

Mecanismos de Deformación y Fractura Presentes en la Formación de Cráteres Durante el Impacto de proyectiles Sobre Chapas de Acero

Álvaro Castro P.*, Édgar Espejo Mora**, Leonardo Martínez Díaz**

RESUMEN

En el presente trabajo se describen los mecanismos básicos de deformación y fractura mediante los cuales se formaron los cráteres que se presentaron al impactar con varios tipos de proyectiles, una serie de blancos de acero (chapas), los cuales recibieron diferentes ciclos de tratamiento térmico. Cada uno de los cráteres se caracterizó mediante ensayos de inspección visual y metalografía, evaluándose a partir de los resultados la morfología típica que presenta el maclaje, el deslizamiento, las bandas de corte adiabáticas, el desconchamiento y el agrietamiento, producidos por el impacto de los proyectiles.

Palabras Clave: Blindaje, impacto, deslizamiento, bandas de corte adiabáticas, desconchamiento

ABSTRACT

The present work describes the basic mechanisms of deformation and fracture, obtained by the impact of various projectiles on steel plates subjected to different cycles of heat treatment. Each one of the craters was evaluated by means of visual and metallography testing. In the craters was evaluated the morphology of twinning, slip, adiabatic shear bands, scabbing and cracking.

INTRODUCCIÓN

Las piezas de acero a las cuales se les aplica un tratamiento térmico o termoquímico, trabajan por lo general bajo cargas de baja velocidad; sin embargo, existe una gran variedad de aplicaciones donde las partes metálicas reciben impactos a altas velocidades, y su comportamiento desde el punto de vista microestructural; no ha sido suficientemente estudiado en nuestro medio. Para poder realizar un análisis sobre los fenómenos que se presentan en este último caso, se acudió al ensayo de impacto con proyectiles, pues en estas pruebas se alcanzan altas velocidades de impacto y deformación.

Esta investigación permite al mismo tiempo proporcionar un soporte teórico-experimental a la industria del blindaje, en lo referente a los fenómenos mecánico-metalúrgicos que se presentan durante el choque de proyectiles contra las superficies

protectoras. Para cumplir con este objetivo se mostrarán en el presente artículo los mecanismos básicos de deformación y fractura, mediante los cuales se formaron los cráteres que se obtuvieron al impactar una serie de blancos de acero (chapas) con varios tipos de proyectiles [6].

I. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. MATERIALES DE LOS BLANCOS

En las pruebas balísticas de este proyecto se ensayó una serie de blancos de acero que actuaban como blindajes, cada uno de ellos con una combinación propia de composición química, tratamiento térmico y microestructura, la cual le confirió propiedades mecánicas específicas a cada uno de ellos.

El espesor de los blancos ensayados fue en su mayoría de 6,35 mm, teniendo la parte frontal de los mismos –en la que impactaron los proyectiles– una forma cuadrada de 20 cm de lado. Estas dimensiones fueron seleccionadas para que con la menor cantidad posible de material se garantizara que no se iba a producir interferencia entre los cráteres producidos por los proyectiles. En el cuadro 1 se encuentran relacionados la designación, el espesor, el ciclo de tratamiento térmico o termoquímico y las durezas obtenidas de algunos de los blancos ensayados, sobre los cuales se formaron los cráteres a los que se hará referencia más adelante.

B. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS BALÍSTICAS

Para realizar los impactos sobre los blancos, se montó cada uno de ellos en un soporte especialmente diseñado para este tipo de pruebas, en el cual se fijaron por sus extremos superior e inferior. En la figura 1 se muestra uno de los montajes realizados, donde se puede apreciar un cráter causado por el impacto de un proyectil.

Sobre cada uno de los blancos se hicieron impactar los proyectiles 5,56 SS109, 7,62C, 7,62P, y en algunos casos el proyectil 9 mm, siendo el objetivo principal el de caracterizar el tipo de cráter obtenido en cada caso. Estos ensayos se realizaron a una temperatura promedio de 18°C.

*Ingeniero Mecánico, M.Sc., profesor titular, Universidad Nacional de Colombia.

** Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia.

Cuadro 1. Designaciones, espesores, ciclos térmicos y durezas de los blancos (chapas).

DESIGNACIÓN BLANCO	MATERIAL	ESPESOR mm	CARBURACIÓN	TEMPLE	REVENIDO	DUREZA RC	
						SUP.*	NUC.**
LA-36	A-36	6,35	-	-	-	58(RB)	56(RB)
LA-36C1	A-36	6,35	900°C/6h	Aceite 900°C	400°C/2h	30	69(RB)
PA-36	A-36	38,1	-	-	-	80(RB)	75(RB)
LAISI304	AISI 304	6,35	-	-	-	86(RB)	85(RB)
LXAR-400	XAR-400	6,35	-	-	-	-	44
LXAR-400B	XAR-400	6,35	-	Agua 900°C	300°C/1,5h	45	44
LXAR-400C2	XAR-400	6,35	915°C/5h	Agua 900°C	300°C/1,5h	66	45
LSAE1045D1	SAE 1045	6,35	-	Aceite 760°C	180°C/2h	30	30
LSAE1045D2	SAE 1045	6,35	-	Agua 750°C	-	25	26
LSAE1045B1	SAE 1045	6,35	-	Aceite 875°C	180°C/2h	48	47
LSAE1045B3	SAE 1045	6,35	-	Agua 860°C	300°C/1 ½ h	46	49
LSAE1045C	SAE 1045	6,35	875°C/6h	Aceite 875°C	180°C/2h	49	30
AISI1B***	AISI S1	8	-	Aceite 900°C	300°C/1h	58	40
AISIO1B***	AISI O1	7,7	-	Aceite 820°C	250°C/1,5h	58	60

* Promedio entre la superficie de impacto y la opuesta del blanco.
 ** Promedio del núcleo del blanco.
 *** Corresponden a cortes sacados de piezas de un mayor espesor.

