

CAPITULO 6

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

6.1 Introducción.

Como se mencionó anteriormente, la finalidad de este trabajo es evaluar la técnica de simulación por elemento finito como herramienta en el conocimiento del comportamiento plástico, aunque en este trabajo solo se refiere a la deformación y al esfuerzo, se sentará un precedente para posteriores investigaciones. Para lograr esto, se desarrolló una metodología la cual se describe en las secciones subsecuentes.

6.2 Selección de material.

La selección de material se llevo a cabo considerando dos parámetros importantes:

- a) El espesor debía de ser lo suficientemente pequeño (algunos autores manejan espesores menores o iguales a 3 mm) [2, 18], para asegurar una relación con respecto al ancho y al largo de la probeta menor o igual a un 10 %, para poder considerar al modelo solamente en dos dimensiones.
- b) Los granos de la superficie del material tenían que ser un tamaño tal que se observaran a simple vista, para facilitar la medicion de la deformación equivalente y crear la geometría a simular.

De acuerdo a lo anterior se decidió analizar un acero de bajo carbono galvanizado, el cual fue proporcionado por la empresa GALVAK S.A. de C.V. Este material cumplía

con los 2 requisitos: espesor pequeño de 0.55 mm que comparado con el ancho (12 mm) y el largo (60 mm) asegura la relación menor o igual a 10 %, y visibilidad de los granos superficiales, ya que el recubrimiento de zinc es del tipo clásico de flor gruesa que permite observar sus granos a simple vista. Aunque se trata de un material con interfase entre el acero y el zinc, sólo se analizó la parte superficial, es decir se considera una sola capa de granos (el porque de esta consideración se explicará al conocer el espesor del recubrimiento)

Además, como no se contaba con los datos de composición química del acero y el espesor del recubrimiento de zinc, se efectuaron un análisis químico al acero y microscopia electrónica de barrido para determinar el espesor del recubrimiento.

6.3 Preparación de muestras.

Ya que las muestras utilizadas en esta investigación serán sometidas a un ensayo de tensión axial, se prepararon de acuerdo a la norma ASTM E-8 [25] para probetas planas (Figura 6.1). Dentro de la distancia entre marcas, la cual es de 60 mm, se grabó una milimalla cuadrada de 2 mm x 2 mm con una navaja de bisturí, con el propósito de medir la deformación obtenida durante el ensayo. En la Figura 6.2 se muestra una probeta milimallada.

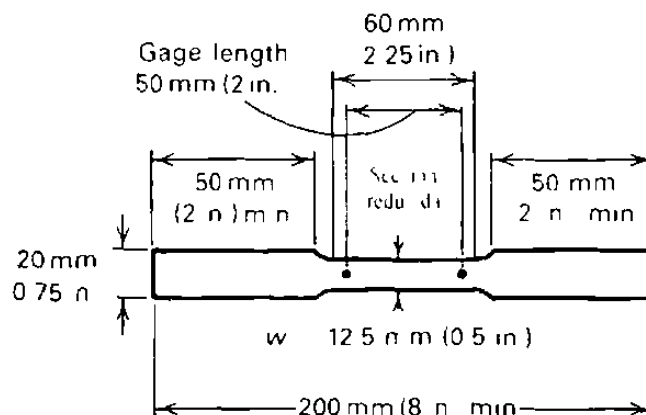


Figura 6.1 Geometría de las probetas de acuerdo a la norma ASTM E-8 para probetas planas [25].

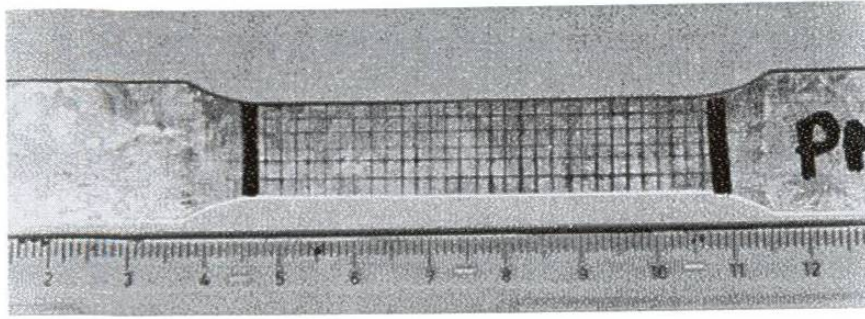


Figura 6.2 Fotografía de la muestra preparada con la milimalla de 2mm x 2mm.

Además, para definir mejor la forma y el tamaño de los granos, las probetas fueron sometidas a un ataque químico de ácido clorhídrico al 8 %, cuidando no dañar la superficie (véase Figura 6.3).



Figura 6.3 Imagen de la muestra preparada con la milimalla de 2mm x 2mm y atacada químicamente con HCl al 8%.

6.4 Ensayo de tensión.

Las probetas fueron sometidas a un ensayo de tensión axial con interrupciones en intervalos de tiempo definidos. Para poder definir estos intervalos, se realizaron pruebas exploratorias a 5 probetas con la finalidad de observar y obtener sus propiedades mecánicas y comportamiento durante la deformación y obtener los valores de elongación y esfuerzo a la ruptura. Además, se efectuó una prueba a una probeta mallada y atacada químicamente para descartar algún cambio en las propiedades mecánicas, debido a estos dos procesos.

En la Tabla 6.1 se indica los tiempos definidos a los cuales se detuvo la máquina para medir la deformación en las probetas, es importante señalar que antes de ser sometidas al ensayo se efectuó un análisis de imagen, el cual será descrito

posteriormente. Debido a que se presentaba el problema de que las probetas comenzaban a resbalarse al estarlas probando una y otra vez, se decidió efectuar para cada uno de los tiempos cuatro pruebas denominadas A, B, C, D, de las cuales se elegiría un espécimen de cada uno de los tiempos para ser simulada (resultados en Anexo 1).

Ya que el problema del deslizamiento de la probeta fue resuelto, se eligió la probeta B del paso 1 (180 s) para deformarla de acuerdo a los tiempo enlistados en la Tabla 6.2. Aunque existe una diferencia entre los tiempos determinados y los tiempos reales, el que presenta una mayor diferencia es el paso 1 debido al inconveniente antes mencionado.

Tabla 6.1 Intervalos de tiempo propuestos para el ensayo de tensión.

Paso	Tiempo (s)	Probetas
1	180	A, B, C, D
2	240	A, B, C, D
3	300	A, B, C, D
4	360	A, B, C, D
5	420	A, B, C, D

Tabla 6.2 Tiempos agregados al ensayo de tensión de la probeta B.

Probeta	Paso	Tiempo señalado (s)	Tiempo real (s)	Tiempo Acumulado (s)
B	1	180	21.7080	21.7080
	2	60	57.0326	78.7406
	3	60	53.8747	132.6153
	4	60	55.1335	187.7488
	5	120	116.1655	303.9143
	6	120	119.9714	423.8857
			Ruptura	

Todas las pruebas fueron realizadas a una velocidad constante del cabezal de 3mm/min en una máquina universal servoelectrica Sintech 30/D (Figura 6.4) con una capacidad de carga de 150 KN.

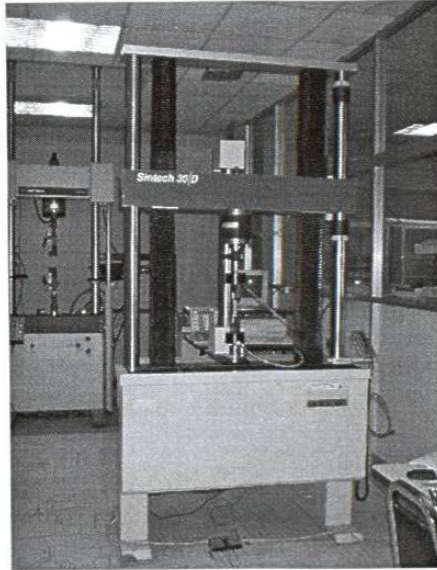


Figura 6.4 Máquina universal Sintech 30/D.

6.5 Análisis de imagen.

El análisis de imagen es la herramienta fundamental de la experimentación de este trabajo, ya que se necesitaba contar con la historia del antes y después de los pasos de deformación (las imágenes obtenidas de las probetas descritas en la Tabla 6.1 se muestran en el Anexo 2), tanto en la malla como en el aspecto de los granos.

Todas las imágenes fueron obtenidas por un digitalizador de imágenes comercial, a una resolución de 150 ppp. (píxeles por pulgada) a un aumento del 200 %. El análisis de la imagen se efectuó por medio de dos paquetes comerciales de edición de imágenes: Photo Plus 4 y Micrografx Windows Draw versión 6.

