# Estudio de los tipos de cráteres obtenidos en el impacto de proyectiles 5,56 SS109, sobre blancos de acero AISI-SAE 1045<sup>(•)</sup>

Alvaro Castro\*, Edgar Espejo\* y Leonardo Martínez\*

**Resumen** En el presente trabajo se describe la morfología y formación de los tipos de cráteres obtenidos, en el impacto de proyectiles 5,56 SS109, sobre siete chapas de acero AISI-SAE 1045 que fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos, comparando el tipo de estructuras de deformación y fractura obtenidas con las formadas por el impacto de uno de estos proyectiles sobre una chapa comercial para blindaje. Cada uno de los cráteres se caracterizó mediante ensayos de inspección visual y metalografía evaluándose, a partir de los resultados, el papel que ejerce la microestructura obtenida sobre el nivel de eficiencia en la detención del proyectil por parte de la chapa y el mecanismo de formación de los cráteres.

Palabras clave Acero. Blindaje. Microestructura. Cráteres. Bandas de corte adiabáticas.

# Study on the types of craters produced in the impact of projectiles 5,56 SS109, over steel targets AISI-SAE 1045

Abstract The present work describes the morphology and formation of the types of craters obtained with the impact of projectiles 5,56 SS109 over seven steel plates AISI-SAE 1045 that received different cycles of heat treatment. A comparison between the type of deformation and fracture structures and the ones generated by the impact of this projectile over one steel armor plate was made. Each one of the craters was characterized by visual and metallography observation. The influence of the plate microstructure on the efficiency for stopping the projectile and the mechanism of craters formation was evaluated.

Keywords Steel. Armor. Microstructure. Craters. Adiabatic Shear Bands.

### 1. INTRODUCCIÓN

La formación de cráteres por impacto de proyectiles sobre materiales metálicos ha sido estudiada con detenimiento durante muchos años, habiéndose encontrado como variables principales del fenómeno, la velocidad del proyectil, materiales y microestructura del mismo, ángulo de incidencia sobre el blanco, materiales y microestructura del blanco y su espesor. Con base en estas variables se han derivado estudios teóricos, numéricos y experimentales a varios niveles como: impactos a bajas velocidades (<500 m/s), altas velocidades (500-1000 m/s), muy altas velocidades (>1000 m/s) y últimamente se habla en la industria aeroespacial de impactos a hipervelocidades (5.000 m/s). La velocidad del proyectil y las propiedades elásticas de los materiales del mismo y del blanco determinan si, la carga actuante durante el choque debe considerarse de tipo estático o dinámico, para cuyo último caso, debe tenerse en cuenta en el análisis, la generación y propagación de ondas de tensión en los dos cuerpos<sup>[1]</sup>. En el caso de impactos a altas, muy altas velocidades e hipervelocidades, es relevante la acción de las ondas de tensión.

Durante el choque de proyectiles contra materiales metálicos, se produce la deformación en el blanco mediante dos mecanismos básicos: por el flujo masivo del material adyacente a la interfaz proyectil-blanco y por la acción de bandas de corte adiabáticas que se propagan desde la superficie impactada.

<sup>(•)</sup> Trabajo recibido el día 30 de marzo de 1999 y aceptado en su forma final el 17 de febrero de 2000.

<sup>(\*)</sup> Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica. Ciudad Universitaria. Edificio del Postgrado de Materiales y Procesos. Santa Fe de Bogotá (Colombia).

A altas velocidades del proyectil, el flujo del material del blanco adyacente a la zona de impacto se analiza mediante un modelo viscoplástico<sup>[2 y 3]</sup>, utilizándose, en el caso de muy altas velocidades, un modelo hidrodinámico que puede incluir el efecto de generación y propagación de las ondas de tensión, fenómeno muy importante en los primeros microsegundos del choque<sup>[4]</sup>. Este flujo plástico de la zona de impacto tiene la particularidad de presentarse en sentidos radial y contrario al avance del proyectil.