Las distancias de impacto fueron de 5 y 25 m medidos desde la boca de fuego del cañón, siendo las velocidades lineales y las energías cinéticas de los proyectiles, las relacionadas en el cuadro 2.

La capacidad destructora o penetrante de un proyectil se mide fundamentalmente por la energía que posee, con lo cual, de acuerdo con el cuadro 2, los proyectiles con menor y mayor poder penetrante serán el 9 mm y el 7,62P, respectivamente.

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

Con la inspección visual se caracterizaron las formas y dimensiones de cada uno de los cráteres; mediante el análisis metalográfico se identificaron las zonas deformadas y la orientación de las mismas, además de los mecanismos de deformación y sus magnitudes.

Cuadro 2. Velocidades y energías cinéticas de los proyectiles.

PROYECTIL	V (m/s)	E _k (J)
9 mm*	369,72	548,84
5,56 SS109**	925,7	1736,89
7,62C**	821,78	3194,51
7,62P**	862,97	3551,3

*Propiedades a 5 m de la boca del cañón.
 ** Propiedades a 25 m de la boca del cañón.

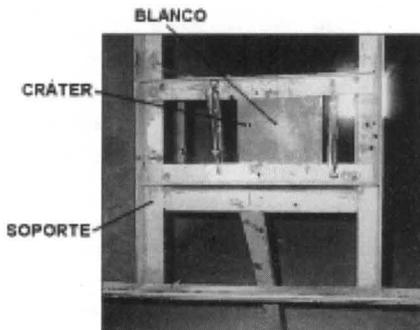


Figura 1. Montaje de un blanco en el soporte.

C. DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE CARGA DINÁMICA SOBRE LOS BLANCOS

Un criterio para determinar si una carga es estática o dinámica, consiste en comparar el tiempo de trepado de la misma, es decir, el tiempo que se demora la carga para alcanzar su máximo valor, con el período natural de vibración de la estructura a la cual se aplica. Si el tiempo de trepado es menor que la mitad del período natural de vibración, la carga se debe considerar como dinámica o de impacto, pero si éste es aproximadamente tres veces mayor, la carga se puede considerar como cuasiestática, es decir, aproximadamente equivalente a una aplicada estáticamente [3].

Con el fin de determinar si la carga que actuó sobre los blancos en cada impacto fue estática o dinámica, se estimaron los tiempos de interacción entre el proyectil y el blanco para varios cráteres no pasantes obtenidos en las pruebas balísticas, comparándose éstos posteriormente con el primer período natural de vibración de un blanco, calculado con la ayuda de un programa de elementos finitos.

Todos los impactos de proyectil que se realizaron sobre los blancos de acero ensayados en este proyecto dejaron en ellos diferentes tipos de cráteres con formas y dimensiones características. Una de las familias de estos cráteres fue la de los no pasantes, los cuales se presentaron cuando el blanco detuvo totalmente el proyectil, después de experimentar una apreciable deformación plástica. En la figura 2 se muestra el aspecto que presenta una sección cortada a lo largo del eje de impacto, de un cráter no pasante.

Para estimar el tiempo durante el cual actúa un proyectil para generar un cráter no pasante, se utilizaron las conocidas relaciones del movimiento uniformemente acelerado dadas por las ecuaciones (1) y (2).

$$a = \frac{V_F^2 - V_O^2}{2s} \tag{1}$$

$$t = \frac{V_F - V_O}{a} \tag{2}$$

donde :

- a : Corresponde a la desaceleración media experimentada por el proyectil.
- s : Es el desplazamiento plástico que experimentó el punto de impacto (véase figura 2).
- V_o : Es la velocidad inicial lineal del proyectil, cuyo valor para cada uno de ellos se encuentra consignado en el cuadro 2.
- V_F : Es la velocidad final del proyectil, la cual, para el caso de cráteres no pasantes, es de cero.
- t : Corresponde al tiempo de detención del proyectil.



Figura 2. Sección de un cráter no pasante.

Observando las ecuaciones (1) y (2) se puede notar que a mayor distancia de frenado del proyectil (s), se obtendrá un tiempo mayor de detención, una menor desaceleración y por lo tanto menor fuerza generada en el impacto. Para comparar los tiempos de detención de los proyectiles con el primer período natural de vibración de un blanco, se escogieron los cráteres no pasantes que presentaron la mayor distancia de frenado, ya que si éstos están dentro de la condición de carga dinámica, también lo estarán los que posean menores valores de (s). En el cuadro 3 se muestra el mayor valor de (s) para cada uno de los grupos de cráteres no pasantes generados por el mismo tipo de proyectil y su correspondiente tiempo de detención, calculado a partir de las ecuaciones (1) y (2).

