

# Capítulo IV

## Discusión de resultados

### 1. Fricción

En todos los materiales se observa un periodo de *break in* con un máximo de fricción, que coincide con el inicio del arranque de material. Como podemos ver en las gráficas (figuras 4.1 a 4.3), la distancia de fricción constante inicial va aumentando según el orden: Cu-nano direccional>Cu-nano equiaxial/direccional>Cu-nano equiaxial, y está de acuerdo con el orden de resistencia al desgaste, como se discutirá mas adelante. Cuanto mayor es la distancia de baja fricción, mayor es la resistencia al desgaste del material.

A continuación se muestran las gráficas que representan el coeficiente de fricción frente a la distancia recorrida. Para cada muestra de cobre se comparan los resultados en sentido longitudinal y transversal.

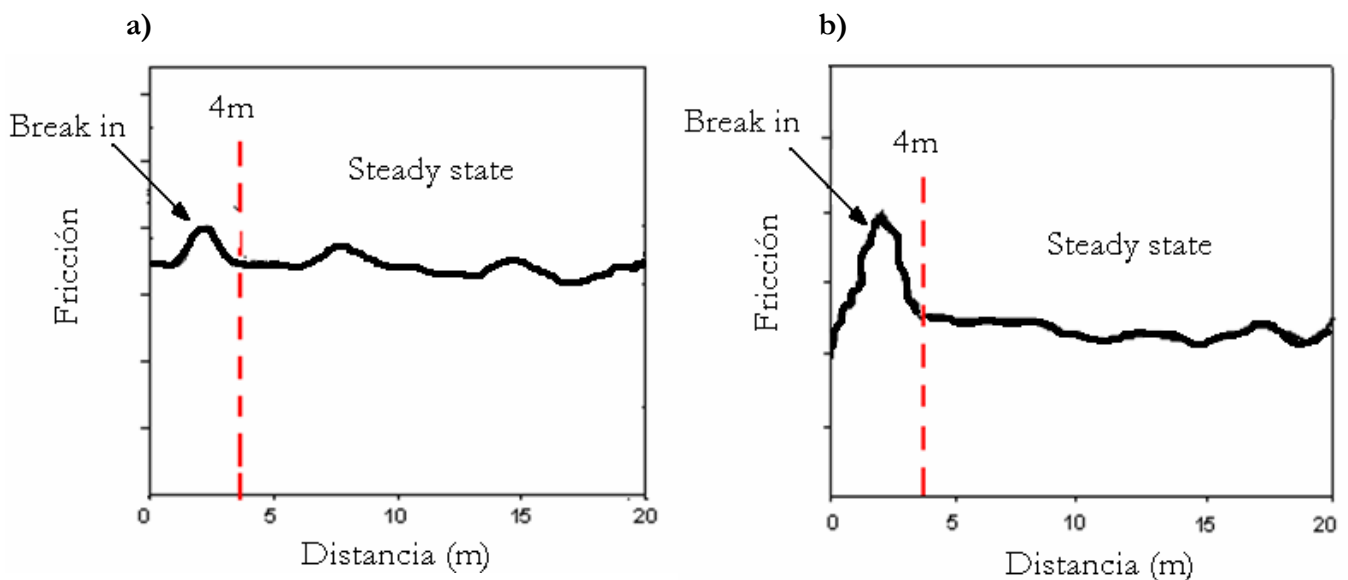


Fig 4.1. Coeficiente de fricción vs distancia en Cu-nano equiaxial.

a) longitudinal, b) transversal.

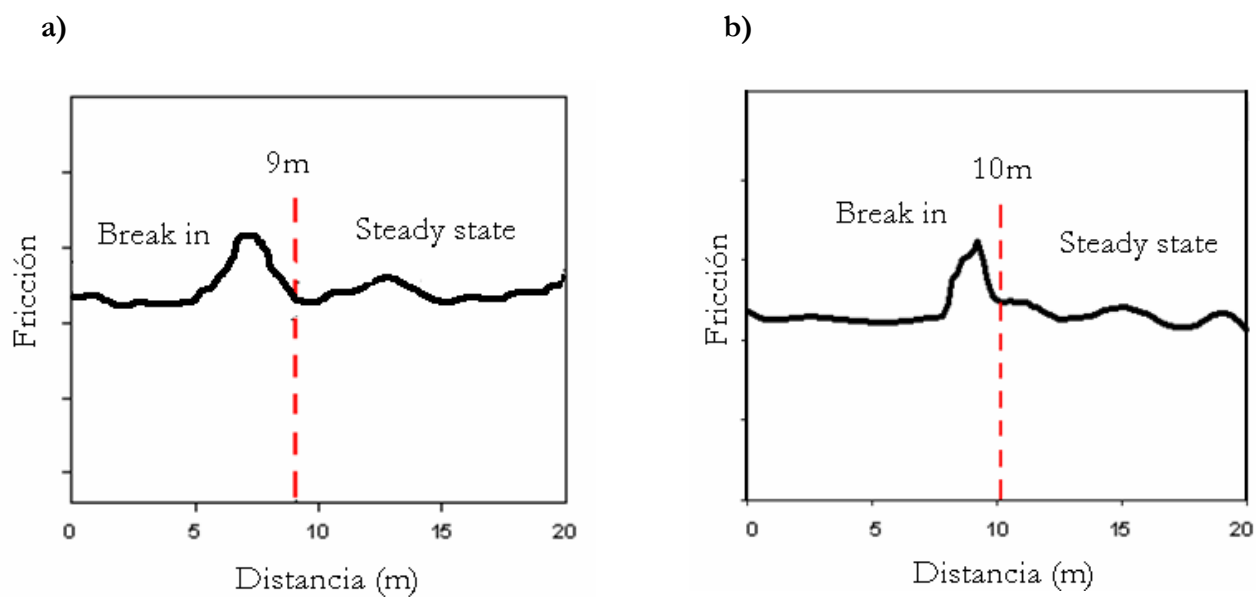


Fig 4.2. Coeficiente de fricción vs distancia en Cu-nano equiaxial/direccional.

a) longitudinal, b) transversal.

