

CAPITULO 10

DISCUSIÓN

10.1 Evaluación de los datos temperatura-tiempo

La evolución térmica (Figuras 9.2 a la 9.5) bajo diferentes condiciones de formado se registró al insertar ocho termopares tipo K (crómel- alúmel), cuatros al frente y cuatro en la parte posterior de las piezas. Las temperaturas se conectaron a un sistema de captura de datos controlado por computadora.

La evolución térmica presentada en la Figura 9.2 se realizó con una carga de la pieza por el lado de entrada, enfriamiento con agua y forja normal. Las curvas del inciso (a) representan la evolución de la temperatura en los puntos A y B, las curvas del inciso (b) representan la evolución de las temperaturas en los puntos C y D, las curvas del inciso (c) representan la evolución de las temperaturas en los puntos E y F y las curvas en el inciso (d) representan la evolución de las temperaturas en los puntos G y H.

La evolución en la Figura 9.3 se obtuvo con una carga de la pieza por el lado de salida, enfriamiento con agua y forja normal. Las curvas (a,b,c y d) representan la evolución de las temperaturas en los puntos (A,B,C,D,E,F,G y H).

La evolución en la Figura 9.4 se hizo con una carga de la pieza por el lado de salida, calentamiento hasta temperatura inferior a 950°C, sin enfriamiento en agua. Las curvas (a,b,c y d) representan la evolución de las temperaturas en los puntos (A, B, C, D, E, F, G y H).

La evolución en la Figura 9.5 se realizó con una carga de la pieza por el lado de entrada en horno sin mampara, enfriamiento en agua y forja normal. Se observó que en las Figuras 9.2 y 9.5 no hay cambios significativos, es decir, que las curvas tienen el mismo comportamiento por lo que se concluye que no es necesaria la mampara para manufacturar las piezas. Las curvas (a,b,c y d) representan la evolución de las temperaturas en los puntos (A, B, C, D, E, F, G, y H).

10.2 Mediciones en el método visioplástico

Las mediciones de las celdas Figura 10.3 se hicieron en línea recta Figura 9.8 ignorando la curvatura de la pieza formada⁽²⁸⁾ lo que introduce un error, sin embargo, éste se cancela si la sección transversal de la T permanece cilíndrica, lo cual sí tiene lugar en el proceso en cuestión.

Se pretende comprobar la validez de la modelación por elemento finito mediante la comparación de los resultados de la deformación equivalente que ésta propone, contra los resultados de deformación equivalente de la experimentación.

A fin de obtener un valor representativo de la deformación equivalente en cada posición angular, se obtuvo un valor promedio de los valores de todos los puntos axiales que coinciden con esa posición angular, es decir, se obtuvo el promedio de la deformación equivalente de todos los nodos localizados a un ángulo 18° , 36° , 54° , 72° y 90° . Una vez obtenido el valor promedio de cada columna, se puede establecer que es ese el valor promedio de la deformación equivalente para esa posición angular y es válido para toda la sección axial.

10.3 Ensayo de compresión a alta temperatura

Se inicia el procesamiento de la información obteniendo los datos que se generan durante el ensayo de compresión, esto produce un archivo en código ASCII mediante el paquete computacional del equipo complementario de la máquina. Este archivo incluye las condiciones con que se realizó el ensayo así como el desplazamiento generado y la fuerza aplicada.

En el paso dos se genera la curva esfuerzo-deformación de cada uno de los ensayos para poder corregir el deslizamiento ocurrido en la probeta si se requiere, para posteriormente generar la curva esfuerzo-deformación verdadera.

El proceso de producción analizado en este trabajo se efectúa en caliente. Usualmente se supone que el ensayo a compresión axial es isotérmico y que la deformación es homogénea. Sin embargo estas hipótesis no siempre se cumplen. Es bien sabido que la mayoría de la energía involucrada en el proceso de deformación se convierte en calor¹⁵.

Si el ensayo tiene lugar a altas velocidades de deformación, no hay tiempo suficiente para que el calor generado se intercambie con el ambiente, y por lo tanto la probeta en vez de tener un comportamiento isotérmico lo tiene adiabático.

No tener en cuenta este fenómeno supondría una mala interpretación de los resultados, puesto que el ablandamiento de tensiones que se observa en la curva de fluencia puede responder más a un calentamiento de la probeta que a un ablandamiento microestructural.

10.4 Simulación

La simulación del proceso se inicia con el programa de elemento finito utilizado por ANSYS que trabaja con una formulación implícita, misma que es adecuada para resolver

problemas estáticos o cuasiestáticos, tales como problemas de fluidos, transferencia de calor y problemas estructurales con deformaciones pequeñas. Sin embargo, al presentarse problemas que involucran no linealidades de estatus cambiantes (por ejemplo, contacto), esta formulación implícita resulta inadecuada. El problema consiste en que la formulación implícita es incondicionalmente estable al incremento del tiempo, por lo que puede utilizar incrementos demasiado grandes y en el caso de las no linealidades de estatus cambiante, esto puede crear ciertos problemas en la respuesta calculada generando oscilaciones inestables en la iteraciones. Por lo anterior se descartó continuar la simulación con este paquete y se continuó con el programa de ABAQUS que cuenta con una formulación explícita misma que es condicionalmente estable en cuanto al incremento del tiempo, por lo tanto, el tamaño del incremento que utiliza es controlado dentro de un límite determinado. Con esto, el problema que presenta la formulación implícita desaparece.