Según los datos consignados en el cuadro 3, el tiempo de detención de los proyectiles cuando producen un cráter no pasante se encontraría en el orden de los microsegundos; sin embargo, los datos calculados anteriormente son tan sólo una aproximación al tiempo real de detención, ya que aquí no se tuvo en cuenta que la desaceleración del proyectil no es constante durante el impacto y que el verdadero valor de la distancia de detención no sólo incluye el valor de (s), sino también las magnitudes de los desplazamientos elásticos del blanco y del soporte. Por las razones anteriores se considera que el orden de magnitud del tiempo real de detención del proyectil sea de 10^{-5} s, basado también en datos de referencia dados en [10].

Cuadro 3. Desplazamientos plásticos máximos encontrados en los blancos y tiempos de frenado.

PROYECTIL	s (mm)	t (s)
9 mm	0,949	$5,1 \times 10^{-6}$
5,56 SS109	3,988	$8,6 \times 10^{-6}$
7,62C	1,902	$4,6 \times 10^{-6}$
7,62P	1,693	$3,9 \times 10^{-6}$

Para calcular el período del primer modo de vibración natural de un blanco se utilizó un paquete de elementos finitos donde se introdujo la geometría de una lámina de $20 \times 20 \times 0,635$ cm, con las condiciones de fijación al soporte que se mostraron en la figura 1, obteniéndose un valor para el período de $7,59 \times 10^{-4}$ s.

Al comparar el orden de magnitud del tiempo de detención de los proyectiles con el del primer período natural de vibración, se puede concluir que la carga que actuó sobre los blancos es de tipo dinámico. **Lo anterior implica que sobre los blancos la totalidad o fracciones del esfuerzo inducido por el impacto de los proyectiles se propagaron como ONDAS DE ESFUERZO.**

II. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este proyecto se denominaron cráteres a aquellas regiones de los blancos que resultaron afectadas por el impacto de cada uno de los proyectiles. Los cráteres corresponden a las zonas adyacentes al punto de impacto del proyectil, en las cuales se concentró la deformación o tuvo lugar la fractura. Los cráteres encontrados se pueden clasificar en primera instancia en dos tipos: pasantes; y no pasantes, los primeros fueron los producidos por el impacto de proyectiles que no fueron detenidos por los blancos, y los otros por proyectiles que sí lo fueron. En la figura 3 se muestran las fotografías de las superficies de impacto y de las secciones cortadas a lo largo del eje del mismo, de un cráter pasante y de uno no pasante.

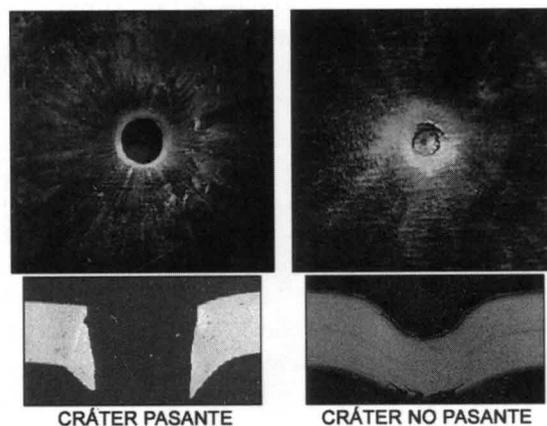


Figura 3. Cráteres pasante y no pasante.

Los dos cráteres mencionados se pueden subdividir a su vez en 11 tipos, los cuales se relacionan a continuación mencionando los mecanismos de deformación y fractura mediante los cuales se formaron. En la figura 4 se muestra una ilustración de cada uno de estos cráteres.

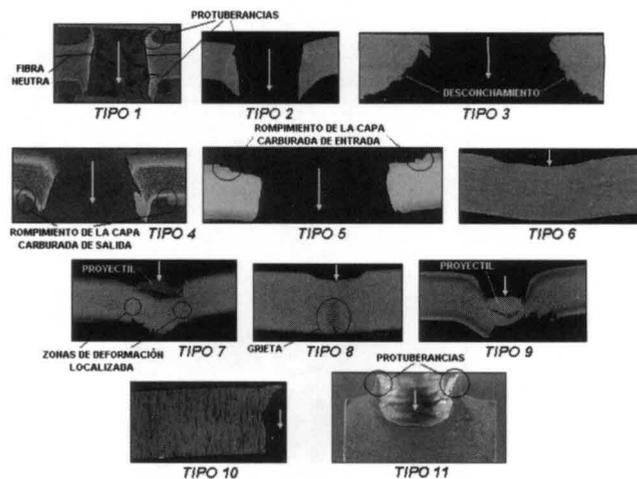


Figura 4. Secciones transversales de los tipos de cráteres obtenidos.

- **Cráter pasante con protuberancias a entrada y salida (tipo 1):** Se trata de un cráter cuyas zonas deformadas fueron originadas por la acción combinada del deslizamiento y el

maclaje dentro de cada uno de los granos. Adicionalmente, buena parte del material que se encontraba en la región del cráter fue expulsada de éste, tanto en el sentido de avance del proyectil como en el contrario, a través de la acción de bandas de corte adiabáticas que desembocaron en una fractura dúctil.