6.5.1 Medición del mallado.

Dentro del método de elemento finito una de las partes fundamentales es el mallado de la pieza a simular, es por esto que en las probetas se trazó la milimalla de $2 \times 2 \text{ mm}^2$, para así poder comparar la deformación de la malla real con la del modelo.

Para llegar a esto, se tuvieron que determinar las coordenadas de la probeta sin deformación y en cada uno de los pasos indicados en la Tabla 6.2. Primeramente, se digitalizó la probeta sin deformar, mejorando la calidad de la imagen por medio del editor de imágenes Photo Plus, y determinando sus coordenadas por medio de Micrografx Windows Draw. En la Figura 6.5 se muestra como se obtuvo las coordenadas. En la parte inferior de esta figura, se señala las coordenadas en centímetros del punto marcado con blanco. Este proceso se practicó para cada paso de deformación. Cada probeta tiene 210 nodos y los pasos de deformación fueron 6.

Una vez determinadas las coordenadas de todos los pasos de deformación (ver Tabla 6.3), se creó un modelo en Turbo Pascal [26] el cual calculó la deformación real de cada uno de los pasos, de acuerdo a sus componentes en x , y , z y el esfuerzo cortante xy . El cómo evalúa la deformación real el programa se describirá en los resultados.



Figura 6.5 Imagen de la pantalla en Micrografx Windows Draw.

Tabla 6.3 Valores de las coordenadas (x, y) en mm de la milimalla de cada uno de los pasos de deformación.