10.4.1 Recolección de datos

La recolección de la información se introdujo en los programa de ANSYS y ABAQUS, es decir los datos obtenidos de los ensayos a compresión y de la evaluación de temperatura, sólo que se consideró fricción cero entre las herramientas y las conexiones T para simplificar los cálculos, así mismo se consideró que las temperaturas tanto en la parte superior como inferior de la T permanecieron constante como condición de cálculo, porque se sabe que en la realidad no sucede así.

10.4.2 Corrección del tercer ramal de la conexión T

Después de validar los resultados experimentales con los numéricos como se observa en la Figura 10.7, se procedió a simular la conexión T cambiando el valor del eje mayor del ovalo que origina el tercer ramal de la conexión T a un valor menor que el original con el propósito de proporcionar mayor cantidad de material en el momento de la deformación. Con ello se logra corregir el defecto Figura 10.1 que se presenta en el tercer ramal.

La Figura 10.1 presenta la diferencia en deformación que se encuentra de la tercera boca de la T con respecto a la pieza formada, como puede verse en el borde del tercer ramal. Aunque este defecto se presenta en la pieza real, en los resultados numéricos, se marca en mayor cantidad. Esto es por la complejidad de la geometría de los dados, así como también por las dimensiones de la boca ovalada donde se forma el tercer ramal, es decir, que si se reduce el radio mayor del óvalo se reduce el defecto.

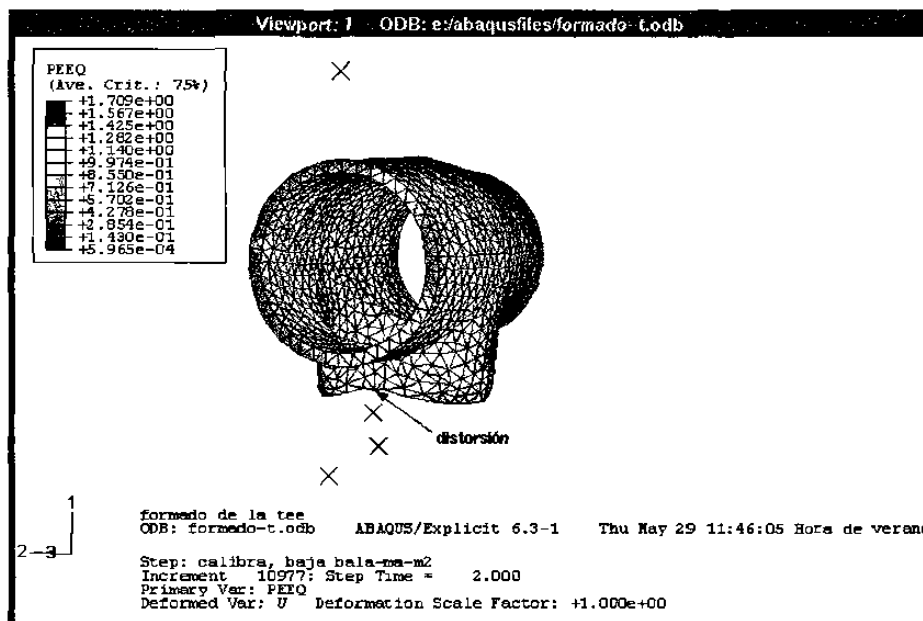


Figura 10.1 Vista del defecto en el borde del tercer ramal, al final del proceso, deformación equivalente plástica.

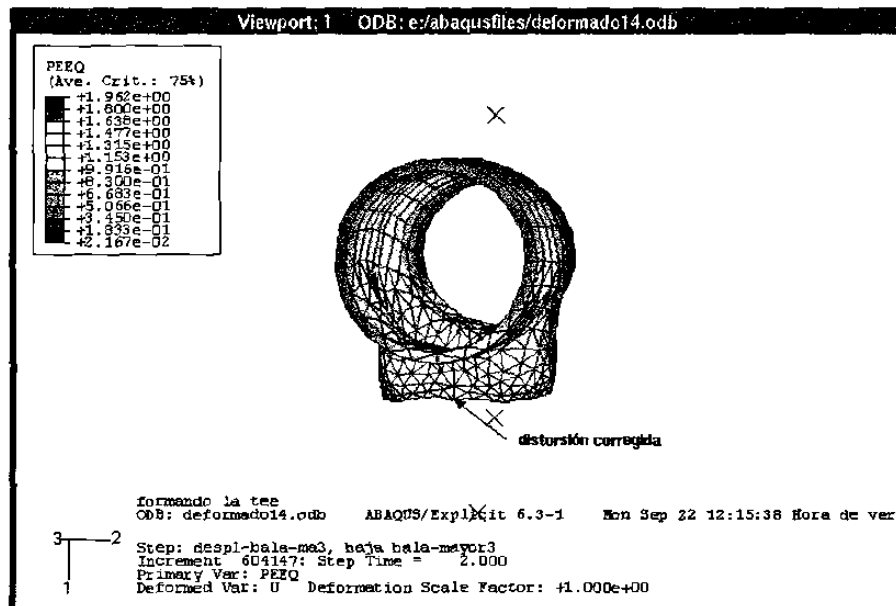


Figura 10.2 Vista de defecto corregido por disminución del eje mayor.

Lo anterior se comprueba en la Figura 10.2 en la cual se disminuyó el eje mayor del óvalo en 1.27cm consiguiéndose en buena medida una corrección al defecto y mejorando así la presentación del modelo. Cabe mencionar que para validar el modelo se rediseñó la plantilla de corte del óvalo en el tubo y se experimentó con la fabricación de ocho conexiones T en las que se observa en similitud con el modelo un mejoramiento en el desarrollo del tercer ramal. Aunque sabemos que los valores numéricos son aproximados, comparando estos con los resultados experimentales se ve un acercamiento entre ambos, lo que da confianza para tomarlos en cuenta en el rediseño de herramientas de formado.

