

Aplicaciones del MEB y de la MSE en metalurgia

P. Adeva

19.1. Introducción

El MEB y la MSE son en la actualidad herramientas indispensables en el campo de la metalurgia, debido principalmente a la gran profundidad de campo y a su buena resolución. Desde hace ya bastante tiempo se han convertido en técnicas absolutamente indispensable para la caracterización de materiales metálicos, estudio de sus transformaciones en estado sólido, análisis de fallos y en general para realizar cualquier estudio metalúrgico. Naturalmente esta técnica es complementaria a la Microscopía Óptica y nunca ha de pensarse que es sustitutiva. También en los casos en que se trata de estudiar particularidades que no se resuelven en el MEB, es necesario recurrir a la Microscopía Óptica y nunca ha de pensarse que es sustitutiva. También en los casos en que se trata de estudiar particularidades que no se resuelven en el MEB, es necesario recurrir a la Microscopía Electrónica de Transmisión. Todas las técnicas de microscopía son complementarias y salvo en raras excepciones no son excluyentes. La principal desventaja que presenta el MET respecto del MEB es que la preparación de muestras es muy laboriosa. Las muestras han de ser suficientemente delgadas para que sean transparentes al haz de electrones y en casos como la fractografía es necesario realizar el estudio sobre réplicas con el consiguiente peligro de obtener información errónea por una deficiente preparación. En contraposición, el MEB no necesita una preparación de muestras especial. Las muestras preparadas metalográficamente para el MO pueden llevarse a continuación al MEB, sin más que metalizarlas si no son conductoras. En otras ocasiones la muestra se observa sin preparación alguna, salvo una ligera limpieza. Tal es el caso de las superficies de fractura.

De todas las señales que se generan en la muestra al incidir el haz de electrones, las que se emplean quizás con más frecuencia en el estudio de los materiales metálicos son las de electrones secundarios, electrones retrodispersados y rayos X.

A continuación vamos a comentar brevemente algunas de las aplicaciones de esta técnica en Metalurgia exponiendo algunos ejemplos.

19.2. Metalurgia Extractiva

La principal aplicación de estas técnicas en esta disciplina es la caracterización de especies mineralógicas. Durante los procesos a los que son sometidos los minerales (extracción, beneficio y aglomeración) para la obtención posterior de la materia prima utilizada en los procesos siderúrgicos o bien para la liberación del mineral, se producen variaciones en su morfología y propiedades. El conocimiento de las diferentes especies y el modo en que se encuentran asociadas permitirá conseguir mejores rendimientos en los diferentes procesos, mediante el ajuste de determinados parámetros.

La información que proporciona la metalografía convencional durante la caracterización de especies minerales es bastante completa. La mayoría de las fases presentes se pueden indentificar mediante sus propiedades ópticas y algunas de sus propiedades físicas. Sin embargo, a veces el tamaño de alguna de las especies impide su identificación, otras la complejidad de dichas especies requiere conocer el modo en que están distribuidos los elementos, por lo que a partir de este momento, es necesario continuar el estudio con el Microscopio Electrónico. La imagen de electrones retrodispersados proporciona una primera información, muy útil, para discriminar las fases constituidas por elementos más ligeros (zonas más oscuras) o más pesados (fases de tonalidad

clara). Además, se distinguen con gran claridad las segregaciones presentes en los granos de una fase determinada.

Localizadas las zonas de interés, se puede proceder a su caracterización microanalítica mediante la señal de rayos X. Dependiendo del tipo de información que se quiera obtener se puede realizar microanálisis cualitativo o cuantitativo. La observación de mapas de distribución de los elementos presentes permite a veces caracterizar, casi perfectamente, la fase objeto de estudio. Otras veces se recurre a realizar un perfil de distribución de los diferentes elementos. El microanálisis cuantitativo también se realiza con bastante frecuencia, sobre todo desde que se puede disponer de equipos automatizados, lo que permite realizarlo con gran rapidez. En este caso, y al igual que en el campo geológico, los patrones que se han de emplear son muestras de óxidos y silicatos puros de composiciones perfectamente conocidas. Los óxidos de calcio, potasio y sodio son fases poco estables, se hidratan rápidamente. Por tanto, para el análisis de estos tres elementos es preferible emplear patrones de silicatos simples o aluminosilicatos.

Los procedimientos de corrección de resultados microanalíticos que conducen a mejores resultados con este tipo de materiales, descritos ampliamente en el capítulo de microanálisis cuantitativo son el método ZAF o bien el método de Bence y Albee. Este último fue desarrollado por estos dos investigadores, para el caso de óxidos y de silicatos.

Con bastante frecuencia se realiza en Siderurgia la caracterización de especies minerales en pellets, sinter y prerreducidos, estudio que generalmente y para que sea completo ha de llevarse a cabo mediante MO, MEB y MSE. La Fig. 19.1. es la imagen de electrones retrodispersados correspondiente a un sinterizado magnético. El estudio al MO permitió discriminar tres fases: magnetita, hematite y una escoria. El estudio se completó con el MEB y la MSE, poniéndose de manifiesto que la fase magnetita se trataba en realidad de una ferrita de aluminio, silicio y calcio, como se desprende del espectro de rayos X (Fig. 19.2) obtenido sobre los cristales grises oscuros de la micrografía.

19.3. Productos colados

El estudio al MEB de materiales colados, tanto si se tratan de materiales férreos como de no férreos, permite conocer la naturaleza de las fases constituyentes así como otros detalles de la microestructura tales como tamaño de grano, fracción de volumen de fases presentes, etc. Por otra parte, resulta de gran utilidad a la hora de evaluar el estado de la pieza. Los defectos que se presentan con más frecuencia en una pieza colada y que por su tamaño no se ponen claramente de manifiesto con Microscopía Óptica son los microrrechupes, microsegregaciones y las inclusiones de pequeño tamaño. El conocimiento de estos detalles de la microestructura permite, por una parte, asegurar el comportamiento esperado del material cuando se somete a la pieza a los trata-

