



# Relación

## entre desgaste y tenacidad para algunos aceros al carbono templados y revenidos a iguales niveles de dureza

Horacio Sierra Restrepo  
Carlos Alberto García  
Jorge Morales  
Juan Manuel Vélez

### RESUMEN

Se estudió la resistencia al desgaste abrasivo de tres aceros al Carbono comerciales (AISI 1016, 1050 y 1075) utilizando como tribosistema un equipo Pin – lija. Los resultados se correlacionan con los obtenidos en ensayos de resistencia al impacto y dureza. Los materiales estudiados fueron sometidos a tratamiento de temple y revenido en condiciones que permitieran obtener valores de dureza semejantes, entre 400 a 550 HV, para todos los contenidos de carbono. Se observó que la resistencia al desgaste aumentó con el incremento del porcentaje de Carbono en el material y con la dureza, acompañada por una caída en la resistencia al impacto. También se verificó que el acero AISI 1075 revenido a temperaturas altas, presentó una tenacidad similar a la del acero AISI 1050, pero con una mayor resistencia al desgaste para durezas entre 400 y 500 HV.

### ABSTRACT

The toughness and low-stress abrasive wear-resistance behavior of the plain carbon steels AISI 1016, 1050 y 1075 have been compared. These materials were quenched and tempered with same hardness levels, which were between 400 and 550 HV. The results showed that with an increase in the carbon content of steel, an increase on its wear-resistance and a reduction of its toughness are achieved. Also, it was verified that steel AISI 1075 tempered at high temperature has a similar toughness than

HORACIO SIERRA RESTREPO. Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

email: hsierra@perseus.unalmed.edu.co

CARLOS ALBERTO GARCÍA y JORGE MORALES. Ingenieros Mecánicos, Universidad Nacional de Colombia.

JUAN MANUEL VÉLEZ. Doctor en Ingeniería. Profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

the AISI 1050, but with greater wear-resistance for hardness between 400 and 500 HV.

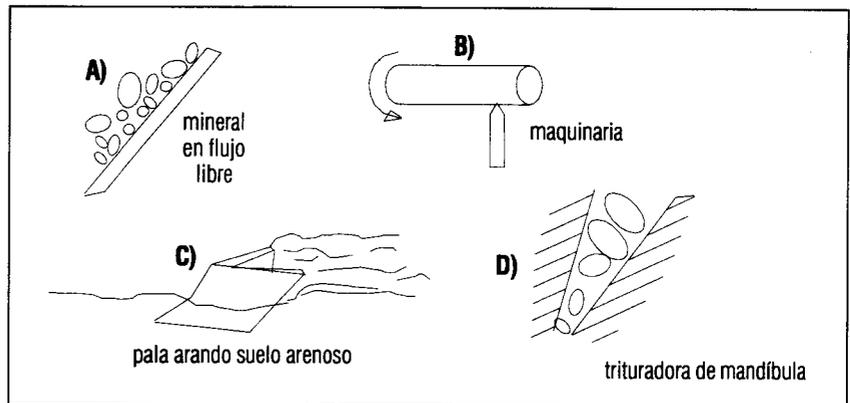
## 1. INTRODUCCIÓN

En nuestro medio, es una práctica común la fabricación de piezas sometidas a desgaste de bajo y medio esfuerzo como discos de arado y palas mecánicas utilizando aceros de alto contenido de Carbono como el AISI 1085 (Fiset, 1988). Estos aceros permiten lograr, a través de tratamientos de temple y revenido estructuras martensíticas revenidas con durezas que varían entre los 23 y 60 HRc. La correlación entre la resistencia al desgaste, la tenacidad y la dureza de aceros al Carbono tiene gran importancia en la evaluación del desempeño del material utilizado en la fabricación de elementos de máquina. Los tratamientos térmicos permiten cambiar las propiedades mecánicas de los aceros al Carbono (Valencia, 1986); (Sierra, 1985), mediante la modificación de la microestructura del material. Con el tratamiento térmico se puede controlar la forma y la distribución del carburo de hierro en la matriz ferrítica para obtener relaciones adecuadas entre la resistencia al impacto y la dureza para aplicaciones específicas (Chalmers, 1968); (Bhadesia, 1990); (Aginaco, 1994).

