

REPUBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR EN  
CIENCIAS TECNICAS  
RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE CARGA ALEANTE PARA CONSUMIBLES DE  
SOLDADURA UTILIZANDO RESIDUAL CATALÍTICO Y CROMITA CUBANA

*AUTOR: M.Sc. FÉLIX ARIEL MORALES RODRÍGUEZ*

TUTORES: Dr.C. Lorenzo Perdomo González  
Dr.C. Rafael Quintana Puchol  
Dr.C. Manuel Rodríguez Pérez  
Dr.C. Eulicer Fernández Maresma

Moa, 2005

## SINTESIS

Se exponen los resultados de la obtención de una carga aleante para consumibles de soldadura a partir de la conformación de una carga metalúrgica con el residual catalítico base óxido de vanadio (V) y la cromita refractaria cubana en una relación de 2,17. Se planifica un diseño de experimentos con restricciones del tipo Mc. Lean Anderson, donde se introducen como variables independientes los contenidos de caliza, fluorita y coque. Como región de trabajo para la escoria, se define la zona de espinelas en el diagrama ternario del tipo  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  en el rango de temperaturas de 1 600 °C y 1 800 °C. Las cargas se someten al proceso de reducción carbotérmico en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito. Para la evaluación de las aleaciones como cargas aleantes, se tomaron las corridas B y D, que son las que tienen menor y mayor contenido de cromo y vanadio respectivamente y los resultados de las caracterizaciones de los depósitos de soldadura arrojaron la presencia de fases de carburos en una matriz de martensita con los valores de dureza de 667,6 y 695,3 HV; lo que las convierte en cargas aleantes idóneas para la fabricación de electrodos tubulares revestidos para recargue mediante soldadura manual por arco eléctrico. En la prueba de desgaste por abrasión pin-disco abrasivo, los menores valores de desgaste se obtuvieron en el depósito de soldadura del electrodo con la carga aleante de D, que con relación a los electrodos comerciales de los tipos N 700 y el 4004 N de la firma Eutectic Castolin. El costo de fabricación de electrodos correspondientes a la carga aleante D, es considerablemente menor, llegando a \$ 3 243.78 CUC/tonelada. La metodología empleada resuelve los posibles impactos ambientales de los desechos del procesamiento de los residuales catalíticos de óxidos de vanadio (V) y representa una solución importante ante los efectos negativos que pueden provoca la acumulación de estos residuales contaminantes en distintas industrias del país.

## **INTRODUCCIÓN**

En la medida en que la economía nacional se reanima, los niveles de consumo de materiales para soldar se incrementan y entre ellos juegan un papel fundamental aquellos destinados a las industrias recuperadoras de piezas. Por sus altos niveles de consumos, entre estas industrias se destacan: la industria del cemento, la industria de materiales de la construcción, la industria minero-metalúrgica; en procesos tales como extracción de minerales y su procesamiento y en la industria agroazucarera.

En el caso específico de la industria minero-metalúrgica y de materiales de la construcción, existe un gran volumen de piezas sometidas a condiciones de desgaste de alta abrasión que son recuperadas o fabricadas con recargue superficial en las partes de trabajo, aplicando tecnologías de soldadura manual con arco eléctrico. Estas operaciones según Rivera, 2004, en el año 2003 se llegaron a consumir más de 40 toneladas en las diferentes ramas de la economía cubana con un valor de unos \$250 000.00 CUC. En estos casos los electrodos tubulares revestidos con alto nivel de aleación pueden tener gran aplicación dada la versatilidad que poseen, con relación a la obtención de depósitos de soldadura adecuados, variando simplemente la composición de la carga del aleante del mismo.

La demanda creciente de materiales para soldar destinados a la recuperación de piezas, unidas a la imposibilidad de muchas empresas para adquirir los consumibles adecuados en el mercado internacional, han acelerado los trabajos de investigación y desarrollo encaminados a obtener productos nacionales que permitan sustituir parcial o totalmente estas importaciones.

Una de las características más comunes para la restauración de piezas desgastadas en la industria minero-metalúrgica y otras ramas de la economía donde predominan los mecanismos de desgaste por abrasión, es que se requieren depósitos de soldadura con altos valores de dureza que oscilan entre 40 y los 64 HRC. Entre estas piezas se encuentran los sinfines en el transporte de materiales en las plantas de procesos, los sistemas de trituración y molienda de mineral, los sistemas para la preparación de pulpa en la Empresa "Pedro Sotillo Alba", así como

los equipos de laboreo y carga en las minas y las máquinas de preparación de mezclas de moldeo en los talleres de fundición en la Empresa Mecánica del Níquel. En estos depósitos de soldadura se requieren elementos de aleación tales como: el carbono, el cromo, el molibdeno y el vanadio; todo lo cual encarece la producción de estos tipos de electrodos.

En Cuba se disponen de fuentes no clásicas que permiten la obtención de metales como el cromo y el vanadio a partir de reservas de cromitas refractarias estimadas en más de 5 000 000 de toneladas métricas (Leyva, et. al, 1997; Proenza, 1997; Perdomo, 1999; Arniella y Quintana, 2002); así como la existencia de fuentes potenciales de vanadio no explotadas hasta ahora, como son los residuales catalíticos que se producen en las plantas durante la obtención de ácido sulfúrico (Morales, 2002 y 2004a). Por otra parte, en las empresas de fundición, donde fundamentalmente se utiliza el coque como combustible en los hornos de cubilote, existen reservas de residuales que por no poseer la granulometría requerida, normalmente se desechan y pueden ser empleados en otros procesos industriales (Cruz, 2001; Morales et. al., 2002).

En el país funcionan tres plantas para la obtención de ácido sulfúrico que emplean la conversión catalítica del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , para lo que se utilizan catalizadores base óxido de vanadio (V). Según estimados (Morales et. al., 2002 y 2004a), anualmente se generan unas 20 toneladas de residual catalítico, existiendo en almacenes especiales unas 200 toneladas.

Según estudios preliminares (Morales 2002, 2004b y 2004a), una adecuada estrategia de conformación de las cargas metalúrgicas utilizando el residual catalítico de vanadio y la cromita refractaria cubana debe permitir la obtención de aleaciones multicomponentes de cromo-vanadio factible de ser utilizada en la conformación de cargas aleantes en electrodos tubulares, destinados al relleno superficial de piezas que trabajan en condiciones de alta abrasión.

En el Centro de Investigación de Soldadura de la Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas se han desarrollado procesos metalúrgicos carbotérmicos y aluminotérmicos a nivel de laboratorio y miniplanta reflejados en los trabajos de Perdomo, 1999; Marcelo, 1999, Cruz, 2001 y Rodríguez, 1992 a y b; los que han

permitido el procesamiento de disímiles minerales metálicos y no metálicos cubanos con el objetivo de obtener componentes de cargas aleantes para consumibles de soldadura destinados, en lo fundamental, a la recuperación de piezas.

De igual manera, en el Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa, se ha acumulado una vasta experiencia en los procesos metalúrgicos de elaboración de minerales fundamentalmente de níquel, así como en otros procesos afines o complementarios necesarios para el procesamiento de minerales metálicos y no metálicos.

Lo analizado anteriormente permite trazar una estrategia para evaluar y proponer un método eficaz de tratamiento carbotérmico de residuales catalíticos base óxido de vanadio (V) conjuntamente con otros minerales cubanos, para obtener cargas aleantes multicomponentes factibles de utilizar en la fabricación de consumibles de soldadura.

Para el desarrollo del trabajo se establecen como los elementos fundamentales en la investigación los siguientes:

#### **Situación problémica**

Necesidad del estudio, propuesta y validación de un proceso metalúrgico eficaz para el tratamiento simultáneo de la cromita refractaria cubana y el residual catalítico de  $V_2O_5$  almacenados en el país que permita obtener una carga aleante factible de emplear en la fabricación de electrodos para la recuperación de piezas desgastadas.

#### **Objetivo**

Obtener una aleación de hierro-cromo-vanadio para la fabricación de electrodos tubulares para recargue de superficies a partir de la reducción carbotérmica de residual catalítico de óxido de vanadio (V) y cromita refractaria cubana.

#### **Problema científico**

El alto contenido de  $SiO_2$  y azufre en el residual catalítico de  $V_2O_5$  limitan el empleo de la tecnología convencional para la obtención de cargas aleantes para la fabricación de electrodos de soldaduras.

**Objeto de investigación**

Obtención de una carga aleante multicomponentes a partir de la reducción carbotérmica simultánea de cromita refractaria cubana y residuales catalíticos de óxido de vanadio (V).

**Hipótesis**

La reducción carbotérmica de residuales catalíticos base óxido de vanadio (V) y cromita refractaria cubanas, posibilita recuperar los valores metálicos presentes en los mismos y obtener una carga aleante multicomponentes factible de utilizar en la fabricación de electrodos tubulares revestidos para el recargue de superficies.

**Novedad científica**

Se propone y valida, con criterios científicamente argumentados, la obtención con altos niveles de recuperación de los valores metálicos de una aleación multicomponentes para la formulación de electrodos de soldadura y una escoria del tipo  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ , utilizando la reducción carbotérmica del residual catalítica de óxido de vanadio (V) y la cromita refractaria cubana

**Aporte metodológico**

Se establece y valida una metodología de procesamiento metalúrgico por reducción carbotérmica simultánea de residuales catalíticos base óxido de vanadio (V) y cromitas refractarias cubanas que permite obtener, como producto final, cargas aleantes para consumibles de soldadura.

