual se le denominó MALLA y el segundo que siguió el patrón de la forma y tamaño de los granos contenidos entre la misma zona entre marcas, el cual se llamó GRANOS.

Para ambos modelos se utilizaron las propiedades mecánicas que se describen en la Figura 7.3 (línea de color rojo) y los desplazamientos utilizados como condiciones frontera se describen la Tabla 6.6. Como se dijo anteriormente se utilizó un análisis estático, ya que ABAQUS permite por este tipo de análisis evaluar comportamientos tanto lineales como no lineales, siendo en este caso un comportamiento no lineal ya que en estos modelos se incluye la parte plástica del comportamiento del material.

Los datos de salida solicitados para ambos modelos fue el esfuerzo de acuerdo al esfuerzo equivalente Mises, definido como,

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_m \cdot \sigma_m} \quad (7.7)$$

donde $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ y δ es la delta Kronecker.

Y la deformación de acuerdo a la deformación plástica equivalente que utiliza la fórmula,

$$\epsilon = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)} \quad (7.8)$$

Aunque se trata de modelos en dos dimensiones, ABAQUS toma en cuenta el espesor de la probeta.

Cabe señalar, que en ambos casos no se tomó en cuenta la respuesta elástica del material ni el endurecimiento por deformación que sufre la probeta al ser ensayada una y otra vez. ABAQUS calcula el endurecimiento por deformación (n) para la curva (propiedades) dada, lo que no calcula es el endurecimiento por deformación acumulado en cada paso de deformación.

7.5.1. Modelo MALLA.

Esfuerzo

En la Figura 7.10 se muestra la secuencia de la distribución de esfuerzos del modelo de la MALLA obtenido por FEM en diferentes pasos de deformación de acuerdo a los tiempos reales señalados en la Tabla 6.2. Posteriormente, se obtuvo la curva esfuerzo-deformación para un elemento de la parte media de la probeta (elemento 50) y punto de integración 3, la cual se muestra en la Figura 7.11 (línea color negro), además en ésta se puede observar una buena aproximación con el comportamiento del material original (línea de color rojo) obtenido experimentalmente.

Comparando los esfuerzos máximos obtenidos por ABAQUS y los obtenidos en el ensayo de tensión interrumpido de la Figura 7.4 (Tabla 7.6). Se puede observar que en el primer paso el porcentaje de error entre ellos es aceptable (9.47%), debido a que en este paso el endurecimiento por deformación es despreciable, siendo lo único que afecta la recuperación elástica del material.

En los pasos 2, 3, 4 el porcentaje de error aumenta hasta en un 50.09%, esto se debe a que ABAQUS modela a deformaciones pequeñas un comportamiento idealmente plástico, en el cual se calcula la n de los datos del material dados, pero no calcula el endurecimiento por deformación que acumula la probeta al ser sometida a deformación,

ademas como son deformaciones pequeñas si existe una recuperacion elastica del material.

Si bien ABAQUS calcula el valor n del endurecimiento por deformación de la curva en sí, no evalúa esta para cada tiempo, para ello se necesitaría realizar 5 modelos diferentes con las propiedades de cada curva (Figura 7.4) y así ABAQUS podría evaluar el endurecimiento por deformación de cada una de éstas.

En los pasos 5 y 6 la diferencia entre los esfuerzos comienza a decrecer (25.76 y 17.33 % respectivamente), lo cual puede ser debido a que en estos pasos el desplazamiento y el tiempo a que está sujeta la probeta aumentan, es decir el material sufre una gran deformación, provocando que ABAQUS utilice el comportamiento de la probeta como linealmente endurecida por deformación, tomando en cuenta su deformación elástica y calculando la n para el material. El porcentaje de error se debe a que como se dijo anteriormente ABAQUS no calcula el endurecimiento por deformación acumulado para cada paro de tiempo.