- **Cráter pasante con protuberancias a la salida (tipo 2):** Aquí se presentaron los mismos mecanismos de deformación y fractura que en el tipo 1, con la salvedad de que no se obtuvo flujo de material del cráter en el sentido contrario al avance del proyectil.
- **Cráter pasante con desconchamiento (tipo 3):** básicamente se trata de un cráter que no experimentó de manera apreciable deformación plástica, y por el contrario fue formado por el “*Scabbing*” o “*Spalling*”.
- **Cráter pasante con rompimiento de capa cementada a la salida (tipo 4):** Este cráter se presentó en blancos cementados, cuando la capa carburada opuesta al impacto falló por fractura frágil, mientras que en la capa de impacto y el núcleo se formaron las paredes del cráter por fractura dúctil, a partir de bandas de corte adiabáticas fundamentalmente.
- **Cráter pasante con rompimiento de capa cementada a la entrada (tipo 5):** Aquí se tiene el caso contrario al cráter tipo 4, ya que la capa que experimentó la fractura frágil ahora fue la de entrada.
- **Cráter no pasante con deformación masiva del blanco (tipo 6):** En este cráter sólo se presentó deformación del blanco, mediante los mecanismos de deslizamiento y maclaje.
- **Cráter no pasante con formación de bandas de corte adiabáticas y grietas (tipo 7):** Éste, adicionalmente a los mecanismos presentes en el cráter tipo 6, presentó formación de bandas de corte adiabáticas en la superficie de impacto y de grietas transversales radiales en la opuesta.
- **Cráter no pasante con formación de grietas (tipo 8):** En comparación con el cráter tipo 7, en éste no se presentaron bandas de corte adiabáticas.
- **Cráter híbrido (tipo 9):** Su nombre se debe a que está en una condición intermedia, entre un cráter pasante y uno no pasante, siendo formado primordialmente por fractura dúctil originada en bandas de corte adiabáticas, aunque la participación de las grietas transversales de la superficie opuesta al impacto también fue importante.
- **Cráter pasante con rotura total del blanco (tipo 10):** Este cráter se caracteriza por haber sido formado enteramente por fractura frágil, a partir de la propagación de las grietas transversales radiales originadas en la superficie opuesta al impacto.

- **Cráter no pasante con penetración del blanco (tipo 11):** En esencia se trata del mismo cráter tipo 1, sólo que en este caso el proyectil no alcanzó a sobrepasar el blanco debido al alto espesor, con lo cual todo el material que estaba originalmente en el cráter fue evacuado durante el impacto, mediante fractura dúctil a través de bandas de corte adiabáticas, en el sentido contrario al avance del proyectil.

Mayores detalles acerca de la formación de cada uno de los cráteres y de la relación existente entre ellos, se pueden encontrar en los trabajos publicados por los mismos autores de este documento en [1] y [2].

A. MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN LA FORMACIÓN DE LOS CRÁTERES

1. MACLAJE MECÁNICO

La deformación de los cristales metálicos ocurre mediante dos mecanismos básicos: el deslizamiento y el maclaje; en el primero la deformación ocurre por el deslizamiento entre planos cristalográficos de un cristal mediante el movimiento de las dislocaciones, mientras que en el maclaje la deformación sólo ocurre en una zona del cristal, producto del desplazamiento tangencial entre dos regiones del mismo.

La región maclada corresponde a aquella zona del cristal que sufre la deformación de la red cristalina por la ocurrencia del maclaje. Una diferencia importante entre el deslizamiento y el maclaje radica en que este último presenta una mayor distorsión de la red cristalina, aunque el porcentaje de deformación global del cristal sea mucho menor.

En las fases metálicas con estructura cúbica de cuerpo centrado como la ferrita, las maclas a temperatura ambiente se producen a altas tasas de aplicación de la carga (cargas tipo impacto), mientras que bajo cargas estáticas el mecanismo preferente de deformación es el deslizamiento. Una de las razones por las cuales el deslizamiento no predomina sobre el maclaje bajo carga dinámica radica en que este último se puede formar en fracciones de tiempo muy cortas, y que pueden estar en el orden de los microsegundos (tiempo aproximado de formación de los cráteres), mientras que la formación de la estructura escalonada producto del deslizamiento puede demorar varias milésimas de segundo [5].

El maclaje en los cráteres formados sobre los blancos se concentró en las regiones donde la carga dinámica fue más alta, es decir, cerca al punto de impacto. Se encontraron maclas mediante microscopía óptica, en granos de ferrita y de martensita revenida de bajo contenido de carbono, o sea, en blancos con durezas inferiores a 35 RC. En la figura 5 se muestran dos micrografías de granos maclados cercanos al punto de impacto, de dos cráteres no pasantes producidos por el impacto de proyectiles 9 mm; en la primera micrografía se observa un grano de ferrita maclado formado sobre LA-36, y en la segunda se encuentra un grano maclado de martensita revenida formado en LA-36C1, ubicado en la capa carburada.

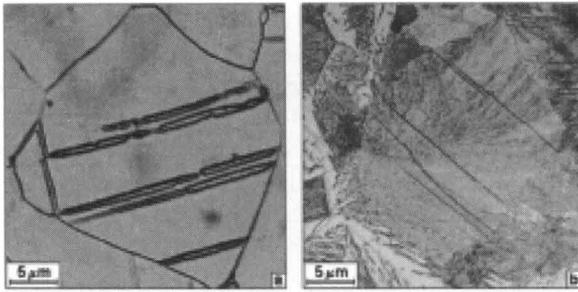


Figura 5. Granos maclados cercanos al punto de impacto de proyectiles 9 mm sobre LA-36 (a) y LA-36C1 (b).

2. DESLIZAMIENTO

La deformación por deslizamiento se presentó en todos los cráteres formados sobre los blancos, es decir, en todas las microestructuras, encontrándose que, a mayor dureza, el porcentaje de deformación es más bajo.