Las bandas de corte adiabáticas son zonas de deformación plástica localizada en cuyo interior se pueden producir, dependiendo de la temperatura alcanzada, transformaciones de fase<sup>[5-9]</sup>. Sobre estas bandas, el proyectil cizalla el material en el sentido de avance del mismo lográndose, si la energía es suficiente, la generación de una perforación total del blanco o lo que se denomina en este trabajo como cráter pasante. Además, se debe tener en cuenta que, dependiendo de la velocidad y de los materiales de blanco y proyectil, se puede producir fusión o, incluso, vaporización de metal<sup>[10]</sup> en la zona de impacto.

En el caso de blancos de bajo espesor, a altas y muy altas velocidades de impacto, las ondas de tensión generadas en el choque se reflejarán en la superficie libre opuesta, produciéndose, en esta región, ondas resultantes de tracción que pueden originar grietas o desconchamiento de material (Spalling), si éste es de naturaleza frágil<sup>[1]</sup>.

A continuación, se presentan los resultados y su correspondiente evaluación, sobre el comportamiento que tuvieron una serie de blancos de acero AISI-SAE 1045, al ser impactados por proyectiles 5,56 SS109, para lo cual se partió del estudio de los tipos de cráteres obtenidos en los impactos, ya que sus características indican el nivel de eficiencia que posee este material al actuar como blindaje principal. Este estudio es parte de un programa de ensayos realizados sobre varios aceros en los cuales, además del SAE 1045, también se incluyeron chapas antidesgaste XAR-400 y T1A, chapas de acero estructural ASTM A-36, chapas de acero inoxidable AISI 304, chapas de aceros de alta resistencia AISI 4140, chapas de aceros para herramientas AISI O1 y S1 y chapas de acero HSLA para aplicaciones de blindaje comercial. Con cada uno de estos materiales se realizaron varios ciclos de tratamientos térmicos, a fin de obtener diferentes combinaciones de fases o microestructuras y evaluar, a partir de ellas, la eficiencia del material en los impactos. En este artículo, se decidió presentar los cráteres obtenidos con el acero SAE 1045, puesto que, a partir de estos, se puede deducir fácilmente un modelo cualitativo sobre la forma en que el proyectil 5,56 SS 109 penetra una chapa de acero de 6,35 mm, en función de la microestructura del material del blanco y bajo las condiciones de ensayo tratadas en este trabajo.

#### 2. PARTE EXPERIMENTAL

#### 2.1. Material

En el desarrollo experimental de este proyecto se impactaron 7 chapas de acero AISI-SAE 1045, actuando como blindajes balísticos, cada una de ellas con un ciclo propio de tratamiento térmico. Con el fin de comparar los resultados se impactó también una chapa comercial de acero para blindaje, utilizada en los niveles de protección IV y V de la norma DIN, que se designa internamente como LB1.

Las dimensiones de las chapas eran de 200  $\times$  200  $\times$  6,35 mm. En la tabla I se encuentra la composición química, en estado de suministro, de las chapas AISI-SAE 1045 y LB1.

A continuación se presenta una lista con la denominación de cada una de las chapas, reseñando su proceso de fabricación y tratamiento térmico:

- LB1: Chapa comercial para blindaje en estado bonificado, fabricada por laminación y temple continuo.
- LSAE1045R: Chapa AISI-SAE 1045 en estado recocido.
- LSAE1045D1: Chapa AISI-SAE 1045 Dúplex N° 1, templada en aceite desde 760 °C y revenida a 180 °C durante 2 h.
- LSAE1045D2: Chapa AISI-SAE 1045 Dúplex N° 2, templada en agua desde 750 °C, sin revenido posterior.
- LSAE1045B1: Chapa AISI-SAE 1045 bonificada N° 1, templada en aceite desde 875 °C y revenida a 180 °C durante 2 h.

