

Análisis de esfuerzos de la palanca de armar de un fusil de asalto

Víctor-Fernando Verduzco-Cedeño¹

Juan Manuel Sandoval-Pineda¹

Guillermo Urriolagoitia-Sosa²

Anaí-Alicia Valencia-Lazcano²

Beatriz Romero-Ángeles²

¹INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI-ESIME U. Azcapotzalco. Av. de las Granjas No. 682,
Col. Sta. Catarina Azcapotzalco, C.P. 02550, México, DF.
MÉXICO.

²INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI-ESIME U. Zacatenco.
Unidad Adolfo López Mateos. Edificio 5, 2o Piso,
Av. IPN s/n, Col. Lindavista. CP 07738, México DF.
MÉXICO.

Teléfono: 5529 6000 ext. 64503

Correo electrónico: verduzcomx@yahoo.com.mx
jsandovalp@ipn.mx, guiurri@hotmail.com
aa.valencia@hotmail.com
romerobeatriz97@hotmail.com

Recibido el 31 de julio de 2008; aceptado el 21 de enero de 2009.

1. Resumen

En este artículo, se presentan los resultados obtenidos sobre el efecto dañino que puede ocasionar un concentrador de esfuerzos sobre un elemento mecánico (como puede ser una palanca de armar, que es un componente de un fusil de asalto). La importancia en el análisis de este tipo de componente, se encuentra establecida en su constante falla durante las condiciones de uso diario y trabajo de acción real. Sin embargo, se encuentra muy bien establecido que las consecuencias que puede ocasionar un concentrador de esfuerzos, se pueden minimizar por medio del cambio de la configuración geométrica del componente. Por lo que en este trabajo, se analizan los efectos que consecuentemente se pueden presentar al cambiar la geometría del elemento, tales como; nivel del campo de esfuerzos en la zona del cambio geométrico, posible fractura durante el proceso de templado y cambios microestructurales.

En este artículo, se evalúan diferentes magnitudes del concentrador de esfuerzos, para radios de 0.2 mm, 0.5 mm y 1.0 mm. Empleando para este análisis métodos analíticos, con lo cual es posible conocer la magnitud del concentrador y su validación por medio de una simulación de su comportamiento bajo condiciones reales. La simulación es realizada por medio del Método del Elemento Finito (MEF), con la finalidad de determinar la magnitud del efecto del concentrador y su mejor ubicación. Asimismo, se muestran los cambios microestructurales que se pueden originar, tales como; tamaño de grano y su interacción con efectos dañinos sobre el componente. Además, se presenta una comparación de resultados entre el método analítico y el MEF, donde se puede observar una gran similitud y se demuestra la importancia que tiene la correcta aplicación del diseño mecánico.

Palabras clave: factor de concentración de esfuerzos, método del elemento finito, microestructura.

2. Abstract (Stress Analysis of a Cocking Lever of Assault Rifle)

This article shows the obtained results on the research concerning on the effect that causes a stress concentrator in an arm lever of an assault rifle, due to this component has a constant failure during real working conditions. Although it is well known that the concentrator effect can be minimized by changing the geometry of the component, the resulting effects on this element are analyzed, such as increased level of stress concentrator, fracture during tempering, microstructural changes.

Different magnitudes for the stress concentrator are analyzed for 0.2 mm, 0.5 mm and 1.0 mm of radius using analytical methods, making possible to know the concentrator magnitude. These results are validated by simulating the real behavior, applying Finite Element Method (FEM) under linear conditions to determine the magnitude and location of the concentrator. Microstructural changes are shown to demonstrate the effect on the component due to concentrator. In addition when comparing the obtained results by FEM to the analytical method were very similar. With these results is demonstrated the importance of an unfit mechanical design.

Key words: stress-concentration factor, finite element method, microstructure.

3. Introducción

Una de las principales misiones del Ejército Mexicano, es salvaguardar la soberanía nacional y mantener la seguridad interior del país. Por lo que es necesario contar con recursos humanos, materiales y equipos que permitan cumplir satisfactoriamente esta misión. Parte del equipo requerido, es primordialmente el armamento y sus municiones, los cuales son proporcionados en su gran mayoría por la Dirección General de Industria Militar (DGIM) En el año 2002, se creó el Centro de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico de la Industria Militar (CIADTIM). La finalidad de este centro es impulsar el crecimiento tecnológico de la Industria Militar mediante el diseño y desarrollo de prototipos de sistemas y equipos.