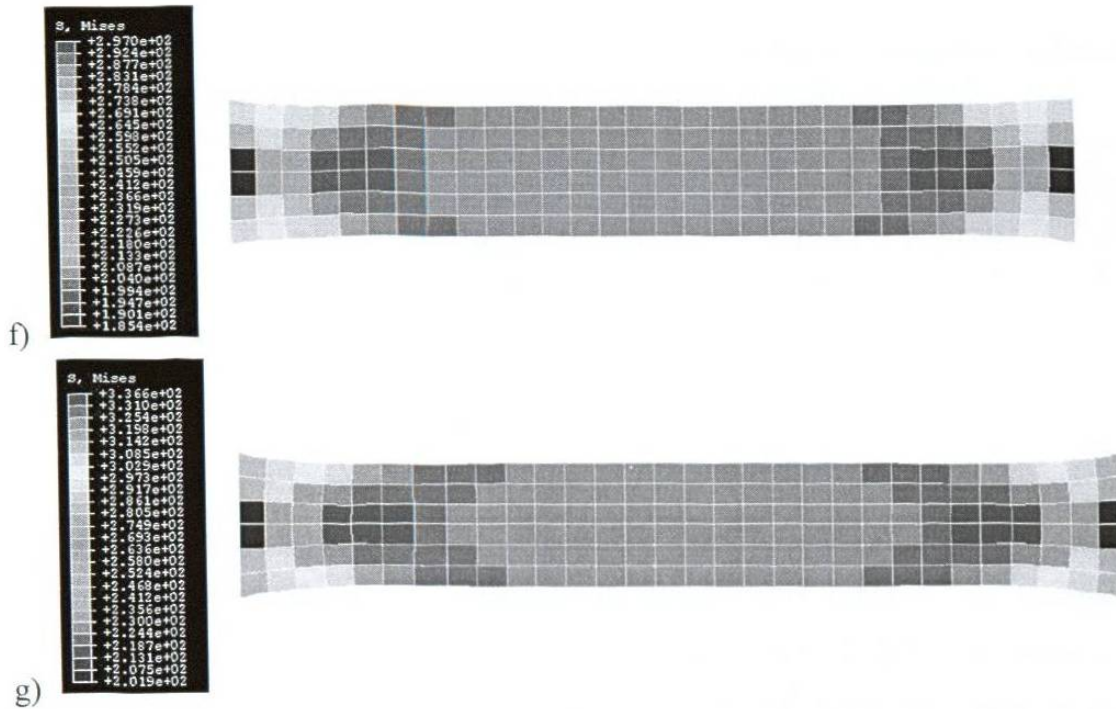


Figura 7.10 Secuencia de distribución de esfuerzos del modelo MALLA obtenida por FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

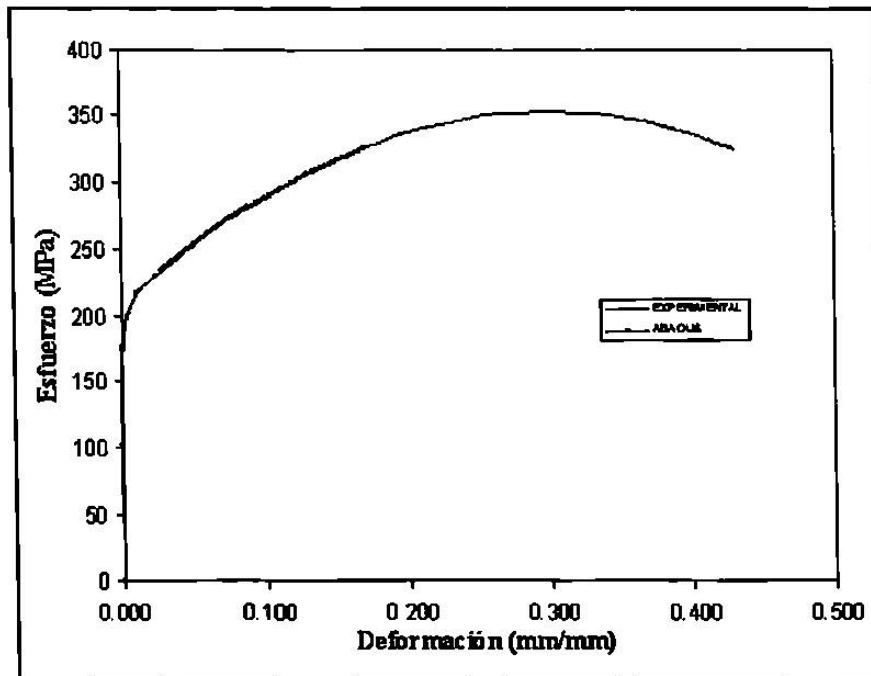


Figura 7.11 Gráfica comparativa de las curvas esfuerzo-deformación, obtenida experimentalmente de las 5 probetas ensayadas a la fractura y la generada por ABAQUS para el modelo MALLA.

Tabla 7.6 Comparación de los valores de esfuerzo máximo calculados experimentalmente y los calculados por ABAQUS para el modelo MALLA.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	215.9	374.9	393.5	361.6	400.1	396.3
ABAQUS	238.5	241.2	245.5	247.5	297.0	336.6
% de Error	9.476	55.43	59.57	46.10	25.76	17.73