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	0.000	11.637	0.000	11.469	0.000	11.450	0.000	11.425	0.000	11.400	0.000	11.181	0.000	10.850
	0.000	9.744	0.000	9.584	0.000	9.550	0.000	9.545	0.000	9.535	0.000	9.337	0.000	9.065
	0.000	7.777	0.000	7.634	0.000	7.625	0.000	7.600	0.000	7.590	0.000	7.460	0.000	7.211
	0.000	5.868	0.000	5.784	0.000	5.775	0.000	5.765	0.000	5.755	0.000	5.605	0.000	5.440
	0.000	3.939	0.000	3.884	0.000	3.850	0.000	3.870	0.000	3.875	0.000	3.747	0.000	3.616
	0.000	1.971	0.000	1.934	0.000	1.930	0.000	1.923	0.000	1.925	0.000	1.894	0.000	1.829
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2.093	11.637	2.164	11.469	2.175	11.450	2.200	11.425	2.214	11.400	2.264	11.181	2.293	10.850
	2.093	9.744	2.164	9.584	2.175	9.550	2.200	9.545	2.214	9.535	2.264	9.337	2.293	9.065
	2.093	7.777	2.164	7.634	2.175	7.625	2.200	7.600	2.214	7.590	2.264	7.460	2.293	7.211
	2.093	5.868	2.164	5.784	2.175	5.675	2.200	5.765	2.214	5.755	2.264	5.605	2.293	5.440
	2.093	3.939	2.164	3.884	2.175	3.850	2.200	3.870	2.214	3.875	2.264	3.747	2.293	3.616
	2.093	1.971	2.164	1.934	2.175	1.930	2.200	1.923	2.214	1.925	2.264	1.894	2.293	1.829
	2.093	0.000	2.164	0.000	2.175	0.000	2.200	0.000	2.214	0.000	2.264	0.000	2.293	0.000
3	4.179	11.637	4.371	11.469	4.400	11.450	4.436	11.425	4.471	11.400	4.764	11.181	4.943	10.850
	4.179	9.744	4.421	9.584	4.421	9.550	4.436	9.545	4.471	9.535	4.764	9.337	4.893	9.065
	4.179	7.777	4.371	7.634	4.400	7.625	4.436	7.600	4.471	7.590	4.614	7.460	4.793	7.211
	4.179	5.868	4.221	5.784	4.250	5.675	4.286	5.765	4.421	5.755	4.514	5.605	4.643	5.440
	4.179	3.939	4.221	3.884	4.250	3.850	4.286	3.870	4.371	3.875	4.464	3.747	4.643	3.616
	4.179	1.971	4.271	1.934	4.271	1.930	4.286	1.923	4.321	1.925	4.464	1.894	4.643	1.829
	4.179	0.000	4.271	0.000	4.271	0.000	4.286	0.000	4.321	0.000	4.514	0.000	4.643	0.000
4	6.186	11.637	6.271	11.469	6.375	11.450	6.436	11.425	6.443	11.400	6.764	11.181	7.093	10.850
	6.186	9.744	6.271	9.584	6.350	9.550	6.436	9.545	6.443	9.535	6.764	9.337	7.043	9.065
	6.186	7.777	6.321	7.634	6.350	7.625	6.436	7.600	6.443	7.590	6.764	7.460	7.043	7.211
	6.186	5.868	6.321	5.784	6.350	5.675	6.436	5.765	6.443	5.755	6.714	5.605	6.993	5.440
	6.186	3.939	6.371	3.884	6.371	3.850	6.436	3.870	6.443	3.875	6.714	3.747	6.943	3.616
	6.186	1.971	6.371	1.934	6.371	1.930	6.436	1.923	6.443	1.925	6.714	1.894	6.993	1.829
	6.186	0.000	6.371	0.000	6.371	0.000	6.436	0.000	6.443	0.000	6.714	0.000	6.943	0.000
5	8.164	11.637	8.421	11.469	8.500	11.450	8.500	11.425	8.543	11.400	9.064	11.181	9.493	10.850
	8.164	9.744	8.421	9.584	8.500	9.550	8.500	9.545	8.543	9.535	9.064	9.337	9.393	9.065
	8.164	7.777	8.371	7.634	8.500	7.625	8.500	7.600	8.543	7.590	9.014	7.460	9.393	7.211
	8.164	5.868	8.421	5.784	8.500	5.675	8.500	5.765	8.543	5.755	8.964	5.605	9.393	5.440
	8.164	3.939	8.471	3.884	8.500	3.850	8.500	3.870	8.543	3.875	8.964	3.747	9.343	3.616
	8.164	1.971	8.471	1.934	8.500	1.930	8.500	1.923	8.543	1.925	8.964	1.894	9.343	1.829
	8.164	0.000	8.471	0.000	8.475	0.000	8.500	0.000	8.543	0.000	8.914	0.000	9.293	0.000
6	10.193	11.637	10.571	11.469	10.571	11.450	10.650	11.425	10.721	11.400	11.314	11.181	11.893	10.850
	10.193	9.744	10.621	9.584	10.621	9.550	10.650	9.545	10.721	9.535	11.314	9.337	11.893	9.065
	10.193	7.777	10.571	7.634	10.650	7.625	10.650	7.600	10.721	7.590	11.314	7.460	11.893	7.211
	10.193	5.868	10.621	5.784	10.650	5.675	10.650	5.765	10.721	5.755	11.314	5.605	11.793	5.440
	10.193	3.939	10.621	3.884	10.621	3.850	10.621	3.870	10.621	3.875	11.214	3.747	11.743	3.616
	10.193	1.971	10.571	1.934	10.600	1.930	10.600	1.923	10.621	1.925	11.214	1.894	11.743	1.829
	10.193	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	11.114	0.000	11.693	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	Y
7	12.021	11.637	12.521	11.469	12.550	11.450	12.600	11.425	12.621	11.400	13.314	11.181	13.943	10.850
	12.021	9.744	12.471	9.584	12.550	9.550	12.600	9.545	12.621	9.535	13.314	9.337	13.943	9.065
	12.021	7.777	12.521	7.634	12.550	7.625	12.600	7.600	12.621	7.590	13.314	7.460	13.943	7.211
	12.021	5.868	12.471	5.784	12.550	5.675	12.600	5.765	12.621	5.755	13.314	5.605	13.943	5.440
	12.021	3.939	12.521	3.884	12.525	3.850	12.550	3.870	12.571	3.875	13.314	3.747	13.893	3.616
	12.021	1.971	12.471	1.934	12.500	1.930	12.550	1.923	12.571	1.925	13.264	1.894	13.843	1.829
	12.021	0.000	12.521	0.000	12.525	0.000	12.550	0.000	12.571	0.000	13.214	0.000	13.843	0.000
8	14.079	11.637	14.621	11.469	14.700	11.450	14.700	11.425	14.721	11.400	15.614	11.181	16.443	10.850
	14.079	9.744	14.621	9.584	14.700	9.550	14.700	9.545	14.721	9.535	15.664	9.337	16.343	9.065
	14.079	7.777	14.671	7.634	14.700	7.625	14.700	7.600	14.721	7.590	15.664	7.460	16.443	7.211
	14.079	5.868	14.671	5.784	14.721	5.675	14.721	5.765	14.721	5.755	15.614	5.605	16.443	5.440
	14.079	3.939	14.671	3.884	14.700	3.850	14.721	3.870	14.721	3.875	15.564	3.747	16.343	3.616
	14.079	1.971	14.721	1.934	14.721	1.930	14.721	1.923	14.721	1.925	15.614	1.894	16.343	1.829
	14.079	0.000	14.671	0.000	14.700	0.000	14.721	0.000	14.721	0.000	15.564	0.000	16.343	0.000
9	16.250	11.637	16.821	11.469	16.950	11.450	16.950	11.425	16.971	11.400	17.914	11.181	18.843	10.850
	16.250	9.744	16.821	9.584	16.950	9.550	16.950	9.545	16.971	9.535	17.914	9.337	18.843	9.065
	16.250	7.777	16.871	7.634	16.950	7.625	16.950	7.600	16.971	7.590	17.914	7.460	18.893	7.211
	16.250	5.868	16.871	5.784	16.950	5.675	16.950	5.765	16.971	5.755	17.914	5.605	18.843	5.440
	16.250	3.939	16.921	3.884	16.950	3.850	16.950	3.870	16.971	3.875	17.914	3.747	18.843	3.616
	16.250	1.971	16.921	1.934	16.925	1.930	16.950	1.923	16.971	1.925	17.914	1.894	18.843	1.829
	16.250	0.000	16.921	0.000	16.925	0.000	16.950	0.000	16.971	0.000	17.914	0.000	18.843	0.000
10	18.114	11.637	18.821	11.469	18.850	11.450	18.850	11.425	18.871	11.400	20.064	11.181	21.143	10.850
	18.114	9.744	18.821	9.584	18.850	9.550	18.850	9.545	18.871	9.535	20.064	9.337	21.143	9.065
	18.114	7.777	18.821	7.634	18.850	7.625	18.850	7.600	18.871	7.590	20.064	7.460	21.093	7.211
	18.114	5.868	18.821	5.784	18.850	5.675	18.850	5.765	18.871	5.755	20.014	5.605	21.093	5.440
	18.114	3.939	18.821	3.884	18.875	3.850	18.950	3.870	18.971	3.875	20.014	3.747	21.043	3.616
	18.114	1.971	18.821	1.934	18.850	1.930	18.950	1.923	18.971	1.925	19.964	1.894	21.043	1.829
	18.114	0.000	18.821	0.000	18.850	0.000	18.950	0.000	18.971	0.000	19.964	0.000	20.993	0.000
11	20.300	11.637	21.121	11.469	21.200	11.450	21.200	11.425	21.221	11.400	22.514	11.181	23.693	10.850
	20.300	9.744	21.171	9.584	21.200	9.550	21.200	9.545	21.221	9.535	22.564	9.337	23.693	9.065
	20.300	7.777	21.121	7.634	21.150	7.625	21.150	7.600	21.171	7.590	22.464	7.460	23.643	7.211
	20.300	5.868	21.121	5.784	21.100	5.675	21.100	5.765	21.121	5.755	22.414	5.605	23.593	5.440
	20.300	3.939	21.121	3.884	21.100	3.850	21.100	3.870	21.121	3.875	22.414	3.747	23.593	3.616
	20.300	1.971	21.071	1.934	21.100	1.930	21.100	1.923	21.121	1.925	22.314	1.894	23.493	1.829
	20.300	0.000	21.121	0.000	21.100	0.000	21.100	0.000	21.121	0.000	22.314	0.000	23.543	0.000
12	22.386	11.637	23.221	11.469	23.300	11.450	23.300	11.425	23.321	11.400	24.814	11.181	26.093	10.850
	22.386	9.744	23.271	9.584	23.271	9.550	23.271	9.545	23.271	9.535	24.764	9.337	26.043	9.065
	22.386	7.777	23.271	7.634	23.271	7.625	23.271	7.600	23.271	7.590	24.764	7.460	26.043	7.211
	22.386	5.868	23.271	5.784	23.271	5.675	23.271	5.765	23.271	5.755	24.714	5.605	25.993	5.440
	22.386	3.939	23.271	3.884	23.271	3.850	23.271	3.870	23.271	3.875	24.664	3.747	25.993	3.616
	22.386	1.971	23.271	1.934	23.271	1.930	23.271	1.923	23.271	1.925	24.664	1.894	25.943	1.829
	22.386	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	24.664	0.000	25.943	0.000
13	24.307	11.637	25.321	11.469	25.400	11.450	25.421	11.425	25.421	11.400	26.964	11.181	28.443	10.850
	24.307	9.744	25.321	9.584	25.400	9.550	25.421	9.545	25.421	9.535	26.964	9.337	28.393	9.065
	24.307	7.777	25.321	7.634	25.350	7.625	25.400	7.600	25.421	7.590	26.914	7.460	28.393	7.211
	24.307	5.868	25.321	5.784	25.350	5.675	25.400	5.765	25.421	5.755	26.914	5.605	28.393	5.440
	24.307	3.939	25.321	3.884	25.325	3.850	25.350	3.870	25.371	3.875	26.914	3.747	28.343	3.616
	24.307	1.971	25.321	1.934	25.325	1.930	25.350	1.923	25.371	1.925	26.864	1.894	28.293	1.829
	24.307	0.000	25.321	0.000	25.325	0.000	25.350	0.000	25.371	0.000	26.864	0.000	28.293	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
14	26.250	11.637	27.321	11.469	27.400	11.450	27.421	11.425	27.421	11.400	29.164	11.181	30.693	10.850
	26.250	9.744	27.321	9.584	27.400	9.550	27.421	9.545	27.421	9.535	29.164	9.337	30.743	9.065
	26.250	7.777	27.321	7.634	27.400	7.625	27.421	7.600	27.421	7.590	29.164	7.460	30.693	7.211
	26.250	5.868	27.321	5.784	27.350	5.675	27.400	5.765	27.421	5.755	29.164	5.605	30.643	5.440
	26.250	3.939	27.321	3.884	27.350	3.850	27.350	3.870	27.421	3.875	29.064	3.747	30.593	3.616
	26.250	1.971	27.371	1.934	27.371	1.930	27.350	1.923	27.421	1.925	29.064	1.894	30.593	1.829
	26.250	0.000	27.321	0.000	27.321	0.000	27.350	0.000	27.371	0.000	29.064	0.000	30.543	0.000
15	28.107	11.637	29.371	11.469	29.400	11.450	29.521	11.425	29.521	11.400	31.164	11.181	32.993	10.850
	28.107	9.744	29.371	9.584	29.400	9.550	29.451	9.545	29.451	9.535	31.264	9.337	32.993	9.065
	28.107	7.777	29.371	7.634	29.400	7.625	29.471	7.600	29.471	7.590	31.214	7.460	32.993	7.211
	28.107	5.868	29.371	5.784	29.400	5.675	29.446	5.765	29.446	5.755	31.214	5.605	32.943	5.440
	28.107	3.939	29.371	3.884	29.400	3.850	29.400	3.870	29.421	3.875	31.164	3.747	32.843	3.616
	28.107	1.971	29.371	1.934	29.400	1.930	29.400	1.923	29.421	1.925	31.164	1.894	32.843	1.829
	28.107	0.000	29.371	0.000	29.400	0.000	29.400	0.000	29.421	0.000	31.114	0.000	32.843	0.000
16	30.471	11.637	31.771	11.469	31.850	11.450	31.971	11.425	31.971	11.400	33.914	11.181	35.793	10.850
	30.471	9.744	31.771	9.584	31.850	9.550	31.921	9.545	31.921	9.535	33.914	9.337	35.793	9.065
	30.471	7.777	31.821	7.634	31.825	7.625	31.921	7.600	31.921	7.590	33.814	7.460	35.693	7.211
	30.471	5.868	31.821	5.784	31.825	5.675	31.921	5.765	31.921	5.755	33.814	5.605	35.693	5.440
	30.471	3.939	31.771	3.884	31.800	3.850	31.921	3.870	31.921	3.875	33.814	3.747	35.643	3.616