**Aporte económico**

Se propone un método de obtención de consumibles de soldadura cuyo costo de fabricación, de \$ 3 243.78 CUC/tonelada, es considerablemente menor en comparación con otros electrodos comerciales evaluados, lo que permite ahorrar al país alrededor de \$ 5 757 CUC/tonelada al año

**Aporte social**

El método propuesto permite minimizar los impactos ambientales negativos derivados del residual catalítico base óxido de vanadio (V) y el residual del coque acumulados en distintas industrias y talleres del país.

**Tareas a desarrollar**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos relacionados con el tratamiento del residual catalítico base óxido de vanadio (V).
2. Caracterización del residual catalítico y determinación de las regularidades que permitan determinar sus posibilidades para la confección de cargas metalúrgicas para el proceso de reducción carbotérmica.
3. Diseño del Plan Experimental y procesamiento estadístico de los resultados.
4. Caracterización de los productos del proceso de reducción-fusión y evaluación de las aleaciones seleccionadas.
5. Análisis y evaluación del impacto económico y ambiental.

**CAPITULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

Los productos de mayor uso para la fabricación de aleaciones son las ferroaleaciones, siendo las más utilizadas las de cromo y en menor cantidad las de vanadio dado a su alto costo, empleándose solo en aleaciones con propósitos especiales. La industria de los consumibles de soldaduras tiene en la ferroaleaciones una de las fuentes fundamentales para la formulación de las cargas aleantes a emplear en los mismos.

**1.1 Fuente de vanadio. Principales características**

En el año 2001, el consumo de vanadio en los Estados Unidos según Norton y Croat, 2002, fue de 3600 toneladas, siendo las importaciones más importantes de ferrovandio las procedentes de Canadá (35%), Sudáfrica (21%), China (21%), Austria (9%) y de otros países (4%) y de óxido de vanadio (V) las provenientes de Sudáfrica (99%) y de otros países (1%), cotizándose en el mercado mundial según Norton G., A., y Croat C., G., en el 2003, el a un precio de \$1.40 USD/libra de óxido de vanadio (V) y \$140.00 USD/libra de vanadio contenido en el ferrovandio.

**1.1.1. Fuentes naturales de vanadio**

En la litosfera superior el vanadio es oxífilo, se conocen hasta la fecha unos setenta y cinco minerales que contienen vanadio en diferentes estados de valencias. Estos minerales se pueden dividir (según Jensen, 1981 y Norton y Croat, 2003), en arenas y sedimentos uranoferroso, en rocas de fosfatos, silicatos, sulfatos,

vanadatos, se encuentra además en la bauxita, en carbones, en el petróleo, en el alquitrán.

### **1.1.2. Residuales industriales que contienen vanadio**

A escala internacional el manejo de los residuales catalíticos, en las empresas productoras de ácido sulfúrico, se considera un problema ambiental importante, debido a las regulaciones existentes. Los residuales catalíticos almacenados en utilizar en el trabajo se muestran en la tabla 1 de los anexos, los que tienen en sus componentes fundamentales; óxido de vanadio, óxidos de silicio y dióxido de azufre, estando ellos en el orden del 67.61%.

En Rusia según Martínez, en 1994, una fuente importante para la producción de ferrovandio son las escorias de la producción de acero en convertidores con soplado con oxígeno. La industria del petróleo las fuentes más utilizadas son los petróleo de Venezuela y Canadá que contienen entre 0,1 al 1,5 % de  $V_2O_5$  como impurezas. En América del Norte y del Sur, Europa, Asia y Australia poseen depósitos de carbón donde el vanadio está presente en el orden del 1% en forma de  $V_2O_5$ . En los procesos para la utilización de los residuos industriales con vanadio se tiene como otra fuente, el reciclado de las chatarras de aceros de herramientas, aceros especiales con contenido apreciable de vanadio.

### **1.2. Afectaciones al medio ambiente por los compuestos del vanadio**

La contaminación ambiental por vanadio más importante en el mundo se considera por el Consejo Internacional de Química de la Organización Mundial de la Salud en el 2001, la constituye la combustión del petróleo y el carbón y otros procesos industriales, alrededor del 90% de las aproximadamente 64 000 toneladas de vanadio en forma de óxidos que se liberan a la atmósfera cada año a partir de fuentes tanto naturales como antropogénicas proceden de la combustión de combustibles fósiles. En los estudios de la influencia sobre las personas del vanadio, se tiene que la información toxicocinética disponible es limitada, pero parece indicar que se absorbe vanadio tras la inhalación y luego se excreta en la orina, con una fase inicial de eliminación rápida, seguida de una fase más lenta, que posiblemente se debe a la eliminación gradual del vanadio desde los tejidos del organismo. Tras la administración oral, la absorción de vanadio tetravalente a partir

del sistema gastrointestinal es escasa. Los efectos toxicológicos finales motivo de preocupación para las personas son la genotoxicidad y la irritación de las vías respiratorias. Puesto que no es posible determinar un nivel de exposición sin efectos adversos, se recomienda reducir los niveles en la medida de lo posible. En los estudios realizado por la Universidad Autónoma de Madrid en el 2002 (<http://www.dsalud.com/noticias.htm>), se considera como la máxima cantidad de vapor (o polvo) de  $V_2O_5$  admisible para las personas es de  $0,05 \text{ mg/m}^3$ .

Sin embargo el vanadio metálico tiene funciones positivas sobre la salud humana según aparece en [www.dsalud.com](http://www.dsalud.com) en el 2005, siendo lo más representativo; ejerce una acción preventiva del cáncer, actúa como agente antioxidante, previene los ataques cardíacos, mejora el metabolismo del hierro, previene la caries dental, inhibe la formación de colesterol en los vasos sanguíneos, mantiene los niveles de grasa en sangre. Está presente en la mayoría de los tejidos corporales siendo absorbido rápidamente para ser empleado por el organismo. El sobrante se excreta por vía urinaria.

### **1.3. Métodos de tratamiento para las materias primas que contienen vanadio**

#### **1.3.1. Métodos por vía húmeda**

Debido a la gran diversidad de las fuentes de materias primas, en la industria del vanadio se emplean varias tecnologías para procesar los minerales o materias primas que contienen  $V_2O_5$  a partir de métodos por vía húmeda, las que de forma general siguen las etapas siguientes; tostación, lixiviación neutralización; alcalina o ácida, extracción por solvente, intercambio iónico y precipitación, estando entre ellos: Pyrih, 1978; Hahn, 1987; Martínez, 1994; (Shieldalloys Metallurgical Corporation. Ferroalloys & Alloying Additives Online Handbook. Htm, Mayo 2003). Estos procesos necesitan suministros especiales como son las sales alcalinas tales como carbonato de sodio que cada año incrementa su precio y en Cuba es limitada su producción y no se abastece al país con las producciones actuales. Por lo que es necesario analizar otros métodos para el tratamiento de residuales catalíticos base óxido de vanadio, que permita de forma directa la obtención de cargas aleante para cargas aleantes de consumibles de soldadura y que las materias primas a utilizar existan en el país con bajos precios.

### 1.3.2. Métodos para la reducción del óxido de vanadio (V)

Otros tratamiento para los residuales catalíticos base óxido de vanadio, se tienen en los procesos por reducción, siendo los más utilizados, los que se efectúan con los reductores sólidos tales como; el silicio, el aluminio, el carbono éste último en sus diferentes formas: grafito, antracita, hulla, según López, 1990 y Hajim, 1986, la reducción de los óxidos de vanadio ha sido estudiada por muchos autores (Carlson, 1981; Emlin y Gacik, 1974; Riss, 1980). En la práctica mundial la producción del ferrovandio comercial se realiza, mediante la reducción con aluminio fundamentalmente para producir un ferrovandio con bajos contenidos de carbono. Se considera que la reducción por carbono del óxido de vanadio (V) presente en los residuales catalíticos, hasta ahora ha sido estudiada insuficientemente.

### 1.2.3. Método de reducción carbotérmica para el óxido de vanadio

La producción de ferrovandio a partir de la reducción del óxido de vanadio (técnicamente puro) con carbón según S. Martínez en su trabajo en 1994, se puede realizar de forma controlada en horno de arco eléctrico o en horno de plasma. En la obtención del ferrovandio se introducen los materiales de la carga directamente en la zona de altas temperaturas en condiciones altamente reductora, la carga generalmente consiste en una mezcla de partículas finas del material que contiene vanadio, la fuente de carbón, chatarra de hierro como fuente de hierro y los fundentes, lográndose en este proceso metalúrgico la formación de una escoria, una ferroaleación y la producción de gases durante el proceso. La reducción de los óxidos de vanadio por el carbono según Emlin y Zacuk , 1974, se produce según las reacciones siguientes:



Como se observa el proceso de reducción del óxido de vanadio (V) sin otro elemento que lo acompañe va directamente a la formación del VC. Cuando no existe fuente de hierro en el proceso de reducción, como en el caso que se procese directamente el residual, se formaría un compuesto de vanadio en unión con el silicio que lo acompaña. Según Edneral, 1977 y corroborado por Quintana, et. at.,

2004, con el tratamiento del residual catalítico con carbono: No se formó aleación alguna, sino sólo un siliciuro de vanadio.