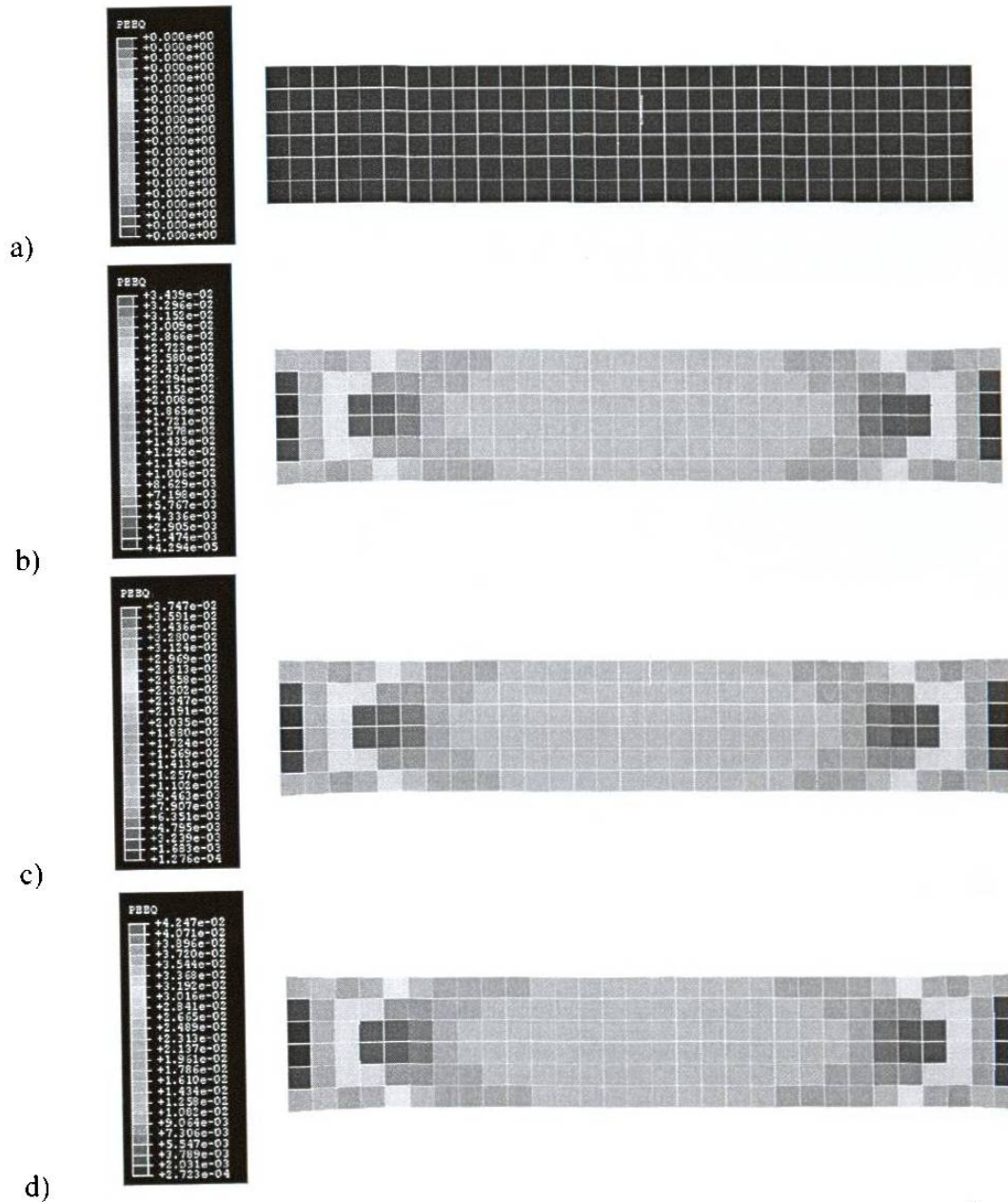
Deformación.

La Figura 7.12 muestra la secuencia de la distribución de deformación de la probeta del modelo MALLA. Como se mencionó anteriormente existieron dos formas de evaluar la deformación para este modelo, de acuerdo a la Tabla 7.7 que compara la deformación real de acuerdo a la ecuación 7.8. (despreciando la deformación en z) y la calculada por ABAQUS, en esta se puede observar una buena aproximación en los primeros 2 pasos (8.72% y 6.19% respectivamente) y posteriormente esta diferencia se eleva hasta un 17.16% en el paso 6. Además, se puede observar que del paso 1 al 5 el valor de la deformación calculada por ABAQUS es menor que lo deducido experimentalmente, esto se puede deber a que ABAQUS a pequeñas deformaciones, toma el modelo como idealmente plástico y no toma en cuenta la parte que corresponde a deformación elástica.

En los pasos 5 y 6 que se consideran largas deformaciones, las mediciones experimentales son menores que las calculadas por ABAQUS y el comportamiento del modelo cambia a linealmente endurecido por deformación, pero existen diferencias (10.59% y 17.16% respectivamente), debido a que ABAQUS no calcula el endurecimiento para cada paro de prueba, es decir en la prueba experimental existe una disminución de la ductilidad por el endurecimiento que sufre la muestra, lo cual se ve reflejado en los datos experimentales.