10.4.3 Comparación de las vistas laterales

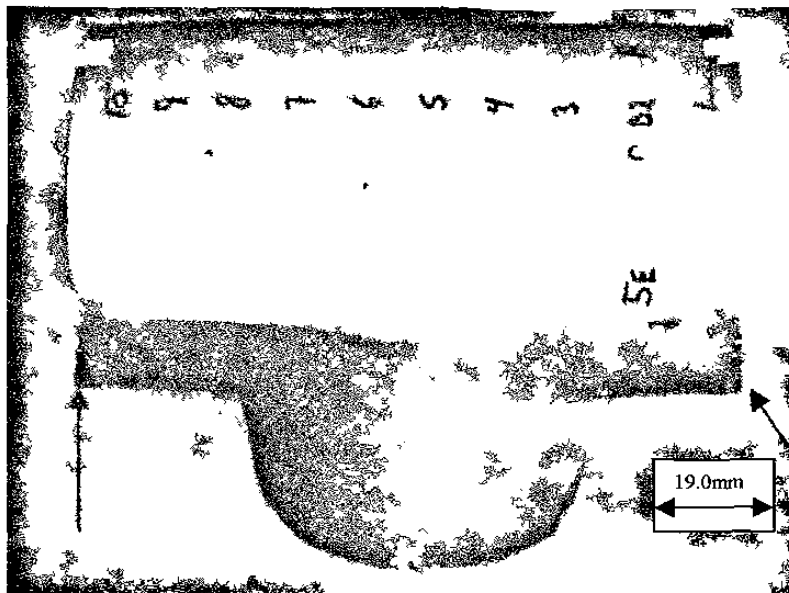


Figura 10.3 Fotografía de la vistas laterales de la TE real al final del proceso.

En la Figura 10.3 las bocas laterales de la pieza real presentan una extensión en lo que es la panza de la T, es decir un exceso de material que fluyó durante la deformación como se observa en detalle en la Figura 10.6. En el modelo numérico también se presentan estos defectos aunque con menor dimensión, Figuras 10.3 y 10.4. De lo anterior, se puede observar la similitud entre la forma de la pieza real y la forma de la pieza del modelo numérico. Aunque el desarrollo numérico por ABAQUS presenta mayor similitud con la pieza real que el desarrollo numérico por ANSYS. Cabe mencionar que la formulación implícita de ANSYS está más enfocada al área

estructural, en este proyecto se requería de una formulación para análisis dinámico explícito, que se obtuvo a través del programa de ABAQUS.

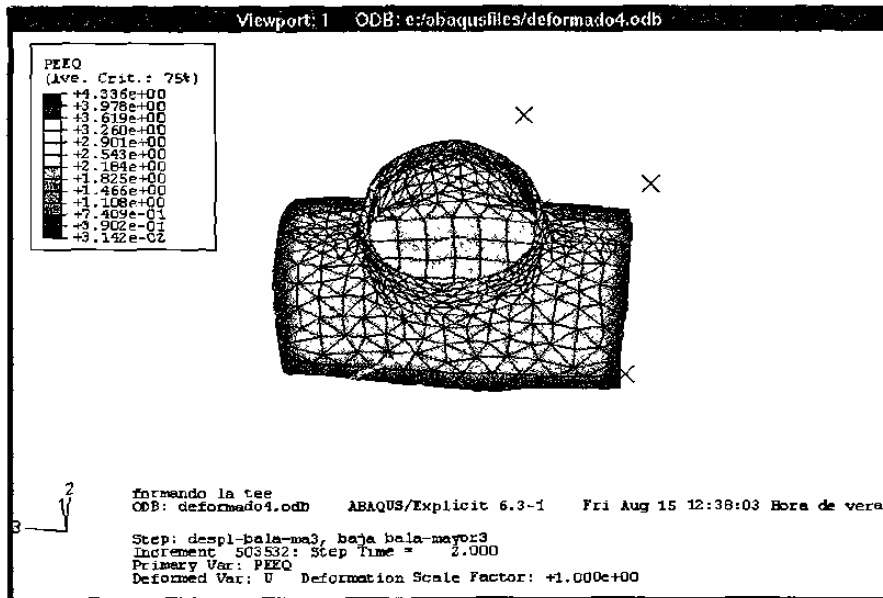


Figura 10.4 Vistas laterales de la T en el desarrollo numérico de ABAQUS al final del proceso. Distribución de la deformación equivalente.