Mediante el deslizamiento ocurre el mayor porcentaje de la deformación experimentada por los cristales de las diferentes regiones del cráter, en las cuales se obtienen los granos alargados en el sentido de la deformación. En la figura 6 se muestran dos micrografías de granos de ferrita y perlita alargados, en el sentido de paso de dos proyectiles que originaron cráteres con fluencia apreciable de material sobre blancos A-36; en el primer caso se tiene el borde del cráter formado por el impacto del proyectil 7,62C sobre PA-36, y en el segundo el producido por el proyectil 7,62P en LA-36C1.

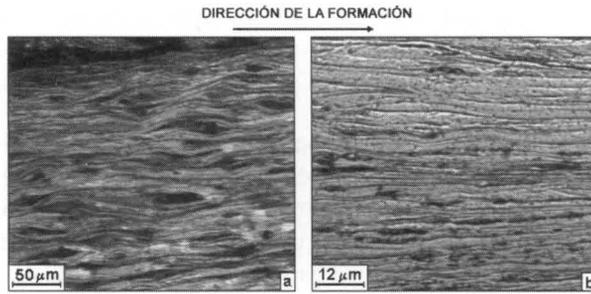


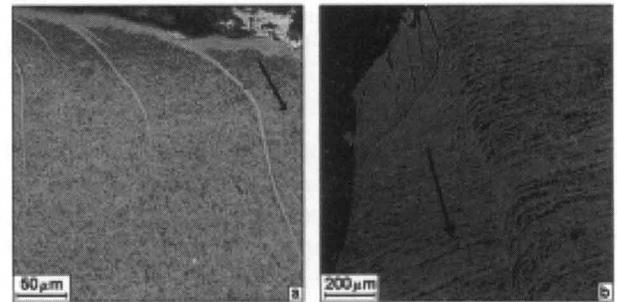
Figura 6. Granos alargados en el borde de cráteres pasantes producidos por impactos con proyectiles 7,62C sobre PA-36 (a) y 7,62P sobre LA-36C1 (b).

3. BANDAS DE CORTE ADIABÁTICAS

Cuando una región de un grano de un metal policristalino rota para acomodarse a la deformación aplicada, se dice que éste presenta una banda de deformación; pero si esta rotación se presenta en muchos granos adyacentes dentro de una aleación, se le denomina banda de corte. Las bandas de corte son zonas localizadas dentro de un material policristalino que han experimentado una mayor deformación que el material que las rodea, con lo cual en ellas se tenderá a formar una orientación preferente. Estas bandas se presentan bajo la acción de esfuerzos cortantes.

Cuando las bandas de corte se forman a velocidades de deformación muy altas, se encuentra que el calor generado dentro de las mismas no alcanza a disiparse hacia la masa del metal circundante, originándose un alto calentamiento; en estas

condiciones, se hablará de banda de corte adiabática [4,7,8,9,11], encontrándose que éstas se forman fundamentalmente bajo cargas de tipo impacto. Se hallaron bandas de corte adiabáticas en todos los blancos, notándose que el ancho de las mismas disminuye con la dureza del material. En la figura 7 se muestran dos micrografías ópticas de bandas de corte adiabáticas, encontradas en dos de los blancos: la primera muestra un conjunto de bandas de corte adiabáticas formadas en el punto de impacto del cráter no pasante, producto de la acción de un proyectil 5,56 SS109 sobre AISIO1B, y la segunda muestra una banda ubicada en la cara del cráter pasante, formado por el impacto de un proyectil 5.56 SS109 sobre LAISI304.



proyectiles 5,56 SS109 sobre AISIO1B (a) y LAISI304 (b). Las flechas indican la dirección en la que se desplazaron las regiones del material.

Dentro de una banda de corte adiabática se observarán los granos deformados de la estructura original del metal si el porcentaje de deformación no fue muy alto. Lo anterior se aprecia en la figura 8a, donde se pueden distinguir dentro de la banda de corte adiabática, ubicada en el cráter pasante formado por el impacto de un proyectil 7,62C sobre LXAR-400, los granos alargados de martensita revenida (grises) y de ferrita (claros). Si el porcentaje de deformación dentro de una banda de corte adiabática fue muy alto, se encuentra que en esta zona se sobrepasaron los valores de temperatura críticos, originándose en el enfriamiento una estructura de martensita muy fina, la cual no puede observarse al microscopio óptico [4,7,8,9,11]. En la figura 8b se observa una micrografía de una banda de corte adiabática, ubicada en el cráter no pasante formado por el impacto de un proyectil 5,56 SS109 sobre LXAR-400C2, donde se formó una martensita más fina que la martensita revenida de la matriz original del blanco que la rodea.

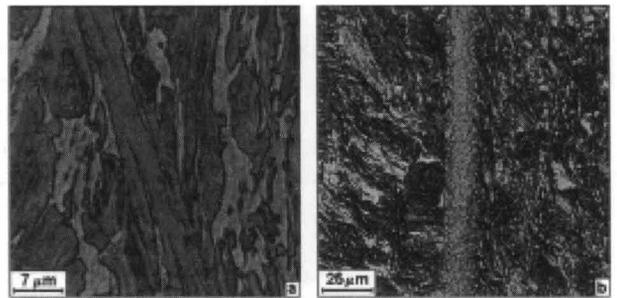


Figura 8. Bandas de corte adiabáticas producidas por el impacto del proyectil 7,62C sobre LXAR-400 (a) y 5,56 SS109 en LXAR-400C2 (b).