En cambio la Tabla 7.8 que compara la deformación media calculada por el programa de Turbo Pascal y la calculada por ABAQUS presenta una mejor aproximación, ya que este toma en cuenta las componentes de deformación en x, y, z.

siendo 21.2 % el máximo error, el cual se presenta en el paso 1. Este porcentaje de error se puede deber a la manera que ABAQUS simula el comportamiento a deformaciones pequeñas, ya que no toma en cuenta la deformación elástica y ni la influencia del esfuerzo cortante en xy del material.



Continúa...

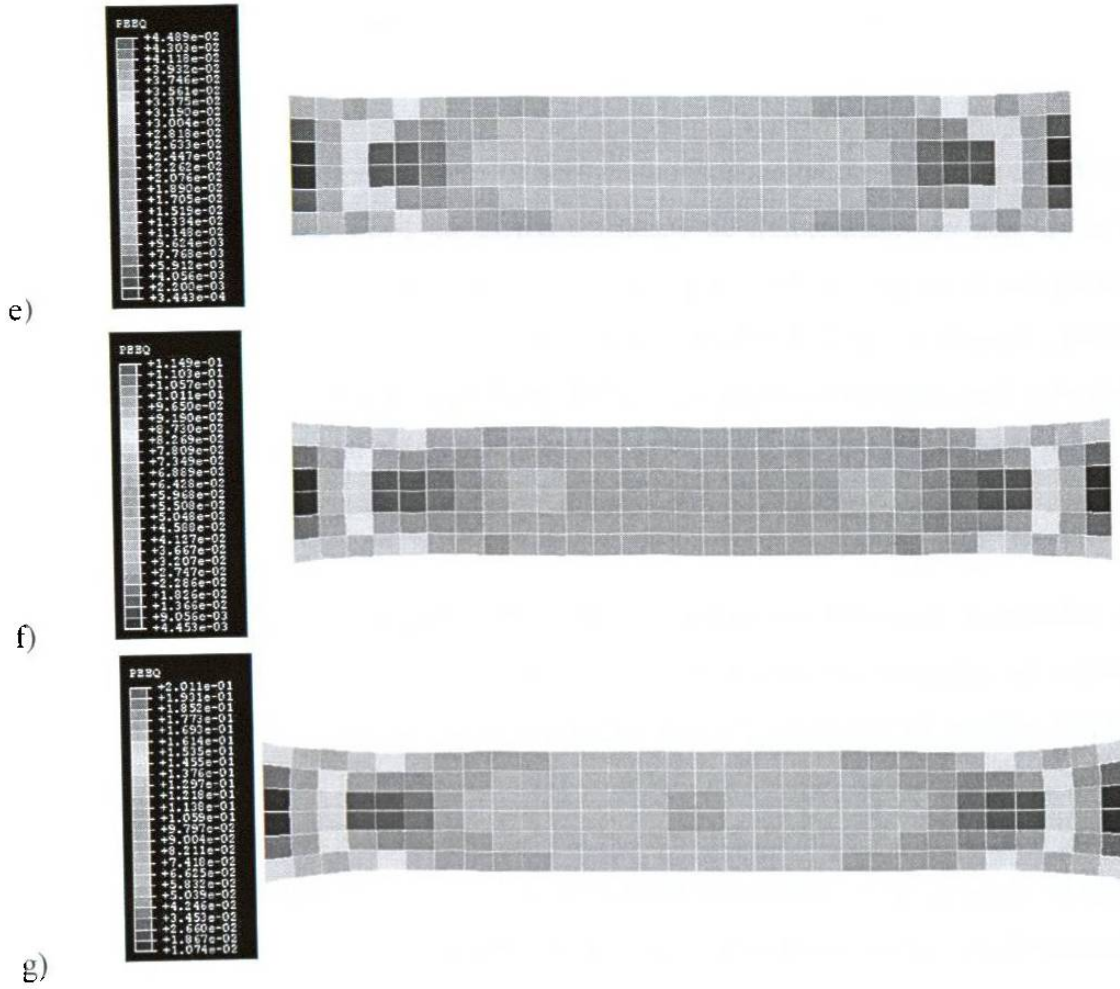


Figura 7.12 Secuencia de distribución de deformación del modelo MALI A obtenido por FEM a diferentes pasos de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

Tabla 7.7 Comparativo de la deformación real y la obtenida por FEM para cada paso de deformación.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	0.03427	0.03649	0.03998	0.04194	0.08838	0.13693
ABAQUS	0.03152	0.03436	0.03554	0.03746	0.09885	0.16530
% Error	8.72	6.19	12.49	10.68	10.59	17.16