Tabla I. Composición de las chapas AISI-SAE 1045 y LB1, %

Table I. AISI-SAE 1045 and LB1 steel composition, %

	Fe	С	Mn	Ρ	S	Cr	Мо	Al	Cu
1045	98,39	0,449	0,71	0,031	0,016	0,11	0,01	<0,012	0,01
LB1	97,85	0,28	0,79	0,012	<0,003	0,22	0,23	0,022	0,07

Estudio de los tipos de cráteres obtenidos en el impacto de proyectiles...

- LSAE1045B2: Chapa AISI-SAE 1045 bonificada N° 2, templada en agua desde 900 °C y revenida a 180 °C durante 2 h.
- LSAE1045B3: Chapa AISI-SAE 1045 bonificada N° 3, templada en agua desde 860 °C y revenida a 300 °C durante 2 h.
- LSAE1045C: Chapa AISI-SAE 1045 cementada, carburada a 875 °C durante 6 h (alcanzándose un contenido de carbono sobre las superficies de 0,98 %), templada en aceite desde 875 °C y revenida a 180 °C durante 2 h.

Los ciclos de tratamiento térmico mediante los cuales se obtuvieron las chapas 1045 bonificadas y la carburada, se eligieron de tal forma que se alcanzara un nivel de dureza comparable con el de la chapa LB1. En la tabla II se encuentran los promedios de durezas superficiales y del núcleo, de cada una de las chapas impactadas.

Los proyectiles utilizados para impactar las chapas fueron de calibre 5,56 SS109, poseen una cabeza ojival y se encuentran constituidos, en su núcleo, por una punta de acero bonificado AISI-SAE 1040 (50 HRC) y un cuerpo de plomo antimonioso. Este núcleo está envuelto por una camisa de latón, Cu 90 % - Zn 10 %, localizándose entre la punta de acero del núcleo y la camisa, una pequeña cámara de aire. En la figura 1 se puede apreciar la constitución de este proyectil. Los valores promedios del diámetro y la longitud de estos proyectiles son de 5,7 y 23,25 mm respectivamente, con una masa media de 4,0538 g.

#### 2.2. Procedimiento

Para la realización de las pruebas balísticas de impacto se montaron, consecutivamente, cada una

#### Tabla II. Durezas de las chapas impactadas

Table II. Hardness of plates

Chapa	Dureza superficial (RC)	Dureza núcleo (RC)
LB1	48	45
LSAE1045R	92(RB)	91(RB)
LSAE1045D1	30	30
LSAE1045D2	25	26
LSAE1045B1	48	47
LSAE1045B2	50	51
LSAE1045B3	46	49
LSAE1045C	49	30



Figura 1. Estructura del proyectil 5,56 SS109.

#### Figure 1. 5,56 SS109 projectile structure.

de las chapas a ensayar, en un soporte especialmente diseñado para este tipo de ensayos, en el cual los blancos se fijaron por sus lados superior e inferior. En la figura 2 se muestra el montaje de uno de los blancos sobre el soporte, donde se puede apreciar, además, un cráter causado por el impacto de un proyectil.

Los impactos se realizaron a una temperatura promedio de 18 °C y a una distancia de 25 m de la boca de fuego del cañón, siendo la velocidad lineal media del proyectil de 925,7 m/s, lo cual indica que se está muy cerca del límite superior del régimen de altas velocidades.

Después de impactar cada uno de los blancos, se procedió a realizar la siguiente secuencia de ensayos y operaciones sobre los cráteres obtenidos: inspección visual, realización de un corte a lo largo del eje de impacto, montaje metalográfico de la sección del cráter obtenida, estudio macrográfico y micrográfico sobre la sección atacada con Nital al 3 %.

Con la inspección visual se caracterizaron las formas y dimensiones de cada uno de los cráteres obtenidos, procediéndose después, mediante el análisis metalográfico, a identificar las zonas deformadas y la orientación de las mismas (macrografía), además de apreciar las magnitudes de la deformación y los mecanismos que la producen (micrografía).