Según Riss, 1975, en la producción de ferrovanadio a partir del proceso de reducción con carbono no ha tenido aplicación en la antigua Unión Soviética, se reporta por este autor, que en la fábrica de Construcción de Maquinaria de Zaparoschi se desarrollo de forma experimental, la fabricación de ferrovanadio con alto contenido de carbono y manganeso, para utilizarlo directamente en la fabricación de acero al manganeso tipo Hadfield. La ferroaleación obtenida tiene una composición química; 76% de manganeso 2,8% de vanadio, 6% de carbono, 0,4% silicio, 0,15% de fósforo y el resto hierro, teniendo una extracción de vanadio entre el 87 al 92 %.

#### **1.4. Otros minerales acompañantes en la carga**

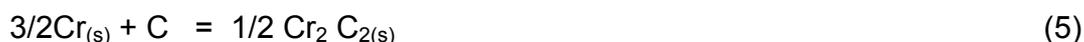
Para la selección de otros materiales de carga se tiene en cuenta los contenidos de azufre que acompaña el residual catalítico, así los elementos necesarios para la formación de la aleación, siendo imprescindible el empleo de otros minerales acompañante como son; la cromita refractaria cubana como fuente de hierro y del carburo de cromo, utilizados tradicionalmente en la formulaciones de electrodos para recargue duro. La caliza como elemento desulfurante, el coque como excelente agente reductor y la fluorita por su influencia positiva en los procesos en las escorias.

##### **1.4.1. Espinela cromífera como fuente de cromo**

En Cuba los yacimientos más importante de cromita (espinela cromífera) se encuentran en el macizo Mayarí – Baracoa, que forma parte de la unidad tectónica anticlinal oriental, según los estudios de Proenza, y Leyva, 1997, Muñoz, 2004. La cromita refractaria cubana se caracteriza por su composición química como se muestra en la tabla 1 de los anexos, teniendo una relación  $\text{Cr}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$  de 2.26. La composición química de la cromita refractaria está formada aproximadamente por el 50% de los óxidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{SiO}_2$  con una relación de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{SiO}_2$  igual a 1:0,6:0,2.

#### 1.4.2. Método de reducción carbotérmica de la cromita

Durante la reducción del cromo en presencia de hierro en los trabajos de Castellano, et. al., 1986 y Perdomo, 1999, se producen rendimientos metálicos significativos, en este caso el hierro actúa como colector del cromo lo que favorece el aumento de la velocidad de reducción del cromo y su recuperación. Durante el proceso de reducción-fusión de la carga, se ha comprobado que con el aumento de la temperatura la reacción se desplaza hacia la formación del silicio metálico que pasa a la aleación. La formación de los carburos de cromo durante el proceso de reducción-fusión de la cromita es inherente a este proceso. La formación de la fase de carburos garantiza el desarrollo del proceso de reducción del óxido de cromo y por lo tanto va a definir la eficiencia del proceso según se reporta en los trabajos de Emlin y Zacuk, 1974 y de Castellano, 1986, las reacciones que rigen el proceso de formación de los carburos de cromo durante la reducción son las siguientes;



Durante el proceso de reducción de la cromita según se reporta por Arangurent, 1963 y Riss, 1975, sucede que se forman carburos de hierro a partir del óxido de hierro con una gran eficacia entre el 95 y 97 %, simultáneamente con la reducción del óxido de cromo se llega a recuperar entre el 90 – 92 % de este metal, formándose un carburo complejo de hierro y cromo.

En 1992 el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de España y el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Cuba desarrollaron investigaciones conjuntas en horno de plasma para la obtención de ferrosilicocromo a partir de finos generados en el beneficio de las cromitas refractarias de la zona Moa-Baracoa, en mezclas con serpentina niquelífera, cuarcita y magnesita indistintamente, lográndose obtener un producto no estandarizado de 45,92 - 51,25 % de cromo, 8,48 - 15,76 % de silicio y 4,20 - 5,65 % de carbono.

En los trabajos desarrollados sobre las cromitas refractarias cubanas Perdomo, 1999 y Quintana, 1999, 2002 y 2004, se estudia el proceso de reducción carbotérmica de la cromita refractaria cubana, obteniéndose ferrocromo de alto

carbono para la formulación de cargas aleante de un fundente aglomerado para ser utilizado en la soldadura automática con arco sumergido, obteniendo contenido de carbono de 5,2 a 6,0 %, llegando la recuperación del cromo hasta el 90 %, se empleo la escoria obtenida como matriz para el fundente, con lo que se logra un mayor aprovechamiento del cromo disminuyendo las perdidas del metal.

A partir de los resultados anteriores se puede asegurar que las cromitas refractarias cubanas son adecuadas para la producción de ferrocromo de alto carbono siempre que se utilice una composición de carga que permita valores aceptables en la recuperación del cromo.

### 1.4.3. Caliza

La caliza es una roca cuyo componente mineral principal lo constituye la calcita con el 90 - 92%. La caliza pura está formada por 56% de CaO y 44% de CO<sub>2</sub>. La caliza es un portador de CaO siendo un óxido básico en la formación de la escoria, se utiliza mundialmente como desulfurante y formador de escoria en los procesos de obtención de aleaciones por su eficacia y su bajo costo. Como el residual catalítico objeto de estudio, tiene en su composición una cantidad apreciable de azufre es importante tener en cuenta esta característica de la caliza para la conformacion de carga metalúrgica. La desulfuración con cal o la caliza según Kudrin, 1989, se puede definir como sigue:



Cuanto mayor sea la actividad del CaO en la escoria y menores sean las actividades del FeO y el azufre tanto menos azufre quedará en el metal, esto se logra al aumentar la basicidad de la misma. Con el aumento de la basicidad de la escoria el coeficiente de distribución del azufre  $\eta_s = (S) / [S]$  crece, por lo que el contenido del azufre en el metal disminuye.

En el trabajo de Cruz, 2001, se empleó la expresión 1, desarrollada por (Podgayeskii, 1988), que considera la conversión de la masa porcentual en molecular directamente, llegando al criterio de ser más precisa, puesto que en ello se define en mayor grado la participación de cada uno de los óxidos.

$$B = \frac{0.018CaO + 0.025MgO + 0.006CaF_2 + 0.014(Na_2O + K_2O) + 0.007(MnO + FeO)}{0.017SiO_2 + 0.005(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (1)$$

Donde: Concentraciones de los componentes, se expresan en %

Tanto en los procesos metalúrgicos de fusión, como en los fundentes de soldadura para arco sumergido y en los revestimientos para electrodos de soldadura, la caliza se adiciona en calidad de fundente básico y formador de gases protectores del depósito durante el desarrollo del cordón de soldadura.

#### 1.4.4. Fluorita

La temperatura de fusión relativamente baja, provoca que al fundirse la fluorita produzca un desplazamiento apreciable de las isoterms de las fases del sistema de óxidos en los diagramas ternario del tipo MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hacia temperaturas menores según Kornaraki, 1977. La fluorita se considera un fundente por excelencia para los procesos de fusión de minerales y aleaciones, aumenta la fluidez de la escoria acelerando el proceso de fusión, se utiliza en los procesos metalúrgicos en calidad de fundente neutro, no realiza actividad química en los baños fundidos. Según Kudrin, 1989, ella realiza la función de regulador, pasando a la escoria como un modificador de funciones. La fluorita se utiliza en los sistemas complejos de óxidos, en la confección de los revestimientos para electrodos para la soldadura manual por arco, lo cual favorece sus funciones metalúrgicas durante el proceso de soldadura.

#### 1.4.5. Coque

La mayor aplicación del coque se realiza en la industria metalúrgica en calidad de reductor, combustible como se analizó por Zachfara, 1981, no obstante una parte del carbono que contiene, pasa a la aleación de hierro formando carburo y se disuelve en el hierro. Se considera un carbón coque de buena calidad siderúrgica cuando tiene una composición química con: carbono 96,5%, hidrogeno 0,3%, nitrógeno 1,3%, oxígeno 1,3%, azufre 0,6% y entrega un calor específico de 27,5 MJ por kg.

### **1.5. Afectaciones al medio ambiente por gases durante el tratamiento del residual**

El efecto de  $\text{SO}_2$  sobre el ecosistema que abarca problemas en las vías respiratorias y gastrointestinales, el efecto más visibles e inmediato se observa sobre áreas urbanas y forestales con niveles de contaminación altos, como consecuencia de las llamadas lluvias ácidas que pueden precipitar a grandes distancias del foco fijo de emisión de  $\text{SO}_2$ .

La limpieza de gases con contenidos apreciables de óxidos de azufre, es una de las variantes más utilizadas en las centrales termoeléctricas y en otros procesos industriales, siendo el uso de torres lavadoras de gases con lechada de cal las de mayor empleo. Una muestra de ello se tiene en la desulfuración de los gases en los Estados Unidos, donde el 90% de las tecnologías empleada en la limpieza de los gases de la combustión en plantas industriales, utilizan el proceso húmedo con lechada de cal, llegando al 95% el uso del proceso cal-caliza en la limpieza de los gases con óxidos de azufre (Corbitt, 1999).

## **CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS**

La selección de los componentes de las cargas metalúrgica son la clave para producir bajos consumos energéticos y altas extracciones de los valores metálicos presentes en la carga, para lo que se tiene cuenta que los elementos tengan las cualidades de: fundentes y formadores de escorias; estabilizadores del arco eléctrico; agentes reductores; aceleradores del proceso de desulfuración y formadores de la ferroaleación.