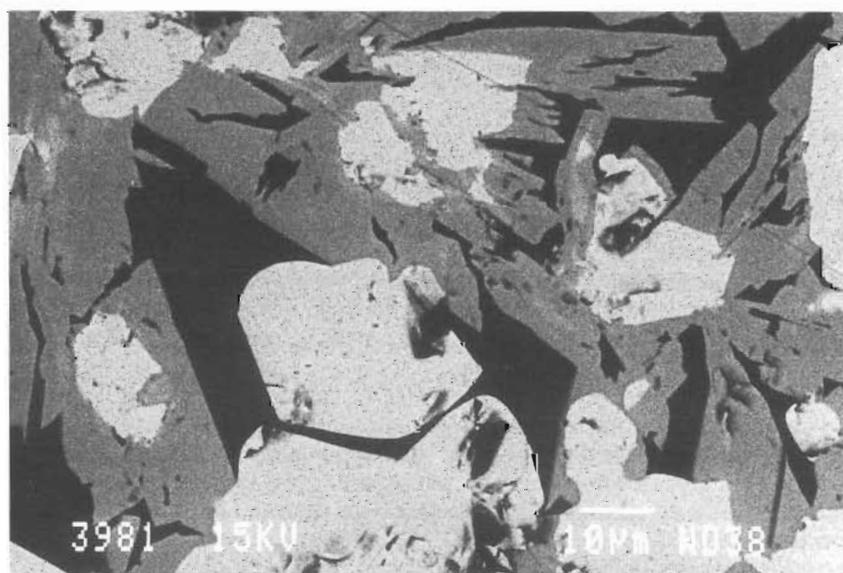


Fig. 19.1. Sinterizado magnético. Imagen de electrones retrodispersados.

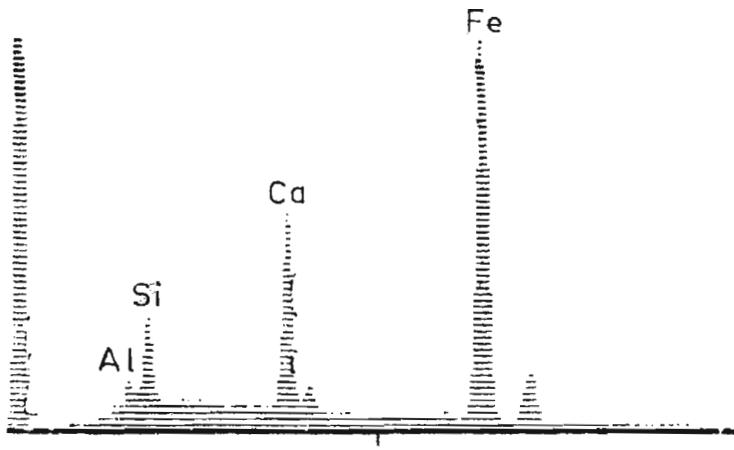


Fig. 19.2. Espectro de rayos X (DE) correspondiente a la fase gris oscura.

mientos termomecánicos posteriores, así como una buena resistencia en servicio, tanto frente a solicitaciones mecánicas como frente a la corrosión. Además, el conocimiento de la naturaleza de los defectos permitirá ajustar diversos parámetros durante la colada y evitar así su aparición o por lo menos controlarlo.

19.4. Estudio de inclusiones

De todos los defectos comentados anteriormente, son quizás las inclusiones no metálicas aquellos cuya formación resulta más difícil de evitar. Las microsegregaciones pueden eliminarse mediante tratamientos térmicos adecuados y los microrrechupes controlando algunos parámetros de colada.

Las inclusiones no metálicas son compuestos constituidos por la combinación de uno o varios metales y algún metaloide, frecuentemente oxígeno, nitrógeno, fósforo, etc., que tienen una solubilidad muy baja en estado sólido.

Su origen puede ser debido a dos causas. Las inclusiones endógenas se forman en el interior del metal líquido o sólido por variaciones de la composición o de la temperatura. Se presentan en casi todos los productos colados, en los que es necesario introducir elementos desoxidantes en el caldo. Suelen estar constituidas por óxidos y sulfuros.

Las inclusiones exógenas aparecen normalmente por causas accidentales y tienen fundamentalmente su origen en los refractarios de los hornos, con los que el metal ha estado en contacto en el curso de su elaboración. Se suelen distinguir de las primeras por su gran tamaño y formas irregulares, y producen efectos muy perjudiciales, sobre todo en las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión de los materiales.

Las inclusiones favorecen la iniciación y la propagación de grietas por fatiga. Los sulfuros (muy típicos en los aceros) son puntos de inicio del fenómeno de corrosión por picaduras. Aunque la presencia de inclusiones, que en general se considera perjudicial, es prácticamente inevitable, y la tendencia es conseguir productos cada vez más limpios, en ciertas aplicaciones, como los aceros de fácil mecanizado, los sulfuros y el plomo se introducen intencionadamente para mejorar de modo apreciable su maquinabilidad y disminuir simultáneamente el desgaste de la herramienta.

El conocimiento de la naturaleza de las inclusiones es de gran importancia para poder comprender el origen de su formación y propiedades. Conocido el origen es posible evitar su formación sin más que eliminar la fuente, sobre todo en el caso de las exógenas.

Un estudio completo exigirá la observación previa, en el microscopio óptico, de la superficie de la muestra pulida metalográficamente y sin atacar. Un ataque provocaría la disolución total o parcial de la inclusión. Los aspectos a observar son la forma, tamaño y distribución, así como su reflectividad y color. La forma, reflectividad y el color de la inclusión pulida son, indicativos de su naturaleza. Así, por ejemplo, si la inclusión es translúcida, como ocurre con muchos silicatos, ésta aparecerá relativamente oscura respecto de la superficie circundante del metal, que es altamente reflectante. Sin embargo, las inclusiones mineralógicamente diferentes muestran un gran parecido en la observación metalográfica y no podrán distinguirse únicamente

por estas características. Esto, unido a que en muchas ocasiones son de pequeño tamaño, es lo que hace indispensable su estudio con el MEB y MSE. La muestra no necesita una preparación metalográfica especial, simplemente se empleará tal y como se preparó para la observación al MO. Para el estudio de la muestra al microscopio se observa en primer lugar la imagen de electrones retrodispersados, con el fin de localizar las inclusiones. A continuación se hace un análisis cualitativo de la partícula, para finalmente realizar un análisis cuantitativo, si el estudio lo requiere. Los patrones que se han de utilizar dependerán en cada caso del tipo de inclusión (óxidos, sulfuros, silicatos, etc.). Los procedimientos de corrección de resultados que se han de emplear son también los de Bence y Albee o el ZAF.