### 2.3. Determinación del tipo de carga que actuó sobre las chapas

Un criterio para determinar si una carga es estática o dinámica, consiste en comparar el tiempo de crecimiento de la misma, es decir, el tiempo que se



Figura 2. Montaje de un blanco en el soporte.

Figure 2. Steel target in the support.

demora la carga para alcanzar su máximo valor, respecto al periodo natural de vibración de la estructura a la cual se aplica. Si el tiempo de crecimiento es menor que la mitad del periodo natural de vibración, la carga debe considerarse como dinámica o de impacto y, si el tiempo de crecimiento es aproximadamente tres veces mayor que el periodo de vibración, la carga se puede considerar como cuasiestática, es decir, aproximadamente equivalente a una aplicada estáticamente<sup>[1]</sup>.

Con el fin de determinar si la carga que actuó sobre las chapas en los impactos fue de tipo estático o dinámico, se estimó el orden de magnitud del tiempo de interacción entre el proyectil y la chapa, para los cráteres producidos por impactos que fueron totalmente detenidos por los blancos (cráteres no pasantes), comparándose éstos, posteriormente, con el primer periodo natural de vibración de una chapa, calculado con la ayuda de un programa de elementos finitos.

A partir de la magnitud de los desplazamientos plásticos experimentados por el punto de impacto, de los cráteres no pasantes obtenidos en los blancos ensayados en el proyecto, se estimó el orden de magnitud de los tiempos de interacción durante los impactos, asumiéndose desaceleración uniforme del proyectil, con lo que se obtuvo un valor de 10<sup>-5</sup> s.

Para calcular el primer periodo de vibración natural de una de las chapas se utilizó un paquete de elementos finitos, donde se introdujo la geometría de una chapa como las ensayadas en el proyecto, con las condiciones de fijación al soporte que se mostraron en la figura 2, obteniéndose un valor para el periodo de 7,59 x  $10^{-4}$  s.

Al comparar el orden de magnitud del tiempo de detención de los proyectiles con el del primer periodo natural de vibración, se puede concluir que la carga que actuó sobre los blancos es de tipo dinámico. Lo anterior implica que fracciones del esfuerzo inducido por el impacto del proyectil, se propagaron como ondas de tensión sobre las chapas.

# 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

# 3.1. Tipos de cráteres obtenidos

Los ocho cráteres obtenidos sobre las chapas LB1 y AISI-SAE 1045 se pueden clasificar en los seis tipos básicos que se describen a continuación, ordenados descendentemente con relación al nivel de eficiencia en la detención del proyectil, por parte del material del blanco.

# 3.1.1. Cráter Tipo I

Este es un cráter no pasante que se produjo en el impacto del proyectil sobre LB1, caracterizándose por presentar una deformación plástica apreciable del conjunto de la chapa, en el sentido de avance del proyectil alrededor del punto de impacto, lo que le confiere una ligera forma abombada. Además, presenta erosión en la zona de impacto y no se encuentran grietas ni bandas de corte adiabáticas en las superficies de la chapa. En la figura 3 se muestra una fotografía de la sección de este cráter.

# 3.1.2. Cráter Tipo II

Corresponde a los cráteres no pasantes que se produjeron en los impactos de los proyectiles sobre las chapas bonificadas (LSAE1045B1, LSAE1045B2 y LSAE1045B3), los cuales muestran una forma similar a la del Tipo I pero, en estos casos, se encuentran grietas en la superficie opuesta al



Figura 3. Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LB1 (Tipo I).

Figure 3. Crater formed by the impact of the projectile over LB1 (Type I).

Estudio de los tipos de cráteres obtenidos en el impacto de proyectiles...

impacto y bandas de corte adiabáticas en la superficie de impacto, estando dirigidas las primeras hacia el punto de impacto y las últimas hacia la superficie opuesta. En la figura 4 se muestra una fotografía de la sección del cráter producido sobre LSAE1045B1 y en la figura 5 un detalle, a mayores aumentos, de las bandas de corte adiabáticas.