### **2.1. Métodos para análisis experimentales**

#### **2.1.1. Métodos de análisis químico para el residual catalítico**

La fuente de vanadio empleada en la investigación procede de los residuales catalíticos de la Empresa "Pedro Soto Alba", donde se utiliza el óxido de vanadio (V) para el proceso de catálisis en la producción de ácido sulfúrico. El análisis químico del residual catalítico se realizó en un equipo de Absorción Atómica marca UNICAM

LIMITED, modelo 929 / 107 INC. Para el análisis para el azufre se utilizó el método gravimétrico según Norma Empresarial NRIB 968-87, con precisión de 0,01%.

### **2.1.2. Métodos de análisis por difracción por rayos X**

Para los ensayos de difracción de Rayos X, para las materias primas y los productos obtenidos durante el proceso de reducción-fusión se utilizó el Difractómetro HZG-4A de la firma Freiberger Präzisionsmechnik. En los ensayos se empleó la radiación de un tubo de cobalto, con longitud de onda ( $\lambda$ ) de 0,179021nm (1,79021Å), Las mediciones se realizaron desde un valor angular de  $2\theta = 40^\circ$  hasta  $2\theta = 120^\circ$ . La velocidad angular y el paso empleado fueron de  $1^\circ / \text{min}$  y  $0,01^\circ$  respectivamente.

### **2.1.3. Método para el análisis químico de las escorias y las aleaciones**

La caracterización química de los productos que se obtienen durante el proceso de reducción carbotérmica se realizó con el empleo del Espectrómetro de Rayos X, tipo Phillips PW 2404, tubo de Rayos X Super Shard de 4KW, con posibilidades de determinación analítica desde el boro hasta el uranio. En todas las determinaciones se empleó el sistema de validación analítica desarrollado por Pérez A., 2005. En la determinación del carbono y azufre se utilizó el analizador continuo de carbono y azufre, modelo CS MAT-6500, marca JUWE.

### **2.1.4. Análisis microestructural y de microanálisis de fase**

Para el análisis microestructural en los depósitos de soldadura se empleó un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Phillips modelo EP- 536, para la determinación de los microanálisis se utilizó un emisor por plasma acoplado del tipo (Equipo spectroflame) modelo TMAQ-023 (ASTM E 1097-97).

### **2.1.5. Ensayos de macrodureza y microdureza**

Los ensayos de macrodureza y microdureza realizados a los depósitos de soldadura de las corridas B y D se desarrollaron de acuerdo a las normas cubanas NC 05-63:85, NC 04-11:72. La determinación de la dureza del cordón depositado se realizó sobre una probeta según la especificación de la AWS SFA-5.13. El diseño de la probeta se muestra en la figura 8 de los anexos.

En la medición de la macrodureza se empleó un durómetro universal marca Heckert modelo WPN, escala Vickers y con prisma de diamante. La carga aplicada fue de 10 Kg (100 N) y el tiempo de aplicación fue de 10 s.

La determinación de la microdureza se realizó en un microdurómetro Shimadzu, utilizándose un penetrador de pirámide de diamante, con una apreciación para la medición de la huella de 0,0005 mm. Se utilizó una carga 0,49N (0,05Kg) y un tiempo de aplicación de la carga 15 s.

### **2.1.6. Ensayo para determinar el desgaste abrasivo en el depósito de soldadura**

Para el ensayo de desgaste se utilizó la instalación experimental del tipo PIN – DISCO ABRASIVO según la Norma de la ASTM, G 99-2000, acoplada a un torno mecánico en el laboratorio de tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Dicha instalación permite simular a nivel de laboratorio el mecanismo de desgaste abrasivo. El valor inicial de este procedimiento de ensayo radica en que predice una clasificación jerárquica relativa de materiales (Rodríguez, 1991; Álvarez, 1996). Este procedimiento de ensayo impone condiciones que causan las pérdidas de masa: los materiales a ensayar por este método deben tener alta resistente a la abrasión. Una vista de la instalación se muestra en la figura 7 de los anexos. Se utilizó el método gravimétrico por diferencia de pesadas recomendado por Álvarez y González, 1995 y Hernández, 1998, aplicando la expresión 2.

$$PP = G_o - G_f \quad (2)$$

Donde:

PP: Desgaste gravimétrico, en (g)

G<sub>o</sub>: Peso inicial, en (g)

G<sub>f</sub>: Peso final, en (g)

Las características para las probetas del ensayo se realizaron a partir de la norma n ASTM, G 99-2000

## **2.2. Materiales empleados para obtención de la aleación**

### **2.2.1. Caracterización del residual catalítico**

La composición química de las muestras tomadas aparece en la tabla 1 de los anexos. Se aprecia que los componentes mayoritarios del residual lo constituyen: el óxido de silicio, el azufre y el agua, los que representan el 78,1 % de la composición química del mismo. Para analizar el comportamiento del residual catalítico durante el calentamiento, se sometió a un proceso de calentamiento a diferentes temperaturas para determinar las pérdidas en peso. La figura 1b muestra el difractograma de la muestra tratada a 800 °C. Se observa que no existe la presencia de reflejos que caracterizan la fase de azufre, considerando la no existencia de este elemento en el residual a esta temperatura; sin embargo se presenta un patrón de difracción caracterizado por reflejos bien definidos según las tarjetas PDF 18-1170 de la fase óxido de silicio como la fase representativa del soporte y los reflejos que caracterizan el óxido de vanadio según la tarjeta PDF 42-876.

### **2.2.2 Otros minerales de adición**

En la conformación de la carga del proceso de reducción carbotérmico, se tiene en cuenta la viabilidad técnico-económica del proceso teniendo en cuenta la composición química del residual catalítico y las posibilidades de suministros de los materiales de carga necesarios, así como los resultados obtenidos por Riss y Khodorosky, 1975; Perdomo, en 1999; Cruz, 2004; Morales, 2002 y 2004, con el uso de estos materiales en la fabricación de ferroaleaciones. Estando entre ellos la cromita refractaria cubana, caliza, fluorita y el coque, la composición química se muestran en la tabla 1 de los anexos.

### **2.3. Planificación del diseño de experimento para el proceso de reducción carbotérmico**

Un aspecto novedoso del trabajo es la posibilidad de la sustitución de la arena sílice empleada como fundente en la fabricación de ferrocromo como se hace habitualmente, por el óxidos de silicio que contiene el residual catalítico que representa el 47,6 % de su composición, garantizando una relación cromita / residual catalítico de 2,17, para una composición química de la escorias de 37% de SiO<sub>2</sub>; 33% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 24% de MgO, esta composición se indica por las líneas en el diagrama ternario de la figura 2 en el anexo, situándose el intercepto en la zona de espinela a una temperatura de 1 680 °C.

Para el desarrollo del plan experimental se utilizó el diseño experimento para mezclas empleado por (Perdomo, 1999; Cruz, 2000 y 2001 y Morales, 2002 y 2005), para el tratamiento de los materiales seleccionado en la investigación, donde los factores del sistema son conocidos y tiene como característica particular la restricción, de que la suma de todos los componentes no puede exceder el valor de 1 ó 100 % (condición de normalidad) de la mezcla. Se utilizan como variables independientes los componentes que influyen directamente en el proceso de reducción-fusión-afino, siendo ellas el coque el cual se dosifica para garantizar la reducción, la caliza como elemento para la formación de escoria y la desulfuración, la fluorita que mejora los procesos en la escoria e influye en la disminución de su temperatura de fusión. La zona restringida seleccionada para cada una de las variables independientes según la influencia de cada de los componentes seleccionados como variables de entrada en el plan experimental son las siguientes:

- Calcita,,,,,, $1,5 \leq X1 \leq 5,0$
- Fluorita,,,,,, $1,0 \leq X2 \leq 7,0$
- Coque..... $9,0 \leq X3 \leq 12,5$

Con la selección de la zona de restricción del sistema de las variables  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , se aplica el diseño para mezclas con restricciones del tipo Mc Lean Anderson.

### 2.2.1. Construcción de la matriz experimental

El diseño Mc Lean Anderson nos permite procesar mezclas restringidas de forma satisfactoria, cada restricción posee dos valores definidos el valor máximo y el valor mínimo, para cada variable de entrada como se muestra en la tabla 2 en el anexo. La cantidad de experimentos iniciales queda determinada por la cantidad de componentes atendiendo a la expresión 3:

$$N = q * 2^{q-1} \quad (3)$$

Donde; q es la cantidad de componentes.

En este caso (tres componentes) la matriz inicial quedaría con 12 corridas experimentales, como se muestra en la tabla 3 de los anexos. Como resultado la matriz del diseño se reduce a seis puntos. La última etapa de la construcción del diseño se decide añadir a la matriz final un nuevo punto. Como resultado de ello la

matriz final del experimento queda con 7 puntos o corridas experimentales, cuyos valores se muestra en la tabla 4 de los anexos. Quedando la carga metalúrgica de acuerdo a la capacidad del horno por arco en 3 588 g, considerando, además la caliza, la fluorita, el coque y la relación cromita, residual catalítico en 2,17, lo que hace que la cantidad de cromita en la carga sea de 2 000 g, para el residual catalítico de 920 g.

Para el procesamiento de los resultados del plan experimental es necesario definir las variables de respuesta, donde las variables de entrada  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  definen el comportamiento que se produce durante el proceso de reducción carbotérmico conjuntamente del residual catalítico y la cromita refractaria en el horno de arco eléctrico. Por lo que se toman como variables de respuestas las siguientes:

$Y_1$  - Cantidad de cromo en la aleación en %.