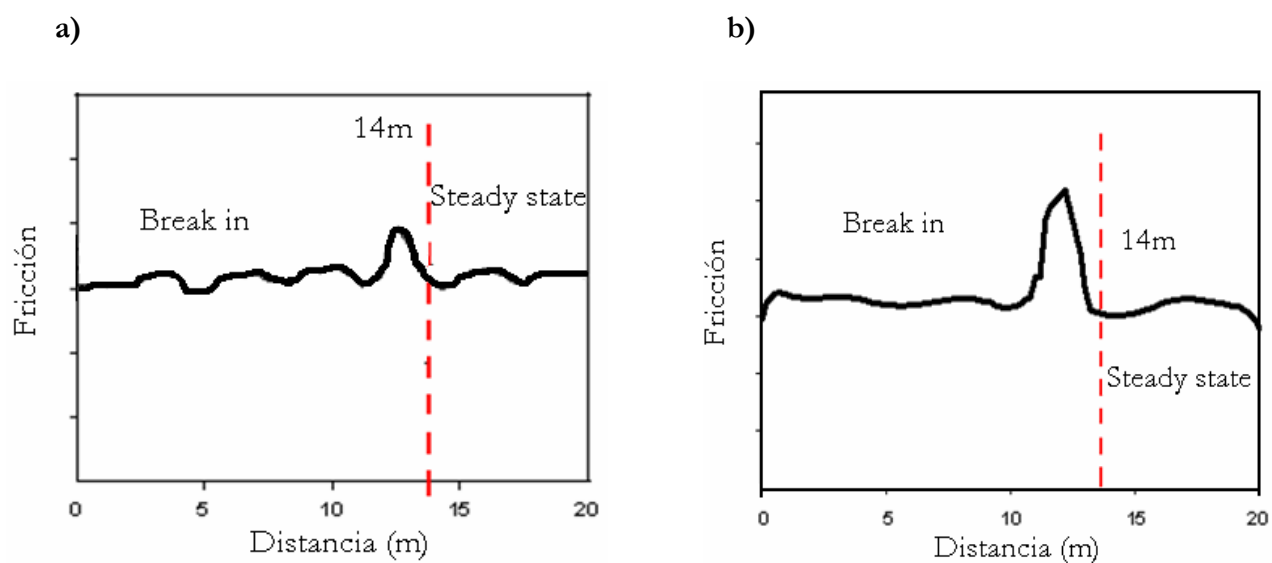


Fig 4.3. Coeficiente de fricción vs distancia en Cu-nano direccional.

a) longitudinal, b) transversal.

## 2. Desgaste

Vamos a contrastar los valores de desgaste obtenidos por dos métodos diferentes. Uno será el de tomar un valor medio del ancho de la huella y calcular el volumen desgastado a partir de la fórmula recomendada en la norma ASTM G-133-05. El segundo método será el de calcular el área efectiva de desgaste en una sección transversal de la huella mediante un perfilómetro, y a partir de éste hallar el volumen de desgaste.

### 2.1. Desgaste Según la Norma ASTM G-133-05.

En trabajos anteriores, se realizaron ensayos de desgaste de estos mismos materiales bajo la configuración punzón sobre disco [7], observándose el siguiente orden de resistencia a desgaste: Cu-nano direccional > Cu-nano equiaxial/direccional > Cu-nano equiaxial > Cu-micro. En los ensayos punzón sobre disco el sentido de deslizamiento es independiente a la orientación del grano del material.

Con el objetivo de conocer el comportamiento a desgaste de estos materiales en función de la orientación del grano (Figura 4.4), se programaron ensayos tipo bola sobre plano con deslizamiento oscilatorio en dos direcciones perpendiculares (Figura 4.5).

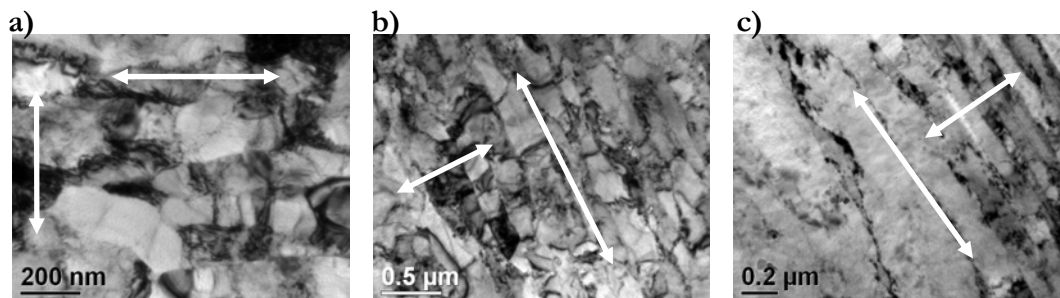


Figura 4.4. Microestructura de los materiales nanoestructurados: a) Cu-nano equiaxial; b) Cu-nano equiaxial/direccional y c) Cu-nano direccional.

En la figura 4.6 y 4.7 se representan los valores de desgaste, en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente, para los cuatro materiales estudiados. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en los ensayos punzón sobre disco. Los materiales nanoestructurados muestran una mejor resistencia a desgaste que el material microestructurado. Considerando los materiales con estructura nanocristalina, el menor valor de volumen de desgaste lo presentó el Cu-nano direccional.

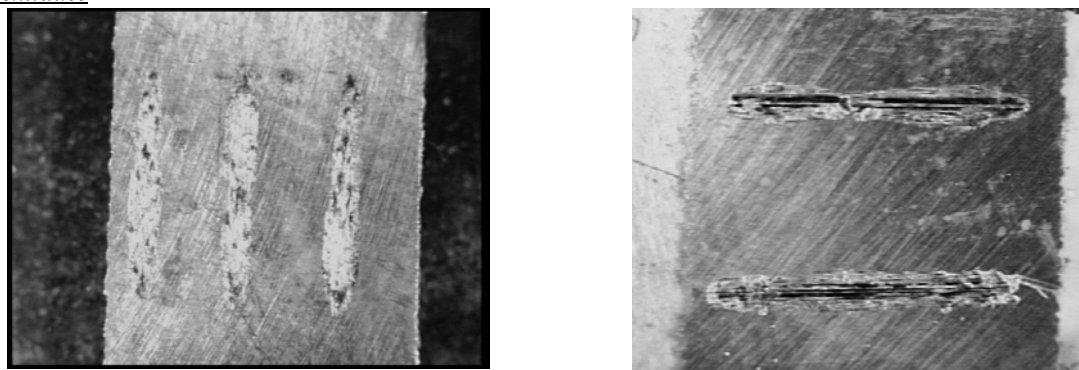


Figura 4.5. Huellas de desgaste después de los ensayos realizados en: a) dirección longitudinal; b) dirección transversal.