El desgaste (Yust, 1985); (ASM, 1992); (Khruschov, 1974) abrasivo consiste en la remoción o desplazamiento del material de una superficie debido al contacto con otra superficie en movimiento relativo, con asperezas duras de la misma, o con partículas duras desprendidas. Durante el desgaste abrasivo ocurren fenómenos de corte y deformación plástica de la superficie, o una combinación de ambos. Bajo un conjunto de condiciones, el

desplazamiento plástico, arado de la superficie, puede ocurrir sin remoción de material; en el otro extremo, la sección completa de la estría podría ser removida. En la **Figura 1** se presenta una clasificación del desgaste abrasivo según los tipos de contacto involucrados, los cuales incluyen el de dos cuerpos (el abrasivo se desliza sobre la superficie), y tres cuerpos (cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies),

**FIGURA 1. Tipos de contacto durante el desgaste abrasivo. A) dos cuerpos abiertos. B) dos cuerpos cerrados, C) tres cuerpos abiertos, y D) tres cuerpos cerrados**

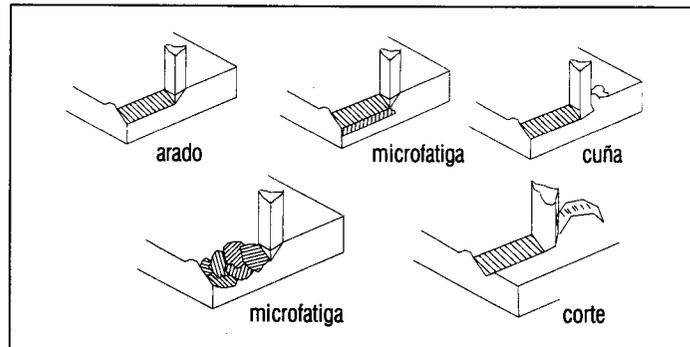


Otra forma conocida de clasificar el desgaste abrasivo es utilizando el nivel de esfuerzo presente entre las partículas de abrasivo y el material. Según este criterio pueden establecerse tres tipos de desgaste, a saber: abrasión de bajo esfuerzo, abrasión de alto esfuerzo y abrasión por socavado. La abrasión de bajo esfuerzo ocurre cuando los esfuerzos sobre las partículas de abrasivo no exceden su límite de rotura, esta condición se presenta típicamente durante el movimiento de tierra húmeda. La abrasión de alto esfuerzo ocurre cuando dos superficies desgastándose aprisionan las partículas de abrasivo con suficiente fuerza para romperla, y por último el desgaste por socavado representa una situación en la que piedras u otro abrasivo corta la superficie desgastada con suficiente fuerza para estriar la superficie profundamente. En la **Figura 2** se ilustran los mecanismos que pueden estar presentes en el proceso de desgaste abrasivo.

**En nuestro medio, es una práctica común la fabricación de piezas sometidas a desgaste de bajo y medio esfuerzo como discos de arado y palas mecánicas utilizando aceros de alto contenido de Carbono como el AISI 1085. Estos aceros permiten lograr, a través de tratamientos de temple y revenido estructuras martensíticas revenidas con durezas que varían entre los 23 y 60 HRc.**

Khruschov (Khruschov, 1974) encontró una relación lineal entre la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de diferentes metales puros. Un comportamiento semejante fue encontrado para aceros tratados térmicamente.

**FIGURA 2. Cinco mecanismos de desgaste abrasivo**



La respuesta del material a las sollicitaciones generadas durante el desgaste abrasivo depende de sus propiedades mecánicas. La resistencia del acero a la penetración y/o corte por partículas duras en contacto con la superficie aumenta con la dureza. Un acero de alta dureza presenta mayor oposición a la penetración y al corte al contacto con partículas duras comparativamente con aceros de media dureza, sin embargo, su desempeño en la práctica se ve comprometido debido a su fragilidad.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la posible correlación entre la resistencia al desgaste abrasivo y la resistencia al impacto de aceros al carbono, para diferentes contenidos de carbono, en la franja de durezas entre 400 y 550 HV.