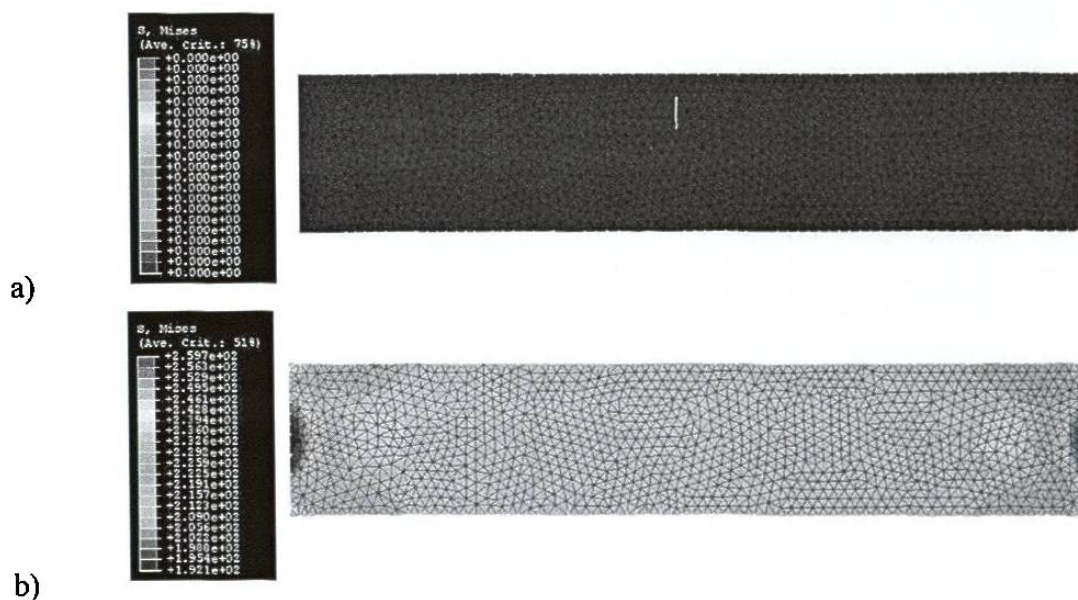
Tabla 7.8 Comparativo de la deformación media obtenida por el programa de Turbo Pascal y la obtenida por FEM para los pasos 1, 5 y 6.

Paso	1	5	6
Turbo Pascal	0.04000	0.1010	0.1530
ABAQUS	0.03152	0.0988	0.1653
% Error	21.2	2.17	7.44

7.5.2. Modelo GRANOS.

La Figura 7.13 muestra la secuencia de la distribución de esfuerzos del modelo GRANOS obtenida por FEM en diferentes pasos de deformación de acuerdo a los tiempos reales señalados en la Tabla 6.2. En la Figura 7.14 se muestra el comparativo entre la curva esfuerzo-deformación generada por ABAQUS (línea color negro) para un elemento de la parte media de la probeta (1321) en el punto de integración 2, y la curva experimental del material original (línea de color rojo de la Figura 7.3), pudiendo observarse una buena aproximación entre ellas.

Efectuando una comparación entre los esfuerzos máximos calculados por ABAQUS y los encontrados para cada paso en la prueba interrumpida, tal como se indican en la Tabla 7.9, se observa una mejor aproximación que el modelo MALLA (Tabla 7.6), esto se debe a que la malla es más fina ya que esta sigue el patrón del tamaño y forma de los granos. Aunque los porcentajes de error siguen siendo grandes, esto se debe básicamente a las mismas razones expuestas en el modelo MALLA, principalmente al hecho de que ABAQUS no calcula el endurecimiento por deformación para cada paro de tiempo.



Continúa...