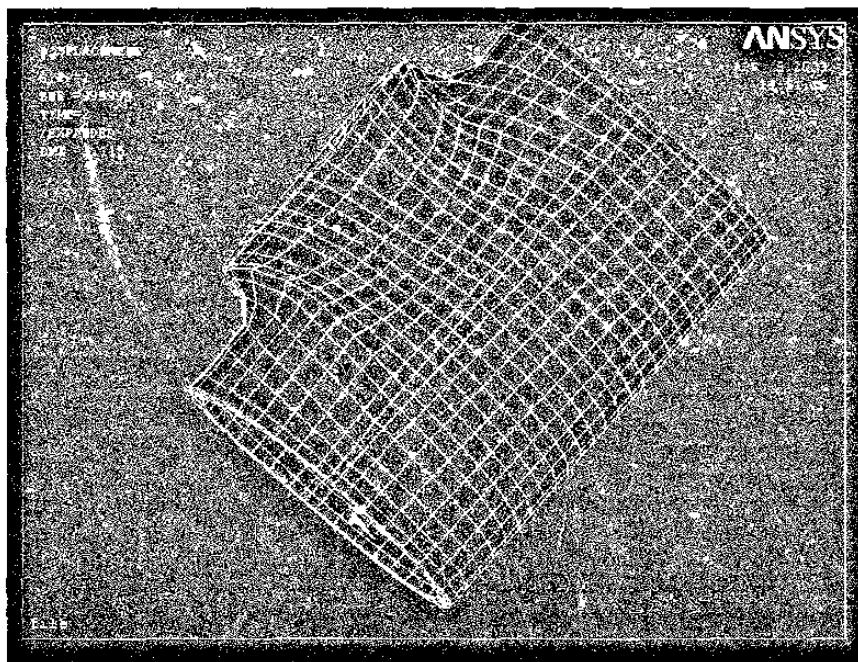


Figura 10.5 Vistas laterales de la T en el desarrollo numérico ANSYS al final del proceso.

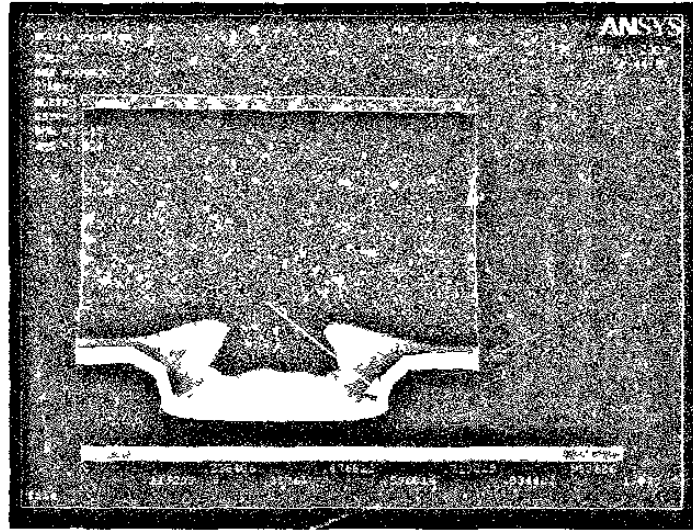


Figura 10.6 Corte de la mitad de la T para ver exceso de material.

En la Figura 10.6 se puede observar como se adelgaza el espesor del material al estar formando el tercer ramal como lo señala la flecha, así mismo, se ve el aumento del espesor en las bocas laterales como lo señalan las otras flechas, este exceso de material se debe a la disminución del diámetro del tubo original al estarse comprimiendo entre los dados hasta alcanzar el diámetro requerido.

Los datos que se introdujeron en el paquete ABAQUS de la curvas esfuerzo-deformación, que se obtuvieron en las pruebas mecánicas a compresión de cilindros de acero ASTM-A-106 a diferentes temperaturas, se combinaron ya que la mitad de la pieza estaba a una temperatura y la otra mitad a una temperatura diferente.

En el Apéndice A se presentan los resultados de las mediciones iniciales y finales de un cuarto de tubo que sirvan para obtener las deformaciones promediadas en función del ángulo (cada 18°) y a lo largo del tubo en 10 elementos de la malla. Para validar el modelo por medio de elemento finito se lleva a cabo la comparación de los datos experimentales con los datos de la simulación Tabla 10.1 y Figura 10.7.

Sector angular	ε medido	ε modelo ABAQUS	Diferencia %
18°	0.95314	1.0247	7.5
36°	0.971	1.0396	7
54°	1.0636	1.057	0.62
72°	1.0636	1.078	1.35
90°	1.0636	1.0381	2.4

Tabla 10.1 Deformación equivalente obtenida experimental y por modelación numérica.