	30.471	1.971	31.771	1.934	31.800	1.930	31.850	1.923	31.871	1.925	33.764	1.894	35.593	1.829
	30.471	0.000	31.721	0.000	31.800	0.000	31.850	0.000	31.871	0.000	33.664	0.000	35.593	0.000
17	32.264	11.637	33.621	11.469	33.650	11.450	33.800	11.425	33.821	11.400	35.814	11.181	37.843	10.850
	32.264	9.744	33.621	9.584	33.650	9.550	33.771	9.545	33.771	9.535	35.814	9.337	37.843	9.065
	32.264	7.777	33.621	7.634	33.650	7.625	33.771	7.600	33.771	7.590	35.764	7.460	37.843	7.211
	32.264	5.868	33.621	5.784	33.650	5.675	33.771	5.765	33.771	5.755	35.764	5.605	37.793	5.440
	32.264	3.939	33.571	3.884	33.600	3.850	33.750	3.870	33.771	3.875	35.764	3.747	37.743	3.616
	32.264	1.971	33.571	1.934	33.575	1.930	33.700	1.923	33.721	1.925	35.764	1.894	37.693	1.829
	32.264	0.000	33.571	0.000	33.575	0.000	33.700	0.000	33.721	0.000	35.714	0.000	37.643	0.000
18	34.171	11.637	35.621	11.469	35.700	11.450	35.771	11.425	35.771	11.400	37.964	11.181	40.093	10.850
	34.171	9.744	35.621	9.584	35.700	9.550	35.771	9.545	35.771	9.535	38.014	9.337	40.093	9.065
	34.171	7.777	35.621	7.634	35.700	7.625	35.771	7.600	35.771	7.590	37.914	7.460	40.093	7.211
	34.171	5.868	35.621	5.784	35.650	5.675	35.771	5.765	35.771	5.755	37.914	5.605	40.043	5.440
	34.171	3.939	35.621	3.884	35.625	3.850	35.771	3.870	35.771	3.875	37.864	3.747	39.993	3.616
	34.171	1.971	35.621	1.934	35.625	1.930	35.700	1.923	35.771	1.925	37.864	1.894	39.893	1.829
	34.171	0.000	35.621	0.000	35.625	0.000	35.700	0.000	35.721	0.000	37.764	0.000	39.893	0.000
19	36.264	11.637	37.771	11.469	37.900	11.450	38.000	11.425	38.021	11.400	40.314	11.181	42.493	10.850
	36.264	9.744	37.771	9.584	37.900	9.550	37.950	9.545	37.971	9.535	40.314	9.337	42.543	9.065
	36.264	7.777	37.821	7.634	37.825	7.625	37.950	7.600	37.971	7.590	40.214	7.460	42.493	7.211
	36.264	5.868	37.821	5.784	37.825	5.675	37.950	5.765	37.971	5.755	40.214	5.605	42.493	5.440
	36.264	3.939	37.821	3.884	37.825	3.850	37.900	3.870	37.971	3.875	40.214	3.747	42.493	3.616
	36.264	1.971	37.821	1.934	37.825	1.930	37.900	1.923	37.971	1.925	40.164	1.894	42.443	1.829
	36.264	0.000	37.821	0.000	37.825	0.000	37.900	0.000	37.971	0.000	40.114	0.000	42.393	0.000
20	38.364	11.637	39.971	11.469	40.050	11.450	40.171	11.425	40.171	11.400	42.614	11.181	44.993	10.850
	38.364	9.744	39.921	9.584	40.050	9.550	40.121	9.545	40.121	9.535	42.614	9.337	44.943	9.065
	38.364	7.777	40.021	7.634	40.025	7.625	40.121	7.600	40.121	7.590	42.614	7.460	44.993	7.211
	38.364	5.868	40.021	5.784	40.025	5.675	40.121	5.765	40.121	5.755	42.564	5.605	44.943	5.440
	38.364	3.939	40.021	3.884	40.025	3.850	40.100	3.870	40.121	3.875	42.514	3.747	44.893	3.616
	38.364	1.971	39.971	1.934	39.975	1.930	40.100	1.923	40.121	1.925	42.464	1.894	44.893	1.829
	38.364	0.000	39.971	0.000	39.975	0.000	40.050	0.000	40.071	0.000	42.464	0.000	44.793	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
21	40.257	11.637	41.971	11.469	42.050	11.450	42.171	11.425	42.171	11.400	44.764	11.181	47.193	10.850
	40.257	9.744	41.971	9.584	42.050	9.550	42.171	9.545	42.171	9.535	44.714	9.337	47.243	9.065
	40.257	7.777	41.971	7.634	42.000	7.625	42.171	7.600	42.171	7.590	44.714	7.460	47.143	7.211
	40.257	5.868	41.921	5.784	42.000	5.675	42.150	5.765	42.171	5.755	44.614	5.605	47.143	5.440
	40.257	3.939	41.971	3.884	41.975	3.850	42.100	3.870	42.121	3.875	44.614	3.747	47.143	3.616
	40.257	1.971	41.971	1.934	41.975	1.930	42.050	1.923	42.121	1.925	44.564	1.894	47.043	1.829
	40.257	0.000	41.971	0.000	41.975	0.000	42.050	0.000	42.071	0.000	44.564	0.000	47.043	0.000
22	42.150	11.637	43.921	11.469	44.050	11.450	44.200	11.425	44.221	11.400	46.814	11.181	49.493	10.850
	42.150	9.744	43.921	9.584	44.050	9.550	44.150	9.545	44.221	9.535	46.814	9.337	49.493	9.065
	42.150	7.777	43.921	7.634	44.000	7.625	44.150	7.600	44.171	7.590	46.814	7.460	49.443	7.211
	42.150	5.868	43.921	5.784	44.000	5.675	44.100	5.765	44.146	5.755	46.764	5.605	49.243	5.440
	42.150	3.939	43.921	3.884	44.000	3.850	44.100	3.870	44.121	3.875	46.764	3.747	49.393	3.616
	42.150	1.971	43.921	1.934	43.950	1.930	44.071	1.923	44.071	1.925	46.714	1.894	49.293	1.829
	42.150	0.000	43.921	0.000	43.950	0.000	44.071	0.000	44.071	0.000	46.664	0.000	49.293	0.000
23	44.193	11.637	46.071	11.469	46.150	11.450	46.325	11.425	46.371	11.400	49.164	11.181	51.893	10.850
	44.193	9.744	46.071	9.584	46.150	9.550	46.300	9.545	46.371	9.535	49.114	9.337	51.893	9.065
	44.193	7.777	46.071	7.634	46.150	7.625	46.300	7.600	46.321	7.590	49.064	7.460	51.793	7.211
	44.193	5.868	46.121	5.784	46.150	5.675	46.300	5.765	46.321	5.755	49.064	5.605	51.793	5.440
	44.193	3.939	46.071	3.884	46.150	3.850	46.250	3.870	46.321	3.875	49.014	3.747	51.793	3.616
	44.193	1.971	46.071	1.934	46.100	1.930	46.250	1.923	46.271	1.925	49.014	1.894	51.793	1.829
	44.193	0.000	46.071	0.000	46.100	0.000	46.250	0.000	46.221	0.000	48.964	0.000	51.743	0.000
24	46.186	11.637	48.171	11.469	48.200	11.450	48.350	11.425	48.421	11.400	51.264	11.181	54.193	10.850
	46.186	9.744	48.171	9.584	48.200	9.550	48.300	9.545	48.371	9.535	51.264	9.337	54.143	9.065
	46.186	7.777	48.171	7.634	48.200	7.625	48.300	7.600	48.371	7.590	51.264	7.460	54.193	7.211
	46.186	5.868	48.171	5.784	48.200	5.675	48.300	5.765	48.371	5.755	51.264	5.605	54.143	5.440
	46.186	3.939	48.171	3.884	48.200	3.850	48.300	3.870	48.371	3.875	51.214	3.747	54.093	3.616
	46.186	1.971	48.171	1.934	48.200	1.930	48.275	1.923	48.321	1.925	51.164	1.894	54.143	1.829
	46.186	0.000	48.171	0.000	48.200	0.000	48.250	0.000	48.271	0.000	51.114	0.000	54.043	0.000
25	48.171	11.637	50.221	11.469	50.300	11.450	50.500	11.425	50.521	11.400	53.564	11.181	56.543	10.850
	48.171	9.744	50.221	9.584	50.300	9.550	50.421	9.545	50.421	9.535	53.564	9.337	56.543	9.065
	48.171	7.777	50.221	7.634	50.250	7.625	50.400	7.600	50.421	7.590	53.464	7.460	56.393	7.211
	48.171	5.868	50.171	5.784	50.250	5.675	50.400	5.765	50.421	5.755	53.464	5.605	56.393	5.440
	48.171	3.939	50.171	3.884	50.250	3.850	50.400	3.870	50.421	3.875	53.414	3.747	56.343	3.616
	48.171	1.971	50.171	1.934	50.250	1.930	50.400	1.923	50.446	1.925	53.364	1.894	56.293	1.829
	48.171	0.000	50.171	0.000	50.250	0.000	50.400	0.000	50.421	0.000	53.364	0.000	56.293	0.000
26	50.279	11.637	52.371	11.469	52.500	11.450	52.650	11.425	52.721	11.400	55.814	11.181	58.943	10.850
	50.279	9.744	52.371	9.584	52.500	9.550	52.625	9.545	52.671	9.535	55.814	9.337	58.943	9.065
	50.279	7.777	52.371	7.634	52.500	7.625	52.600	7.600	52.671	7.590	55.814	7.460	58.893	7.211
	50.279	5.868	52.371	5.784	52.450	5.675	52.600	5.765	52.646	5.755	55.764	5.605	58.843	5.440
	50.279	3.939	52.371	3.884	52.450	3.850	52.600	3.870	52.621	3.875	55.764	3.747	58.843	3.616
	50.279	1.971	52.371	1.934	52.450	1.930	52.600	1.923	52.671	1.925	55.714	1.894	58.843	1.829
	50.279	0.000	52.371	0.000	52.450	0.000	52.600	0.000	52.671	0.000	55.764	0.000	58.793	0.000
27	52.421	11.637	54.621	11.469	54.750	11.450	54.900	11.425	54.971	11.400	58.164	11.181	61.543	10.850
	52.421	9.744	54.621	9.584	54.700	9.550	54.850	9.545	54.971	9.535	58.114	9.337	61.543	9.065
	52.421	7.777	54.621	7.634	54.700	7.625	54.850	7.600	54.971	7.590	58.114	7.460	61.343	7.211
	52.421	5.868	54.621	5.784	54.700	5.675	54.850	5.765	54.971	5.755	58.114	5.605	61.343	5.440
	52.421	3.939	54.621	3.884	54.700	3.850	54.850	3.870	54.971	3.875	58.114	3.747	61.293	3.616
	52.421	1.971	54.571	1.934	54.700	1.930	54.850	1.923	54.971	1.925	58.114	1.894	61.293	1.829
	52.421	0.000	54.621	0.000	54.700	0.000	54.850	0.000	54.946	0.000	58.114	0.000	61.293	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
28	54.400	11.637	56.671	11.469	56.750	11.450	56.950	11.425	57.021	11.400	60.364	11.181	63.743	10.850
	54.400	9.744	56.671	9.584	56.750	9.550	56.900	9.545	57.021	9.535	60.364	9.337	63.743	9.065
	54.400	7.777	56.671	7.634	56.750	7.625	56.950	7.600	57.071	7.590	60.364	7.460	63.693	7.211
	54.400	5.868	56.671	5.784	56.750	5.675	56.950	5.765	57.071	5.755	60.364	5.605	63.643	5.440
	54.400	3.939	56.671	3.884	56.750	3.850	56.950	3.870	57.071	3.875	60.364	3.747	63.593	3.616
	54.400	1.971	56.671	1.934	56.750	1.930	56.950	1.923	57.021	1.925	60.364	1.894	63.643	1.829
	54.400	0.000	56.671	0.000	56.750	0.000	56.950	0.000	57.021	0.000	60.314	0.000	63.593	0.000
29	56.429	11.637	58.871	11.469	58.950	11.450	59.100	11.425	59.221	11.400	62.614	11.181	66.093	10.850
	56.429	9.744	58.871	9.584	58.950	9.550	59.100	9.545	59.221	9.535	62.614	9.337	66.093	9.065
	56.429	7.777	58.871	7.634	58.950	7.625	59.075	7.600	59.221	7.590	62.664	7.460	66.093	7.211
	56.429	5.868	58.771	5.784	58.925	5.675	59.050	5.765	59.221	5.755	62.614	5.605	66.043	5.440
	56.429	3.939	58.771	3.884	58.925	3.850	59.050	3.870	59.171	3.875	62.614	3.747	66.043	3.616
	56.429	1.971	58.771	1.934	58.900	1.930	59.000	1.923	59.171	1.925	62.564	1.894	65.743	1.829
	56.429	0.000	58.721	0.000	58.875	0.000	59.000	0.000	59.171	0.000	62.514	0.000	65.893	0.000
30	58.464	11.637	60.971	11.469	61.000	11.450	61.150	11.425	61.321	11.400	64.714	11.181	68.243	10.850
	58.464	9.744	60.871	9.584	61.000	9.550	61.200	9.545	61.321	9.535	64.764	9.337	68.343	9.065
	58.464	7.777	60.871	7.634	61.000	7.625	61.200	7.600	61.321	7.590	64.814	7.460	68.343	7.211
	58.464	5.868	60.821	5.784	61.000	5.675	61.150	5.765	61.321	5.755	64.714	5.605	68.293	5.440
	58.464	3.939	60.821	3.884	61.000	3.850	61.150	3.870	61.321	3.875	64.714	3.747	68.293	3.616
	58.464	1.971	60.821	1.934	60.950	1.930	61.100	1.923	61.321	1.925	64.714	1.894	68.193	1.829
	58.464	0.000	60.721	0.000	60.950	0.000	61.100	0.000	61.271	0.000	64.664	0.000	68.143	0.000
31	60.493	11.637	62.921	11.469	63.065	11.450	63.300	11.425	63.414	11.400	66.900	11.181	70.450	10.850
	60.493	9.744	62.921	9.584	63.065	9.550	63.300	9.545	63.414	9.535	66.900	9.337	70.450	9.065
	60.493	7.777	62.921	7.634	63.065	7.625	63.300	7.600	63.414	7.590	66.900	7.460	70.450	7.211
	60.493	5.868	62.921	5.784	63.065	5.675	63.300	5.765	63.414	5.755	66.900	5.605	70.450	5.440
	60.493	3.939	62.921	3.884	63.065	3.850	63.300	3.870	63.414	3.875	66.900	3.747	70.450	3.616
	60.493	1.971	62.921	1.934	63.065	1.930	63.300	1.923	63.414	1.925	66.900	1.894	70.450	1.829
	60.493	0.000	62.921	0.000	63.065	0.000	63.300	0.000	63.414	0.000	66.900	0.000	70.450	0.000