# 3.1.3. Cráter Tipo III

Este cráter se produjo en el impacto del proyectil sobre la chapa LSAE1045C, qué, aunque logró detener el proyectil, experimentó un considerable nivel de destrucción. En el interior del cráter quedó embebida la punta de acero del proyectil, presentándose bandas de corte adiabáticas en la interfaz proyectil-chapa, además de regiones en la superficie opuesta que mostraron fractura frágil o fluencia plástica que originó protuberancias. En la figura 6 se muestra una fotografía de la sección de este cráter.

# 3.1.4. Cráter Tipo IV

Este es un cráter pasante que se produjo en el impacto del proyectil sobre la chapa LSAE1045D2, donde el material de la chapa, que se encontraba originalmente en el cráter, fue expulsado de éste por el proyectil, en el sentido de avance del mismo. Este cráter se diferencia del Tipo III, en que no se presentaron protuberancias a la salida, debido a que el material de estas zonas falló por fractura frágil. Sobre los bordes del cráter que estuvieron en contacto con el proyectil, se presentan bandas de corte adiabáticas. En la figura 7 se muestra una fotografía de la sección de este cráter.



IMPACTO

**Figura 4.** Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LSAE1045B1 (Tipo II).

Figure 4. Crater formed by the impact of the projectile over LSAE1045B1 (Type II).



Figura 5. Bandas de corte adiabáticas del cráter producido sobre LSAE1045B1.

Figure 5. Adiabatic shear bands in the crater formed over LSAE1045B1.



Figura 6. Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LSAE1045C (Tipo III).

Figure 6. Crater formed by the impact of the projectile over LSAE1045C (Type III).



<sup>®</sup> Fractura Frágil '

Figura 7. Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LSAE1045D2 (Tipo IV).

Figure 7. Crater formed by the impact of the projectile over LSAE1045D2 (Type IV).

# 3.1.5. Cráter Tipo V

Este corresponde al cráter pasante que se produjo en el impacto del proyectil sobre la chapa LSAE1045D1, en el cual el material de la chapa, que se encontraba originalmente en el cráter, fue

expulsado de éste por el proyectil en el sentido de avance del mismo, lo que se pone de manifiesto mediante la presencia de protuberancias, únicamente, a la salida del cráter. Sobre los bordes de este cráter se presentan bandas de corte adiabáticas, al igual que en el cráter Tipo IV. Además, se encuentran grietas originadas en laminaciones del material. En la figura 8 se muestra una fotografía de la sección de este cráter y en la figura 9 un detalle a mayores aumentos de la banda de corte adiabática ubicada en el borde del mismo.

## 3.1.6. Cráter Tipo VI

Corresponde al cráter pasante que se produjo en el impacto del proyectil sobre la chapa LSAE1045R, en el que el material de la chapa que se encontraba originalmente en el cráter fue expulsado de éste por el proyectil, tanto en el sentido de avance del mismo como en el opuesto. Lo anterior se pone de manifiesto mediante la presencia de protuberancias a la entrada del cráter (fluencia plástica en el sentido contrario al avance del proyectil) y a la salida del mismo (fluencia en el sentido de avance del proyectil). Sobre los bordes de este cráter se presentan bandas de corte adiabáticas. En la figura 10 se muestra una fotografía de la sección de este cráter.

# 3.2. Relación entre los tipos de cráteres y la microestructura del blanco

El cráter Tipo I se formó a partir del proceso de deformación plástica experimentado por la chapa LB1, la cual estaba constituida por un material de alta resistencia, que impidió la formación de bandas de corte adiabáticas y la deformación masiva



PROTUBERANCIAS A

Figura 8. Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LSAE1045D1 (Tipo V).