**Otra forma conocida de clasificar el desgaste abrasivo es utilizando el nivel de esfuerzo presente entre las partículas de abrasivo y el material. Según este criterio pueden establecerse tres tipos de desgaste, a saber: abrasión de bajo esfuerzo, abrasión de alto esfuerzo y abrasión por socavado.**

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Características del Material

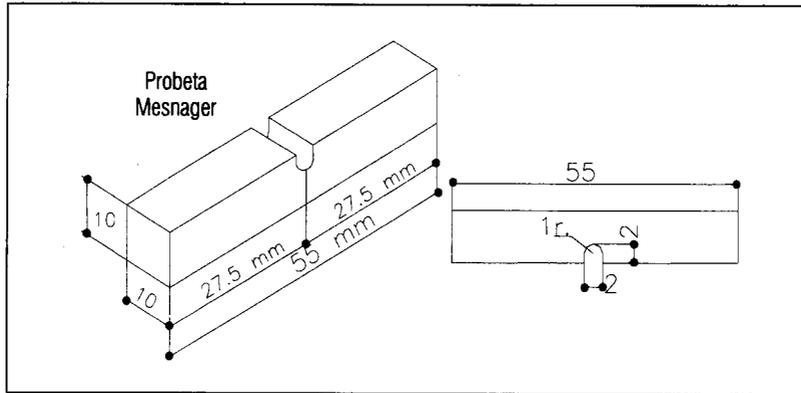
Fueron estudiados los aceros AISI 1016, 1050 y 1075, cuyas composiciones químicas determinadas por análisis espectrométrico se dan en la **Tabla 1**.

**TABLA 1. Composición química de los aceros ensayados**

Acero	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Cr	%Cu	%Mo	%Al	%Sn	%V
1016	0.16	0.87	0.31	0.022	0.012	0.61	0.58	0.24	0.192	0.012	0.031	0.016
1050	0.48	0.83	0.22	0.012	0.013	0.05	0.06	0.11	0.16	0.007	0.013	0.001
1075	0.75	0.68	0.17	0.004	0.010	0.04	0.07	0.07	0.016	0.018	0.007	0.001

Para el estudio de la tasa de desgaste abrasivo se utilizaron barras cilíndricas de  $\phi 6 \times 30$  mm, obtenidas a partir de redondo de 3/4". Para las pruebas de impacto se utilizaron probetas del tipo Mesnager, ilustradas en la **Figura 3**.

**Figura 3. Diagrama de la probeta Mesnager <sup>10</sup>**



**2.2 Tratamientos Térmicos**

Los aceros AISI 1016, 1050 y 1075 fueron normalizados y posteriormente reaustenizados a 920°C, 845°C y 830°C, temperaturas desde las cuales se efectuó el temple con enfriamiento en agua agitada, agua en calma y aceite agitado respectivamente. En la Tabla 2 se presentan los ciclos de tratamientos térmicos aplicados. Para la realización de los revenidos se empleó el método propuesto por Holloman y Jaffe en 1945 y modificado por Grange y Baughman en 19563, el cual se sintetiza en la ecuación 1. Este parámetro permite, a partir del porcentaje de Carbono y del contenido de aleantes, determinar para aceros al Carbono y de media aleación, la