$Y_2$  - Cantidad de vanadio en la aleación en %.

$Y_3$  - Cantidad de azufre en la aleación en %.

#### **2.4. Procedimiento para la obtención de la aleación**

El proceso de reducción-fusión se desarrollo en tres etapas básicas; preparación de la carga, fusión – reducción vertido.

##### **2.4.1. Preparación de la carga**

Los parámetros de granulometría para la preparación de la carga se utiliza los valor de tamaño de partícula propuestos por Cruz, en 2000 y 2001, para que ocurran perdidas mínima por arrastres de las mismas durante el movimiento de los gases que salida del horno, estableciendo como diámetros mínimos para los materiales de la carga con 0,026 mm para la caliza y de 0,024 mm para la fluorita, por ser estos los componentes de menor peso específico en la carga.

La caliza se utiliza con una granulometrías entre 1 a 5 mm. La fluorita se utilizó menor a 2 mm. El residual de coque se empleo la granulometría entre 1 a 5 mm, lo que permite un compromiso entre la reactividad y la superficie especifica del grano. La cromita se utilizó como se suministra comercialmente la arena para fundición entre 0,25 a 1,0 mm. El residual catalítico se empleó tal como sale de servicio con

granulometría mayor de un milímetro y los pellet de 5 y 10 mm de diámetros y 10 mm de largo. Luego de preparada la carga se mezcla durante 30 minutos en un mezclador de tambor giratorio como recomiendan Gómez, 1995, Perdomo, 1999 y Cruz, 2001.

### **2.3.1. Proceso de fusión – reducción**

El tratamiento de las cargas calculadas según la tabla 4 de los anexos, se selecciono el proceso de fusión en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito, acoplado a una fuente de corriente continua del tipo Mansfield G 1000 V/S de 1000 A y 48 V. Los parámetros de trabajo del horno durante todas las coladas fue de 30 V con 500 A, los que fueron establecidos para el tratamiento de una mezcla con mineral de cromita refractaria cubana y otros minerales por Perdomo, 1999. Estando conectando el electrodo al polo positivo y el crisol al negativo, con el objetivo de aumentar la vida útil del crisol y se produzca mayores temperatura en la escoria, con estas características el horno permite trabajar a temperaturas entre 1 600 °C a 1 850 °C, siendo el volumen libre del crisol del horno de 1 439 dm<sup>3</sup>. El proceso se continúa con la alimentación de las cargas en porciones que se adicionan a medida que se va fundiendo la misma. El tiempo para el proceso de obtención de la aleación en el horno eléctrico de arco tuvo una duración de sesenta minutos.

### **2.3.3. Vertido**

El vertido al agua de los productos del proceso desde el horno de arco se hace desde una altura entre 0,5 - 0,6m, en una cubeta rectangular que se coloca debajo del horno, realizándose a razón de 1- 1,5 l / min, durante el vertido de la masa fundida la temperatura del agua en la cubeta nunca sobrepaso los 60 °C. Durante el vertido se generan altas tensiones internas durante el proceso de solidificación de la aleación aumentando la fragilidad lo que favorece la trituración, la escoria durante el enfriamiento rápido en el agua desde las altas temperatura se vuelve esponjosa alcanzando un alto grado de amorfismo, teniendo un aspecto vítreo - porosa de fácil trituración, de forma similar a lo especificado en los trabajos de Quintana, 2002. Luego se elimina el agua de la cubeta y los productos obtenidos se someten a un

proceso de secado en una estufa a 120 °C durante 2 h con altura de capa de 50 mm, según recomiendan Gómez, 2000 y Cruz, 2001.

## **2.5. Procedimiento para la evaluación de la aleación como carga aleante de electrodos tubulares**

### **2.5.1. Características de las carga aleante para electrodos tubulares**

Uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo de los consumibles de soldadura es la naturaleza de la carga aleante, la cual decide en gran medida las propiedades mecánicas fundamentalmente del depósito de soldadura, como ocurre con la resistencia al desgaste de las piezas.

### **2.5.2. Procedimiento para fabricar el electrodo tubular revestido**

El electrodo de alambre tubular consiste en una envoltura o cinta de acero de bajo carbono que cubre o envuelve el núcleo donde se coloca la carga aleante, como se muestra en las figuras 3 y 4 de los anexos. En la elaboración del alambre tubular con el primer paso de perfilado, se obtiene un perfil en forma de canal el cual se llena con la carga aleante mediante un sistema alimentador-dosificador acoplado a la instalación. El cierre sin soldadura se utiliza a tope como aparece en la figura 3 de los anexos, con un diámetro de electrodo de 3,2 mm, valor recomendado por Rodríguez, 1992; Rivera, 2003; Morales, 2005, para la evaluación de las cargas aleantes en electrodos tubulares. En la conformación del electrodo tubular se emplea una cinta de acero al carbono del tipo AISI / SAE de 0,5 x 15 mm, con una composición química de; C: 0,085 %; Si: 0,27 %; Mn: 0,55 %; P: 0,035 %; S: 0,04%; Cr: 0,1%.

### **2.5.3. Preparación de la carga aleante para el electrodo**

En la preparación de la carga aleante de los electrodos tubulares se utiliza la granulometría entre >0.08 mm y <0.25 mm, según los resultados de las investigaciones de (Rodríguez, 1992 y 2002, Marcelo, 1999 y Rivera, 2003), lo que garantiza un alto coeficiente de llenado del electrodo y buena apariencia superficial sin deformación en las paredes del tubo durante el trefilado. Una vista de la máquina conformadora del alambre tubular se muestra en la figura 5 del anexo.

### **2.5.4. Coeficiente de llenado del electrodo tubular**

En la selección del coeficiente de llenado de los electrodos tubulares se toman entre 0,40 a 0,5, según los resultados obtenidos por Rodríguez, 1992, 2002, y Marcelo, 1999, en el se expresa la relación en peso de la carga aleante con respecto al peso total del electrodo, para una longitud dada, la que se expresa por la ecuación siguiente:

$$C_{ll} = P_c / P_e \quad (4)$$

Donde:

$C_{ll}$  - Coeficiente de llenado

$P_c$  - Peso de la carga aleante, en g

$P_e$  - Peso del electrodo, en g.

#### **2.5.5. Selección del revestimiento del electrodo tubular**

En la selección de los materiales para el revestimiento del electrodo se tuvo en cuenta las propiedades físicas que deben tener las escorias en el proceso de soldadura para recargue de superficie. Para el revestimiento de los electrodos a fabricar, se selecciono el revestimiento desarrollado por Rodríguez, 1992 a y utilizado por Rivera, 2004, los que tienen altas prestaciones en la calidad del metal depositado, siendo un revestimiento de carácter básico, mostrándose su composición en la tabla 6 de los anexos.

#### **2.5.6. Procedimiento para realizar el depósito de soldadura**

Para la realización del deposito de soldadura en la evaluación de los electrodos tubulares, se selecciono la intensidad de corriente entre 100 a 110 A, donde se logra un arco estable. Se utiliza polaridad invertida para lograr las mejores características del depósito con el revestimiento básico, el cordón se depositó sin precalentamiento. El deposito de soldadura para la evaluación en los diferentes ensayos se realizaron sobre la probeta normada en la especificación de la AWS en la especificación SFA - 5.13, la que se muestra en la figura 8 de los anexos.

### CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y se establecen los criterios que corroboran la veracidad de la hipótesis científica declarada.

#### 3.1. Caracterización de las escorias

En las escorias obtenidas se realiza el análisis de difracción por rayos X, todos los difractogramas mostraron alto grado de amorfismo, en la figura 3 del anexo, se aprecia la correspondiente a la corrida D. Se determinó como fase más representativa de las escorias a la de espinela del tipo  $MgAl_2O_4$ , según los datos de la tarjeta PDF 21-1152 reportada por la cartoteca Mineral Powder Diffraction File, 1980, que coincide aceptablemente con los valores de  $d(\text{Å})$  y  $I_r$  representado en difractograma y se caracteriza por los valores  $d(\text{Å}) = 2,437$  (100); 2,020 (65); 1,554 (45); 2,858 (40) y 4,660 (35), con valores de  $D_x = 3,5675 \text{ g / cm}^3$  y un parámetro de la red  $a_0 = 8,086 \text{ Å}$ . Las escorias formadas se caracterizan por tener en su composición química, según se refleja en la tabla 7 de los anexos, por encima al 75 % de los óxidos de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ . En esta tabla se aprecia lo efectividad del proceso de desulfuración, debido a la retención del azufre en la misma, variando los contenidos de este elementos entre el 1,8 y 2,7%, Se destaca, por lo tanto, el papel que juega en el proceso la caliza y fluorita empleadas, Una muestra de las escorias obtenidas se presenta en la fotografía de la figura 10 de los anexos, caracterizada por una coloración gris-azul y una masa porosa.