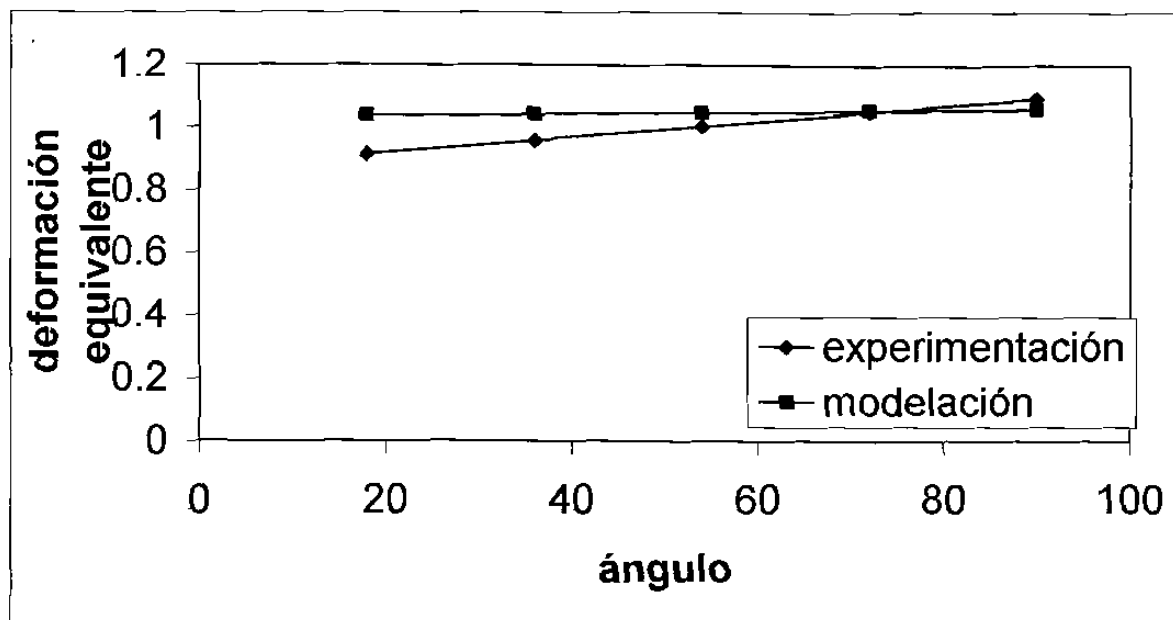


Figura 10.7 Comparación de los valores de deformación equivalente.

Las aproximaciones en el modelo se debe a las diferentes restricciones que se hicieron en los datos que se introdujeron en los programas de análisis. Es por ello que no se espera que los resultados sean iguales a los experimentales.

10.4.4 Modificación de las balas

Con el objeto de reducir el número de etapas en el proceso de formado de la conexión T se hizo la simulación con una sola bala en vez de dos, utilizando los mismos datos experimentales obtenidos en el capítulo 9. Lo anterior se hizo suponiendo como buena la validación obtenida en la Figura 10.7, dando como resultado final la solución requerida. Esto permitirá disminuir el tiempo del proceso aproximadamente en un tercio. A pesar de considerar que los valores obtenidos son aproximados se tiene la confianza de la suposición realizada para la modelación de la T utilizando una bala combinada en vez de utilizar dos balas separadas. Cabe mencionar que se cuidaron las dimensiones adecuadas tanto para abrir boca como para calibrar y poder formar el tercer ramal de la T como se requiere. Se puede ver comparando las Figuras 9.56 y 9.58 como se distribuyó la deformación equivalente con la bala combinada.

10.4.5 Mallado preferencial

El grado de exactitud de los resultados depende del tamaño y tipo de los elementos y del criterio del usuario. Esto se puede apreciar en las Figura 7.11, 7.12, 7.13 que sirvieron de ensayo para seleccionar el tipo y tamaño de elemento a utilizarse en este trabajo.

Después de probar con diferentes tipos y tamaño de elementos, se decidió por dos tipos de elementos utilizándolos de dos maneras aceptables:

- 1.- En el primer caso se combinaron los elementos hexaedros Figura 10.8 y los elementos tetraedros Figura 10.9 colocando los hexaedros en la parte superior que es donde las variaciones no son muy relevantes, estos elementos tienen una densidad de

0.038 y los tetraedros en la parte inferior donde se forma el tercer ramal que es la zona de bastante variación, los elementos tienen una densidad de 0.013.

2.- En el segundo caso se utilizaron únicamente elementos tipo tetraedro en toda la pieza con una densidad de 0.013.

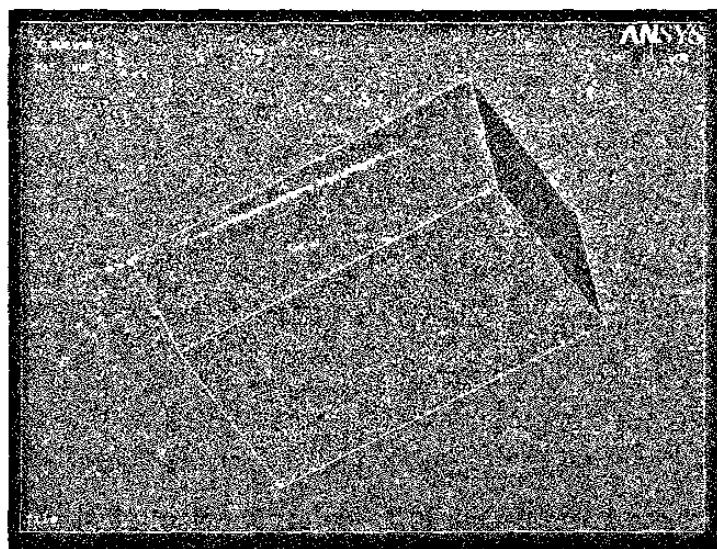


Figura 10.8 Tipo de elemento hexaedro.

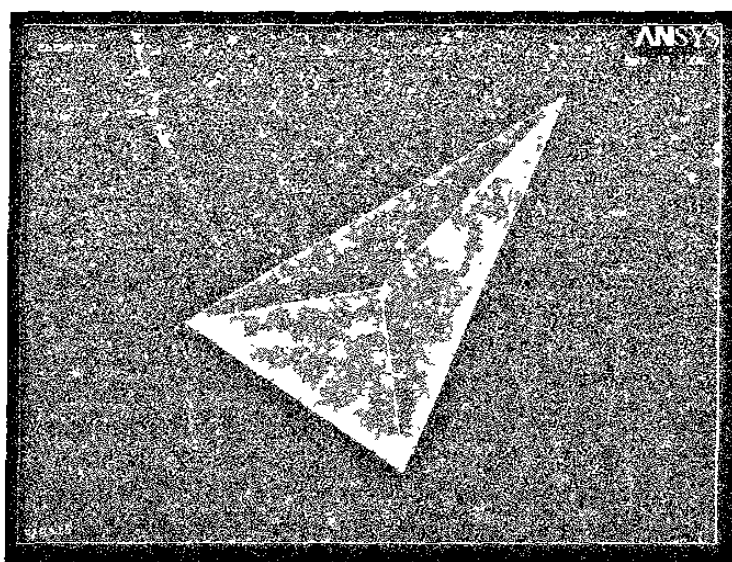


Figura 10.9 Tipo de elemento tetraedro.