Figure 8. Crater formed by the impact of the projectile over LSAE1045D1 (Type V).

BANDA DE CORTE ADIABÁTICA



Figura 9. Banda de corte adiabática del cráter producido sobre LSAE1045D1.

Figure 9. Adiabatic shear band in the crater formed over LSAE1045D1.



# PROTUBERANCIAS A

Figura 10. Cráter producido por el impacto del proyectil sobre LSAE1045R (Tipo VI).

Figure 10. Crater formed by the impact of the projectile over LSAE1045R (Type VI).

de la zona de impacto, y de una alta tenacidad que evitó la aparición de grietas en la zona opuesta al impacto. Estas dos características del material se deben a su proceso de fabricación, al bajo contenido de carbono, a la presencia de elementos de aleación, al tamaño de grano fino (ASTM N°7) y a una microestructura, compuesta en un 100 %, por martensita revenida (Fig. 11a).

Los cráteres Tipo II se formaron también a partir del proceso de deformación plástica experimentado por las chapas bonificadas las que, aunque poseían un nivel de resistencia estática comparable con el de LB1, presentaron la formación de

Rev. Metal. Madrid 36 (2000)

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) pequeñas bandas de corte adiabáticas en la superficie de impacto y, debido a sus bajas tenacidades, mostraron grietas en la superficie opuesta. Lo anterior se debe a que el material presentó un contenido medio de carbono, ningún nivel de aleación, tamaño de grano basto (ASTM N°4) y una microestructura compuesta por una red de agregados finos de cementita y ferrita, rodeando granos de martensita revenida (Figs. 11e, f y g). No obstante lo anterior, es importante resaltar que la chapa AI-SI-SAE 1045 bonificada es capaz de detener este proyectil, bajo las condiciones de ensayo descritas anteriormente.

En el cráter Tipo III, sobre las bandas de corte adiabáticas, el proyectil cizalló el material de la chapa ubicado enfrente del mismo, hasta que el agrietamiento de la superficie opuesta permitió que fuera expulsado este material; durante este proceso, el proyectil no llegó a abandonar la chapa. Este impacto fue realizado sobre la chapa LSAE1045C, lo que hizo evidente que el proceso de carburación disminuyó la capacidad de detención del proyectil en comparación con las chapas bonificadas, debido a que la baja tenacidad de la capa carburada de la superficie opuesta al impacto favoreció la formación de grietas que debilitaron la chapa, acentuándose así la propagación de las bandas de corte. La microestructura de esta chapa fue similar a la que presentaron las chapas bonificadas, con la salvedad de que, en las capas carburadas

predominaron los agregados de ferrita y cementita sobre la martensita revenida (Fig. 11h).

En el cráter Tipo IV el proyectil logró atravesar completamente el blanco, quedando evidencias de una alta fragilidad de la chapa, mediante el desprendimiento de material en la superficie opuesta al impacto (*Spalling*). Este impacto fue realizado sobre la chapa LSAE1045D2, que no recibió tratamiento de revenido posterior al temple, quedando así una microestructura compuesta por una red ferrítica rodeando granos de martensita de alto contenido de carbono y pequeñas cantidades de agregados finos de ferrita-cementita (Fig. 11d).

En el cráter Tipo V se observa que, todo el material de la chapa que se hallaba frente al proyectil fue cizallado, a través de las bandas de corte adiabáticas, y arrojado fuera de la chapa, quedando solo evidencias de fragilidad en defectos de laminación del blanco. Este impacto fue realizado sobre la chapa LSAE1045D1, que a diferencia de la D2, recibió tratamiento de revenido posterior al temple, además de haber sido templada en un medio menos severo. La microestructura de esta chapa está constituida por ferrita, rodeando granos de martensita revenida de alto contenido de carbono, y agregados finos de ferrita-cementita (Fig. 11c).