#### 3.2. Caracterización de las aleaciones

Durante el proceso de vertido en agua de la masa de aleación se desarrolla un aumento considerable en el grado de deformación reticular, así como sustituciones isomórficas de diferentes magnitudes de hierro y cromo por vanadio y de carbono por silicio en el compuesto base  $(Cr,Fe)_7C_3$ , formando un compuesto complejo predominantemente del tipo  $(Fe,Cr_{0,9}V_{0,1})C_{0,5}Si_{0,25} \rightarrow [(Fe_4Cr_{3,6}V_{0,4})C_2Si]$  presentando una estructura hexagonal deformada, lo cual pueden resumirse las características químicas en las formulas estequiométricas anteriores y las fases por un espectro característico especificado por bandas y líneas anchas de mayor intensidad expuestas en el difractograma de la figura 11 y en la tabla 8 de los

anexos, la muestra de la aleación de la corrida D se muestra en la figura 10 de los anexos. Se estableció por Kadapmetov, 1982 que a temperatura de 1 200 °C se forma el carburo  $(Cr,Fe)_3C_2$ , en una red rómbica con los parámetros ( $a = 2,31$ ,  $b = 5,52$ ,  $c = 11,46$ ) y a temperatura de 1 300 °C se forma el carburo  $(Cr,Fe)_7C_3$  con red hexagonal con los parámetros de ( $a = 13,98$ ,  $c = 4,52$ ). La composición química se muestra en la tabla 9 de los anexos.

Se considera que con los resultados de la caracterización por difracción por rayos X y la composición química para las escorias y las aleaciones, cumple lo esperado para la planificado de experimento realizado a partir del de diseño para mezclas empleado.

En la tabla 10 de los anexos, se aprecia el comportamiento del balance de masa de los productos que salen del horno a partir según Castellanos, 2001. Comportándose el rendimiento para las aleaciones señaladas el 23, 64 % y 25,0 % con relación a la carga alimentada al horno. En estos resultados se tiene que tener en cuenta que existen varios componentes de las cargas formadores de gases.

De las aleaciones obtenidas a partir de la metodología empleada. Se deciden seleccionar las corridas B y D, para la evaluación como cargas aleantes en los electrodos tubulares a fabricar. Siendo significativo para la aleación B que tiene los menores contenidos de cromo y vanadio y la aleación D tiene los mayores, así como los contenidos de carbono, azufre son similares y los de silicio no difiere mucho entre una y otra. La alto recuperación del cromo y del vanadio se debe a la eficacia del proceso de reducción-carbotérmica para las cargas metalúrgicas establecidas por el diseño de experimentos. Los rendimientos para el cromo y el vanadio en las aleaciones B y D, se ofrecen en tabla 11 de los anexos, influyendo en estos resultados, el desarrollo estable de las corridas en el horno de arco eléctrico. En la recuperación del cromo y el vanadio influyo el contenido de fluorita y coque en estas cargas. En la obtención de los ferrocromos de alto carbono, el rendimiento del cromo cuando se procesan cromitas metalúrgica, según (Edneral, 1977; Riss, y Khodorosky, 1975), se encuentra en el 90 %, siendo el mismo reportado por Perdomo, et. at. 2003, para la cromita refractaria cubana, según Riss y Khodorosky 1975, la recuperación del vanadio durante la fabricación de

ferromanganesovanadio, es de 87 y 92%. En la trituración de las aleaciones B y D, se obtuvo el 87 % con granulometría entre +0,08 y -0,25, con solo el 13 % con granulometría de -0,18, corroborando estos niveles de trituración el alto grado de fragilidad de las mismas, que se produce por el vertido en agua de la masa fundida.

### **3.2.1. Recuperación del cromo en la aleación**

Para los cálculos estadísticos de los resultados se toman los niveles de confiabilidad del 95%, el procesamiento estadístico se realizó utilizando el Software STATGRAPHICS PLUS versión 4,1 sobre Windows.

Los resultados experimentales para los contenidos de cromo se muestran en la tabla 9 de los anexos, donde se aprecia que los mayores contenidos, se obtiene en la corrida D, alcanzando 49,0 %. Las variables independientes en esta corrida son; 1,9% de caliza, 4,3 % para la fluorita y 12,3 % de carbón. El comportamiento para la recuperación del cromo se obtuvo a partir del modelo estadístico 5.

$$Y_1 = 1,86465 * \text{Caliza} + 2,1456 * \text{Fluorita} + 2,90698 * \text{Coque} \quad (5)$$

En el modelo estadístico para la recuperación del cromo, tiene un comportamiento lineal con un valor de  $R^2$  igual a 97,9909. Los resultados estadísticos para el modelo 25, demuestran que a partir del factor p-value en la tabla 12 de los anexos, existe una alta correlación en todas las variables y un nivel de confianza por encima del 95 %. Este modelo cumplió satisfactoriamente con las pruebas estadísticas para su validación.

La variable independiente de mayor significación es el coque, al ser el mayor coeficiente en la ecuación del modelo. Cuando ocurre la reacción de reducción con la formación de los carburos aumenta la recuperación del cromo aspecto comprobado anteriormente durante la caracterización de las aleaciones. Según en el trabajo de Golodov, 1995, se obtuvieron valores de recuperación del cromo similares. Con menor influencia en el modelo están los coeficientes para la caliza y la fluorita, estas variables influyen poco en la reducción.

### **3.2.2. Recuperación del vanadio en la aleación**

El comportamiento de la recuperación del vanadio a partir de las cargas establecidas por el diseño de experimento fue obtenido a través del modelo estadístico, a partir de los datos reflejados en la tabla 9 de los anexos.

$$Y_2 = 0,131923*Caliza + 0,221923*Fluorita + 0,29681*Coque \quad (6)$$

Como se4 aprecia en la expresión del modelo estadístico la recuperación del vanadio tiene un comportamiento creciente siguiendo una ley lineal con un valor de  $R^2$  de 98,75 %, con alta correlación entre las variables independientes establecidas. El modelo cumplió todas las pruebas estadísticas para su validación como se muestra en la tabla 13 de los anexos.

Del modelo 6, se establece que la variable independiente (caliza) es la que menor influye en el proceso de reducción del óxido de vanadio (V), siendo este un resultado esperado. Para el coque el coeficiente en la ecuación es más acentuado, por ser este un componente determinante en el proceso de reducción del óxido de vanadio (v). La influencia del contenido de coque en la carga se muestra en la figura 13 de los anexos, donde se observa que a medida que aumenta este, se incrementa la recuperación del vanadio.

### 3.2.3. Comportamiento de la desulfuración en la aleación

El contenido de azufre en las aleaciones obtenidas oscila entre 0,16 y 0,18 %, su fuente fundamental es el residual catalítico. Durante el calentamiento de las cargas metalúrgicas, la mayor parte de este, pasa a la fase gaseosa representando el 85 % del azufre que alimenta, otra parte menor al 2%, se disuelve en el hierro y la otra se retiene en la escoria con el 13 %.

El modelo estadístico que obtenidos se refleja en la ecuación 7, nos permite analizar el comportamiento de proceso de la desulfuración durante el proceso de reducción-fusión en la investigación:

$$Y_3 = 0,0153122*Caliza + 0,0102908*Florita + 0,00548073*Coque \quad (7)$$

Como características importantes del modelo, se muestran un comportamiento creciente y lineal obtenido con un coeficiente de 97,0696. Otro aspecto a destacar del modelo es que la desulfuración, decrece en la medida que se incrementan los contenidos de Caliza y Fluorita. Este resultados, corrobora el efecto de estos componentes analizados anteriormente, sin embargo el coque influye poco. En el modelo 27, se observa que la mayor influencia en la desulfuración se tiene con la fluorita. En la tabla 14 de los anexos se muestran los resultados del tratamiento de estadísticos para el azufre en la aleación. De acuerdo a los resultados reflejados en

esta tabla, el modelo se puede simplificar, ya que el p-value obtenido es de 0,3608 mucho mayor que 0,01, lo que lo hace no siendo significativo para un nivel de confianza mayor al 90 %.

### **3.3. Evaluación de la aleación como carga aleante. Caracterización del depósito de soldadura**

Para la confección del electrodo tubular se seleccionaron las aleaciones según el diseño experimental con el menor y mayor contenidos de cromo y vanadio correspondientes a las corridas B y D.

La utilización de la aleación como carga aleante proporciona la ventaja de que el vanadio no se introduzca en forma de vanadio metálico el cual tiene gran afinidad por el oxígeno a temperaturas relativamente bajas 610 °C según Emlin y Zacuk, 1974, lográndose mayor eficiencia en los procesos de transferencia de los elementos al baño fundido durante la formación del cordón de soldadura. El coeficiente de llenado del electrodo fabricado con la aleación de la corrida D, se calcula utilizando la ecuación 9, siendo de 0,46.

#### **3.3.1 Caracterización química de los depósitos de soldadura**

Se considera que el revestimiento seleccionado garantiza excelentes propiedades tecnológicas como son; estabilidad del arco, desprendimiento fácil de la capa de escoria, proceso de desulfuración durante la formación del cordón de soldadura estando los contenidos de azufre entre el 0,09 y 0,023 como se muestra en la tabla 17 en los anexos, por debajo a lo exigido en la especificación de la AWS SFA-5.13, el aspecto del cordón se aprecia en la figura 6 de los anexos. Los contenidos de los elementos en el depósito, hace que los mismos estén cercano al EFeCr-A3 de la especificación SFA-5.13 de la AWS, con altos contenidos de carburos de cromo y una matriz de martensita dado a su bajo contenido de manganeso menor al 2 %, el depósito no es maquinable, tiene cierta fragilidad. El electrodo se recomienda para su uso en el recargue de superficies de equipos para la trituración de rocas, martillos de impactos en transportadores.