La Fig. 19.3a corresponde a la imagen de electrones retrodispersados de una inclusión en un acero laminado. Las imágenes de rayos X correspondientes a las líneas $K\alpha$ del Mg, Al, Si, S y Ca (Fig. 19. 3b, c, d, e, f) muestran la presencia y distribución de dichos elementos en la inclusión. El microanálisis cualitativo realizado sobre dicha inclusión permite suponer que su origen está ligado a un fenómeno de atrape de escoria.

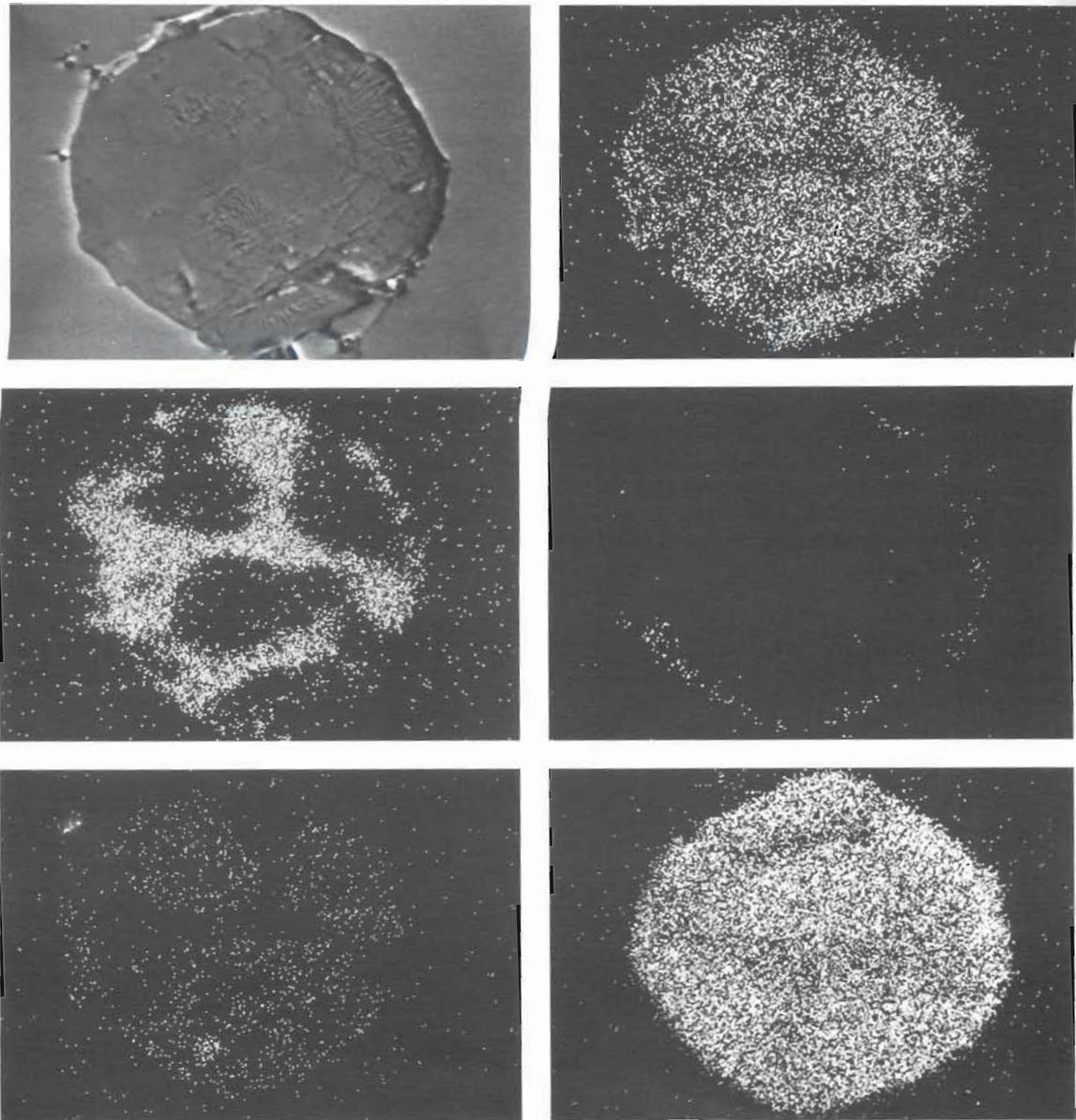


Fig. 19.3. Inclusión en un acero laminado. a) Imagen de electrones retrodispersados. b), c), d), e) y f) distribución de rayos X de las líneas $K\alpha$ del Si, Al, S, Mg y Ca, respectivamente.

19.5. Caracterización de fases

Mediante el MEB y la MSE es posible conocer la naturaleza de las fases presentes en una muestra metálica, siempre que éstas tengan el tamaño mínimo necesario para realizar un microanálisis cuantitativo.

Recordemos que la resolución en el microanálisis o tamaño de la fuente de rayos X es la suma del diámetro del haz (d) y de la profundidad de penetración de los electrones (R) en la muestra. A su vez, la profundidad de penetración depende no sólo del potencial de aceleración y de la naturaleza de la muestra sino también del potencial de excitación crítico de las líneas características de rayos X de los elementos presentes.

Se establece que el tamaño medio de partícula o fase para poder realizar el microanálisis debe ser superior a $3\mu\text{m}$. De otro modo, será mayor la zona excitada por el haz y los resultados de composición obtenidos estarán comprendidos entre la composición de la fase y de la matriz que la rodea. Además, la concentración que se obtenga variará en cada caso con el tamaño de la partícula. Sin embargo, y dado que en muchas ocasiones las fases a analizar son de pequeño tamaño, se puede hacer una aproximación a las composiciones reales mediante el método desarrollado por Betzold. Este método, aplicable para el análisis de partículas de tamaños comprendidos entre $0,2$ y $2\mu\text{m}$ se basa en analizar partículas de diferentes tamaños de concentración ($C_1, C_2, C_3 \dots C_n$). Las concentraciones medidas se emplean para representar C_1 en función de $C_2, C_3 \dots C_n$. La representación da lugar a unas rectas con las que se puede hacer la extrapolación para el caso de partículas de mayor tamaño. No obstante, este método es válido en el caso en el que la matriz sea homogénea y las partículas o fases analizadas sean de la misma naturaleza.