La Secretaría de la Defensa Nacional, encomendó a la Dirección General de Industria Militar y esta a su vez al CIADTIM, el desarrollo de un fusil de diseño nacional. Por lo que era necesario diseñar los mecanismos que lo integrarán. Así como, realizar un estudio de evaluación del comportamiento de los mismos y de esta forma garantizar el correcto funcionamiento del armamento diseñado.

Uno de los mecanismos de interacción entre el fusil y el usuario, es la palanca de armar. La cual, transmite la fuerza de accionamiento del usuario hacia del sistema de cierre. Con el objeto de introducir el cartucho o munición en la recámara de disparo, e iniciar el ciclo de disparo, tiro a tiro o en ráfaga. Otra función que realiza la palanca de armar, es la de accionar el cierre hacia el frente o parte trasera del sistema en caso de que se presente el fenómeno de encasquillamiento durante el funcionamiento del fusil.

El concepto de funcionamiento y geometría que prevalece sobre el diseño de este tipo de componentes es su tamaño, peso y adaptabilidad de uso para personas diestras y no diestras. Con el objeto de que su geometría, peso y posición dentro de un fusil de asalto no afecte la operatividad y movilidad del arma durante una operación de alto impacto.

4. Desarrollo

4.1. Metodología de la investigación

Para el análisis de esfuerzos a los que se encuentra sometida la palanca de armar, se utilizan métodos analíticos y numéricos. Para este desarrollo se implementó la metodología mostrada en la figura 1.

La metodología establecida, se fundamenta en la necesidad de analizar el estado de esfuerzos a los que se somete el diseño.



Fig. 1. Diagrama de la metodología de la investigación.

Asimismo, relaciona dos condiciones de trabajo, momento flexionante y tensión axial. También se aplica, el concepto de concentración de esfuerzos sobre la geometría establecida y diseñada para la fabricación de la palanca de armar del fusil de asalto. Además, se analizarán las fuerzas que actúan sobre el modelo con lo que es posible predecir su comportamiento durante el funcionamiento del arma, lo que generará una reducción de costos durante la fase de fabricación de prototipos y evaluación del diseño ya que el análisis validará la selección del diseño y los materiales a emplearse.

4.2. Diseño conceptual y definición de geometría

La palanca de armar, transmite la fuerza de accionamiento del usuario hacia el sistema de cierre. Esto con el objeto de mantener

un diseño elegante y funcional. Capaz de adaptarse a la antropometría del soldado mexicano, al tipo de habilidades motrices (derecho, zurdo o ambidiestro), de bajo peso y geometría compacta. Con lo que se determinó la forma preliminar, capaz de realizar la función específica de interacción entre el usuario y el arma. A partir de los diseños conceptuales y formas preliminares se trabajaron las geometrías, mediante el empleo de un software comercial de diseño asistido por computadora. Donde se consideró la geometría de la pieza, tolerancias geométricas y los ajustes mínimos y máximos de ensamble, y la interacción con los componentes del sistema de cierre. Así como, el armamento mismo y con el usuario del fusil de asalto.

4.3. Análisis esfuerzos (magnitud y posición)

Las fuerzas que interactúan con la palanca de armar se determinaron a través del principio de funcionamiento por toma de gases. Provocando que un resorte recuperador del sistema sea comprimido y liberado durante cada ciclo del arma. Lo que representa la fuerza de 225 ± 5 N, o bien la fuerza que el usuario del fusil deberá aplicar para comprimir el resorte hasta una altura de 110 mm. Con el fin de cargar el arma, fuerza que se aplicará directamente en el centro de masa de la pieza a analizar. Mismo que se encuentra situado a 17.87 mm, desde la parte posterior hacia la punta de la pieza y sobre el eje longitudinal de la misma.