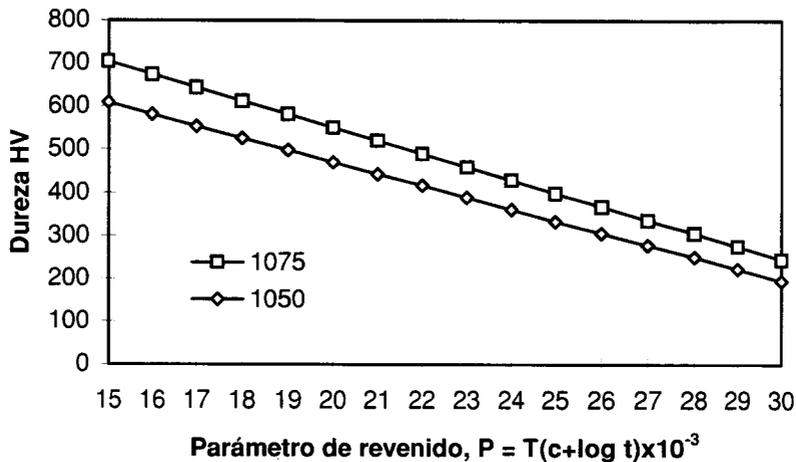
temperatura y tiempo de revenido para lograr una dureza dada, siempre que la temperatura esté entre 340°C y 650°C.

$$P = T(C + \log t) \cdot 10^3 \quad (1)$$

- en la cual: P = Parámetro de revenido.
- T = Temperatura absoluta de revenido (°R)
- t = Tiempo de revenido en horas.
- C = Constante = 18 para aceros.

En la **Figura 4** se observa la gráfica de la dureza estimada de revenido para aceros AISI 1050 y AISI 1075, mas no para el AISI 1016, ya que para éste no es posible aplicarse el parámetro en el intervalo de temperatura adecuado.

**FIGURA 4. Dureza estimada de martensita revenida para los aceros AISI 1050 y AISI 1075**



## 2.3 Medición de Dureza y Metalografía

Las muestras para observación metalográfica fueron desbastadas con papeles abrasivos (200 a 600 AFS) y luego con alúmina de 7  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ . La dureza fue medida en escala Vickers con carga de 62.5 kg. en un durómetro Wolpert Universal. Para el ataque químico se empleó Nital al 2%. La observación metalográfica se realizó mediante microscopía óptica.

**TABLA 2. Tratamientos térmicos efectuados**

Material AISI 52100	Temperatura de revenido (°C)	Medio de temple	Dureza esperada (HV)	Temperatura de revenido (°C)	Tiempo de revenido (minutos)	Dureza final en las probetas (HV)
1016	920	agua agitada	450	No	No	437
			400	200	60	383-397
1050	845	agua	550	370	15	548
			500	370	30	493
			450	370	50	454-463
			400	430	50	390
1075	830	aceite agitado	600	370	10	599
			550	370	20	536
			500	420	15	493
			450	390	90	447
			400	450	30	397

## 2.4 Ensayo de Desgaste

Para la realización de la prueba de desgaste abrasivo se emplea una máquina de banda abrasiva en movimiento, a la cual le fue adaptado un mecanismo de desplazamiento transversal que garantiza el movimiento de la probeta siempre sobre una pista de banda abrasiva virgen con grano AFS120. Se aplicó una carga normal de 2 kgf. Antes de cada ensayo las muestras fueron sometidas a un desgaste de asentamiento en lija de la misma granulometría con el objetivo de homogeneizar la superficie inicial. La rata de desgaste fue obtenida a través de la medida de la pérdida de masa dividida por la distancia, expresada en mg./m. Esta pérdida de masa fue determinada usando una balanza electrónica con 0.0001 g de precisión. La distancia de recorrido para todos los ensayos fue de 11600 mm  $\pm$  40.

## 2.5 Ensayo de Impacto

El procedimiento de ensayo se ajustó a la norma ASTM E-23, excepto que las probetas empleadas fueron del tipo Mesnager

(Böhler, Edelstal Handguch), las cuales presentan entalla en forma circular como se ilustra en la **Figura 3**. Durante los ensayos, no se registraron cambios significativos de temperatura o humedad relativa, las cuales permanecieron en un promedio de 19°C y 59% respectivamente. Cada una de las probetas se posicionó individualmente, esto es que para cada una se verificó que el péndulo golpeará exactamente en la línea opuesta a la entalla, con el fin de evitar variaciones muy grandes en los resultados originados en el cambio de sección transversal.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Pérdida de Masa

La **Figura 5** muestra la variación de la resistencia al desgaste, expresada como el inverso de la pérdida de masa por unidad de longitud con respecto a la dureza de revenido dada en Vickers para los aceros estudiados. De igual forma, se presenta la variación de la energía absorbida (Julios), obtenida en el ensayo de impacto.