#### **3.3.2. Análisis microestructural**

En el microanálisis EDAX para la fase de la matriz se muestra en las figuras 15 y 16 de los anexos, se reporta presencia de cromo, hierro y silicio, siendo baja la

presencia del carbono por lo que la fase es una solución sólida en hierro  $\alpha$  con elementos de aleación disueltos en el hierro, lo que fue analizado por Pero-Sanz, 1994. La estequiometría para la solución sólida de la matriz se muestra en la tabla 16 de los anexos. Para la fase de los carburos en los datos mostrados en la tabla de las relaciones atómicas de las figuras 14 y 17 de los anexos, se calcula las formulas estequiométricas para los carburos que se forman durante la solidificación del cordón de soldadura, las que obedecen a una relación estequiométrica típica de los carburos complejos cuando se normaliza a 23 átomos metálicos quedando la formula como se muestran en la tabla 15. Los microanálisis arrojan como resultado principal que los carburos y las matrices obtenidas obedecen a combinaciones químicas cuyas formulas generales son  $M_{23}C_6$  y  $CrSiFe$  respectivamente.

#### **3.3.2.1. Análisis metalográfico del depósito de soldadura**

El análisis microestructural arrojó la presencia de dos fases completamente nítidas siendo las fases definidas de carburos y de la matriz, como se ilustran en las figuras 18 y 19, para cada electrodo fabricado utilizándose aumentos de 2530x. Las dos muestras evaluadas presentaron características microestructurales similares, diferenciándose en la cantidad de la fase de carburo de la matriz, influyendo en estas variaciones en las cantidades de carbono, cromo y vanadio que existen en la carga aleante.

#### **3.3.2.2. Determinación de la macrodureza y microdureza en los depósitos**

Los ensayos de medición de macrodureza y microdureza, se realizaron de acuerdo a las normas cubanas NC 05-63:85, NC 04-11:72. La determinación de la dureza del cordón depositado realizado sobre una probeta según la especificación de la AWS SFA-5.13, con los electrodos tubulares fabricados a partir de las ferroaleaciones de los puntos B y D, los valores obtenidos se aprecian en la tabla 18 en el anexo. La microdureza de las fases existentes en el depósito del metal, permite definir las fases o microconstituyentes donde se realiza el análisis de microdureza, los valores se muestran en la tabla 18 en el anexo. En la zona 1 marcada en la microfotografía de las figuras 10 y 11 de los anexos, los valores que se obtienen son característicos de carburos con 1443.3 HV, para el metal depositado con electrodo de la corrida D. La zona 2 en las microfotografías de las

figuras 18 y 19, los valores obtenidos indican que la fase presenta valores inferiores de microdureza y en el microanálisis de fase aprecio una solución de hierro con valores de microdureza de 801.9 HV lo que corrobora la existencia de fase dura como la martensita.

### **3.3.2.3. Evaluación del desgaste abrasivo del depósito de soldadura**

En la resistencia al desgaste de las aleaciones de hierro-carbono con alto contenido de cromo, se tiene según el trabajo de Pero-Sanz E., J., A en 1994, que las propiedades mecánicas como la dureza dependen de las fases, así por ejemplo la la martensita tiene valores de 720 – 800 HV, Para los carburos que sustituyen los átomos de cromo por los de hierros tipos  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  ó  $(Cr,Fe)_7C_3$  los valores de dureza son del orden de 1 000 – 1250 HV y estos carburos llegan a la dureza de topacio escala # 8 de Mohr

Como se aprecia en la tabla 20 de los anexos, los valores de desgaste gravimétrico obtenidos a partir de los depósitos de soldadura de dos electrodos comerciales y el fabricado utilizando como carga aleante la ferroaleación de la corrida D, se puede apreciar como los valores de desgaste menores corresponde al electrodo tubular fabricado a partir de la ferroaleación, con valores de desgaste gravimétrico de 0,0297 g, menor a las demás pruebas realizada por lo que la carga aleante utilizada garantiza altos valores de resistencia a la abrasión por lo que se puede utilizar el electrodo fabricado para el recargue de superficies en piezas que exijan estas prestaciones en el servicio de desgaste abrasivo.

### **3.4. Análisis económico de los resultados**

Como se analizó anteriormente, en la evaluación de la aleación en calidad de carga aleante es factible de uso para la fabricación de los electrodos tubulares para el recargue de superficie, independientemente de que el consumible desarrollado no coincide con las composiciones químicas de los depósitos recomendados por la norma SFA-5.13-2000. Para el recargue de superficies existen muchos electrodos que no responden a esta norma, sino que son desarrollado por cada fabricante para propósitos similares, por lo que este electrodo se puede comercializar como un electrodo tubular cubano para el recargue de superficies con alta resistencia al

desgaste por abrasión. Por lo que se hace necesaria por lo tanto la valoración económica para los costos de producción para su comercialización en el país.

Este análisis tomando como base fundamental el equipamiento disponible en la planta multipropósito, según el trabajo de Quintana, 2005, para la fabricación de consumibles de soldadura ubicada en la Empresa Mecánica “Fabric Aguiar Noriega de la ciudad de Santa Clara” que funciona en producción cooperada entre esta empresa y el Centro de Investigaciones de Soldadura de la Universidad Central de Las Villas, donde se garantizan volúmenes de producción para satisfacer una parte de la demanda nacional que sobrepasa las 12 toneladas de varios tipos de consumibles de soldadura y de aleaciones multicomponentes para cargas aleantes o de uso directo en los procesos siderúrgicos. La ficha de costo se muestra en la tabla 21 de los anexos.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

1. Es factible el empleo del proceso de reducción carbotérmico, para la obtención de una aleación compleja con alrededor del 50 % de cromo, el 5,0 % de vanadio y el 5,7 % de carbono, la que tiene un alto valor metalúrgico para el desarrollo de cargas aleantes de electrodos para soldadura por arco eléctrico manual, con un amplio rango de aplicación en el campo del recargue de superficies para el desgaste por abrasión.
2. Las escorias obtenidas son del tipo  $MgO-SiO_2-Al_2O_3$ , las que garantizan temperaturas de fusión entre los 1 630 a 1 680 °C. Según lo previsto en el diseño de experimento. Son de carácter básico- neutro  $B = 1,05$ , lo que permite una adecuada desulfuración de la aleación.
3. Los análisis de difracción con rayos X y de microscopia electrónica de barrido, demuestran la formación de dos fases bien definidas en la aleación y en el metal depositado por medio de la soldadura manual con arco eléctrico, siendo de carburos complejos del tipo  $(Fe,Cr,V)_{23}C_6$  y una solución sólida del tipo

$Fe_{85,64}Cr_{7,58}Si_{6,78}$ . Lo que la hacen idóneas para recargues de superficies de desgastes por abrasión.

4. El electrodo tubular fabricado a partir de la aleación de la corrida D se puede utilizarse en las aplicaciones del EFeCr-A3, propuesto por la AWS en la norma SFA-5.13, para soldadura de recargue superficial. Teniendo similitud sus estructura metalográfica, siendo bifásica con carburos complejos y martensita.
5. Con los costos de fabricación de los electrodos tubulares a partir de la aleación obtenida, permite comercializar un consumible de soldadura con alto valor agregado, haciéndolo competitivo con relación a los electrodos que se comercializan para propósitos similares en el recargue de superficie sometidas a desgastes con abrasión. Por lo que la solución propuesta para el tratamiento del residual catalítico de óxido de vanadio (V), es económicamente factible.

## **RECOMENDACIONES**

1. Introducir en la planta multipropósito en la Empresa Mecánica de Santa Clara, el proceso propuesto para la obtención de aleaciones complejas de cromo-vanadio, para formulaciones de cargas aleantes en consumibles de soldadura.
2. Aplicar la estrategia metodológica empleada, para el tratamiento conjunto de otros minerales y el residual catalítico en la obtención de cargas aleantes para consumibles de soldaduras.
3. Hacer estudios para la utilización de la aleación obtenida para desarrollar otros consumibles de soldaduras.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Aknazarova, S., y V., Zafarov. Experimental Optimization in Chemistry and Chemical Engineering. Ed. Mir Moscú. 1982. 312 Pág.

2. Akverdin, I. Propiedades físicas de los sistemas fundidos  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CaF}_2$ . Ed. Metalurgia. Moscú, 1987. 143 Pág.
3. Alvarez G., E., A. Desarrollo y Evaluación de Materiales Elastomérico para la Fabricación y Recuperación de Rodillos del Tren de Estiraje de Maquinas Hiladoras. Tesis Doctoral. UCLV. Santa Clara. 1996.
4. Álvarez G., E., y R., J., M., González. Maquinas para el Estudio del Desgaste Abrasivo en Pares Tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. No 2. Mayo – Agosto. 1995. Pag 69 – 76.
5. Arangurent, F. Siderurgia. Ed. Dorssat S.A. Madrid 1963. 617 Pág.
6. Arniella O., A., y R., Q., Puchol. Potencialidades de concentrado cromífero del yacimiento Merceditas como fuente alternativa para recubrimiento cromodifusivo en acero. COMEC. UCLV. 2002.
7. ASM, ASM Handbook. Volume 18. "Friction, Lubrication and Wear Technology". The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992.
8. ASTM, Norma G 99-2000: Método para el ensayo de desgaste en el equipo de Pin sobre Disco Abrasivo. Pag. 6. EE.UU. 2000.
9. A.W.S; SFA-5.13-2000. Specification for surface electrodes for shielded metal arc welding. Miami. EE.UU. 2000. pag 303 – 324.
10. Bekman, E.F. Metalurgia del arrabio. Ed. Metalurgia. Moscú. 1978. Pág. 479.
11. Burgos, S., J. Procesos metalúrgicos durante la soldadura por fusión, UCLV, Santa Clara. 1992.
12. Canoza, R., F. Electrodo Tubulares Revestidos para la Soldadura de Reparación de Piezas de Hierro Fundido", Trabajo de Diploma, UCLV.2001.
13. Carlson, O.N., Burkholder, H., Matsching, G.A. y Schmidt, F.A. Extractive Metallurgy of Refractory Metals. Eds. H.Y. Sohn, O.N. Carlson y J.T. Smith, The Metallurgical Society Of AIME. Warrendale (EE:UU:), 1981: 191-203.
14. Castellano S., J., Morales R., F. y Causse R., Factibilidad de producción directa de aceros inoxidables a partir de las menas níquelíferas y cromitas de baja ley, MINIMETAL 91, CIPIIMM. Ciudad de La Habana 1991.
15. Castellano S., J., Onishin B. y Parada A., Producción de aleaciones de Fe-Cr-Ni a partir de la mena níquelífera de baja ley,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y/o cromita. Volumen XVI, Minería. Número 2. CIPIIMM. 1986.