En el cráter Tipo VI desaparece toda evidencia de agrietamiento o fractura frágil notándose, además, que el material de la chapa que se encontraba originalmente en el cráter, no solo fue cizallado sobre las



Figura 11. Microestructuras de las chapas (Nital 3%).

Figure 11. Microstructures of the plates (Nital 3%).

bandas de corte en el sentido de avance del proyectil sino que, también, una pequeña cantidad fluyó de las regiones cercanas al punto de impacto en el sentido contrario. Este impacto fue realizado sobre la chapa de menor resistencia mecánica de las AISI-SAE 1045, la cual, por estar en estado recocido, presentó una microestructura ferrito-perlítica (Fig. 11b).

Comparando lo expuesto en los párrafos anteriores con los valores de dureza mostrados en la tabla II, los cuales están relacionados con cada una de las microestructuras de la figura 11, se hace evidente que existe una estrecha relación entre el tipo de cráter obtenido y las propiedades de resistencia y tenacidad del material del blanco hallándose que, la mayor eficiencia en la detención de proyectiles de un blindaje basado en chapas de acero AI-SI-SAE 1045 (lo que implica obtener cráteres no pasantes en los impactos, con mínima deformación y erosión del punto de impacto y sin presencia de bandas de corte o grietas), se alcanzará con altos valores de dureza en régimen estático (45-50 RC) que estén asociados a la presencia de una microestructura de alta tenacidad, es decir, compuesta de martensita revenida y/o bainita inferior.

# 3.3 Modelo cualitativo de penetración del proyectil

En el trabajo de Ravid y Bodner<sup>[2]</sup> se formula un modelo teórico para la perforación de blancos con proyectiles rígidos, condición que se acerca a la tratada en este estudio, ya que la punta del proyectil utilizado no presentó fluencia apreciable durante los impactos, debido a que se trata de un acero en estado bonificado, como se puede notar en la figura 6. En este modelo teórico se considera que la perforación ocurre en cinco etapas:

- (a) Penetración dinámico-plástica, en la cual hay un flujo masivo del material de la región de impacto, en el sentido opuesto al avance del proyectil.
- (b) Formación de abombamiento de la superficie opuesta al impacto.
- (c) Avance del abombamiento.
- (d) Formación del tapón (*plug*) y su salida del blanco, donde se pueden formar bandas de corte adiabáticas o presentarse el desconchamiento (*spalling*)
- (e) Salida del proyectil.

Para el caso del cráter tipo VI, que se obtuvo sobre una chapa de baja resistencia, se puede

Rev. Metal. Madrid 36 (2000)

apreciar que su formación se explica mediante el modelo propuesto en<sup>[2]</sup>, donde la etapa (a) es la responsable de la presencia de las protuberancias a la entrada del cráter (*petalling*), mientras que las siguientes etapas dieron origen a las protuberancias de la salida, en las que el tapón fue cizallado sobre bandas de corte adiabáticas. Lo anterior supone la presencia de una fibra neutra FN que separa las zonas de deformación que se dirigen a la entrada de las que se dirigen hacia la salida (Fig. 12a).

Si se utiliza, ahora, una microestructura del blanco de mayor resistencia que la anterior, se logra disminuir parcial o totalmente el flujo de material de la chapa en el sentido contrario al avance del proyectil o, en otras palabras, la distancia de la fibra neutra a la superficie de impacto se hace mínima. Lo anterior causa que el cráter tienda a formarse, enteramente por cizallamiento, sobre las bandas de corte adiabáticas (cráter tipo V), quedando como indicio la ausencia de protuberancias a la entrada (Fig. 12b). En este caso, se hace evidente que las etapas (a), (b) y (c) del modelo teórico desaparecen, prácticamente, al aumentar la resistencia de la microestructura del blanco.

Con una microestructura de baja tenacidad, que minimice el flujo del material del blanco, se obtendrá la generación de grietas en la superficie que facilitarán el desconchamiento del material, o *spalling* (Fig. 12c), bajo la acción de las ondas de tensión que se reflejan (cráter tipo IV).