4.4. Definición de materiales

El material seleccionado para el desarrollo de esta investigación, fue un acero AISI/SAE 1045. Debido a que el material tiene una gran importancia en la industria armamentista, automotriz y metal-mecánica. Algunas de sus aplicaciones incluyen; engranes, flechas, pernos, herramientas, rodillos. Así como, en la construcción de mecanismos de maquinaria [1]. Además, este acero de mediano Carbón tiene excelentes características de forjabilidad y maquinabilidad, responde de manera excelente a los tratamientos térmicos, una vez templado alcanza durezas de 55 HRc, por lo que las características de este acero son relevantes para aplicar el tratamiento térmico de normalizado, recocido, templado y revenido [2].

El acero AISI/SAE 1045 utilizado en esta investigación es un material manufacturado por extrusión en frío y su composición química se presenta en la tabla 1 [2 y 3].

Con el objeto de obtener de manera equivalente el valor a la resistencia última a la tensión del acero AISI/SAE 1045, se realizaron diferentes mediciones de la dureza del material en tres lotes de 4 muestras cada uno (tabla 2). Esto con el fin de obtener un valor promedio del valor a la resistencia última a la tensión [4].

Tabla 1. Composición química (%) del acero AISI/SAE 1045.

C	Si	Mn	P		S		Cr	Mo	Ni
			máx	máx	máx	máx			
0.42-0.50	≤ 0.40	0.50-0.80	0.035	0.035	≤ 0.40	≤ 0.10	≤ 0.40		

Cabe señalar que este método comparativo entre dureza y esfuerzo último mantiene una relación que se debe considerar como aproximada, por lo que en base a los resultados obtenidos se estimó y fijó como primer parámetro de seguridad de 1.5 para este valor, por lo que el límite de esfuerzo último fue de 500 MPa.

5. Análisis por el MEF

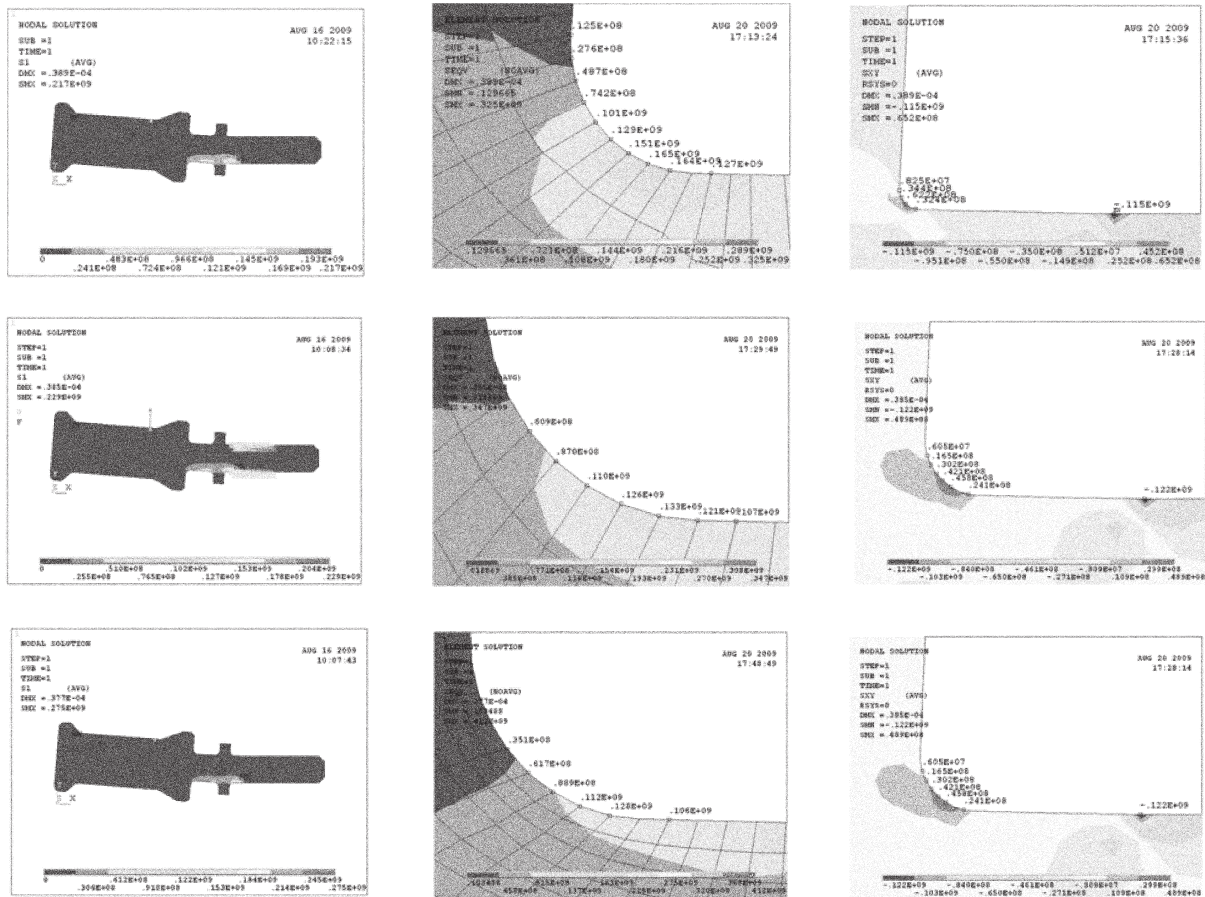
Para realizar la fase de análisis por el MEF se utilizó el programa ANSYS 10.0. En la etapa de Preproceso se seleccionó un elemento plano de 8 nodos de alto orden en 2-D [5].