Bien sea que haya habido o no transformación de fase en el interior de una banda de corte adiabática, se encuentra que la

dureza de esta región es mayor que la de la matriz circundante, ya que allí habrá granos originales del material del blanco con alto porcentaje de deformación o granos de martensita fina sin revenir. En la figura 9 se muestra una micrografía óptica de una región con una banda de corte adiabática formada en el cráter no pasante producido por el impacto de un proyectil 5,56 SS109 sobre LXAR400B; en ella se indican seis lecturas de microdureza Knoop (dos en la banda y cuatro en la matriz circundante), donde se puede apreciar que efectivamente la banda de corte adiabática presenta una mayor dureza que el material original del blanco.

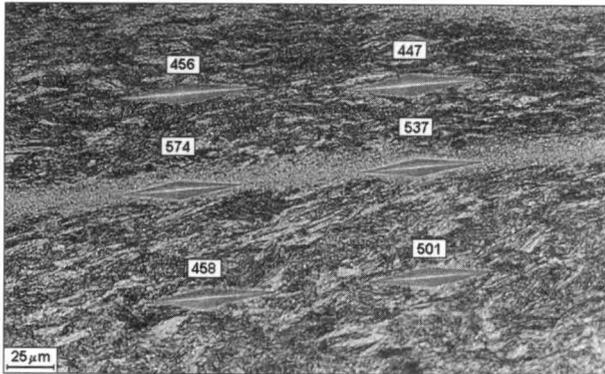


Figura 9. Microdurezas KNOOP de la matriz martensítica y de la banda de corte formada por el impacto de un proyectil 5,56 SS109 sobre LXAR400B.

Algunas de las bandas de corte adiabáticas formadas en los blancos, en cuyo interior se encontró una microestructura de martensita fina, presentaron grietas que se formaron siguiendo la ruta de las bandas; esto indica, como era de esperarse, que estas estructuras poseen una alta fragilidad. En la figura 10a se puede apreciar la formación de una grieta que se propagó, desde la superficie de impacto de un proyectil 7,62P sobre AISIS1B, por la ruta en que inicialmente se había formado una banda de corte adiabática.

En aquellos casos en los cuales se formaron grietas sobre bandas de corte adiabáticas cercanas a la región de impacto, fue común encontrar dentro de éstas plomo y latón fundidos provenientes del proyectil, que da una idea de la cantidad de energía que se libera en esta zona. En la figura 10b se puede apreciar un ejemplo de esto, al observar el interior de una banda de corte adiabática, formada por el impacto de un proyectil 5,56 SS109 sobre LXAR-400C2.

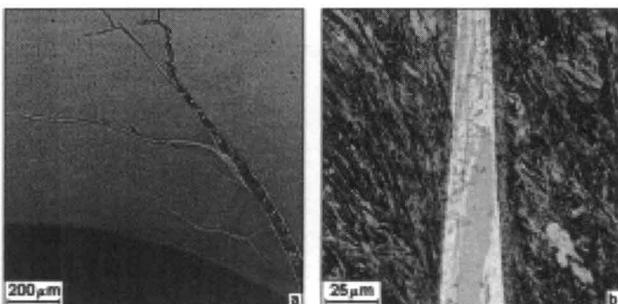


Figura 10. Grieta de la banda producida por el impacto del proyectil 7,62P sobre AISIS1B (a) y presencia de plomo y latón fundidos en una grieta de la banda formada por 5,56 SS109 en LXAR-400C2 (b).

B. MECANISMOS DE FRACTURA EN LA FORMACIÓN DE LOS CRÁTERES

I. FRACTURA DÚCTIL

Las bandas de corte adiabáticas se constituyen en el principal mecanismo por el cual se forman los cráteres pasantes que presentan fractura de naturaleza dúctil, ya que sobre ellas el proyectil cizalla el material del blanco ubicado frente a él. En la figura 11 se muestra una secuencia de imágenes, en las cuales se esquematiza la formación de un cráter pasante de naturaleza dúctil.

En la figura 11 se indica también cómo sobre los bordes de los cráteres pasantes quedan evidencias de la formación de las bandas de corte adiabáticas, a partir de las cuales se formaron. En la figura 12a se muestra la banda de corte adiabática ubicada en el borde del cráter pasante formado por el impacto del proyectil 7,62C sobre LSAE1045D2 y en la 12b, la formada en el borde del cráter producido por 5,56 SS109 en LSAE1045D1.

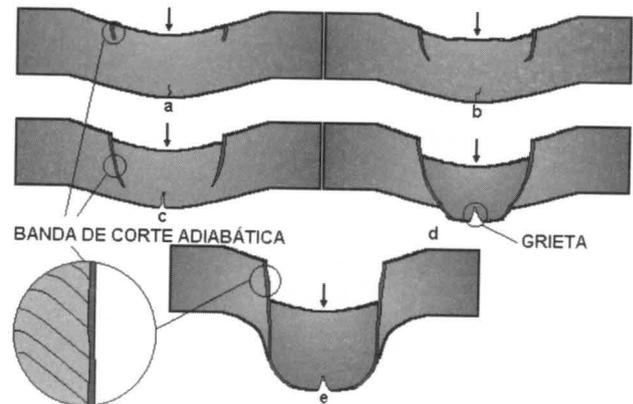


Figura 11. Formación de un cráter pasante a partir de la propagación de bandas de corte adiabáticas (fractura dúctil).