CAPITULO 11

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 Conclusiones

- Se rediseñó la plantilla para el corte del óvalo en el tubo para modificar el eje mayor del óvalo que forma el tercer ramal de la conexión T por lo que se corrigió el defecto que se presenta tanto en el modelo como en la pieza real.
- Se modeló la conexión T utilizando como herramienta de formado una bala combinada en vez de dos balas independientes. Con ello se logra que el proceso se reduzca en una etapa.
- Debido a los ensayos de compresión realizados sobre las probetas cilíndricas se permitió conocer las características de esfuerzo-deformación del acero ASTM-A-106 a 27°C, 300°C, 400°C, 500°C y 800°C.
- Las mediciones experimentales permitieron conocer la distribución de la deformación en el proceso de producción de conexiones T y probaron que el modelo numérico es representativo del proceso real..
- Los resultados numéricos que se obtienen se aproximan a los obtenidos de pruebas en planta y es mucho más económico obtenerlos de esta forma.

- La aplicación de la técnica numérica, en este caso del método de elemento finito a problemas de formado, es cómoda y sencilla con la ayuda de equipo moderno.
- Siempre hay que tratar de poner más elementos en las zonas de mayor variación geométrica para poder detectar los cambios.
- El método de elemento finito permite resolver sistemáticamente cualquier tipo de problema; materiales complejos, tales como materiales no homogéneos, no isotrópicos, materiales elásticos no lineales, etc.
- La modelación se inicia con la aplicación del paquete comercial ANSYS pero como sólo cuenta con la formulación implícita cuya capacidad de solución no fue suficiente para este proyecto, se recurrió al paquete comercial ABAQUS empleando la formulación explícita.

11.2 Recomendaciones

- Sería importante hacer la modelación tomando en cuenta la fricción entre la pieza a formar y las herramientas de trabajo, ya que en el formado de la conexión T se utiliza como lubricante la emulsión de grafito-aceite para disminuir la fricción.
- Es necesario optimizar la geometría de las herramientas es decir minimizar las complejidades del dibujo para evitar las dificultades que se presentan en el mallado. Lo anterior para disminuir el porcentaje de error.

- Se recomienda hacer la modelación considerando gradientes de temperatura para localizar el punto crítico.

REFERENCIAS

- 1.- Román Cervantes. Introducción al método del elemento finito. UNAM. México 1983.
- 2.- Burnet, D., S., Finite Element Analysis, Addison Wesley, USA. 1988.
- 3.- Reddy, J., N., An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill. USA. 1995.
- 4.- William B. Bickford. Finite Element Method. Irwin. USA. 1994.
- 5.- David. S. Burnet. Finite Element Analysis. Addison Wesley. USA. 1987.
- 6.- O. C. Zienkiewicz. El método de los elementos finitos. McGraw-Hill. USA. 1994.
- 7.- Bathe, K., J., Finite element Procedures, Prentice Hall, USA. 1996.
- 8.- Bickford, W. B., Finite Element Method, Irwin. USA. 1994.
- 9.- Jorge L. González Velázquez . Metalurgia Mecánica IPN. MEX. 1998.
- 10.- Enzo Levi. Mecánica del medio continuo. UNAM . MEX. 1980.
- 11.- Jhon, Noel Harris. Trabajo Mecánico de los Metales. CECSA. MEX. 1999.
- 12.- Marc André Meyers. Mechanical Behavior of Materials. Prentice Hall. USA. 1999.
- 13.- George E. Dieter. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill. USA. 1988.
- 14.- G., W., Rowe, Finite-Element Plasticity and metalforming analysis. Cambridge. 1991.
- 15.- Taylan, Soo-ik, Harol. Metal Forming. ASM. USA. 1983.
- 16.- Ashby, Jones. Engineering Materials. Pergamon. USA. 1980.
- 17.- Betzalel, Avitzur. Metal Forming Processes and analysis. McGraw-Hill. USA. 2000.
- 18.- Manual de empresa. 2000 RIGA. N.L.

- 19.- Robert D. Cook, Finite element Modeling for Stress Analysis. John Wiley. USA. 1995.
- 20.- Abaqus/CAE. User's Manual, U.S.A. 2000.
- 21.- Abaqus/Standard. User's. U.S.A. 2000.
- 22.- Ansys. User's Guide. U.S.A. 1999.
- 23.- Abaqus/Explicit. User's Manual. U.S.A. 2000.
- 24.- Larry J. Segerlinf. Applied Finite Element Analysis. Wiley & Son, USA. 1984.
- 25.- Chandrupatla. Introducción al estudio de Elemento Finito. Prentice hall. USA. 1999.
- 26.- Ansys version 7.1 USA. 2003.
- 27.- Andrés Rodríguez, Gastón Olvera, Peter Fodor and Rafael Colás. Evaluación de los gradientes de deformación en conexiones forjadas en caliente. Revista de Minas Universidad de Oviedo. 2000.
- 28.- Andrés Rodríguez, Gastón Olvera., Peter Fodor and Rafael Colás. Strain Distribución Analysis of hot forged seamless pipe fitting, UANL 1998.
- 29.- Baker, A., J., Finite Element Computational Fluid Mechanic., Taylor & F. USA. 1983.
- 30.- Daily, J., W., Dinámica de Fluidos, Trillas USA. 1975.
- 31.- Holman, J., P., Transferencia de Calor., McGraw-Hill. USA. 1998.
- 32.- Pat L. Mangonon. The Principles of Materials Selection For Engineering Design. Prentice Hall . USA. 1999.
- 33.- Kenneth G. Budnski. Engineering Materials Properties and Selection .Prentice Hall. USA. 1996.
- 34.- Robert H, Jean-Loup. Fundamentals of metal Forming. Wiley. USA. 1996.