6.5.2 Medición de la deformación de los granos.

Para evaluar la deformación de los granos de acuerdo a su cambio en ancho y alto se utilizó el método de estimación de la deformación equivalente desarrollado por Hensler y Gifkins [21] descrito en la sección 5.6. Para ello, se midió la altura H (paralela al eje del esfuerzo) y el ancho W (perpendicular al eje del esfuerzo) máximos [20]. La probeta seleccionada 1B cuenta con 30 granos, de los cuales se resolvió hacer las mediciones antes mencionadas en un 50 % del total de granos, es decir a 15 de estos. En la Tabla 6.4 se muestra los valores de H y W para los 15 granos en los pasos de deformación.

Las mediciones se efectuaron antes y después de cada deformación, mediante Micrografx Windows Draw, obteniendo las coordenadas de la altura y el ancho máximos como se muestra en la Figura 6.6.

Tabla 6.4 Valores de H y W para los diferentes pasos de deformación.

	Grano	SD		1		2		3		4		5		6	
		H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W
1	06	3.660	2.300	3.800	2.300	3.800	2.300	3.800	2.200	3.800	2.150	4.000	2.050	4.000	2.000
2	09	4.800	2.900	5.150	2.900	5.200	2.700	5.200	2.800	5.050	2.800	5.450	2.700	5.500	2.650
3	11	6.500	5.150	6.830	5.116	7.200	4.950	7.400	4.950	7.350	4.950	8.050	4.900	8.200	4.600
4	13	8.700	7.000	8.900	6.967	8.950	6.650	9.300	6.650	9.600	6.650	9.600	6.400	9.800	6.300
5	17	9.750	8.600	9.966	8.330	10.000	8.330	10.100	8.000	9.700	8.100	10.150	7.750	10.450	7.450
6	18	5.416	1.900	5.416	1.900	5.500	1.800	5.600	1.800	5.700	2.000	5.850	1.700	5.850	1.700
7	19	5.900	5.083	6.616	5.083	6.250	4.750	6.300	4.450	6.650	4.700	6.650	4.600	6.650	4.550
8	20	8.450	8.650	8.650	8.650	8.800	8.250	9.100	8.250	9.400	8.250	9.400	7.950	9.500	7.950
9	21	2.750	2.200	2.860	2.200	3.200	2.200	3.200	2.150	3.000	1.800	3.250	1.800	3.300	1.800
10	22	10.950	11.637	12.000	11.469	12.000	11.450	11.800	11.425	12.250	11.400	12.500	11.181	12.500	10.850
11	24	4.800	5.150	5.030	5.150	5.030	5.050	5.030	5.000	5.500	5.000	5.500	5.000	5.350	4.900
12	25	8.050	5.000	8.600	4.900	8.600	4.650	8.600	4.650	8.900	4.650	8.900	4.500	8.900	4.400
13	26	5.950	5.170	6.267	5.160	6.300	4.950	6.300	4.800	6.300	4.800	6.550	4.650	6.550	4.650
14	27	15.880	7.300	15.880	7.300	15.600	6.950	15.450	6.950	15.950	6.950	17.000	6.850	17.200	6.800
15	28	4.950	4.660	5.330	4.367	5.200	4.250	4.250	5.300	4.250	5.350	4.100	5.400	4.050	