El microanálisis, al igual que en los demás casos, ha de realizarse sobre muestra pulida, empleando como patrones los elementos puros. Existen diversos métodos de corrección de resultados, para el caso de muestras metálicas, tales como el método de Tong-Reed, la corrección Delta y el ZAF, conduciendo los tres a buenos resultados.

Un estudio que resultó de gran interés y en el que esta técnica jugó un papel decisivo fue el estudio que se llevó a cabo en el Departamento de Metalurgia Física del CENIM, sobre «La influencia de la microestructura sobre los procesos de deformación en monocristales y policristales de aleaciones de aluminio» dentro del cual se trataba de investigar la deformación plástica y fractura de monocristales de una aleación Al-4%Cu. El estudio se llevó a cabo tanto con el material en el estado de solubilización como tras distintos estados de envejecimiento a diferentes temperaturas. La fractura de los monocristales no resultaba del todo explicable en base a los distintos estados de envejecimiento del material. La observación al MEB de las superficies pulidas de las muestras envejecidas, permitió distinguir, además de la matriz, una segunda fase de diferente tamaño. La caracterización microanalítica con la MSE pudo de manifiesto que en realidad se trataban de dos fases diferentes. Una de ellas, la de menor tamaño, era la fase que precipita en este tipo de aleaciones (Al_2Cu) y por tanto responsable del envejecimiento. La otra, de mayor tamaño era ternaria y estaba constituida por Al, Cu y Fe. Los resultados del microanálisis cuantitativo (51Al-34 Cu-13Fe, % en masa) permitieron identificar esta fase como la Cu_2FeAl_7 . La presencia de esta fase (Fig. 19.4) ya desde el estado inicial, dado que no se solubiliza a 540°C , se debe a que la aleación contiene una impureza de hierro de $0,1\%$ en masa muy por encima del límite de solubilidad en aluminio.

19.6. Aleaciones solidificadas rápidamente

La técnica de solidificación rápida que da lugar a la obtención de polvos y de cintas de materiales metálicos tanto cristalinos como con estructura amorfa es muy empleada en la actualidad debido a las mejoras que introduce en los materiales así preparados. Las principales ventajas que introduce esta técnica frente a la colada en coquilla son las siguientes:

a) Microestructuras más finas y homogéneas, debido a la disminución de los fenómenos de segregación.

b) Materiales de tamaño de grano muy fino, e incluso amorfos

c) Mejores propiedades mecánicas. Esto es debido a que al aumentar la solubilidad sólida de los elementos aleantes junto con la gran concentración de vacantes que se producen por efecto del temple, se favorece la formación de fases metaestables y los fenómenos de precipitación.

Indudablemente, el estudio de la microestructura de este tipo de materiales no se puede realizarlo si no es con la ayuda de la Microscopía Electrónica. Las microestructuras tan finas que presentan estos materiales (tamaño de grano menor de $10\mu\text{m}$) no permiten ser resueltas en un MO.

La Fig. 19.5 corresponde a una partícula de polvo de aleación Al-Cr-Mo obtenida mediante atomización centrífuga. En ella se observa la estructura de solidificación constituida por dentritas

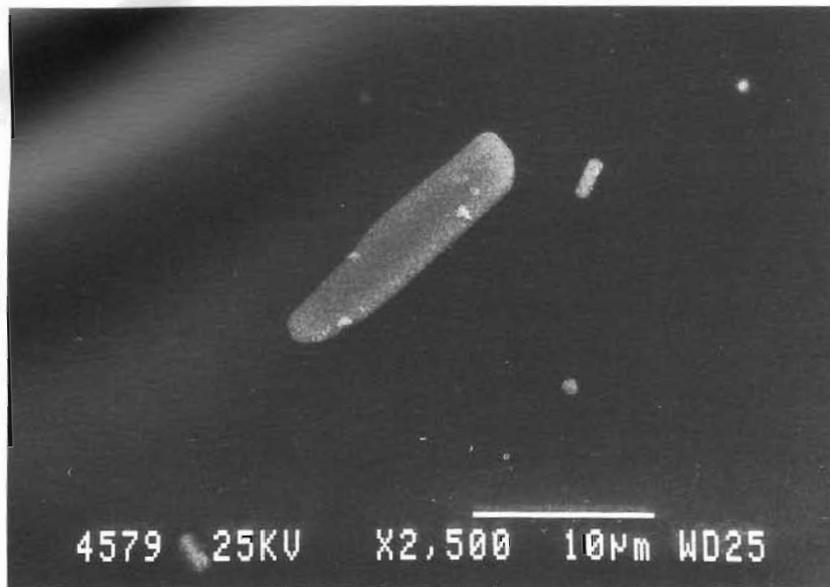


Fig. 19.4. Al-4%Cu sin atacar. Imagen de electrones retrodispersados.

y una segunda fase con morfología de roseta. Así mismo se observan pequeñas cavidades o microrrechupes. El microanálisis realizado sobre la sección pulida muestra que la matriz está constituida por una solución sólida de Cr y Mo en aluminio mientras que la segunda fase es rica en Cr y Mo.

En la Fig. 19.6, correspondiente a la sección longitudinal de una cinta de aleación Ni-Cr-Al, obtenida mediante la técnica de la rueda, se observa la microestructura de solidificación constituida por una zona de granos columnares, como consecuencia de un enfriamiento muy rápido, que crece desde la cara en contacto con la rueda, seguida a la continuación por otra de granos equiaxiales debido a una nucleación homogénea o solidificación en régimen estacionario. Mediante el contraste cristalográfico de electrones retrodispersados se puede obtener una buena imagen (Fig. 19.7), sobre muestras sin atacar, para realizar medidas de tamaño medio de grano y de celda. El contraste cristalográfico que proporciona esta imagen permite realizar estas medidas en equipos automáticos de Análisis de Imagen.