35.- J. M. Morales .Ecuaciones constitutivas para caracterizar la deformación en caliente. Aplicación a simulaciones por ordenador de procesos de conformado. Universidad politécnica de cataluña., Barcelona.

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación en tensión uniaxial.....	21
Figura 4.2 Curva esfuerzo-deformación (real, ingenieril)	24
Figura 4.3 Curvas esfuerzo-deformación uniaxial de forma idealizada, a) plástico perfecto.....	25
b) elastoplástico ideal. c) elastoplástico con endurecimiento por trabajo lineal. d) endurecimiento por trabajo parabólico ($\sigma = K\varepsilon^n$).	
Figura 5.1 Comportamiento de deformación durante el forjado de anillo. a) anillo original.....	44
b) después de la deformación con baja fricción, c) después de la deformación con alta fricción.	
Figura 5.2 Curvas de calibración para evaluar el coeficiente de fricción en el ensayo a compresión de anillos.....	45
Figura 6.1 Resumen esquematizado del proceso de conexiones T.....	46
Figura 6.2 Tubo de acero sin costura.....	46
Figura 6.3 Corte del tubo en tramos.....	47
Figura 6.4 Plantilla para el corte del óvalo pequeño de una TE 8x8x8.....	48
Figura 6.5 corte de óvalo con plantilla utilizando oxiacetileno.....	49
Figura 6.6 Tubo preformado con óvalo para el tercer ramal.....	49
Figura 6.7 Dado inferior donde se forma el tercer ramal.....	50
Figura 6.8 Esquema de las balas empleadas para formar el tercer ramal.....	50
Figura 6.9 Horno de calentamiento, entrada de la pieza era y 2da etapa.....	51

Figura 6.10 horno de calentamiento, salida de la pieza 1ra y 2da etapa.....	51
Figura 6.11 Prensa hidráulica vertical para el formado de la TE.....	52
Figura 6.12 Horno de relevado de esfuerzos.....	53
Figura 6.13 Maquinado de los biseles de la TE.....	53
Figura 6.14 TE 8x8x8 terminada	54
Figura 7.1 Diseño del dado.....	62
Figura 7.2a Tubo ovalado preformado.....	63
Figura 7.2b Dado.....	63
Figura 7.3a Bala menor.....	63
Figura 7.3b Bala mayor.....	63
Figura 7.4 Geometría ensamblada.....	64
Figura 7.5 Ovalo: material superior a 300°C, material inferior 800°C.....	64
Figura 7.6 Primer desplazamiento de la prensa hacia abajo.....	66
Figura 7.7 Desplazamiento de la bala menor hacia abajo.....	67
Figura 7.8 Segundo desplazamiento de la prensa hacia abajo.....	68
Figura 7.9 Desplazamiento de la bala mayor hacia abajo.....	68
Figura 7.10 Contacto e interacción discretizada.....	70
Figura 7.11 Tipo de elemento hexaedro en toda la pieza.....	71
Figura 7.12 Tipo de elemento tetraedro en toda la pieza.....	72
Figura 7.13 Tipo de elemento combinado.....	72
Figura 7.14 Malla de óvalo deformable.....	74
Figura 7.15 Malla de contacto prensa-óvalo.....	75
Figura 7.16 Malla de contacto óvalo-base.....	75
Figura 7.17 Malla de contacto bala menor-óvalo.....	76

Figura 7.18 Malla de contacto bala mayor-óvalo.....	76
Figura 8.1 Mallado del tubo a deformar.....	80
Figura 8.2 Horno de inducción	81
Figura 8.3 Máquina Universal y centro de cómputo de apoyo.....	82
Figura 8.4 Mordazas para ensayos mecánicos en caliente.....	83
Figura 8.5 Conexión T mallada.....	83
Figura 9.1 Proceso de formado de la conexión T.....	86
Figura 9.2 Gráficas de temperatura en función del tiempo con carga de la pieza por el Lado de entrada, enfriamiento en agua y forja normal.....	86
Figura 9.3 Gráficas de temperatura en función del tiempo con carga de la pieza por el lado de salida, enfriamiento en agua y forja normal.....	87
Figura 9.4 Gráficas de temperatura en función del tiempo con carga de la pieza por el lado de salida, calentamiento hasta temperatura inferior a 950°C, sin enfriamiento en agua.....	87
Figura 9.5 Gráficas de temperatura en función del tiempo con carga de la piza por el lado de entrada en horno sin mampara, enfriamiento en agua y forja normal.....	88
Figura 9.6 Micrografías de las diferentes zonas (A,B,C,D Y E) de la pieza antes del normalizado.....	89
Figura 9.7 Micrografías de las diferentes zonas (A,B,C,D Y E) de la pieza Normalizada.....	90
Figura 9.8 Diagrama de la diagonal de una de las celdas.....	91
Figura 9.9 Distribución de componente axial de la deoformación.....	93
Figura 9.10 Distribución de la componente radial de la deformación.....	93