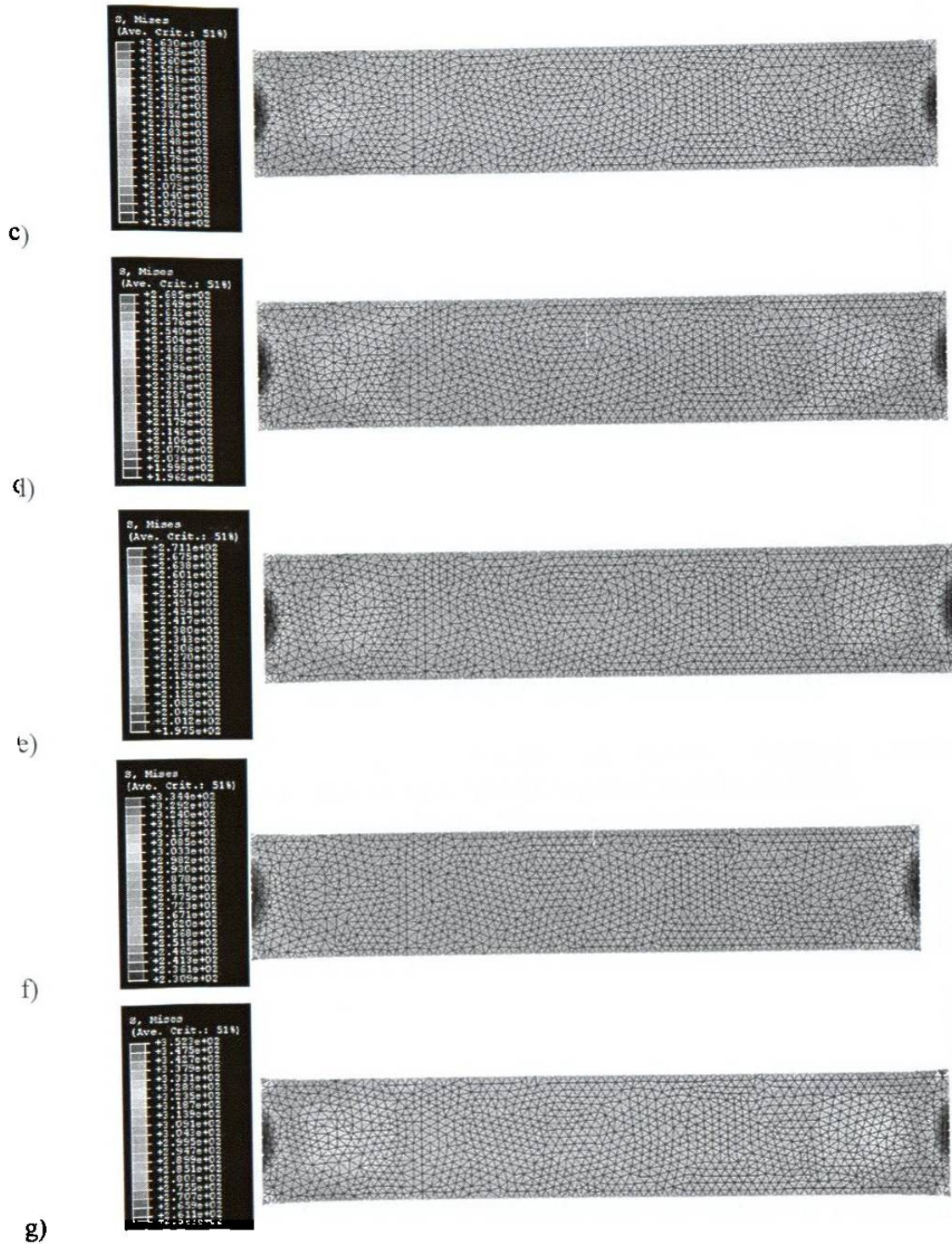


Figura 7.13 Secuencia de distribución de esfuerzos para el modelo GRANOS obtenida por medio de FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

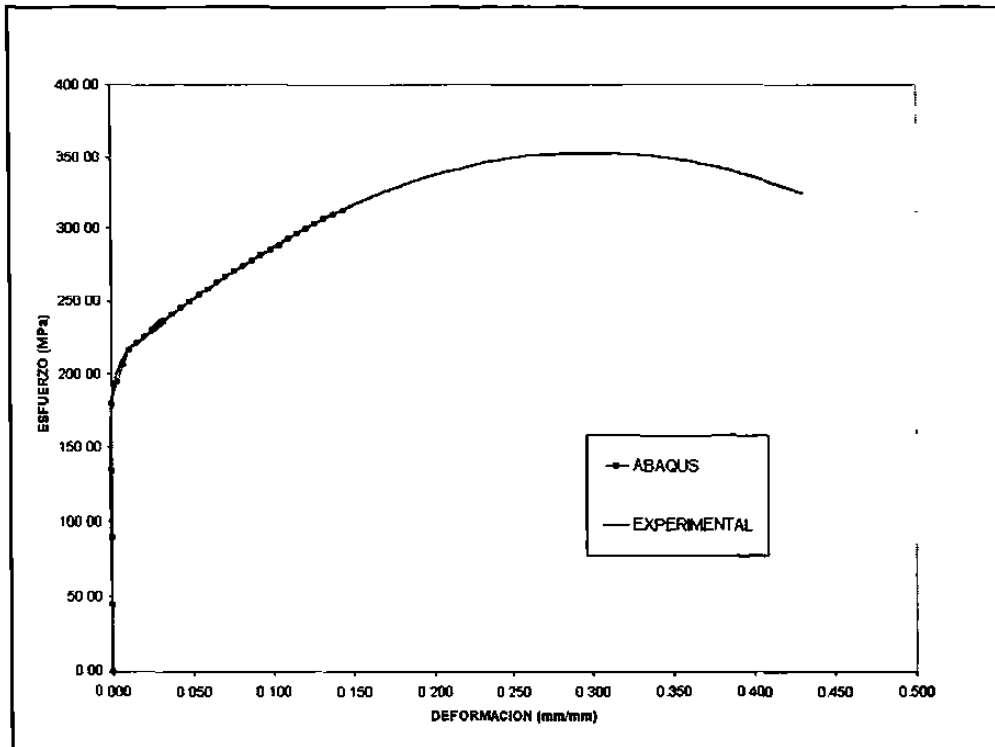


Figura 7.14 Gráfica comparativa de las curvas esfuerzo-deformación, obtenida experimentalmente y la generada por ABAQUS para el modelo GRANOS.