Después, se definieron las propiedades mecánicas del material: Estructural, lineal, elástico e isotrópico, con módulo de Young 2.11×10^{11} [2] y relación de Poisson 0.3 [6]. Posteriormente se elaboraron modelos para radios de 0.2 mm, 0.5 mm y 1.0 mm y finalmente se discretizó el modelo de la palanca de armar en 5 856 elementos y 18 115 nodos.

En la etapa de solución se aplicó una fuerza de 22.94N sobre el eje neutro y el centro de masa de la pieza. En la etapa de Postproceso se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 2.

Tabla 2. Relación de valores obtenidos de dureza y esfuerzo último.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Núm. muestra												
Dureza HRc	19	18	23	22	21	22	22	20	20	22	18	24
Esfuerzo último (MPa)	732	730	805	805	775	805	790	765	760	805	730	825
Esfuerzo último promedio (MPa)	770				785				770			



a) Simulación de esfuerzos principales S1 [6].

b) Simulación de esfuerzos por energía de distorsión máxima en nodos (Von Mises) [6].

c) Simulación de esfuerzos por cortante máximo (Tresca) [6].

Fig. 2. Resultados gráficos del análisis de esfuerzos.

6. Análisis analítico

El cálculo analítico de esfuerzos para la palanca de armar se realizó considerando como punto crítico de concentración de esfuerzos, el cambio de geometría en la zona frontal, considerando la resistencia del material de fabricación, y la geometría, auxiliándose de las curvas de la figuras 3 y 4 que relacionan el valor del factor teórico de concentración de esfuerzos de una sección circular sometida a tensión y flexión respectivamente, logrando conocer el esfuerzo promedio de resistencia de la pieza de acuerdo a la geometría diseñada, resultados que se muestran y comparan en la tabla 3 y 4.

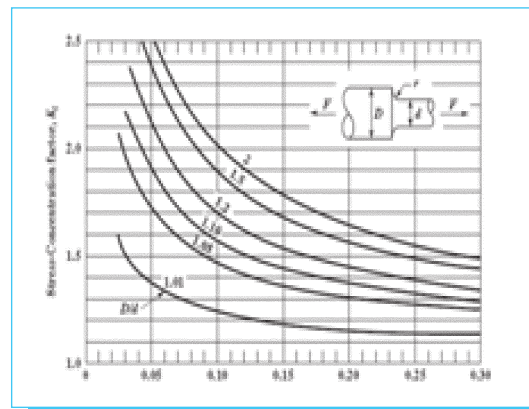


Fig. 3. Gráfico de valor del factor de concentración de esfuerzos a tensión [7].

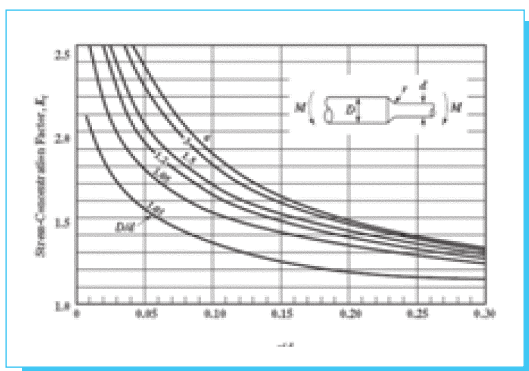


Fig. 4. Gráfico de valor del factor de concentración de esfuerzos a flexión [7].