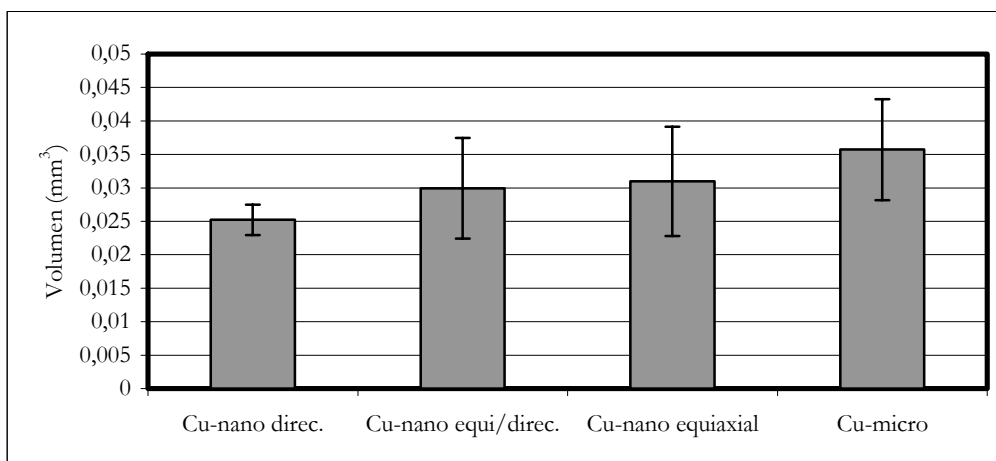


Fig.4.6. Desgaste según norma ASTM G-133 en huella longitudinal.

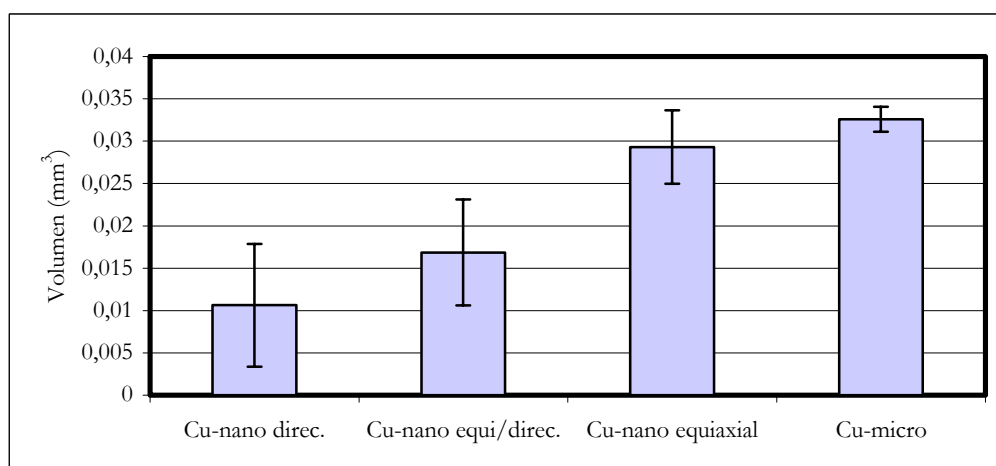


Fig.4.7. Desgaste según norma ASTM G-133 en huella transversal.

En la figura 4.8 podemos observar que para el Cu-micro y el Cu-nano equiaxial, los valores de desgaste son similares en ambas direcciones de deslizamiento. Mientras que en aquellos materiales con granos orientados, se observa un menor desgaste en la dirección perpendicular a dicha orientación. Este efecto es especialmente importante en Cu-nano direccional, como era de esperar, dada la anisotropía de la microestructura de este material, que no contiene granos equiaxiales.

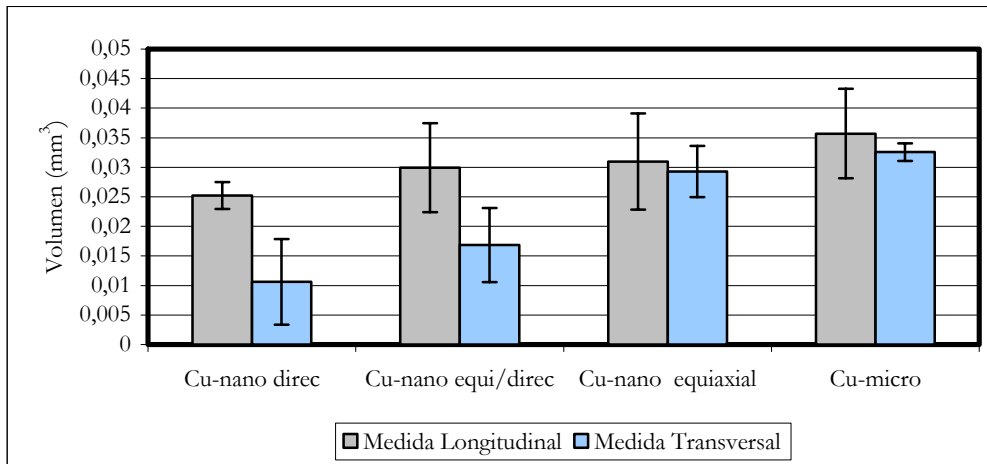


Fig.4.8. Desgaste según norma ASTM G-133. Comparativa longitudinal-transversal.

En la figura 4.9 podemos ver más claramente la evolución del desgaste en los dos tipos de ensayos (huella longitudinal y transversal).

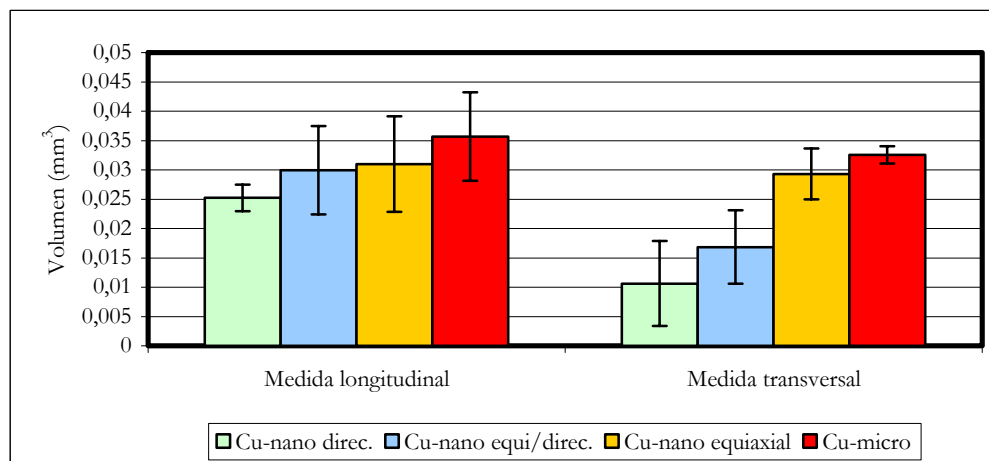


Fig. 4.9. Desgaste según norma ASTM G-133. Comparativa entre tipos de cobre nanoestructural.