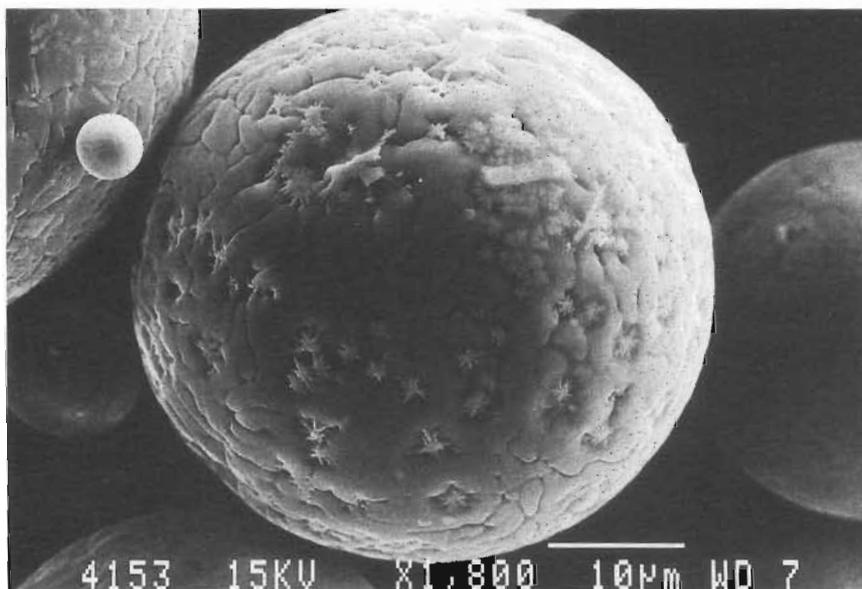


Fig. 19.5. Al-Cr-Mo solidificada rápidamente. Imagen de electrones secundarios.

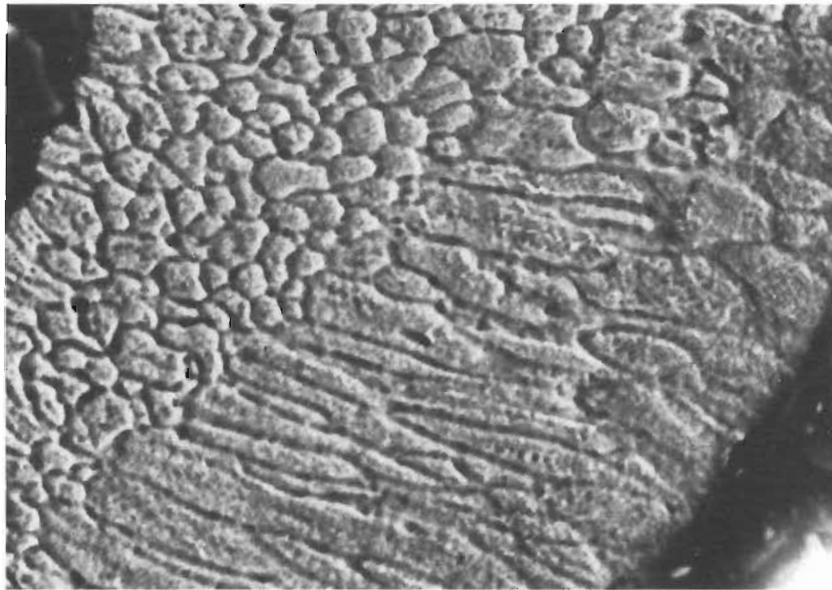


Fig. 19.6. Ni-Cr-Al solidificado rápidamente. Sección longitudinal de la cinta. Imagen de electrones secundarios.

La preparación de muestras en este caso es como en el resto de los materiales metálicos. En el caso de cintas, conviene embutirlas en resina conductora para disminuir los fenómenos de carga. En el caso de polvos, para estudiar formas y tamaños, es posible observarlos sin preparación, sin más que depositarlos sobre el portamuestras del MEB. Para estudiar la microestructura es necesario realizar una preparación metalográfica convencional tras embutirlos en resina conductora.

19.7. Metalurgia de la soldadura

Durante el proceso de soldeo se producen habitualmente defectos que perjudican notablemente la resistencia de la unión soldada. Los defectos que aparecen con más frecuencia son las sopladuras, inclusiones, segregaciones o porosidad. El conocimiento de estos defectos permite

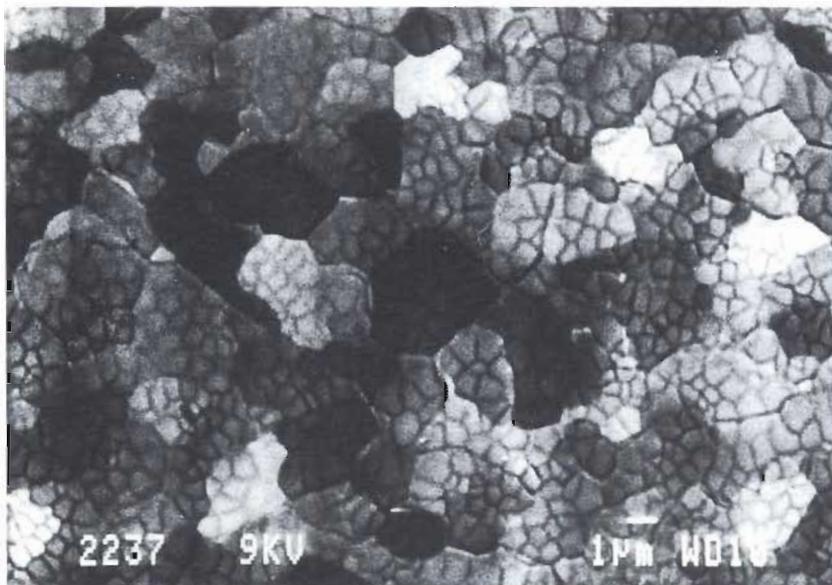


Fig. 19.7. Ni-Cr-Al solidificado rápidamente. Contraste cristalográfico por electrones retrodispersados.

evaluar las causas que los han provocado, y por tanto corregir el proceso. También se pueden producir fenómenos de crecimiento de grano o tensiones residuales que afecten a la resistencia de la unión soldada.

Existen diversos ensayos para controlar la calidad de las soldaduras, tales como la metalografía convencional, ensayos no destructivos como la inspección radiológica y los ultrasonidos.

Sin embargo, a veces es necesario recurrir al MEB y a la MSE, sobre todo cuando se produce el fallo de la unión soldada y se requiere un estudio completo del origen del fallo. Mediante una buena toma de muestras de la unión soldada, y tras la preparación metalográfica adecuada para su observación, se puede comprobar con la imagen de electrones secundarios si la muestra se ha atacado metalográficamente, o con la de retrodispersados, en el caso contrario, si el cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente presentan la microestructura esperada para este tipo de material, así como la presencia de defectos, grietas, etc. La microsonda permitirá además identificar la naturaleza de las inclusiones, segregaciones y productos de corrosión.