Tabla 3. Esfuerzos promedio a tensión.

Factor de concentración de esfuerzos a tensión					Analíticos σ_{prom} (MPa)	MEF σ_{MAX} (MPa)	Comparación	
Núm.	RAD	D/d	r/D	K			σ_{max} (MPa)	% de σ (MPa)
1	0,2		0,04	3,20	156,3	165	106%	0,95
2	0,3		0,06	2,60	192,3			
3	0,4		0,08	2,10	238,1			
4	0,5		0,10	2,00	250,0	133	53%	1,88
5	0,6	1,9	0,12	1,80	277,8			
6	0,7		0,14	1,70	294,1			
7	0,8		0,16	1,65	303,0			
8	0,9		0,18	1,62	308,6			
9	1,0		0,20	1,60	312,5	128	42%	2,44

Tabla 4. Esfuerzos promedio a momento.

Factor de concentración de esfuerzos a momento					Analíticos σ_{prom} (MPa)	MEF σ_{MAX} (MPa)	Comparación	
Núm.	RAD	D/d	r/D	K			σ_{max} (MPa)	% de σ (MPa)
1	0,2		0,04	2,50	200,0	165	83%	1,21
2	0,3		0,06	2,00	250,0			
3	0,4		0,08	1,80	277,8			
4	0,5		0,10	1,70	294,1	133	45%	2,21
5	0,6	1,9	0,12	1,60	312,5			
6	0,7		0,14	1,55	322,6			
7	0,8		0,16	1,51	331,1			
8	0,9		0,18	1,48	337,8			
9	1,0		0,20	1,45	344,8	128	37%	2,69

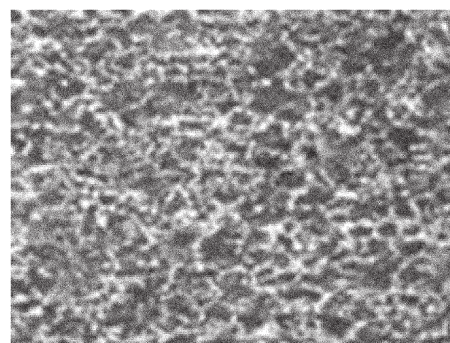
7. Desarrollo experimental

En esta parte de la investigación, se describe la parte experimental aplicada a la palanca de armar. Después de mecanizar la pieza y con el fin de establecer el proceso de manufactura en lo que refiere al mejoramiento de las

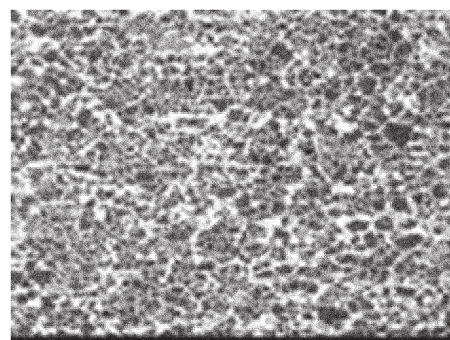
propiedades mecánicas de la pieza, se realizaron diferentes marchas de tratamiento térmico (temple), utilizando como medios de enfriamiento agua y aceite. Para el análisis metalográfico de las muestras se utilizó un microscopio Marca Carl Zeiss Modelo Axio Scope A1 con software analizador de imágenes: Axio Visión. La figura 4 muestra la metalografía realizada al acero AISI 1045 como materia prima bajo la siguiente presentación: Barra redonda \varnothing 5/8" (15.875 mm) de diámetro, rolada en frío y normalizada, observándose fases ferrita-perlita (24,046%-71.98%) con una matriz perlítica y tamaño de grano de 10.24 [8 y 9].

Las figuras 5a y 5b, muestra la microestructura martensítica, del acero AISI 1045 templado y enfriado en aceite y en agua, con durezas de 55 y 60 HRC respectivamente; con base en el diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación del acero AISI 1045 [10].

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del material (ductilidad) se aplicó una marcha de temple y



a) materia prima.



b) tamaño de grano.

Fig. 5a. Metalografía de la microestructura del acero AISI 1045 (200x).