## 2.2 Desgaste según datos obtenidos en el perfilómetro.

Vamos a contrastar los resultados de desgaste obtenidos mediante la norma ASTM G-133 con los datos que aporta el análisis de las huellas mediante un perfilómetro. El método para calcular el desgaste a partir del cálculo del área útil con un perfilómetro se explica en el capítulo III, apartado 3.5 (medida del volumen de desgaste).

En la figura 4.10 y 4.11 se muestran las áreas negativa y positiva, respectivamente, de la sección transversal de una huella hallada con el perfilómetro.

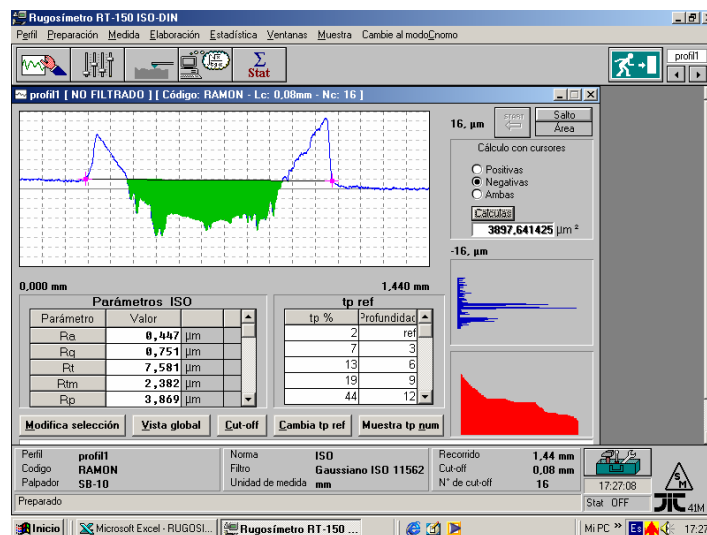


Fig.4.10. Área negativa de la sección transversal de una huella obtenida mediante el perfilómetro.

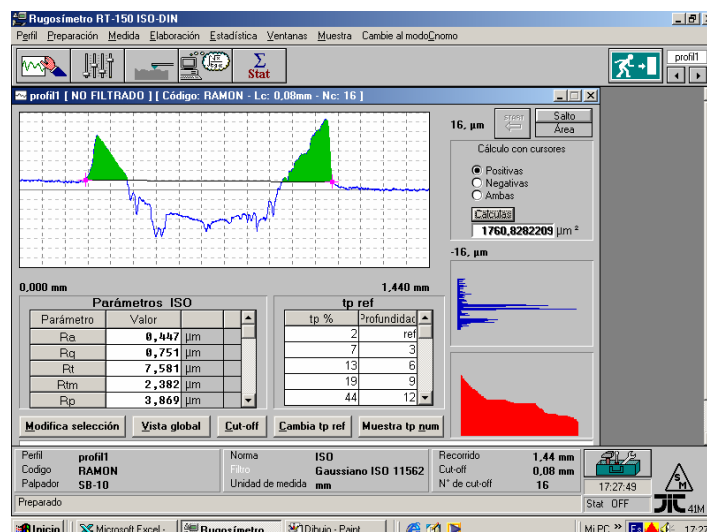


Fig.4.11. Área positiva de la sección transversal de una huella obtenida mediante el perfilómetro.

En la figura 4.12 se muestran los resultados obtenidos. Observamos que, aunque cuantitativamente no se corresponden con los datos hallados a partir de la norma ASTM G-133, sí existe una correlación cualitativamente hablando. La tendencia es exactamente la misma, el desgaste aumenta en el mismo orden: Cu-micro>Cu-nano equiaxial>Cu-nano equi/direc.>Cu-nano direc.

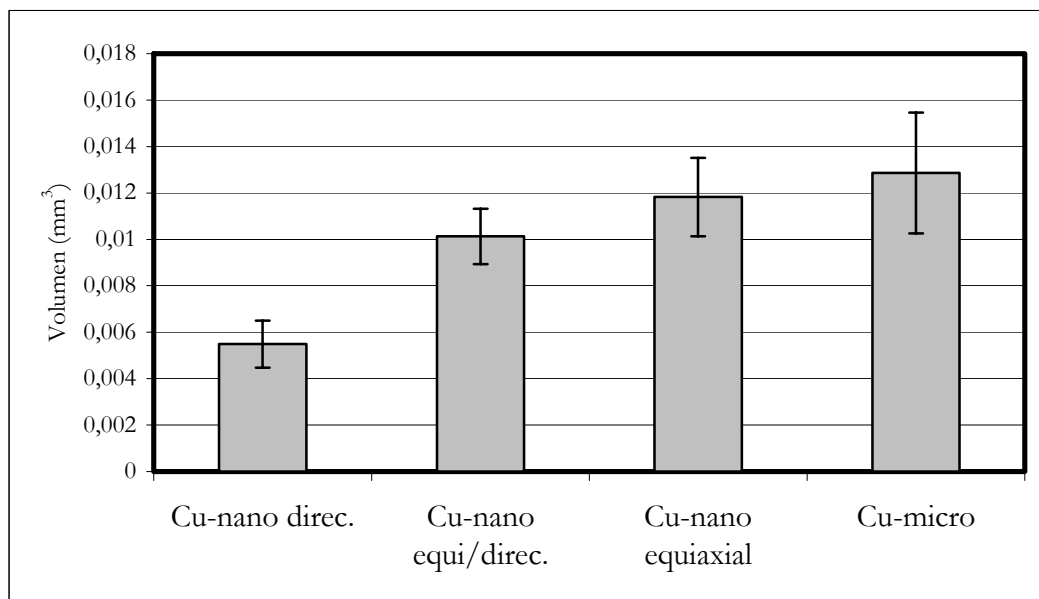


Fig.4.12. Medida del desgaste a partir del perfilómetro en huella longitudinal.

Al encontrarse estos resultados no se analizaron las huellas transversales, ya que el objetivo de éste apartado era corroborar que los resultados obtenidos por el anterior método eran correctos.

### 3. Comparación entre tribómetros.

Vamos a comparar los factores de desgaste en cada uno de los tipos de cobre ensayados. Los ensayos a considerar serán los correspondientes a dos tipos de tribómetro:

- Punzón sobre disco (Pin on disk): Movimiento circular. No tiene en cuenta la orientación del grano en la estructura del material.
- Movimiento linal alternativo (Reciprocating): Consideraremos, dentro de este tipo de ensayo, el movimiento en sentido longitudinal y transversal.