En el caso del cráter tipo III se puede ver que corresponde al mismo modelo de formación del tipo V, sólo que en este caso el proyectil no alcanzó a abandonar la chapa, debido a una mayor resistencia de la misma (Fig. 12b).

Si se aumentan la resistencia y la tenacidad de la microestructura del blanco, se puede llegar a que el cizallamiento del material sobre las bandas de corte se restrinja a la superficie de impacto, presentándose o no grietas en la superficie opuesta (cráter tipo II), lo que conduce necesariamente a que este tipo de cráter sea una fase intermedia entre el III y el V (Fig. 12b). Llevando el material a una microestructura con un optimo de resistencia y tenacidad, se logra la formación de un cráter tipo I.

#### 4. CONCLUSIONES

Para velocidades de proyectil del orden de 925,7 m/s y espesores de los blancos de 6,35 mm, aplicados al acero SAE 1045 sometido a diferentes tratamientos térmicos, se concluye lo siguiente:

Estudio de los tipos de cráteres obtenidos en el impacto de proyectiles...



Figura 12. Formación y relación entre los cráteres II, III, IV, V y VI.

Figure 12. Formation and relation between craters II, III, IV, V y VI.

- Chapas de acero AISI-SAE 1045, en estado bo-
- nificado, son capaces de detener proyectiles 5,56 SS109. Sin embargo, tienden a presentar un comportamiento frágil en las condiciones de pureza y tamaño de grano con que se utilizaron en el estudio.
- Una chapa AISI-SAE 1045 cementada, tiene una eficiencia menor en la detención del proyectil 5,56 SS109, con relación a una del mismo material bonificado.
- En la superficie opuesta de una chapa para blindaje es deseable que el material posea una alta tenacidad, que evite la formación de grietas durante los impactos.
- El equilibrio entre resistencia y tenacidad de chapas de acero para blindaje se alcanza con una microestructura compuesta por martensita revenida, obtenida a partir de una tamaño de grano austenítico fino.
- El estudio de la morfología de los tipos de cráteres que se obtienen en el impacto de proyectiles sobre blancos proporciona información, que permite evaluar el nivel de eficiencia de un material al actuar como blindaje y la forma en que se produce la penetración.
- En la formación de los cráteres predominará el cizallamiento por bandas de corte adiabáticas

sobre el flujo viscoso, cuando la microestructura del blanco sea lo suficientemente resistente.

# REFERENCIAS

- J.A. COLINS, Failure of Materials in Mechanical Design, 1<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, New York, EE. UU., 1981, p. 500.
- [2] M. RAVID, y S. BODNER, Int. J. Eng. Sci. 21 (1983) 577-591.
- [3] R. BATRA, Int. J. Eng. Sci. 25 (1987) 1131-1141.
- [4] M. RAVID, S. BODNER, y I. HOLCMAN, Int. J. Eng. Sci. 25 (1987) 473-482.
- [5] U. GERLACH, Metall. Trans. 17A (1986) 435-442.
- [6] E. IRICK, C. HEINOL, T. CLAYTON, J. HASHEMI, J.F. CARDENAS-GARCIA, y R. SADHNENI JMEPEG. (1995) 709-716.
- [7] G. CHANG, J. WOO, L. SUNGHAK y S. KWANG, Metall. Trans. A 29A (1998) 477-483.
- [8] Y. XU, X. WANGY Z. WANG, Scripta Metallurgica et Materialia. 24 (1990) 571-576.
- [9] J. HINES, K. VECCHIO y S. AHZI, Metall. Trans. A. 29A (1998) 191-203.
- [10] M. F. KANNINEN and C. H. POPELAR, Advanced Fracture Mechanics, 1<sup>a</sup> ed., The Oxford Engineering, Science Series 15, New York, EE.UU., 1985 pp. 271-278.

32

Rev. Metal. Madrid 36 (2000)