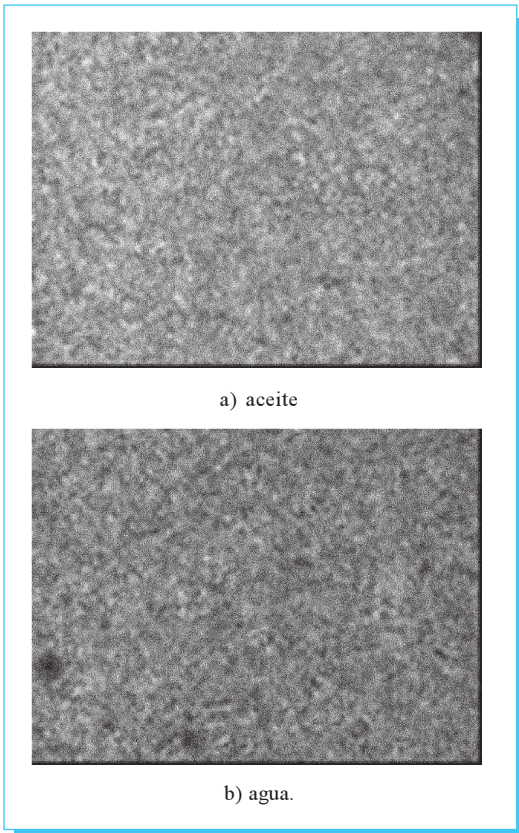


Fig. 5b. Metalografía del acero AISI 1045 templado al agua y aceite. Aumentos: 500x, Ataque: Nital No. 2

revenido, esto a una temperatura de austenizado de 850° C, un tiempo de permanencia de 15 minutos empleando como medio de enfriamiento agua y aceite (W12), y un revenido a 300° C durante 120 minutos, ajustando la dureza del material a 45+5 HRc.

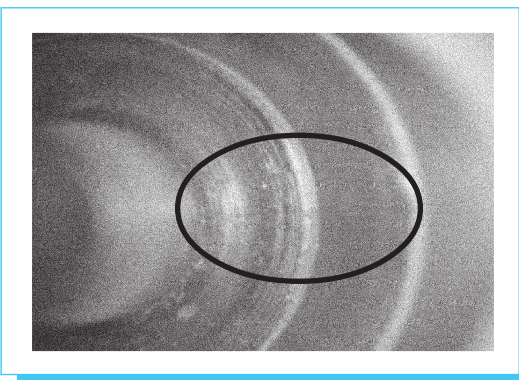


Fig. 6. Inicios de la falla (temple al agua).

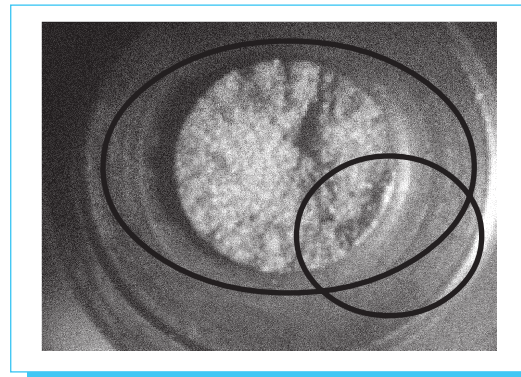


Fig. 7. Evolución de la falla (temple al agua) hasta provocar la fractura.

En las piezas templadas y revenidas al agua se presentó el inicio y evolución de una falla en la zona del concentrador de esfuerzos, como se muestra en la figura 6 y figura 7, prolongándose en toda la sección longitudinal de la pieza hasta provocar la fractura.