El análisis de la **Figura 5** permite señalar que al aumentar la dureza, se produce un aumento de la resistencia al desgaste, siendo esta variación lineal como fue sugerido por Krushov. En la **Figura 6** se presenta el inverso de la variación de pérdida de masa por unidad de longitud con respecto al contenido de Carbono para diferentes niveles de dureza, variación que puede considerarse lineal. Conforme aumenta el contenido de Carbono, la resistencia al desgaste aumenta en forma apreciable para los diferentes niveles de dureza con una pendiente muy similar, tal como se aprecia en la **Figura 6**.

Las diferencias en la resistencia al desgaste son del orden del 7 al 11% para el AISI 1016 y el AISI 1050. Para el AISI 1016 y el AISI 1075 las diferencias son de aproximadamente entre el 26 y 32%. Comparando el AISI 1050 y el AISI 1075 la diferencia en la resistencia al desgaste para una dureza determinada varía entre el 12 y el 18%. Además, se aprecia que para los diferentes aceros estudiados, a mayor dureza se presenta mayor resistencia al desgaste.

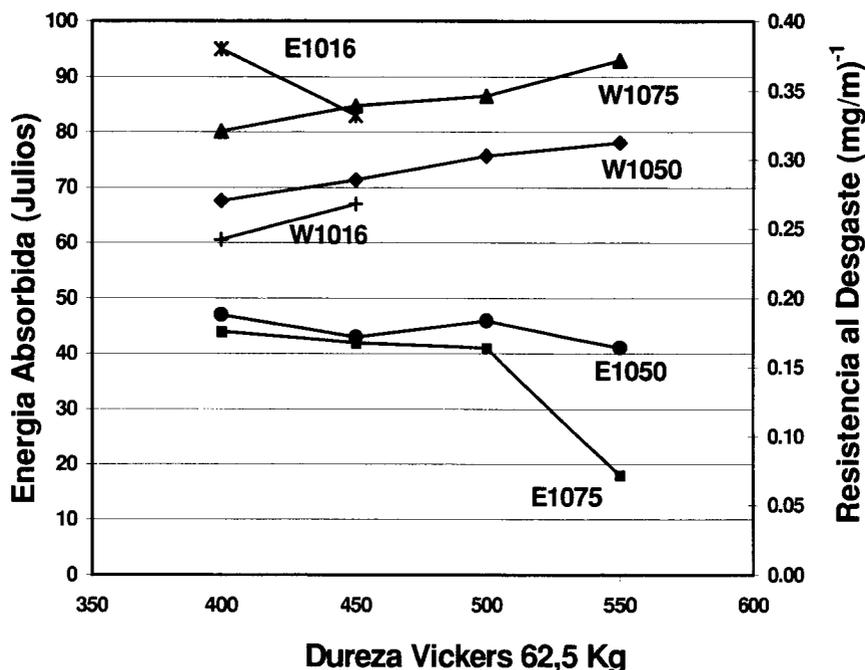
### 3.2 ENERGÍA ABSORBIDA DURANTE EL IMPACTO

La variación de la energía de impacto en las probetas Mesnager con respecto a la dureza, también es ilustrada en la **Figura 5**.

El análisis de esta información permite señalar que el acero AISI 1050 muestra poca variación de energía absorbida en el ensayo de impacto con respecto a la dureza, en el rango de durezas entre 400 y 550HV. El acero AISI 1075 presentó un comportamiento muy similar al acero 1050 hasta una dureza de 500HV por encima de la cual sufrió una fuerte caída de la energía absorbida.