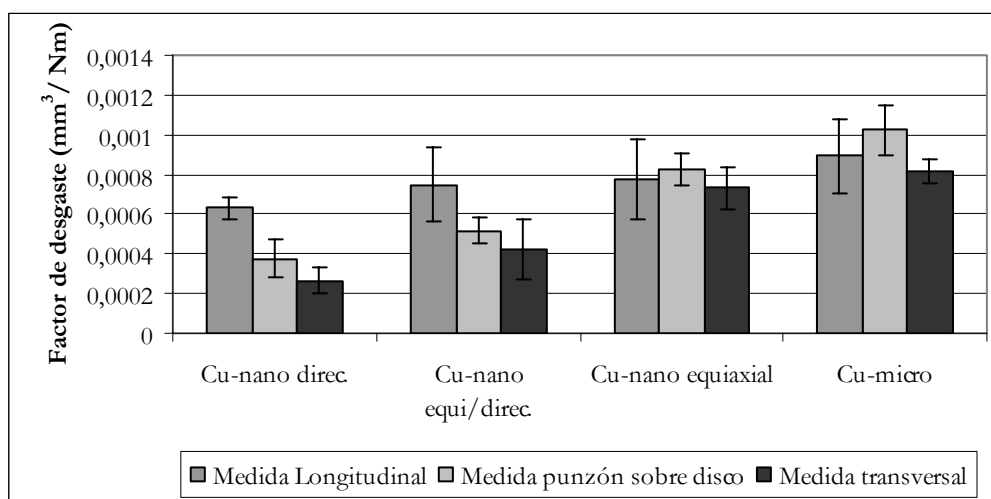


Fig.4.13. *Comparativa entre tribómetros.*



En la figura 4.13 se comparan los valores de desgaste para todos los ensayos realizados. Se confirma que cuando el ensayo es tipo punzón sobre disco, dado que el sentido de deslizamiento es independiente de la orientación de la microestructura, los valores para los materiales con granos orientados son intermedios de los obtenidos en las direcciones longitudinal y transversal a la orientación del grano [7]. En los materiales donde los granos no se encuentran orientados según una dirección preferente (Cu-nano equiaxial y Cu-micro) el ensayo de punzón sobre disco ocasiona un mayor factor de desgaste.

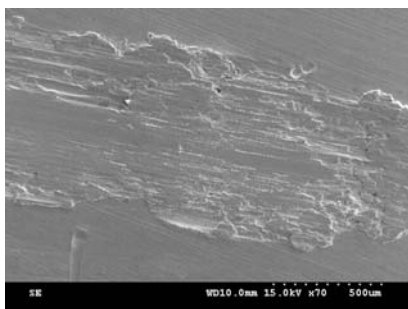
## 4. Mecanismos de desgaste.

Con el fin de establecer los mecanismos de desgaste que operaron en todos los ensayos, se efectuaron básicamente dos tipos de acciones. Por una parte se observaron las bolas de acero utilizadas para realizar los ensayos. En segundo lugar se observaron las huellas producidas con ayuda de un microscopio electrónico de barrido (SEM) con el que además se hicieron estudios EDX tanto de las huellas como de las bolas.

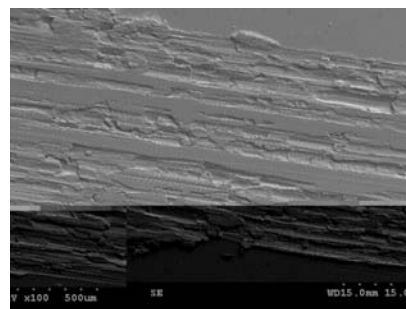
### 4.1. Análisis de las huellas.

De los resultados obtenidos para los volúmenes de desgaste, deducimos que las huellas serán mas anchas según mayor sea el volumen desgastado. Como podemos observar en la figura 4.14, la anchura de la huella es mayor en el cobre microestructurado que en el cobre nanoestructurado direccional.

a)

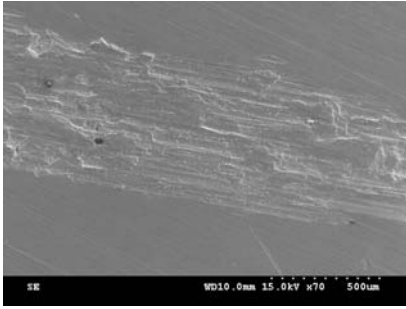


b)





c)



d)

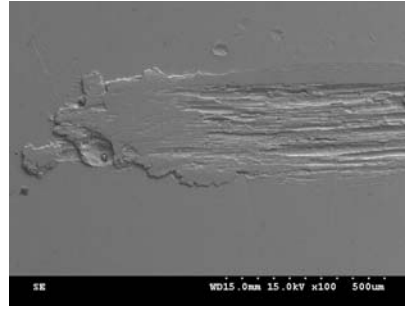


Fig.4.14. Micrografías SEM de las huellas de desgaste: a) Cu-micro longitudinal. b) Cu-micro transversal. ,  
c) Cu-nano direc. Longitudinal. d) Cu-nano direc. transversal

En la figura 4.14 también podemos observar que existe una componente abrasiva en el mecanismo de desgaste, ya que se aprecian claramente surcos en la huella (efecto arado).

Podemos observar mas claramente este fenómeno en las figuras 4.15 a 4.18, donde se muestran las huellas de desgaste en todas las muestras ensayadas después de los ensayos de tipo bola sobre plano, en la dirección longitudinal (a) y (c) y transversal (b) y (d).

También podemos ver como el número y profundidad de grietas y discontinuidades va disminuyendo según vamos avanzando en el sentido de mayor a menor volumen de desgaste: Cu-micro>Cu-nano equiaxial>Cu-nano equi/direc.>Cu-nano direccional.