Figura 9.11 Distribución de la componente circunferencial.....	94
Figura 9.12 Distribución de la deformación calculada a partir de mediciones del espesor.....	94
Figura 9.13 Correlación entre el componente radial de la deformación y aquel calculado a partir de las mediciones de espesor.....	95
Figura 9.14 Resultados experimentales en la posición angular de 18°.....	96
Figura 9.15 Resultados experimentales en la posición angular de 36°.....	96
Figura 9.16 Resultados experimentales en las posiciones angulares 54,72,90°.....	97
Figura 9.17 Gráficas resultantes de ensayos mecánicos realizados a diferentes temperaturas (800°C, 500°C, 400°C, 300C y 27°C).....	98
Figura 9.18 Imagen de la distribución de deformaciones en la dirección “x” para el primer paso (25%) del proceso.....	100
Figura 9.19 Imagen de la distribución de deformaciones en la dirección “x” para el segundo paso (50%) del proceso.....	101
Figura 9.20 Imagen de la distribución de las deformaciones en la dirección “x” para el Tercer paso (75%) del proceso.....	101
Figura 9.21 Imagen de la distribución de las deformaciones en la dirección “x” para el Cuarto paso (100%) del proceso.....	102
Figura 9.22 Imagen de la distribución de los esfuerzos en primer paso (25%) del proceso.....	102
Figura 9.23 Imagen de la Distribución de los esfuerzos segundo paso (50%) del proceso.....	103
Figura 9.24 Imagen de la distribución de los esfuerzos tercer paso (75%) del proceso.....	103

Figura 9.25 Imagen de la distribución de los esfuerzos cuarto paso (100%) del proceso.....	104
Figura 9.26 Esfuerzo Equivalente de von Mises 800/300°C.....	105
Figura 9.27 Deformación plástica equivalente 800/300°C.....	106
Figura 9.28 Desplazamiento en la dirección x 800/300°C.....	106
Figura 9.29 Esfuerzo equivalente de von Mises 800/400°C.....	107
Figura 9.30 Deformación equivalente plástica 800/400°C.....	107
Figura 9.31 Desplazamiento en la dirección x 800/400°C.....	108
Figura 9.32 Esfuerzo equivalente de von Mises 800/500°C	108
Figura 9.33 Deformación equivalente plástica 800/500°C.....	109
Figura 9.34 Desplazamiento en la dirección x 800/500°C.....	109
Figura 9.35 Esfuerzo equivalente de von Mises 800/27°C.....	110
Figura 9.36 Deformación equivalente plástica 800/27°C.....	110
Figura 9.37 Deformación en la dirección x 800/27°C.....	111
Figura 9.38 Deformación equivalente plástica 800/800°C.....	111
Figura 9.39 Resultados numéricos a 18°.....	113
Figura 9.40 Resultados numéricos a 36°.....	113
Figura 9.41 Resultados numéricos a 54°.....	114
Figura 9.42 Resultados numéricos a 72°.....	114
Figura 9.43 Resultados numéricos a 90°.....	115
Figura 9.44 Línea de distorsión en la pieza.....	116
Figura 9.45 Línea de distorsión en el modelo.....	116
Figura 9.46 Líneas de distorsión en la pieza.....	117
Figura 9.47 Líneas de distorsión en el modelo.....	117

Figura 9.48 Curvas de deformación equivalente a 18°.....	118
Figura 9.49 Curvas de deformación equivalente a 36°.....	118
Figura 9.50 Curvas de deformación equivalente a 54°.....	119
Figura 9.51 Curvas de deformación equivalente a 72°.....	119
Figura 9.52 Curvas de deformación equivalente a 90°.....	120
Figura 9.53 Bala menor	121
Figura 9.54 Bala mayor.....	121
Figura 9.55 Bala combinada.....	122
Figura 9.56 Resultado usando bala separada.....	123
Figura 9.57 Simulación no concretada con bala combinada.....	123
Figura 9.58 Resultado con la bala combinada calibrada.....	124
Figura 9.59 Muestra de la prueba 1.....	125
Figura 9.60 Muestra de la prueba 2.....	126
Figura 9.61 Muestra de la prueba 3.....	126
Figura 9.62 Muestra de la prueba 4.....	127
Figura 9.63 Muestra de la prueba 5.....	127
Figura 9.64 Muestra de la prueba 6.....	128
Figura 9.65 Muestra de la prueba 7.....	128
Figura 9.66 Muestra de la prueba 8.....	129
Figura 9.67 Señalando los puntos (A,B,C y D).....	130
Figura 10.1 Vista del defecto en el borde del tercer ramal.....	135
Figura 10.2 Vista del defecto corregido.....	136
Figura 10.3 Fotografía de las vistas laterales.....	137

Figura 10.4 Vistas laterales en abaqus.....	138
Figura 10.5 Vistas laterales en ansys.....	138
Figura 10.6 Corte para ver el exceso de material.....	139
Figura 10.7 Comparación de valores de deformación equivalente.....	140
Figura 10.8 Tipo de elemento hexaedro.....	142
Figura 10.9 Tipo de elemento tetraedro.....	142

INDICE DE TABLAS

Tabla 9.1 valores de esfuerzos y deformación.....	99
Tabla 9.2 espesores en la tercera boca.....	129
Tabla 10.1 Deformación equivalente experimental y numérica.....	140
Tabla A1. Medidas longitudinales iniciales.....	157
Tabla A2. Medidas transversales iniciales.....	157
Tabla A3. Medidas longitudinales finales.....	158
Tabla A4. Medidas transversales finales.....	158
Tabla A5. Medidas diagonales finales.....	159