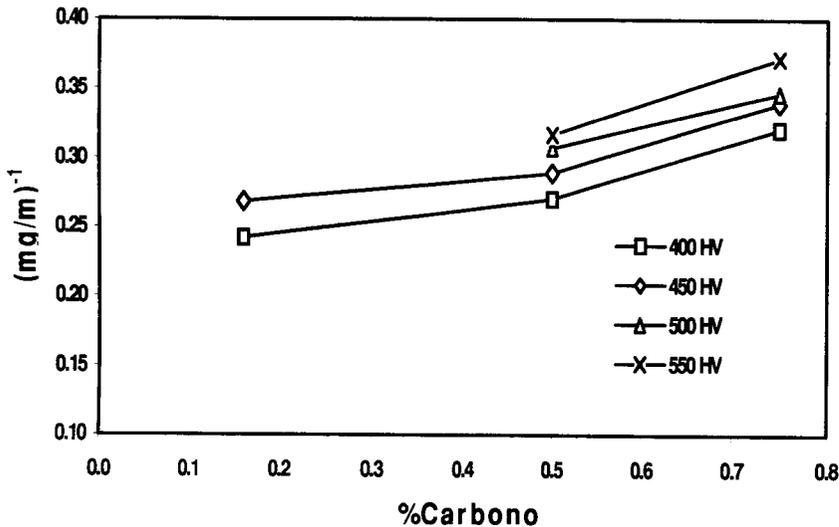
Debe notarse que la variación de dureza y energía de impacto fue conseguida con diferentes condiciones de tratamiento (tiempo y temperatura de revenido), lo cual puede tener influencia importante en la microestructura del acero y por tanto en sus propiedades mecánicas.

**FIGURA 5. Energía Absorbida (Julios) y Resistencia al Desgaste Vs. Dureza Vickers, 62.5 Kg para diferentes aceros al Carbono templados y revenidos. E: Energía Absorbida. W: Resistencia al Desgaste.**



Para el acero AISI 1016, con un revenido a 200 °C, hubo una disminución de la dureza de 437 HV a 400 HV, logrando un incremento de cerca del 20% en la energía absorbida. Para niveles de dureza entre 400 y 450 HV el acero 1016, dobla en resistencia al impacto a los aceros 1050 y 1075, sin embargo, su resistencia al desgaste abrasivo de bajo esfuerzo es inferior respecto a los aceros de mayor contenido de carbono. Esto puede ser de interés en algunas aplicaciones como por ejemplo discos de arados.

**FIGURA 6. Resistencia al desgaste contra porcentaje de Carbono para iguales niveles de dureza**



### 3.3 MICROESTRUCTURAS

La microestructura que se muestra en la **Figura 7** corresponde a martensita masiva, típica de los aceros de bajo contenido de Carbono. El acero AISI 1016 produjo un temple total ya que la dureza lograda (437 HV) es acorde con la correspondiente dureza teórica. En los aceros AISI 1050 y AISI 1075 templados y revenidos a un mismo nivel de dureza, a medida que aumenta la temperatura de revenido o el tiempo de sostenimiento a una misma temperatura (>350 °C), el proceso de esferoidización se hace más intenso, dando como resultado una microestructura de ferrita más carburos globulares embebidos en ella. La resistencia al desgaste en aceros de alto Carbono es mayor que para aceros de más bajo contenido de Carbono, dado que la cantidad de carburos precipitados durante el revenido es proporcional a la cantidad de Carbono y estos actúan como superficie de protección de las superficies blandas, la morfología de las estructuras se pueden comparar en las **Figuras 7 a 16**. En las **Figuras 12 y 16** se ve la diferencia en las microestructuras del AISI 1050 y AISI 1075 revenidos para niveles de dureza de 400 HV con respecto al acero AISI 1016, **Figura 8**. Algo similar se puede establecer para el nivel de dureza de 450 HV, **Figuras 7, 11 y 15**. En los AISI 1050 y AISI 1075 ha habido una precipitación significativa de carburos por revenidos a tiempos más largos y a mayores temperaturas, produciendo estructuras más estables.