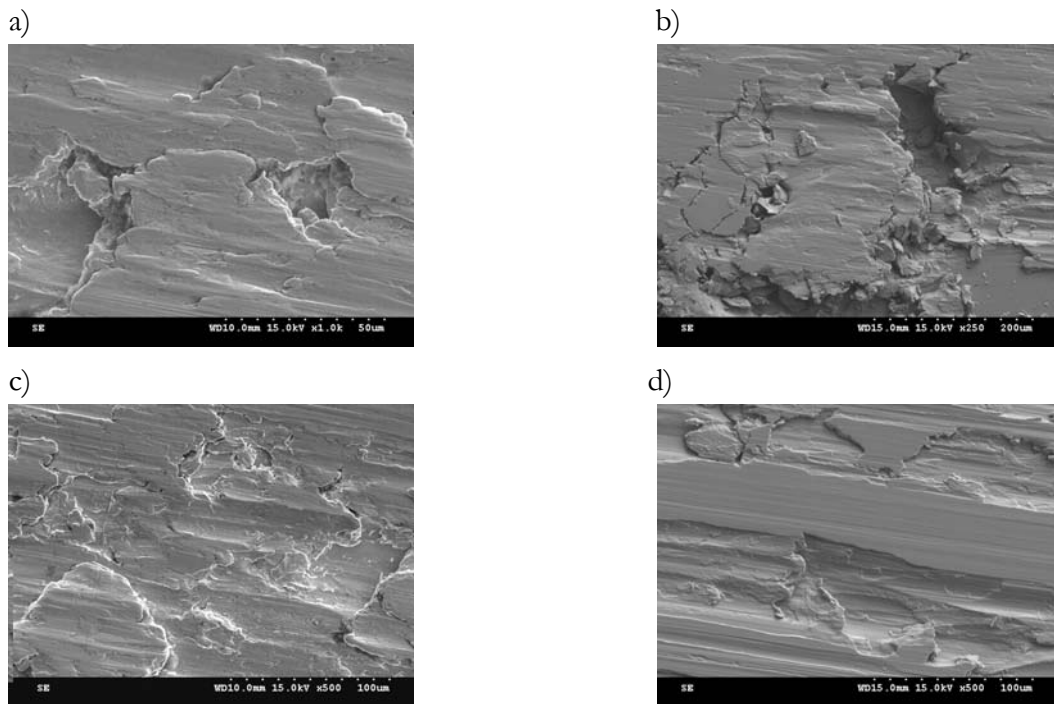
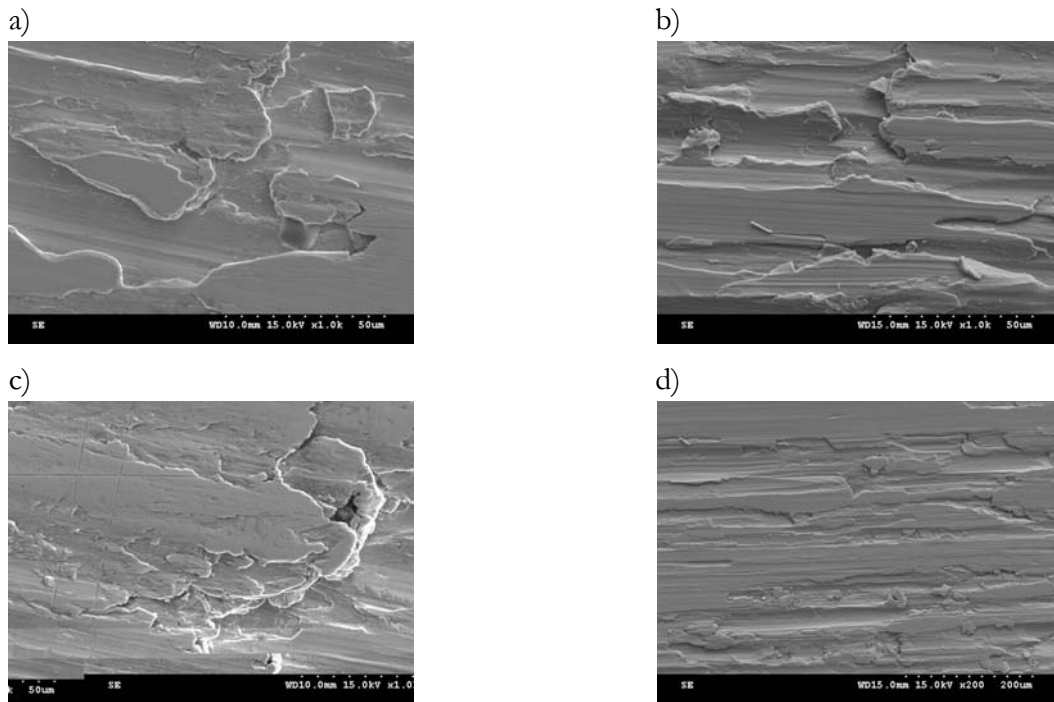
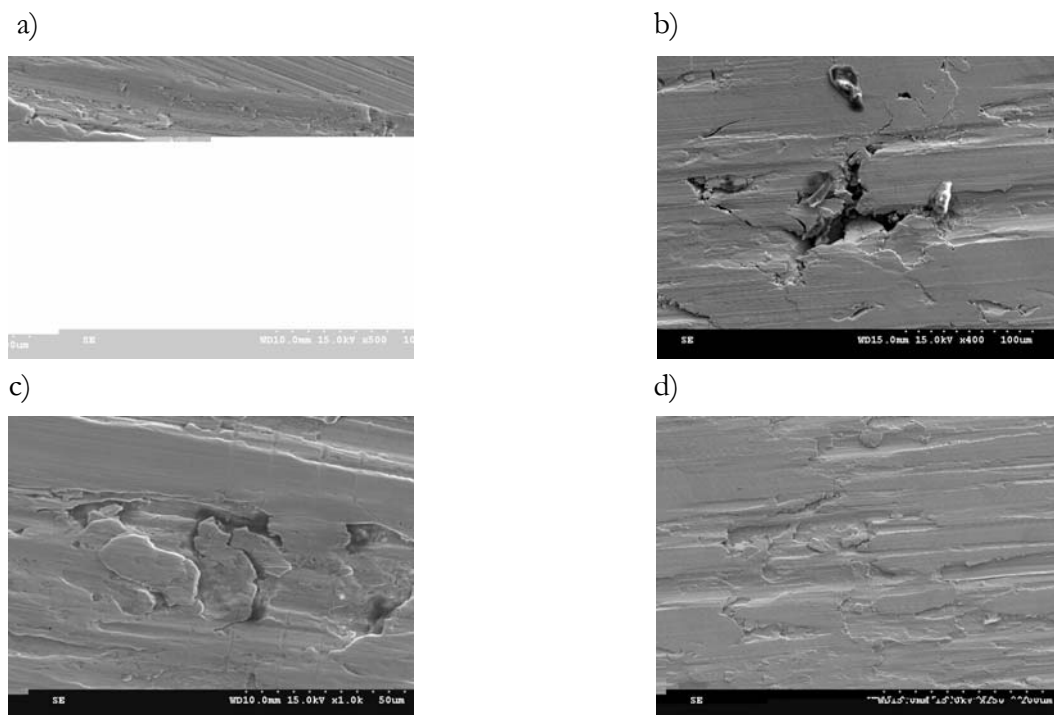


Fig.4.15 Micrografías SEM de cobre microestructurado: a) y c) longitudinal , b) y d) transversal.