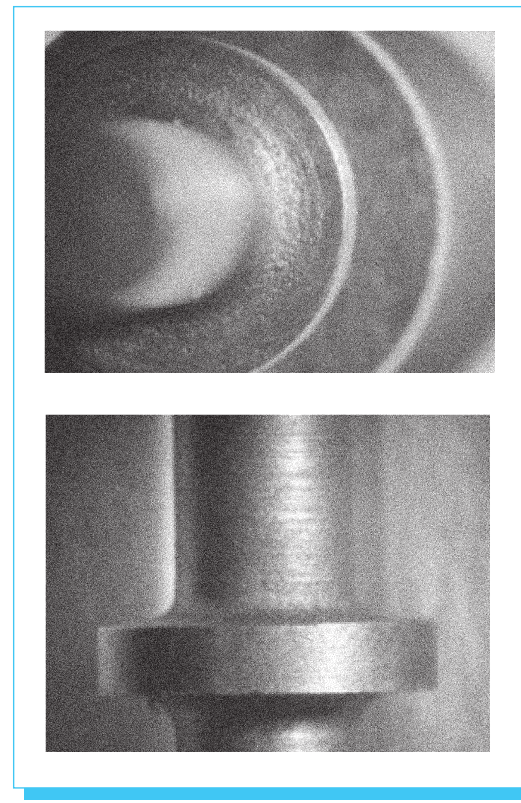


Fig. 8. Palanca de armar de radio 1.0 mm; templada y revenida al aceite, sin indicios de falla.

En las piezas templadas y revenidas al aceite no se presentó ningún indicio de falla en la zona del concentrador de esfuerzos, como se muestra en la figura 8, para las muestras de radio 1.0 mm.

La figura 9 ilustra la microestructura martensítica realizada al Acero AISI 1045 Templado y revenido al aceite, con contenidos de 19.043% de austenita retenida, 53.184% de martensita revenida y tamaño de grano 9.04 [8 y 9] en la zona del concentrador de esfuerzos.

8. Análisis de resultados

Se observa que el valor máximo de esfuerzo se genera en la geometría de radio 0.2 mm es de 165 MPa, mientras que en la geometría de radio 1.0 es de 128 MPa. Lo que representa un 18% menor de esfuerzo por factor de concentración de esfuerzos en el radio, de igual forma con base al cálculo analítico de los esfuerzos a tensión generados por el cambio de geometría, este valor representa el 41% del valor calculado de manera analítica.

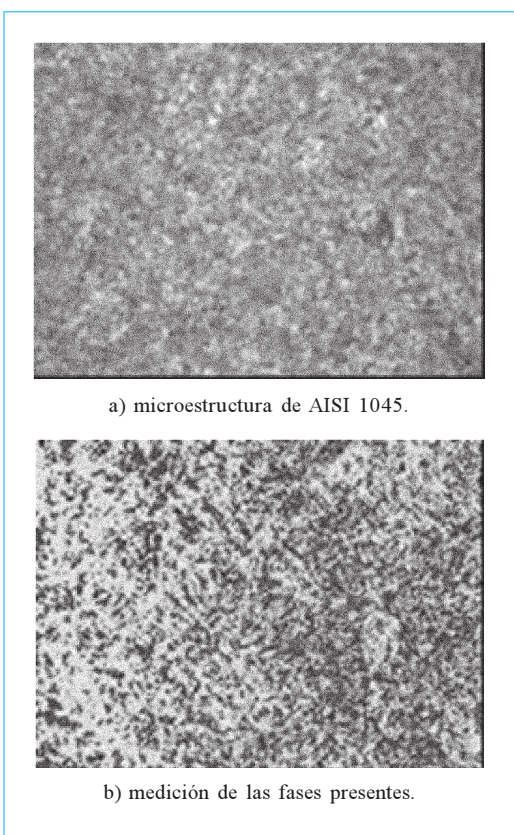


Fig. 9. Microestructura del acero AISI 1045 templado y revenido en aceite, Aumentos: 500x.

Los esfuerzos calculados analíticamente a momento flector por concentración de esfuerzos soportan desde 200 MPa para el radio de 0.2 mm, hasta 344.8 MPa del radio 1.0 mm. Esto es, un radio de 1.0 soporta un mayor concentrador de esfuerzos, que comparados con el análisis realizado por MEF representa un 38% y un factor de seguridad de 2.69 a momento.

El valor máximo que soportará la pieza a tensión calculado analíticamente es de 156 MPa, y de acuerdo al análisis de elemento finito a un radio de 0.2 mm se sobrepasa este valor por un 6%, motivo que se estima sea el origen de la falla del componente. De los datos anteriormente descritos se observa que la falla generada está provocada por los esfuerzos de tensión que se generan por la aplicación de la fuerza, falla que será subsanada aplicando un radio de 1.0 mm en la región de cambio de geometría, con un factor de seguridad de 2.44

En la figura 10 se muestra el gráfico del desplazamiento de las tres geometrías analizadas durante la aplicación de las cargas a las que está sometida la palanca de armar.