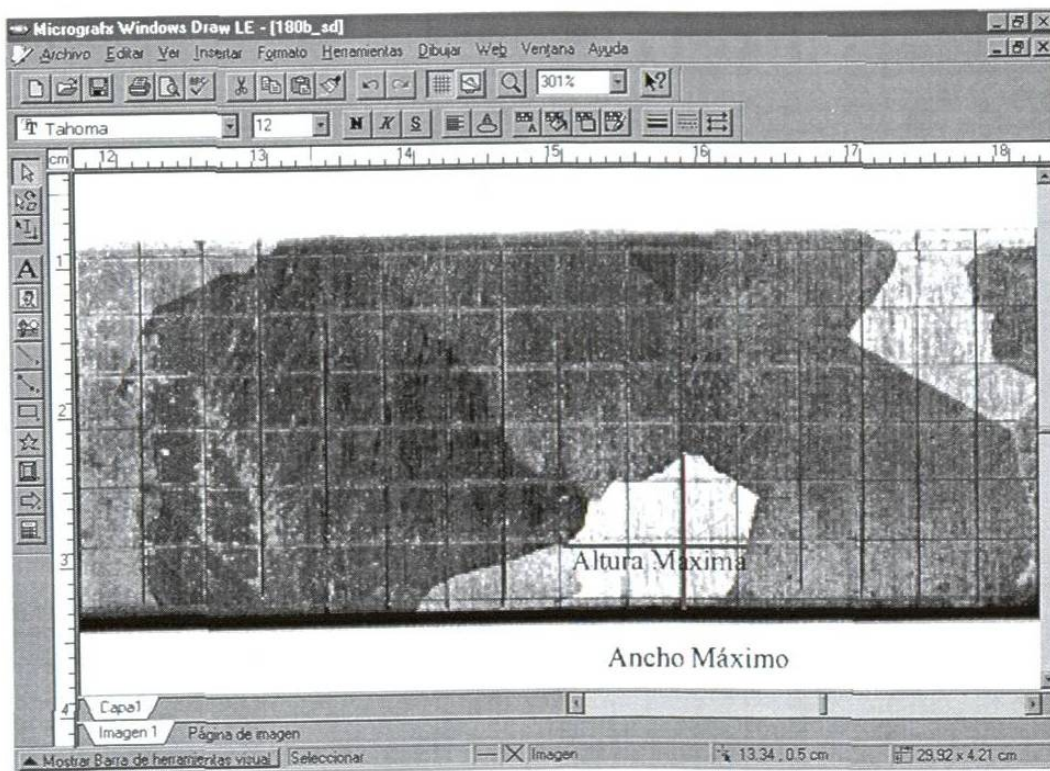


Figura 6.6 Imagen que muestra el procedimiento de medición de la altura y del ancho máximo para determinar la deformación equivalente.

6.6 Simulación por elemento finito.

En este trabajo se efectuaron 2 modelos y 1 tipo de análisis, los cuales se realizaron en el paquete comercial ABAQUS version 6.2. El primer modelo consistió en la probeta rectangular con la malla cuadrada de 2 mm x 2 mm al cual se llamó MALLA, y el segundo se baso en la probeta seccionada de acuerdo a la forma y al tamaño de grano llamado GRANOS. El tipo de análisis que se uso fue estático.

6.6.1 Conceptos básicos de ABAQUS/CAE^{MR}.

Un análisis completo en ABAQUS Standar usualmente consiste de 3 pasos: preprocesador, simulación y postprocesador. Estos pasos son ligados por archivos como se muestra en la Figura 6.7.

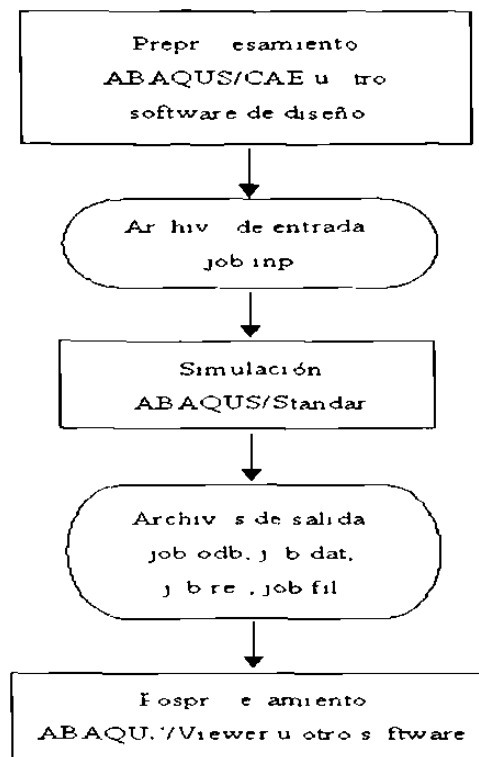


Figura 6.7 Esquema de los tres pasos y como son ligados [27].

Preprocesador (ABAQUS/CAE)

En esta estación se define el modelo del problema físico y se crea un archivo de entrada a ABAQUS. El modelo es usualmente creado gráficamente utilizando ABAQUS CAE u otro preprocesador o paquete de diseño, aunque el archivo de entrada de ABAQUS para un análisis simple puede ser creado directamente utilizando un editor de texto.

Simulación (ABAQUS/Standar)

La simulación normalmente se corre como un proceso de soporte, es la estación en la cual ABAQUS Standar resuelve el problema numérico definido en el modelo. Ejemplos de salida de un análisis incluye desplazamientos y esfuerzos que son almacenados en archivos binarios leídos por el postprocesador. Dependiendo de la complejidad, el problema será analizado y el poder de la computadora aplicado, por lo que puede tomar desde segundos a días para realizar el análisis completo.

Postprocesador (ABAQUS/Viewer).

Se pueden evaluar los resultados una vez que la simulación haya sido terminada y los desplazamientos, esfuerzos, u otras variables fundamentales hayan sido calculados. La evaluación generalmente se hace interactivamente usando ABAQUS/Viewer u otro postprocesador. ABAQUS/Viewer lee los archivos de base de datos de salida binarios neutrales, teniendo una variedad de opciones de desplegado de resultados, incluyendo planos de color de contorno, animaciones, planos de forma deformada y planos X - Y .

Un modelo en ABAQUS es compuesto de diferentes componentes que juntos describen el problema físico para ser analizado y poder obtener los resultados. Por lo menos, el modelo de análisis debe de consistir de la siguiente información:

- Discretización de la geometría.
- Propiedades de la sección del elemento.
- Datos del material.
- Cargas y condiciones frontera.

- Tipo de análisis.
- Requerimientos de salida.

ABAQUS CAE es el ambiente completo ABAQUS que proporciona una interfase para crear modelos ABAQUS, interactivamente enviando y monitoreando los trabajos de ABAQUS y evaluando los resultados de las simulaciones. ABAQUS CAE está dividido en módulos, donde cada módulo define un aspecto lógico del proceso de simulación.

Cambiando de módulo a módulo, se construye el modelo. Cuando el modelo está completo ABAQUS CAE genera un archivo de entrada que es enviado a ABAQUS Standar o ABAQUS Explicit para su solución. Estos programas de solución analizan el archivo de entrada generado por ABAQUS CAE, ejecutando el análisis, mandando la información a ABAQUS CAE, observando el progreso del trabajo en el monitor y generando la base de datos de salida. Finalmente, se utiliza ABAQUS Viewer para analizar la base de datos de salida y así observar los resultados del análisis [27].

ABAQUS CAE está dividido en unidades funcionales denominadas módulos. Cada módulo contiene únicamente herramientas que son relevantes para una porción específica del trabajo de modelación. En las secciones subsecuentes se definirán cada uno de estos módulos y como se fueron construyeron los 2 modelos en este trabajo.

6.6.1.1 Módulo Parte (Part).

Este módulo permite crear partes individuales que componen la geometría directamente en ABAQUS CAE, ó también puede importarla de otros programas de modelación geométrica [27].

Para este trabajo se utilizó ABAQUS CAE para realizar las geometrías de los dos modelos.

Para el modelo MALLA la geometría se realizó en un espacio de modelación en dos dimensiones del tipo deformable, con una aplicación base de estructura plana (Planar Shell) y consistió en un probeta rectangular de 60 mm de largo y 12 mm de ancho. El segundo modelo (GRANOS) también se efectuó bajo el mismo procedimiento del modelo MALLA, pero posteriormente fue seccionada de acuerdo a una aproximación del tamaño y forma de los 30 granos que se tienen dentro de esta sección.

Esta aproximación se realizó debido a que la geometría de los granos es muy complicada, ya que cada grano contiene un sinnúmero de bordes y ondulaciones que harían casi imposible su construcción. En la Figura 6.8(a) se muestra la probeta elegida para este modelo, nótese que las fronteras de granos son muy complejas para trazarse. En la Figura 6.8(b) se observa la aproximación efectuada de los granos, las coordenadas utilizadas se encuentran en la Tabla 6.5.