19.8. Fenómenos de corrosión

Otra posible aplicación del MEB y de la MSE es el estudio de los fenómenos de corrosión y de oxidación de los materiales metálicos, por la posibilidad de examinar superficies deterioradas sin las limitaciones de profundidad de campo del MO. Esta técnica permite conocer tanto la morfología de las capas de corrosión como su composición para relacionar estos dos parámetros con la cinética del proceso. Resulta de gran utilidad para caracterizar el estado superficial del material, tanto si dispone o no de recubrimiento protector o de un tratamiento superficial, puesto que éste y las variables ambientales son los factores determinantes del ataque en su proceso inicial.

En la Fig. 19.8 se observa el estado superficial de una aleación para alta temperatura tras el mantenimiento durante 100 horas a 850°C al aire. La MSE permite diferenciar dos tipos de óxidos de diferente morfología. Los que constituyen una capa más o menos continua son ricos en aluminio y los que aparecen en forma de aglomerados y de tonalidad más clara son ricos en cromo tal y como se desprende del espectro de rayos X de la figura 19.9.

Como ejemplo, en el caso de tratamientos superficiales es interesante la Fig. 19.10. En esta micrografía se observa la microestructura de un acero inoxidable Tipo 304 sensibilizado, seguida a continuación por una zona de transición y finalmente la zona tratada superficialmente con láser. La morfología de la capa tratada (Fig. 19.11), típica de un enfriamiento rápido, permite asegurar no sólo la recuperación de las propiedades de resistencia a la corrosión del material, sino su mejora, tal y como se ha comprobado mediante métodos electroquímicos.

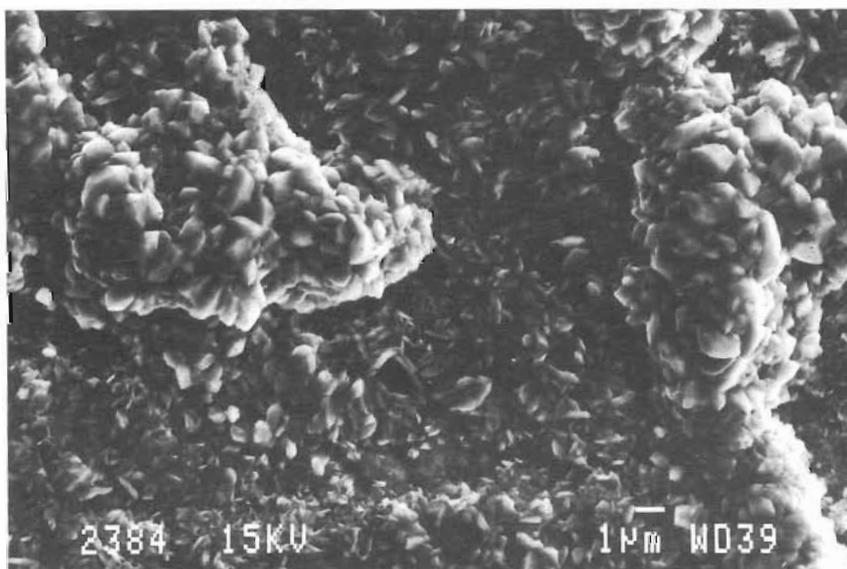


Fig. 19.8. Superaleación de base níquel. Imagen de electrones secundarios.

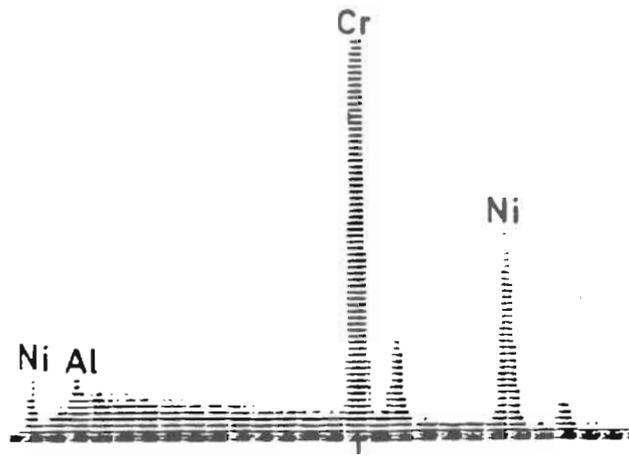


Fig. 19.9. Espectro de rayos X (DE) correspondiente a los cristales más grandes de la micrografía anterior.

19.9. Metalurgia Física

Muchos son los estudios en el campo de la Metalurgia Física en los que el MEB y la MSE son técnicas absolutamente necesarias. Se utiliza para el estudio de fenómenos de difusión, transformaciones en estado sólido tales como la precipitación, recristalización, transformaciones martensíticas, etc., para establecer la evolución microestructural de los materiales durante los tratamientos térmicos y mecánicos, así como para caracterizar el modo de fractura de los materiales. Se utiliza complementariamente con otras técnicas, tales como Difracción de Rayos X, Análisis Térmico, Microscopia Electrónica de Transmisión, etc, en la determinación de diagramas de equilibrio en estado sólido.

Como ejemplo se puede citar el estudio del fenómeno de cristalización de vidrios metálicos. Estos materiales son aleaciones metálicas desordenadas, sin periodicidad traslacional, obtenidas a altas velocidades de enfriamiento para evitar su cristalización. Al ser materiales fuera de equilibrio su tendencia es cristalizar, lo que provoca una variación brusca de sus propiedades. El conocimiento de su proceso de cristalización permitiría ampliar su intervalo de estabilidad, evitando durante el proceso de fabricación la necesidad de emplear elevadas velocidades de enfriamiento.