*Fig.4.16. Micrografías SEM de cobre equiaxial: a) y c) longitudinal , b) y d) transversal.*



*Fig.4.17. Micrografías SEM de cobre equiaxial/direccional: a) y c) longitudinal , b) y d) transversal.*

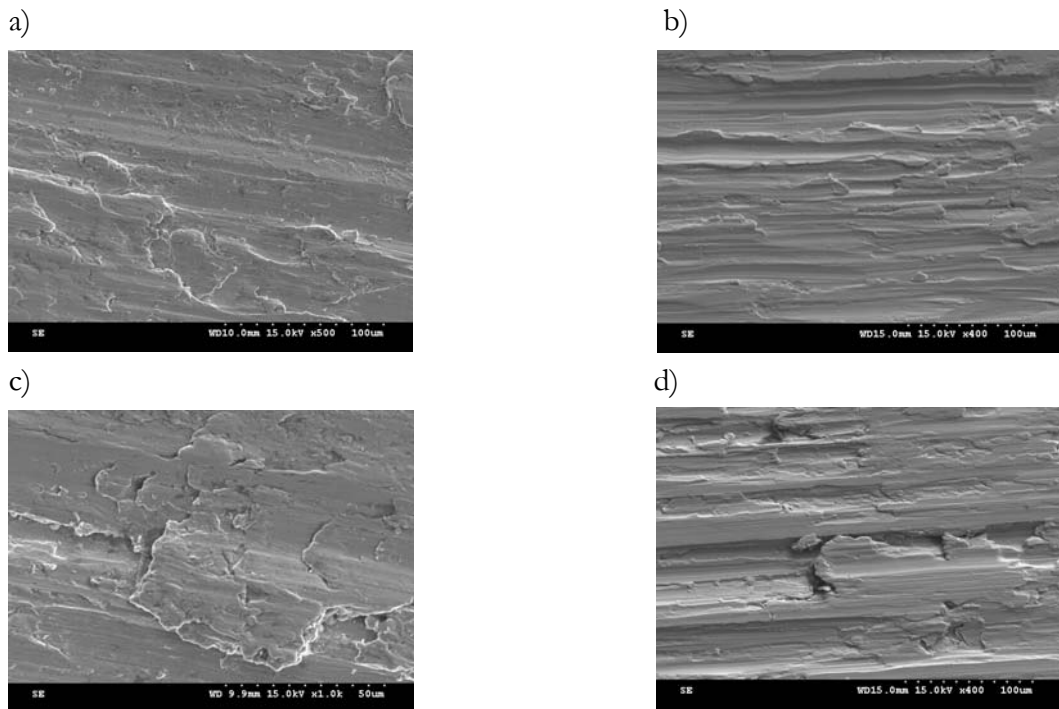


Fig.4.18. Micrografías SEM de cobre direccional: a) y c) longitudinal, b) y d) transversal.

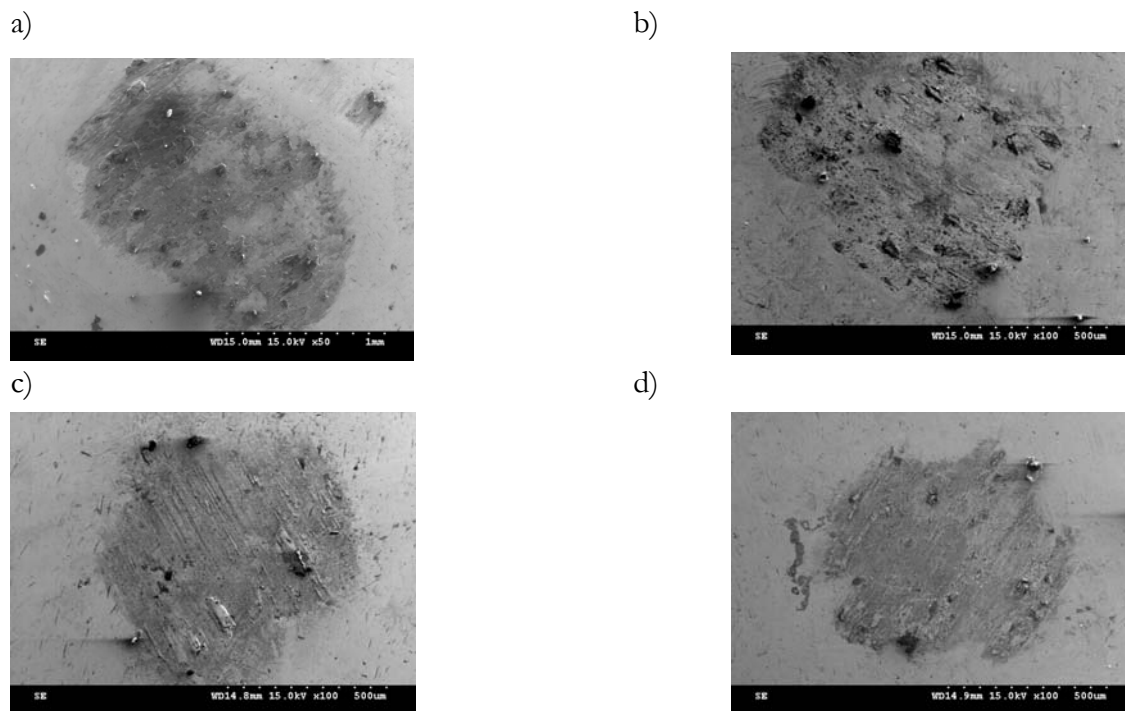
El ensayo realizado en la dirección longitudinal mostró una mayor anchura de huella y una mayor concentración de partículas y grietas en el surco, confirmando un régimen de desgaste más severo en la dirección de la orientación de los granos.