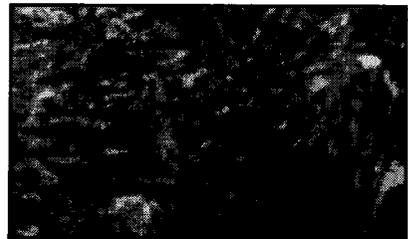
**FIGURA 7. AISI 1016  
templado en agua.  
436 HV. Nital 2%. 1050X**



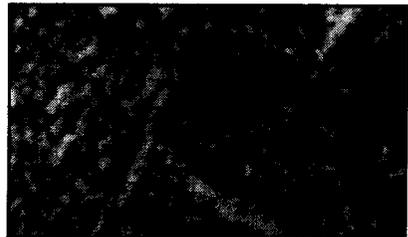
**FIGURA 8. AISI 1016 rev. 60 min  
200°C 400HV. Nital 2%. 1050X**



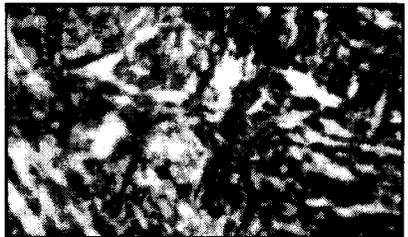
**FIGURA 9. AISI 1050 rev 370°C  
15 min. 548 HV. Nital 2%. 1050X**



**FIGURA 10. AISI 1050 rev 370°C  
30 min 493. HV. Nital 2%. 1050X**



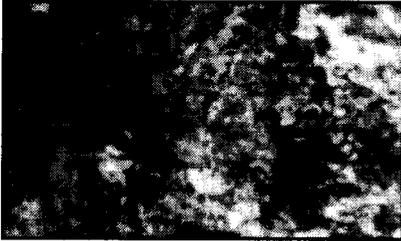
**FIGURA 11. AISI 1050 rev 370°C  
50 min. 450 HV. Nital 2%. 1050X**



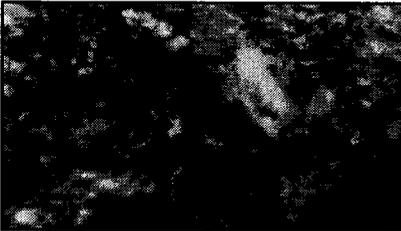
**FIGURA 12. AISI 1050 rev 430°C 50  
min. 390 HV. Nital 2%. 1050X**



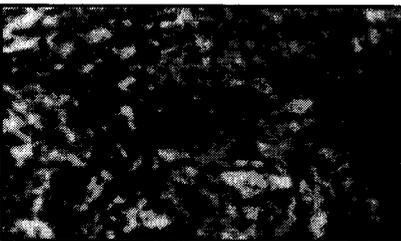
**FIGURA 13. AISI 1075 rev 370°C  
20 min. 536 HV. Nital 2%. 1050X**



**Figura 14. AISI 1075 rev 420°C  
15 min. 493 HV. Nital 2%. 1050X.**



**FIGURA 15. AISI 1075 rev 390°C  
90 min. 447 HV. Nital 2%. 1050X.**



**FIGURA 16. AISI 1075 rev 450°C  
30 min. 397 HV. Nital 2%. 1050X.**



### 3.4 Relación entre Resultados

- Para todos los aceros estudiados, la resistencia al desgaste abrasivo de bajo esfuerzo aumentó linealmente con la dureza. De otro lado, la tenacidad no presentó un cambio lineal con respecto a la dureza. Para aceros de bajo Carbono (0.2%), la tenacidad cae rápidamente y para los aceros de medio y alto Carbono (0.5 y 0.75%), la tenacidad se mantiene constante para durezas entre 400 y 500 HV. Para durezas superiores hay una disminución de tenacidad siendo más acentuada en el acero de alto Carbono, debido, posiblemente, al efecto combinado del aumento volumétrico de carburos y la morfología laminar de los mismos.
- Los aceros AISI 1050 y 1075, a pesar de presentar comportamiento al impacto muy similar entre sí para niveles de dureza entre los 400 y 500 HV, presentan un comportamiento diferente al desgaste, explicable por las fracciones volumétricas de carburos existentes en cada uno de ellos. Por esta última razón, el acero AISI 1075 presenta menores tasas de desgaste que los aceros 1016 y 1050.
- Para durezas del orden de 550 HV el acero de 0,5% C presenta mayor capacidad de absorber energía durante el impacto que el acero de 0,75% C; sin embargo, la resistencia al desgaste de este último es mayor. Esto sugiere que la resistencia al impacto no es la variable que gobierna el proceso de desgaste en el tribosistema utilizado en el presente trabajo, el cual es considerado de bajo esfuerzo. Debe haber una combinación

óptima de dureza y tenacidad para lograr el máximo desempeño del acero en estas aplicaciones.