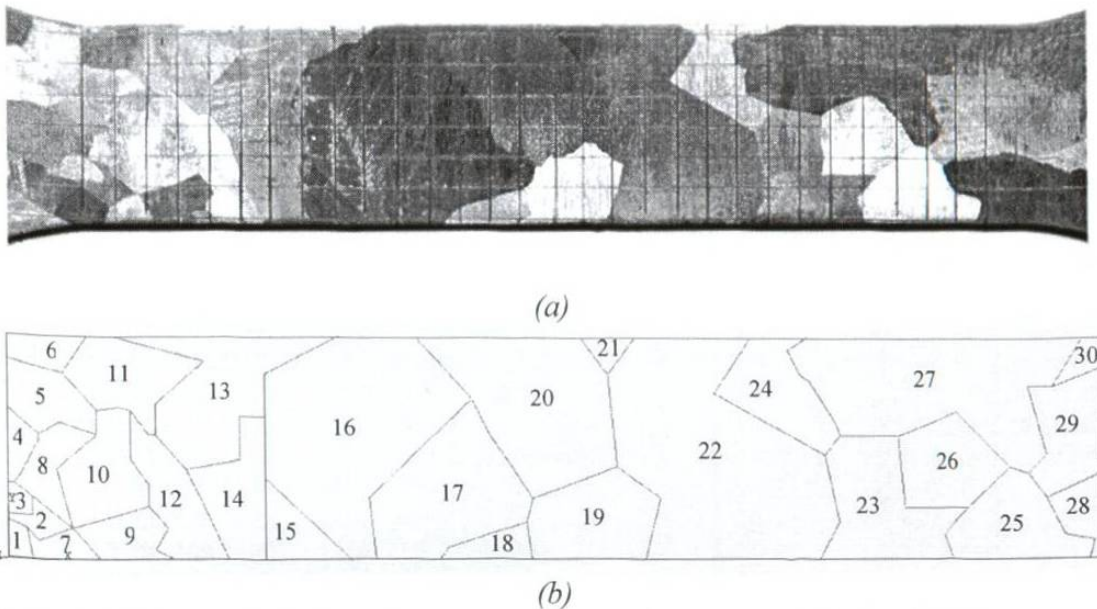


Figura 6.8 Geometría de la probeta rectangular utilizada en modelo GRANOS.

Tabla 6.5 Coordenadas en mm de la geometría a simular.

Grano 1		Grano 2		Grano 3		Grano 4		Grano 5		Grano 6		Grano 7		Grano 8		Grano 9		Grano 10	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	2	0	2	0	2	0	4	0	8	0	12	0	16	0	20	0	24	0	28
0	6	0	6	0	6	0	12	0	18	0	24	0	30	0	36	0	42	0	48
0	10	0	10	0	10	0	20	0	30	0	40	0	50	0	60	0	70	0	80
0	14	0	14	0	14	0	28	0	42	0	56	0	70	0	84	0	98	0	112
0	18	0	18	0	18	0	36	0	54	0	72	0	90	0	108	0	126	0	144
0	22	0	22	0	22	0	44	0	66	0	88	0	110	0	132	0	154	0	176
0	26	0	26	0	26	0	52	0	78	0	104	0	136	0	168	0	196	0	224
0	30	0	30	0	30	0	60	0	90	0	120	0	150	0	180	0	210	0	240
0	34	0	34	0	34	0	68	0	102	0	134	0	166	0	198	0	226	0	252
0	38	0	38	0	38	0	76	0	114	0	146	0	178	0	210	0	232	0	258
0	42	0	42	0	42	0	84	0	126	0	158	0	190	0	222	0	244	0	264
0	46	0	46	0	46	0	92	0	138	0	170	0	202	0	234	0	250	0	270
0	50	0	50	0	50	0	100	0	150	0	182	0	214	0	246	0	266	0	276
0	54	0	54	0	54	0	108	0	162	0	194	0	226	0	258	0	272	0	282
0	58	0	58	0	58	0	116	0	174	0	206	0	238	0	270	0	278	0	288
0	62	0	62	0	62	0	124	0	186	0	218	0	250	0	282	0	284	0	294
0	66	0	66	0	66	0	132	0	198	0	230	0	262	0	288	0	290	0	300
0	70	0	70	0	70	0	140	0	210	0	242	0	274	0	294	0	296	0	306
0	74	0	74	0	74	0	148	0	222	0	254	0	286	0	298	0	302	0	312
0	78	0	78	0	78	0	156	0	234	0	266	0	298	0	304	0	308	0	318
0	82	0	82	0	82	0	164	0	246	0	278	0	310	0	310	0	314	0	324
0	86	0	86	0	86	0	172	0	258	0	290	0	322	0	316	0	318	0	330
0	90	0	90	0	90	0	180	0	270	0	302	0	334	0	322	0	322	0	336
0	94	0	94	0	94	0	188	0	282	0	314	0	346	0	328	0	328	0	342
0	98	0	98	0	98	0	196	0	294	0	326	0	358	0	334	0	334	0	348
0	102	0	102	0	102	0	204	0	306	0	338	0	370	0	340	0	340	0	354
0	106	0	106	0	106	0	212	0	318	0	350	0	382	0	346	0	346	0	360
0	110	0	110	0	110	0	220	0	330	0	362	0	394	0	352	0	352	0	366
0	114	0	114	0	114	0	228	0	342	0	374	0	406	0	358	0	358	0	372
0	118	0	118	0	118	0	236	0	354	0	386	0	418	0	364	0	364	0	378
0	122	0	122	0	122	0	244	0	366	0	398	0	430	0	370	0	370	0	384
0	126	0	126	0	126	0	252	0	378	0	410	0	442	0	376	0	376	0	390
0	130	0	130	0	130	0	260	0	390	0	422	0	454	0	382	0	382	0	396
0	134	0	134	0	134	0	268	0	402	0	434	0	466	0	388	0	388	0	402
0	138	0	138	0	138	0	276	0	414	0	446	0	478	0	394	0	394	0	408
0	142	0	142	0	142	0	284	0	426	0	458	0	490	0	400	0	400	0	414
0	146	0	146	0	146	0	292	0	438	0	470	0	502	0	406	0	406	0	420
0	150	0	150	0	150	0	300	0	450	0	482	0	514	0	412	0	412	0	426
0	154	0	154	0	154	0	308	0	462	0	494	0	526	0	418	0	418	0	432
0	158	0	158	0	158	0	316	0	474	0	506	0	538	0	424	0	424	0	438
0	162	0	162	0	162	0	324	0	486	0	518	0	550	0	430	0	430	0	444
0	166	0	166	0	166	0	332	0	498	0	530	0	562	0	436	0	436	0	450
0	170	0	170	0	170	0	340	0	510	0	542	0	574	0	442	0	442	0	456
0	174	0	174	0	174	0	348	0	522	0	554	0	586	0	448	0	448	0	462
0	178	0	178	0	178	0	356	0	534	0	566	0	598	0	454	0	454	0	468
0	182	0	182	0	182	0	364	0	546	0	578	0	610	0	460	0	460	0	474
0	186	0	186	0	186	0	372	0	558	0	590	0	622	0	466	0	466	0	480
0	190	0	190	0	190	0	380	0	570	0	602	0	634	0	472	0	472	0	486
0	194	0	194	0	194	0	388	0	582	0	614	0	646	0	478	0	478	0	492
0	198	0	198	0	198	0	396	0	594	0	626	0	658	0	484	0	484	0	498
0	202	0	202	0	202	0	404	0	606	0	638	0	670	0	490	0	490	0	504
0	206	0	206	0	206	0	412	0	618	0	650	0	682	0	496	0	496	0	510
0	210	0	210	0	210	0	420	0	630	0	662	0	694	0	502	0	502	0	516
0	214	0	214	0	214	0	428	0	642	0	674	0	706	0	508	0	508	0	522
0	218	0	218	0	218	0	436	0	654	0	686	0	718	0	514	0	514	0	528
0	222	0	222	0	222	0	444	0	666	0	698	0	730	0	520	0	520	0	534
0	226	0	226	0	226	0	452	0	678	0	710	0	742	0	526	0	526	0	540
0	230	0	230	0	230	0	460	0	690	0	722	0	754	0	532	0	532	0	546
0	234	0	234	0	234	0	468	0	702	0	734	0	766	0	538	0	538	0	552
0	238	0	238	0	238	0	476	0	714	0	746	0	778	0	544	0	544	0	558
0	242	0	242	0	242	0	484	0	726	0	758	0	790	0	550	0	550	0	564
0	246	0	246	0	246	0	492	0	738	0	770	0	802	0	556	0	556	0	570
0	250	0	250	0	250	0	500	0	750	0	782	0	814	0	562	0	562	0	576
0	254	0	254	0	254	0	508	0	762	0	794	0	826	0	568	0	568	0	582
0	258	0	258	0	258	0	516	0	774	0	806	0	838	0	574	0	574	0	588
0	262	0	262	0	262	0	524	0	786	0	818	0	850	0	580	0	580	0	594
0	266	0	266	0	266	0	532	0	798	0	830	0	862	0	586	0	586	0	600
0	270	0	270	0	270	0	540	0	810	0	842	0	874	0	592	0	592	0	606
0	274	0	274	0	274	0	548	0	822	0	854	0	886	0	598	0	598	0	612
0	278	0	278	0	278	0	556	0	834	0	866	0	898	0	604	0	604	0	618
0	282	0	282	0	282	0	564	0	846	0	878	0	910	0	610	0	610	0	624
0	286	0	286	0	286	0	572	0	858	0	890	0	922	0	616	0	616	0	630
0	290	0	290	0	290	0	580	0	870	0	902	0	934	0	622	0	622	0	636
0	294	0	294	0	294	0	588	0	882	0	914	0	946	0	628	0	628	0	642
0	298	0	298	0	298	0	596	0	894	0	926	0	958	0	634	0	634	0	648
0	302	0	302	0	302	0	604	0	906	0	938	0	970	0	640	0	640	0	654
0	306	0	306	0	306	0	612	0	918	0	950	0	982	0	646	0	646	0	660
0	310	0	310	0	310	0	620	0											