La figura 11 muestra los valores de los esfuerzos aplicados a lo largo de la zona de concentración de esfuerzos con base a la teoría de falla por energía máxima de distorsión.

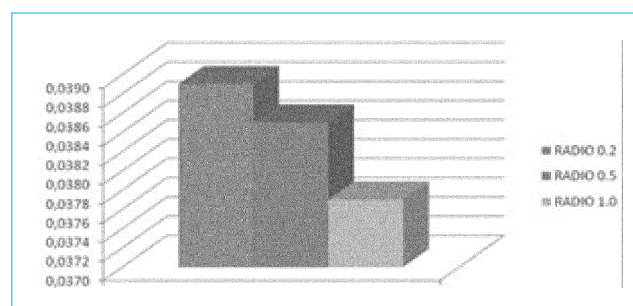


Fig. 10. Desplazamiento de la palanca de armar.

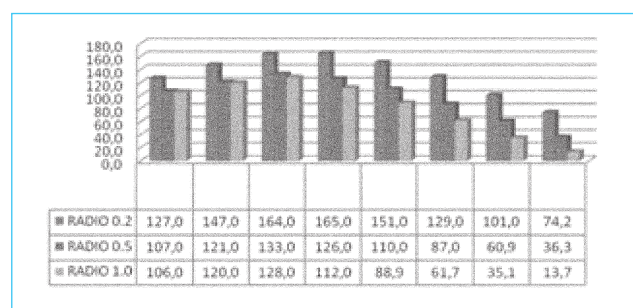


Fig. 11. Esfuerzos aplicados a lo largo de la zona de concentración de esfuerzos.

De la misma manera se observa el efecto sobre la microestructura del material en la zona del concentrador de esfuerzos, reduciéndose hasta 9.04 en esta región, luego del templado y revenido del material. Lo que afecta de manera directa sobre los esfuerzos a los que se somete la pieza durante su trabajo.

9. Conclusiones

En el diseño mecánico de componentes es de suma importancia considerar e investigar sobre los diversos factores que actúan en un material, los cuales modifican su capacidad para soportar cargas. En este trabajo se llevó a cabo la investigación referente al factor de concentración de esfuerzos aplicado las teorías de falla tales como esfuerzo cortante máximo y la falla por energía de distorsión máxima.

Se utilizó el MEF, método numérico basado en la transformación de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, método numérico desarrollado con el que es posible evaluar el comportamiento de la pieza de una manera rápida y económica, con resultados aproximados a la realidad.

En todos los casos los esfuerzos obtenidos de manera analítica fueron similares a los obtenidos por el MEF siendo posible determinar el óptimo comportamiento de la pieza diseñada así como la ubicación de la zona que más esfuerzos soporta, el cual es un dato requerido para diseñar la pieza. Con los resultados obtenidos de la evaluación numérica del MEF se

ha logrado comprobar la valiosa utilidad de este método en problemas de resistencia de materiales y de diseño de partes. Además de cumplir con los objetivos fijados en este trabajo de investigación que fueron la determinación de los esfuerzos a los que se somete la palanca de armar de un fusil de asalto, determinar su buen diseño certificando así su desempeño.

10. Referencias

- [1] ASTM - A108-03, 1992
- [2] ASM International, Heat treater's guide, Second Edition, pp. 184 y 510, 2006
- [3] Wegst, C., Stahlschulussel, 2001
Unterweiser, P., Boyer, H., Kubbs, J., Heat treater's guide standard practices and procedures for steel ASM 1980.
- [4] Theory Reference, Release 10.0 Documentation for ANSYS, Element Reference
- [5] Craig, R., Mecánica de materiales, Segunda Edición, pp.736-747,2007
- [6] Bauccio, M., ASM metals reference book, Third Edition, pp.306, 2004.
- [7] Amiss, J., Jones, F., Machinery's Handbook, 27th Edition Industrial Press, Inc.
- [8] ASTM E 112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 1999.
- [9] ASTM E1382 - 97, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis, 2004.
- [11] Vander, B., Atlas of time diagrams for iron and steel, ASM international, pp.14, 1991.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**XI CNIES CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS**

MÉXICO, NOVIEMBRE, 2009.