Los cráteres pasantes formados a partir de la propagación de las bandas de corte adiabáticas se presentaron en todos los blancos, ya que, como se mencionó anteriormente, éstas se pueden formar en todas las microestructuras.

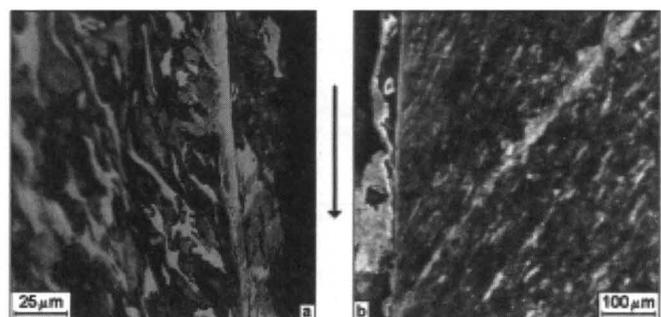


Figura 12. Bandas ubicadas en los bordes de los cráteres pasantes producidos por los impactos 7,62C sobre LSAE1045D2 (a) y 5,56 SS109 sobre LSAE1045D1 (b). La flecha indica el sentido de paso del proyectil.

2. FRACTURA FRÁGIL

• Desconchamiento (Scabbing)

Los cráteres pasantes formados sobre blancos de altas durezas (40 RC o mayores), se caracterizaron por mostrar bordes con superficies típicas de fractura frágil, presentándose ausencia casi total de bandas de corte adiabáticas. En la figura 13a se muestra la sección cortada a lo largo del eje de impacto y el lado de salida de un cráter pasante formado sobre LSAE1045C, producto del choque de un proyectil 7,62C, en el cual se puede apreciar claramente la superficie de fractura frágil del borde del cráter. En la figura 13b aparece una micrografía óptica del borde del cráter pasante formado sobre LSAE1045B1, producto del impacto de un proyectil 7,62C, en el cual se puede apreciar la naturaleza frágil del mismo.

Las fotografías de la figura 13 muestran los rasgos típicos del modo de falla conocido como desconchamiento o "Scabbing", que consiste en un desprendimiento de material por fractura frágil de una superficie opuesta a otra que experimenta una carga de tipo impacto.

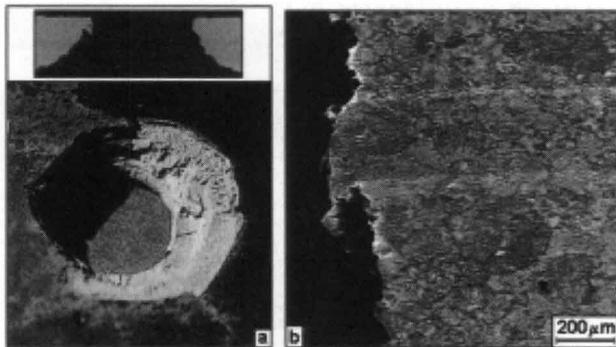


Figura 13. Sección y lado de salida del cráter pasante producido por el impacto de un proyectil 7,62C sobre LSAE1045C (a) y borde del cráter formado por 7,62C en LSAE1045B1 (b).

Cuando ocurre un impacto sobre un material, se generan ondas de compresión que viajan hacia la superficie opuesta al choque; si es una superficie libre o no empotrada, las refleja como ondas de tracción. El desconchamiento se produce cuando la suma algebraica de las ondas reflejadas, con las que todavía no lo han sido, supera el esfuerzo de fractura a tracción. En la figura 14 se ilustra el proceso de desconchamiento descrito anteriormente.

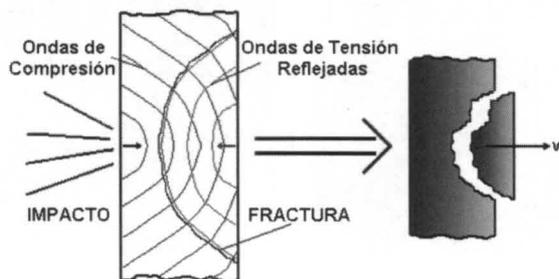


Figura 14. Modo de falla por desconchamiento "Scabbing" de un blanco.

• Agrietamiento perpendicular al eje de impacto en la superficie opuesta de los blancos

En algunos cráteres no pasantes formados sobre blancos de altas durezas, que no fallaron por el desconchamiento, se generaron grietas radiales (transversales) al eje de impacto en la superficie opuesta, las cuales son de naturaleza frágil. En la figura 15 se pueden apreciar dichas grietas, en la superficie opuesta del cráter producido, por el impacto del proyectil 5,56 SS109 sobre LSAE1045B3.



Figura 15. Grietas transversales de la superficie opuesta al impacto del proyectil 5,56 SS109 sobre LSAE1045B3.

El origen de estas grietas se explica por la condición de triaxialidad de esfuerzos de tensión que se alcanza en la superficie opuesta al impacto, la cual induce un comportamiento frágil del material. En la secuencia de la figura 11 se puede apreciar también cómo se forman estas grietas en la superficie opuesta al impacto, a la par que se están propagando las bandas de corte adiabáticas.