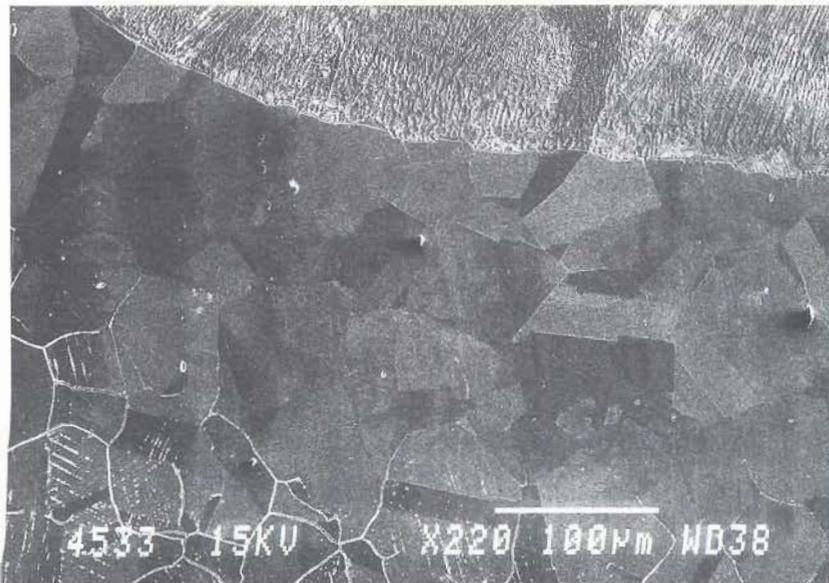


Fig. 19.10. Acero inoxidable Tipo 304 sensibilizado y tratado superficialmente con láser. Imagen de electrones secundarios.

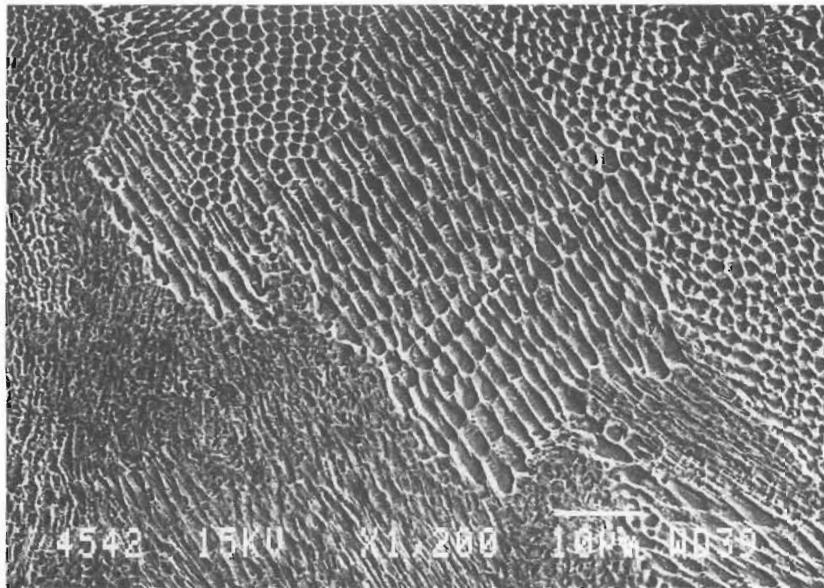


Fig. 19.11. Acero inoxidable Tipo 304 tratado superficialmente con láser. Imagen de electrones secundarios.

El MEB resulta de gran ayuda para estudiar dicho proceso, como se muestra en la figura 19.12, correspondiente al vidrio metálico $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ recocido al aire 4 horas a $350^{\circ}C$. Se observa un cristal (núcleo de cristalización) disgregado y como flotando sobre la matriz amorfa.

La Fig. 19.13 es un ejemplo bastante ilustrativo de las posibilidades que presenta el MEB cuando se estudian transformaciones en estado sólido. En la micrografía (imagen de electrones secundarios), correspondiente a una superaleación de base níquel envejecida, se aprecia una elevada densidad de precipitados de Ni_3Al con morfología cúbica. Envejecimientos prolongados provocan la coalescencia de dichos precipitados (Fig. 19.14) y, por tanto, la pérdida de las buenas propiedades del material.

En la Fig. 19.15 se pone de manifiesto la influencia que tiene un tratamiento térmico en la microestructura de una aleación rápidamente solidificada de Al-Cr-Mo.

Otro ejemplo en el que el MEB y la MSE representan técnicas de gran ayuda es la determinación de diagramas de equilibrio en el estado sólido. Para ello se procede al estudio de aleaciones de distinta composición tratadas térmicamente, durante el tiempo necesario para conseguir una microestructura tan próxima como se pueda a la de equilibrio, templándose rápida-

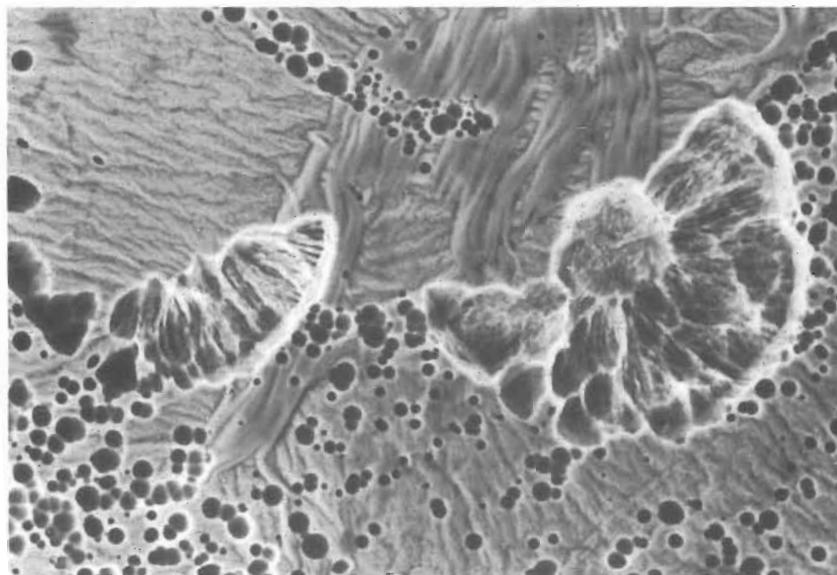


Fig. 19.12. Vidrio metálico $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$. Imagen de electrones secundarios.