6.6.1.2 Módulo Propiedades (Property).

Este módulo contiene la información acerca de las propiedades de la parte o región de la parte. Dentro de éste se crean la definición y secciones del material y la asignación de éstos a regiones de las partes que componen la geometría [27].

En este trabajo se definió el comportamiento del acero de bajo carbono galvanizado como mecánico, teniendo parte elástica y parte plástica y asignando las propiedades de este material de las obtenidas en los ensayos de tensión descritos en la sección 6.4 en ambos modelos, aunque el modelo de GRANOS fue dividido en cada una de sus secciones se utilizaron las mismas propiedades.

6.6.1.3 Módulo Ensamble (Assembly).

Cuando se crea una parte, ésta existe con su propio sistema de coordenadas, independiente de otras partes en el modelo. Se usa este módulo de ensamble para pasar todas las partes de la geometría de su propio sistema de coordenadas a un sistema de coordenadas global, creando de esta manera un ensamble. Un modelo ABAQUS contiene solamente un ensamble [27].

Dentro de este módulo se mandan llamar las partes que crean el modelo, para este trabajo solo se mando llamar las geometrías antes mencionadas.

6.6.1.4 Módulo Paso (Step).

Se puede usar el módulo paso para crear y configurar pasos de análisis y asociar peticiones de salida. La secuencia de paso provee un modo conveniente para capturar cambios en un modelo (tales como carga y cambios de condición de frontera); las peticiones de salida pueden variar conforme se necesite entre pasos [27].

Para los modelos realizados en este trabajo el tipo de análisis empleado fue estático (STATIC) y se definió como pasos a los tiempos reales a los que se deformó la probeta de acuerdo a la Tabla 6.2. y los requerimientos de salida fueron el esfuerzo conforme al criterio de Von Mises y la deformación plástica equivalente.

6.6.1.5 Módulo Interacción (Interaction).

En el módulo interacción se especifican las interacciones mecánicas y térmicas entre regiones de un modelo o entre regiones de un modelo y sus alrededores. Un ejemplo de interacción es el contacto entre dos superficies. Otras interacciones que pueden ser definidas incluyen restricciones, tales como vínculos, ecuaciones, y restricciones de cuerpos rígidos. ABAQUS CAE no reconoce los contactos mecánicos entre partes de casos o regiones de un ensamble a menos que el contacto sea especificado en el módulo de interacción; la simple proximidad física de dos superficies en un ensamble no es suficiente para indicar cualquier tipo de interacción entre las superficies. Las interacciones son objetos dependientes del paso, lo cual significa que se deben especificar los pasos de análisis en los cuales están activos. En este trabajo no se utilizó ninguna interacción [27].

6.6.1.6 Módulo Carga (Load).

El módulo carga permite especificar cargas, condiciones de frontera y campos. Las condiciones de cargas y condiciones de frontera son objetos dependientes del paso, lo que significa que se deben especificar los pasos de análisis en los cuales están activos; algunos campos son aplicados únicamente al inicio del análisis, mientras que otros son dependientes del paso [27].

Para los modelos realizados en este trabajo se utilizaron como condiciones frontera: el extremo izquierdo sin movimiento, y el extremo derecho utilizó para cada

paso el desplazamiento en x que presentó la probeta. En la Tabla 6.6 se enlistan los desplazamientos para cada uno de los pasos.

Tabla 6.6 Desplazamientos utilizados como condiciones frontera para cada uno de los pasos.

Paso	Desplazamiento en x (mm)
1	2.921
2	3.065
3	3.300
4	3.414
5	6.900
6	10.450

6.6.1.7 Módulo Malla (Mesh).

El módulo malla contiene herramientas que permiten generar una malla de elemento finito en un ensamble creado con ABAQUS/CAE. Están disponibles varios niveles de automatización y control de tal manera que se puede crear una malla que cumpla los requerimientos del análisis [27].

La malla del primer modelo es igual a la malla experimental de 2 mm x 2 mm (véase Figura 6.9), y para el segundo el mallado se realizó con un elemento triangular respetando los límites de grano (ver Figura 6.10). Al final de este paso contamos con el tipo de elemento, para el primero se trató de un elemento CPS8R (elemento bi-cuadrático 8 nodos integración reducida) y para el segundo es un elemento CP3 (elemento lineal triangular 3 nodos).

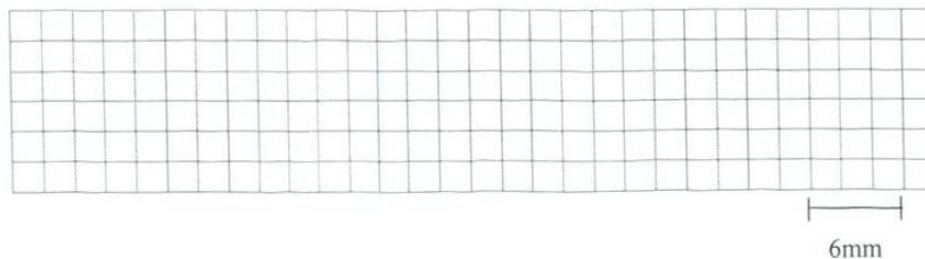


Figura 6.9 Esquema del mallado para el modelo MALLA.

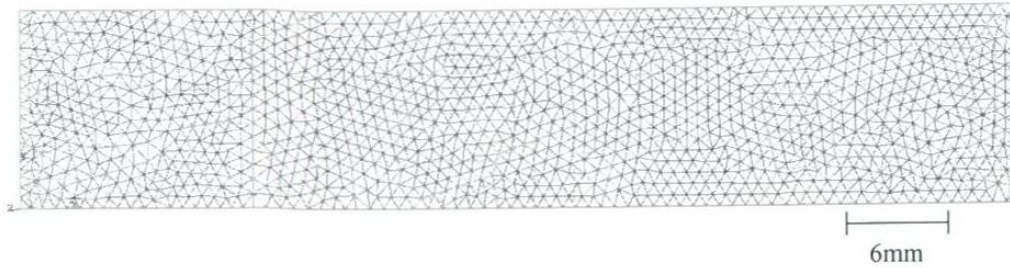


Figura 6.10 Esquema del mallado para el modelo GRANOS.

6.6.1.8 Módulo Trabajo (Job).

Una vez que se han finalizado todas las tareas envueltas en la definición del modelo, se usa el módulo de trabajo para analizar el modelo. El módulo de trabajo permite interactivamente enviar un trabajo para análisis y control del progreso. Además, múltiples modelos y corridas pueden ser enviados y controlados [27].

6.6.1.9 Módulo Visualización (Visualization).

El módulo de visualización provee una imagen gráfica del modelo de elemento finito y sus resultados. Se obtiene información del modelo y resultados a partir de la base de datos de salida; se puede controlar la información que se va a escribir a la base de datos de salida modificando la petición de salida en el módulo de paso [27].

6.6.1.10 Módulo Bosquejo (Sketch).

Los bosquejos son perfiles bidimensionales que son usados para ayudar a formar la geometría definiendo una parte ABAQUS/CAE nativa. Se usa el módulo de bosquejo para crear un esquema que defina una parte plana, una viga o una división o para crear un bosquejo que puede ser extruido, “barrido” o revolucionado para formar una parte tridimensional [27].