• Relación entre los mecanismos de deformación y fractura

Bajo el impacto de proyectiles sobre todas las microestructuras de las chapas ensayadas (ferrita, perlitas, bainitas y martensita revenida), se forma el maclaje debido a la alta velocidad de aplicación de la carga, fundamentalmente durante los primeros microsegundos del impacto, en los granos de ferrita o en las matrices ferríticas de la perlita, bainita o martensita revenida. Las maclas se forman en su mayoría cerca de la superficie de impacto.

En los siguientes microsegundos, el esfuerzo concentrado inicialmente en la región de impacto empieza a propagarse como una onda de esfuerzo a compresión, dirigiéndose hacia la superficie libre opuesta, donde es reflejada como onda de tracción; si la microestructura del material no es suficientemente resistente y tenaz como para resistir la acción de esta onda, se producirá el desconchamiento. Si el material soporta la acción de esta primera onda de tracción, no se presentará el desconchamiento y por lo tanto el blanco seguirá desacelerando al proyectil, generándose ondas de esfuerzo de menor amplitud, bajo la acción de las cuales empezará a presentarse una fluencia masiva del material ubicado alrededor del sitio de impacto, a través del deslizamiento interno de los granos y de las bandas de corte adiabáticas.

El deslizamiento masivo predominará sobre las bandas de corte, cuando la microestructura sea de baja resistencia mecánica (ferrita y perlitas), mientras que la participación de las bandas de corte será más importante en las estructuras de alta resistencia como las bainitas o la martensita revenida. Bajo la acción combinada de estos dos mecanismos de deformación plástica, el material de la chapa está siendo empujado en el sentido de avance del proyectil; con esto el abombamiento generado en la superficie opuesta al impacto puede originar, si se tiene una estructura de poca ductilidad como las perlitas finas o la martensita revenida a baja temperatura, el agrietamiento radial transversal debido a la condición de esfuerzos triaxiales. La continua propagación de las bandas de corte adiabáticas desembocará necesariamente cuando alcancen la superficie opuesta, en fractura dúctil.

CONCLUSIONES

- El maclaje mecánico se presentó en los granos de ferrita o en las matrices ferríticas de las estructuras perlíticas, bainíticas o de martensita revenida, en todos los aceros de las chapas impactadas.
- El porcentaje de la deformación por deslizamiento y el tamaño de las bandas de corte adiabáticas (largo y ancho) encontradas en los cráteres, son en general inversamente proporcionales a la dureza del blanco.
- En los blancos de alta dureza asociados a microestructuras bainíticas y de martensita revenida se encontró un predominio del comportamiento frágil, manifestado en la aparición de grietas radiales transversales o del desconchamiento.
- Las superficies de fractura dúctil de los cráteres fueron formadas a partir del mecanismo de las bandas de corte adiabáticas.
- La relación entre resistencia y tenacidad de la microestructura de las chapas, determina los mecanismos de deformación o fractura que se presentan en la formación de los cráteres.

AGRADECIMIENTOS

A Indumil por la colaboración logística prestada en la realización de las pruebas balísticas, sin las cuales hubiese sido imposible realizar este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. CASTRO, A., ESPEJO, E. y MARTÍNEZ, L., "Estudio de los Tipos de Cráteres Obtenidos en el Impacto de proyectiles 5.56 SS109, Sobre Blancos de Acero AISI-SAE 1045", En: *Revista de Metalurgia CENIM*. Enero-Febrero, 2000, Vol. 36: 24-32.
2. CASTRO, A., ESPEJO, E. y MARTÍNEZ, L., "Formación y Tipos de Cráteres Obtenidos Durante el Choque de proyectiles Contra Blancos de Acero", *Memorias Primer Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*. Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., 1999, Vol. 1: 358-372.
3. COLLINS, J., "Shock and Impact", *Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction and prevention*, 1a. ed., John Wiley & Sons, New York, United States, 1981, pp. 500-501.
4. CHANG, G., WOO, J., SUNGHAK, L. y KWANG, S., "Microstructural Development of Adiabatic Shear Bands Formed by Ballistic Impact in a WELDALITE 049 Alloy", En: *Metall. Trans. A.*, 1998, Vol. 29A: 477-483.
5. DIETER, G., "Plastic Deformation of Single Crystals", *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, McGraw-Hill, Singapore, 1988, pp. 133-34.
6. ESPEJO, E. y MARTÍNEZ, L., "Influencia de la Microestructura en la Eficiencia de Blindajes Balísticos Basados en Láminas de Acero", Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico presentado al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., 1998.
7. GERLACH, U., "Microstructural analysis of residual Projectiles, a new method to explain penetration mechanisms", *Metallurgical Transactions*, March, 1986, Vol. 17A: 435-442.
8. HINES, J., VECCHIO, K. y AHZI, S., "A Model for Microstructure Evolution in Adiabatic Shear Bands", En: *Metall. Trans. A.*, 1998, Vol. 29A: 191-203.
9. IRICK, E., *et al.*, "Numerical and Experimental Investigation of Adiabatic Shear Bands in Metals Under Low-Velocity Impact Conditions", *JMEPEG.*, 1995, Vol. 4: 709-716.
10. RAVID, M. y BODNER, S., "Dynamic Perforation of Viscoplastic Plates by Rigid Projectiles". En: *Int. J. Engng Sci.*, 1983, Vol. 21: 577-591.
11. XU, Y., WANG, X. y WANG, Z., "Formation and microstructure of Localized Shear Band in Low Carbon Steel". En: *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, Vol. 24: 571-576.