Tabla 7.9 Comparación de los valores de esfuerzo máximo calculados experimentalmente y los calculados por ABAQUS para el modelo GRANOS.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	215.9	374.9	393.5	361.6	400.1	396.3
ABAQUS	259.7	263.0	268.5	271.1	334.4	352.3
% de Error	20.28	42.54	46.55	33.38	16.42	11.10

Deformación

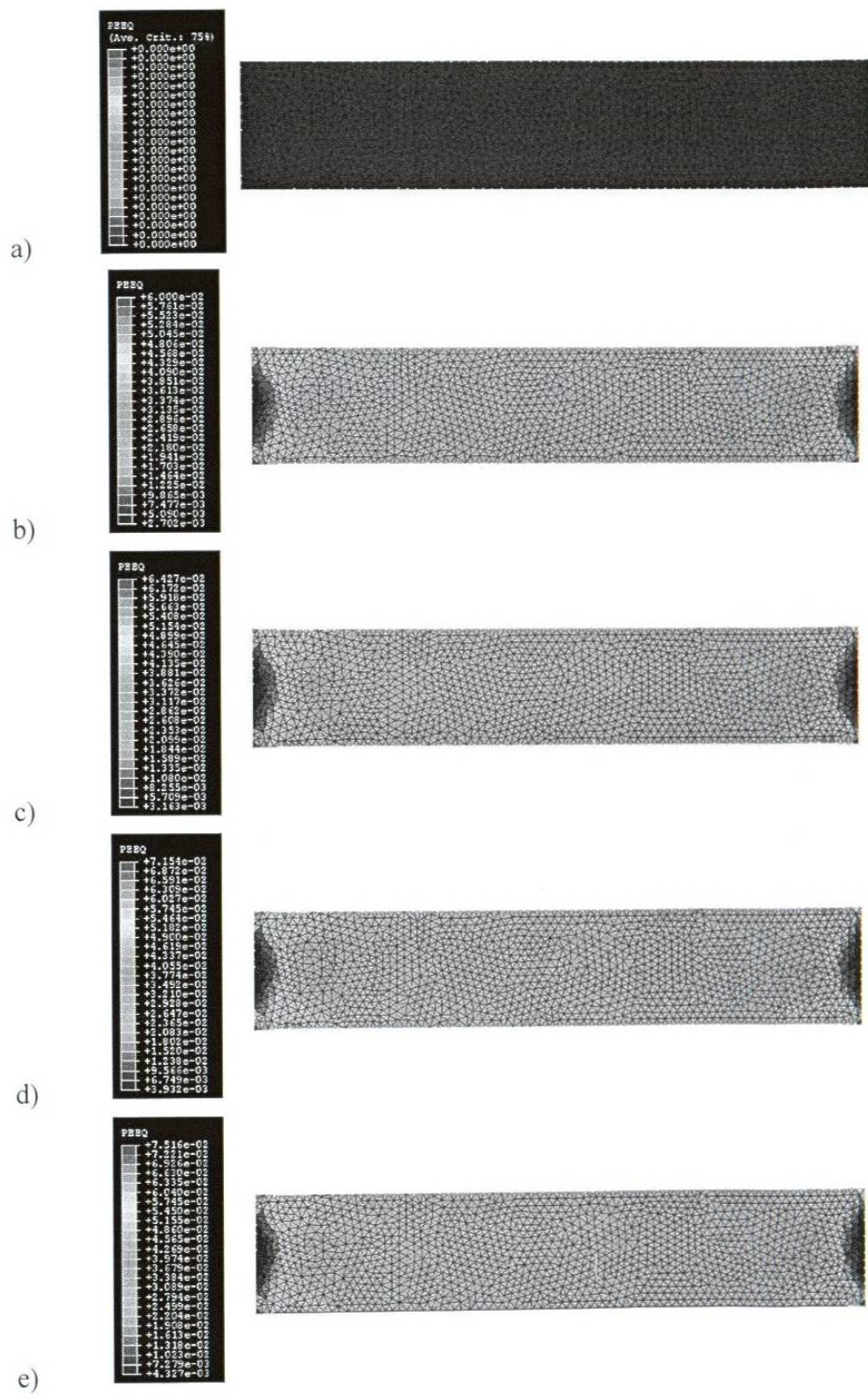
En la Figura 7.15 se observa la continuidad de la distribución de deformación de la muestra 1B del modelo GRANOS alcanzado por FEM a los diferentes tiempos de deformación. La forma de evaluar la deformación para este modelo fue de acuerdo a la técnica de Gifkins y Hensler [21], la Tabla 7.10 enlista los valores de deformación calculados por esta técnica en los diferentes pasos, de acuerdo al promedio de los 15 granos y el valor promedio obtenido de la simulación numérica por ABAQUS.