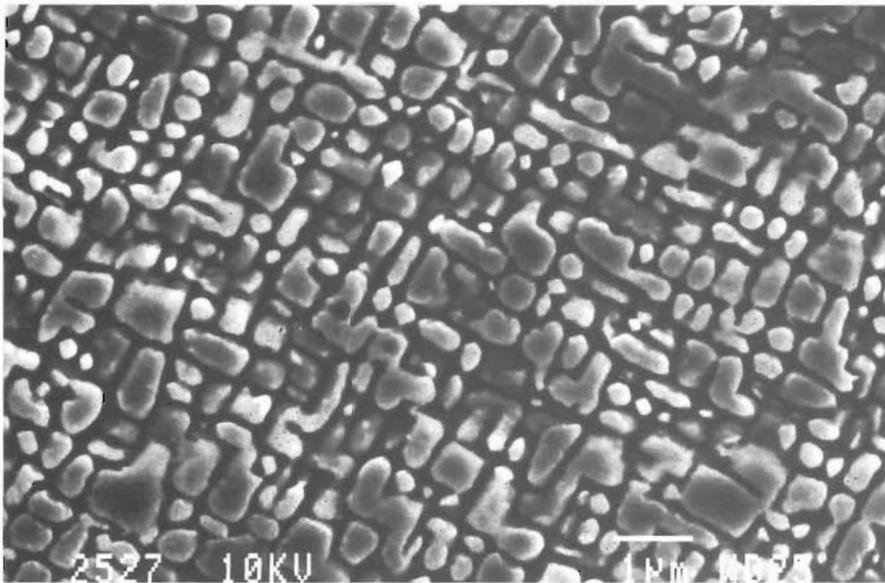


Fig. 19.13. Precipitación de Ni₃Al. Imagen de electrones secundarios.

mente a continuación. El microanálisis cuantitativo de las fases que aparecen y la evaluación de la proporción de cada una de ellas permiten dibujar los bordes de separación de las diferentes fases en estado sólido, así como las líneas de conjunción, si este estudio se lleva a cabo a diferentes temperaturas de tratamiento. Por supuesto que, el parámetro fracción de volumen de cada una de las fases no se obtiene directamente de la observación al MEB, pero esta técnica combinada con el Análisis de Imagen sí permite obtener este parámetro de un modo bastante sencillo y con una buena aproximación. Se podrían citar otros muchos ejemplos, pero el tema se alargaría demasiado.

Por último sería conveniente citar el estudio de los fenómenos de recristalización y de maclado mediante el empleo de Diagramas de Canalización de electrones. A diferencia de otras imágenes obtenidas en el MEB, la imagen de canalización de electrones no corresponde a un tipo de señal específica. Este fenómeno tiene su origen en la naturaleza cristalina de los sólidos y como consecuencia la información que proporciona es cristalográfica. El fenómeno tiene su origen en las variaciones de la intensidad electrónica emitida con el ángulo de incidencia del haz de electrones con respecto a los planos cristalinos de la muestra. Por tanto, el contraste obtenido es inde-

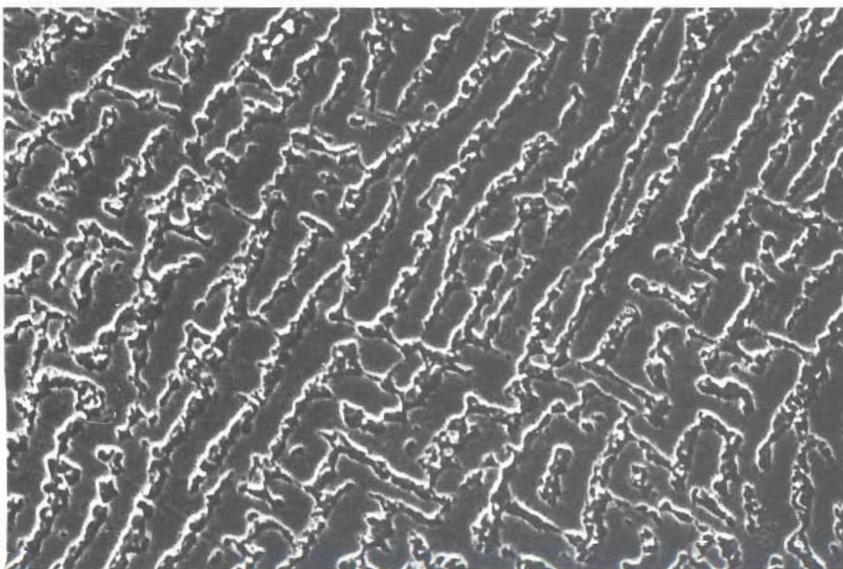


Fig. 19.14. Coalescencia de precipitados de Ni₃Al. Imagen de electrones secundarios.

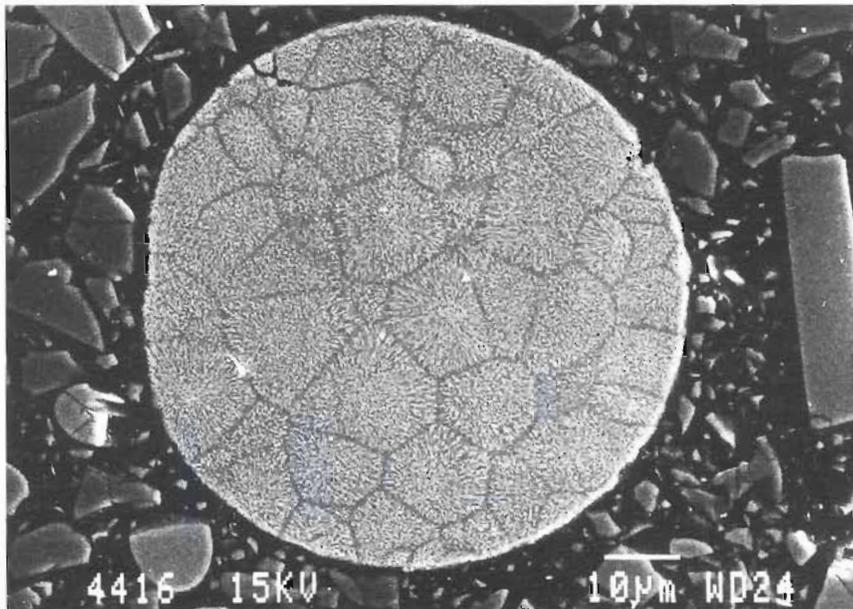


Fig. 19.15. Al-Cr-Mo solidificada rápidamente tras un tratamiento térmico. Imagen de electrones secundarios.

pendiente de la topografía de la muestra. Sin embargo, esta técnica tiene una importante limitación que es la de necesitar que la muestra a estudiar tenga una superficie lo más libre de distorsiones posible. Ello requiere una preparación metalográfica muy cuidadosa. Generalmente se ha de realizar mediante pulido electrolítico.

Agradecimientos

Agradezco a todos aquellos compañeros del CENIM que tan amablemente me han cedido sus micrografías para poder escribir este capítulo.