- El aumento del contenido de Carbono produce un aumento de la resistencia al desgaste (figura 6). Este incremento puede ser atribuido a la mayor fracción volumétrica de carburos lograda con mayores contenidos de Carbono, aún para durezas similares.

### 3. CONCLUSIONES

- Para aceros simples al Carbono templados y revenidos, a medida que se aumenta el contenido de Carbono, la resistencia al desgaste abrasivo de bajo esfuerzo aumenta, y para iguales niveles de dureza la tenacidad baja gradualmente.
- En aceros de alto Carbono (0.75% C), para niveles de dureza superiores a 500HV, la tenacidad baja considerablemente debido, posiblemente, al aumento en la cantidad de carburos y la morfología laminar de los mismos.
- Para durezas superiores a 500 HV, es preferible emplear el acero AISI 1050, ya que éste presenta más tenacidad (hasta 127% superior a 550 HV) y la diferencia en resistencia al desgaste es relativamente baja (máximo 17% menos que la del acero AISI 1075).
- Para el acero AISI 1075 son preferibles revenidos a mayor temperatura y tiempos largos que proporcionen durezas inferiores a 500 HV y sus estructuras presenten gran cantidad de carburos precipitados de forma esférica, cuando lo necesario es una moderada tenacidad y resistencia al desgaste.

- Para un mismo contenido de Carbono, la resistencia al desgaste está determinada por la cantidad de carburos, mientras que la tenacidad está determinada por la cantidad de carburos precipitados y su morfología.
- Es evidente que la obtención de iguales niveles de dureza de revenido mediante el método propuesto por Holloman y Jaffe, sólo aplica a esta propiedad y a la resistencia a la tracción y no es extensible para obtener niveles iguales en otras propiedades como resistencia al desgaste y resistencia al impacto, las cuales son fuertemente influenciadas por la microestructura, la cantidad de carburos precipitados y su morfología.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aginaco, V. y Onoro, J. (1994). Teoría de la Nucleación Martensítica. En: *Revista Metalúrgica*. 30 (2). Pp 100-111.
- ASM HANDBOOK: FRICTION, LUBRICATION AND WEAR TECHNOLOGY. (1992). vol. 18. ASM INTERNATIONAL. 1992.
- Bhadesia, H.K y Christian, J.W. (1990). Bainite in Steels. En: *Metallurgical Transactions A*. Vol. 21A. pp. 767-795.
- Böhler Edelstahl, Handbuch. Gebr. Böhler & Co. Aktiengesellschaft, Edelschahlwerke. Pp. 496-501.
- Chalmers, Bruce. (1968). Metalurgia Física. 2da. Ed. Madrid: Aguilar. 447 p.
- Fiset, M. & Balley, Denis. (1988). Comparison of Laboratory and Field Abrasive Wear. En: *CIM Bulletin*. Vol. 81, No. 916. pp. 85-92.
- Khrushov, M.M. (1974). Principles of Abrasive Wear. p 69-88. En: *Wear* No. 28, pp. 69-88.
- Sierra Restrepo, Horacio. (1985). Guías para la Selección de Aceros. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Valencia, Asdrúbal. (1986). Tecnología del Tratamiento Térmico de los Metales. Medellín: Universidad de Antioquia Ediciones Previas. Facultad de Ingenierías - CESET.
- Yust, C.S. (1985). Tribology and Wear.. En: *International Metals Reviews*. Vol. 30 No. 3, pp. 141-154. 1985.