Al comparar los resultados se tienen porcentajes de error más pequeños que los registrados en el modelo MALLA.

En los pasos del 1 al 4 (pequeñas deformaciones) las mediciones experimentales son mayores que las calculadas por ABAQUS, teniendo un porcentaje de error máximo de 8.83 en el paso 3. Esto se debe, a que como se dijo anteriormente en el modelo MALLA, ABAQUS a pequeñas deformaciones simula un comportamiento idealmente plástico, es decir solo toma en cuenta la deformación plástica que sufrió el material.

En los pasos 5 y 6 aunque sus diferencias son pequeñas (1.70 y 1.63 %), se puede observar que las mediciones experimentales son menores, básicamente se debe al hecho de que al estar ensayando una y otra vez la probeta ésta pierde ductilidad, dando como resultado estas diferencias.

Otro factor que hace que el modelo GRANOS es mejor que el modelo MALLA, es la formación de la malla respeta los límites de grano, haciéndose mas fina y por lo tanto mejora su aproximación. Es importante señalar que aunque la aproximación de los granos a una forma rectangular no es la ideal, si mejora la aproximación, dando un indicativo de que es pertinente seguir la deformación de los granos para encontrar la deformación total del material.



Continúa...

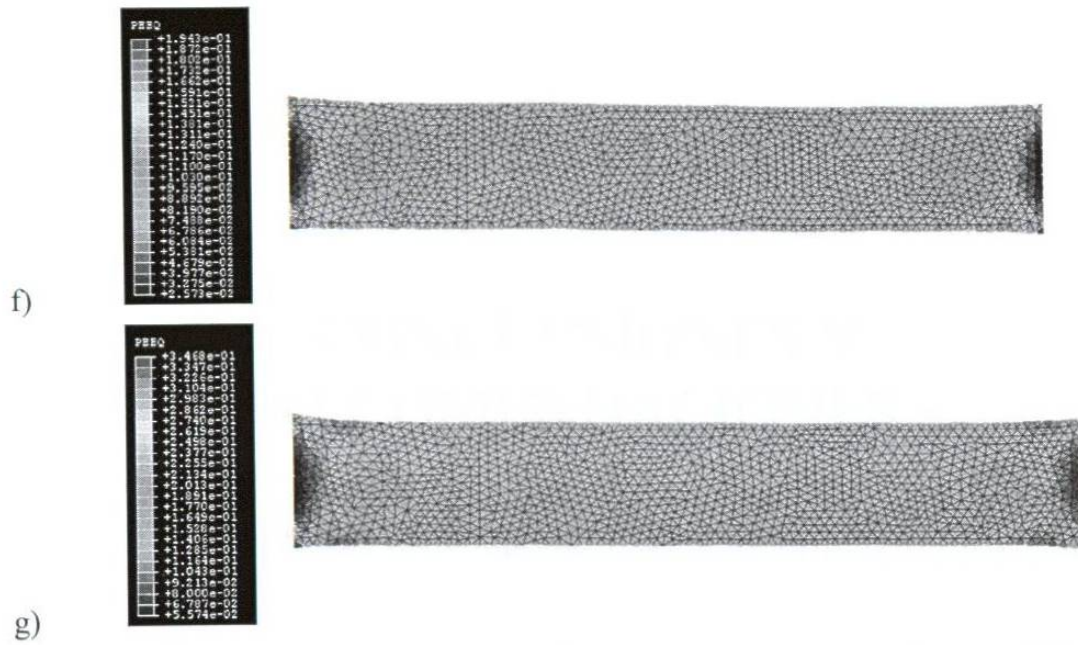


Figura 7.15 Secuencia de distribución de deformación del modelo GRANOS obtenido por FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

Tabla 7.10 Comparación entre los valores de la deformación equivalente calculada experimentalmente y la calculada por el modelo numérico para cada paso.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	0.03868	0.03890	0.05333	0.05538	0.1046	0.1503
ABAQUS	0.03613	0.03881	0.04900	0.05450	0.1065	0.1528
% Error	7.05	0.231	8.83	1.61	1.81	1.63