## 4.2 Análisis de las bolas de acero

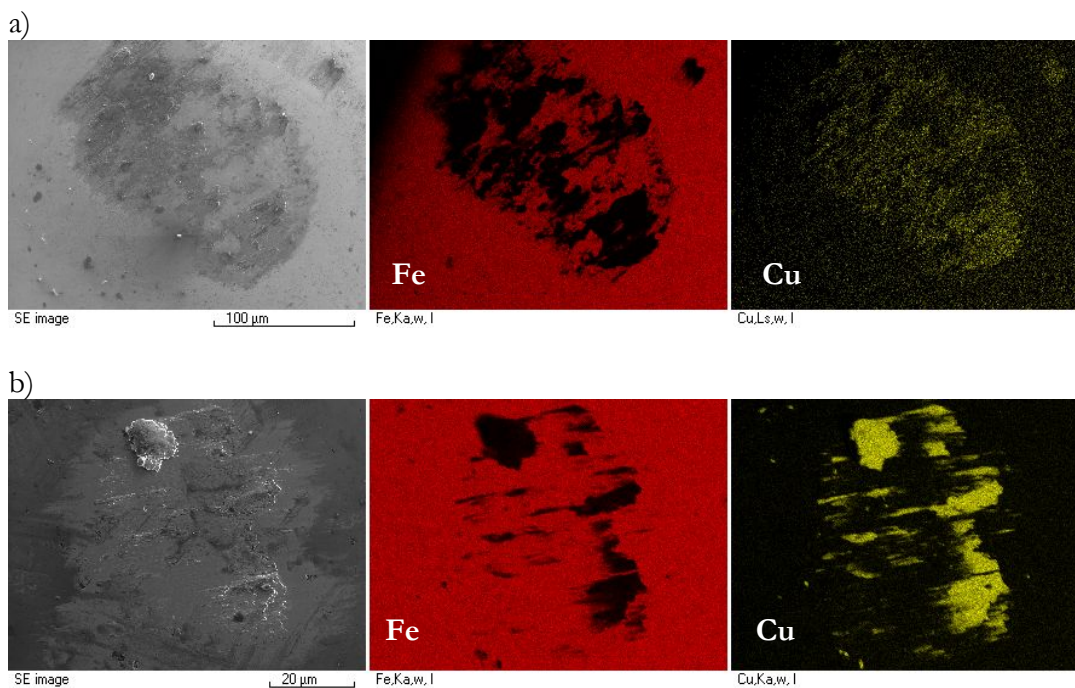
Además del desgaste por abrasión, del estudio de las micrografías SEM y los correspondientes mappings de hierro y cobre realizados a las bolas de acero podemos determinar que existe también una componente de adhesión en los mecanismos de desgaste. En la figura 4.19 se muestran las micrografías SEM en dirección longitudinal de las bolas de acero utilizadas en los ensayos. En las figuras 4.20 y 4.21 se representan los mapping de hierro y cobre para el cobre microestructurado y el cobre nano-direccional, respectivamente.

La componente adhesiva viene representada por la capa de cobre adherida a la bola de acero.

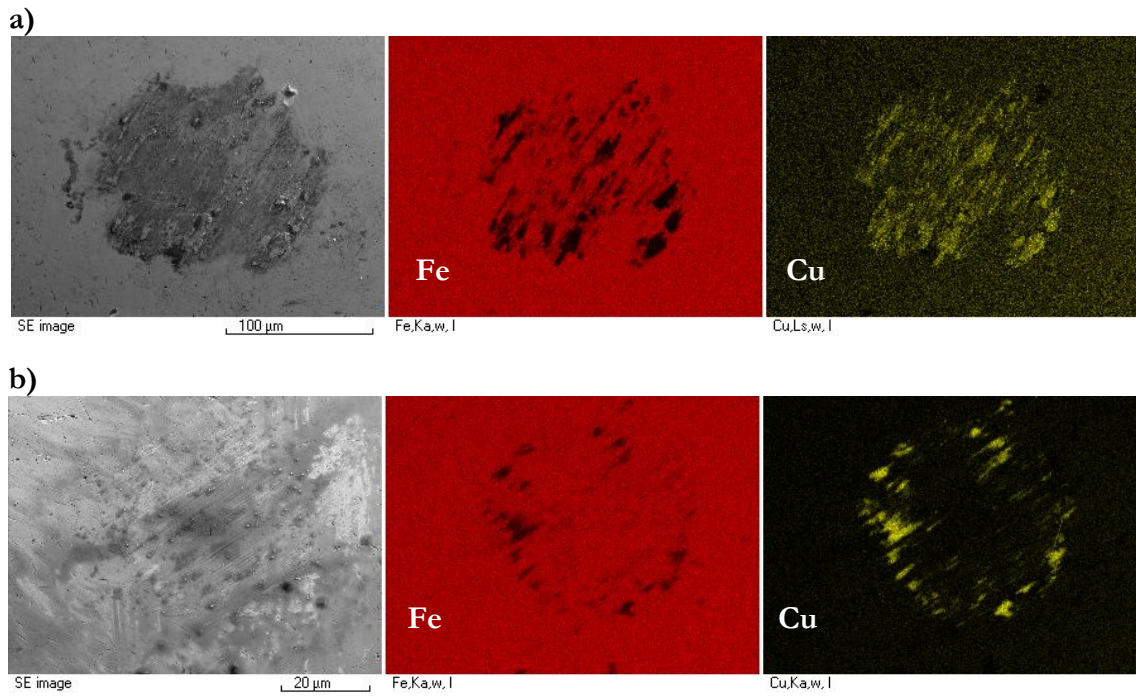
Así, podemos concluir, que todos los materiales ensayados presentan un mecanismo de desgaste de adhesión-abrasión.



*Fig.4.19. Micrografías SEM de las bolas de acero utilizadas en los ensayos: a) Cu-micro. b) Cu-nano equiaxial. , c) Cu-nano equi/direc. d) Cu-nano direccional.*



*Fig.4.20. Bola de acero después del ensayo de desgaste contra Cu-micro: a) ensayo longitudinal , b) ensayo transversal.*



*Fig.4.1. Bola de acero después del ensayo de desgaste contra Cu-nano direccional:  
a) ensayo longitudinal , b) ensayo transversal.*



## 5. Conclusiones

Se ha comparado el comportamiento a desgaste en función de la orientación de la microestructura de materiales nanoestructurados obtenidos por mecanizado con extrusión bajo gran deformación, con un cobre microestructurado mediante ensayos de bola sobre plano.

Las conclusiones que podemos extraer de este trabajo son las siguientes:

- 1.- Los resultados ponen de manifiesto la mayor resistencia a desgaste del material nanoestructurado con orientación del grano en el sentido de la extrusión.
- 2.- Para este material, la resistencia al desgaste depende de la dirección, y está de acuerdo con la anisotropía de su estructura, siendo mayor en la dirección transversal a la orientación del grano.
- 3.- Para todos los materiales se detecta un mecanismo adhesivo-abrasivo, de acuerdo con las observaciones microscópicas y microanálisis.