16. Castellanos E., J., E., Pedraza G., J., Zamora B., A., Pérez P., A., Rodríguez A., J. Balance de masa y energía métodos clásicos y técnicas no convencionales. Editorial Feijoo. 2001. Santa Clara. Cuba.
17. Corbitt, R. A. Standard Handbook of Environmental Engineering. 2<sup>nd</sup> Edition, Editorial McGraw-Hill Co. New York. 1999.
18. Cruz C., A., García S., L., Quintana P., R., Perdomo G., L., Gómez P., C., R., Formoso P., A. y Cores S., A. Reducción carbotérmica de pirolusita para la obtención de ferromanganeso y escoria, adecuados al desarrollo de materiales de soldadura. Revista metalurgia. Numero 40, 2004. Madrid. Pág. 163 – 172.
19. Cruz C., A., Síntesis por Fusión de un Fundente Fundido del Sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la Soldadura por Arco Sumergido a partir del Procesamiento de Minerales Cubanos. Tesis de Maestría. Santa Clara. UCLV. 2000.
20. Cruz C., A., Síntesis por Fusión de un Fundente Fundido del Sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la Soldadura por Arco Sumergido a partir del Procesamiento de Minerales Cubanos. Tesis en Opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara. UCLV. 2001.
21. Del Pino, B., U. Morgado, E. y Sosa R., Sequential Subsimplex to improve mixtures. The Mathematics Preprint Server: #0303027. 2003a.
22. Del Pino, B., U. Morgado, E. y Sosa R.,. Diseño secuencial subsimplex aplicado en el desarrollo de ferroaleaciones al cromo vanadio. VIII Congreso Internacional de matemática y ciencias de la computación. Santi Espíritu.2003b.
23. Dorta Y. Obtención de un revestimiento del tipo básico para electrodo tubular, Trabajo de Diploma, UCLV, 2001.
24. Edneral F., P. Electrometalurgia del Acero y las Ferroaleaciones, Editorial Metalurgia; Moscú, Rusia, 1977. Pag. 487. (en ruso)
25. Emlin B.I., Zacuk M.I. Manual para los procesos electrotérmicos. Editorial Metalúrgica, 1978. Pag 287. (En ruso)
26. Eslibisky, A.M. Cálculos térmicos de los Procesos de Soldadura, Kiev, 1982.
27. Estructplan.com. La Eliminación del SO<sub>2</sub> en los Gases de Combustión. En línea <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=71>. [Tomado 7 de Abril del 2004]
28. Ferré J. y Rius X., F. Introducción al diseño estadístico de experimentos. Tomado de la WEB: <http://www.química.urv.es/quimio/general/dis.pdf>. Consultado el 1º de Abril del 2004.

29. Gasik, M., I. Realización de la tecnología de obtención de sinter con alto óxido de calcio. Rev. Acero. N°5. Moscú. 1991. (En ruso)
30. Golodov C., M. y otros. Investigación de la interacción del óxido de cromo con el carbono. Revista Metalurgia Ferrosa. No. 5, 1984. Pag 6-9. Moscú. (En ruso)
31. Gómez P., C., R. Obtención de fundente fundido para la S.A.W. a partir de rocas cubanas. Tesis Doctoral: U.C.L.V. 1995.
32. Gómez Pérez, C., R. y R., Q., Puchol. Algunas consideraciones sobre la formación de estructuras vítreas en fundentes fundidos. Rev. Construcción de maquinaria. Enero – Marzo 1994. Cuba.
33. Gómez, P., C., R. y R., Q., Puchol. Micropeletización con fuido gaseoso de mezclas de minerales fundidos: Una alternativa tecnológica para la granulación de fundentes fundidos. Memorias de METANICA'2000. La Habana. 2000.
34. Goncalves de Melo M. Balance Minero de Brasil, 2000, Ministerio de Minas y Energía. Secretaria de Minas y Metalurgia, Brasilia, 2001.
35. Guliaev A., Metalografía (tomo II). Editorial Mir. Moscú. 1978. Pág. 332.
36. Hahn y otros aut. Producción de compuestos de vanadio Febrero 24. 1987. U.S. Pat. No. 4 645 651. EE.UU.
37. Hajim M. y otros autores. Meted for Melting and Reducing Chrome Ore. Patente 0222397. European Patent office. 1986.
38. Hernández B., A., E. Estudio de Fricción y Desgaste de Cojinetes Obtenidos por Pulvimetalurgia. Tesis de Maestría. UCLV.1998.
39. Hitzky R., E. Introducción a la Ciencia de los Materiales: Capitulo 6; Fenómenos de superficie. Editorial CSIC. España. 1993. Pág. 201 a 230.
40. Horton W. Proceso húmedo de desulfuración con caliza experiencia en la planta Fayette. Moder Power Systems. Abril, 1991. Gran Bretaña.
41. Hurlbut, C., S. Dana's Minerals and how to study them. New York. Ed. Wiley. 1998. 328 Pág.
42. International Center of Diffraction Data: Mineral Powder Diffraction file. Editor JCPOS. USA. 1980. 1165 Pág.
43. Jensen, M., L. y A., M., Bateman. Economic Mineral Deposits. 3ª Ed., John Wiley. Nueva York (EE:UU.), 1981.

44. Jiménez V., G., E. Fusión reductora de dos menas oxidadas de Manganeso. Revista Metalurgia. 28, (2), Madrid, 1992.
45. Jiménez V., G., E. y R., A., Hernández. Método de Obtención de Ferrocromo de Carbono Medio. Certificado de Autor de Invención CU 21582 A1. Publicado por: Oficina Cubana de la Propiedad Industrial. La Habana. 22 de Julio de 1987.
46. Kadapmetov X., N. Formación en fase sólida de monocristales de carburos durante la reducción de las cromoespinelas. Revista Metalurgia Ferrosa. No. 1, 1982. Pág. 4-8. Moscú. (En ruso)
47. Kafarov, V., V. Métodos de la Cibernética en química y Tecnología Química. Editorial Mir. Moscú. 1988. (En ruso)
48. Kalieva, P., S. Influencia de factores independiente sobre el proceso de descomposición del fluoruro de calcio. Metalurgia Ferrosa. No. 9. Moscú. 1985
49. Kelley, Jr. J. C. R. Febrero de 1955. U.S. Pat. No. 2 709 739.
50. Konstsikova V., P. Estudio de la velocidad de utilización de escorias de la producción de ferroaleaciones para fundentes con manganeso. V Conferencia de Metalurgia del Manganeso. Nikopol. 1991.
51. Kornaraki, V., V., y otros aut. Características termofísicas de algunos fundidos y sus materias primas (en ruso). Soldadura automática. N° 4. 1977, Pág. 31 – 33. (En ruso)
52. Kost Ya. y otros autores. Physical research methods of sedimentary rock and minerals. Publishing house of academy of Science of the URSS. Moscú. 1967, 270Pág.
53. Kostyanoi B., M., Manoskhin A., L., y Zubarev A., G. Proceso para la producción de ferrocromo. U.S. Pat. No. 4 165 234. Agosto 21. 1979. EE.UU.
54. Krivanduna A., B. Termotecnia en la Metalurgia. Ed. Metalurgia. Moscú. 1986. 423Pág.
55. Kudrin V., A. Metalurgia del Acero, 3ª Ed. Editorial Mir, Moscú, 1989, pag 424.
56. Kumlachew N., T. Fabricación de Electrodo Tubular con alto Contenido de Manganeso. Trabajo de Diploma. UCLV. 1992.
57. Kuzmienko V., G. Particularidades de la reacciones de intercambio de fluoruro de calcio y la sílice de 880 a 1900 °C. Soldadura automática. N°6. 1980. Pág. 33-35.

58. Leyva R., E., Figueredo S., O., Guerra Q., A., Ortiz B., J. y Rodríguez G., J., E. Cromitas del norte de Holguín. Estado actual de las investigaciones. Revista de Minería y Geología. Vol. XIV N° 2. 1997. Pág. 69-71.
59. López F. Tratamiento de polvos de aceros mediante procesos hidrometalúrgicos y reducción carbotérmicas. Rev. Metalurgia. 26 (2) Pág. 71-85, 1990.
60. López I., A. Obtención de un electrodo para relleno de las mazas de los molinos de caña de azúcar. 5<sup>ta</sup> Jornadas de Investigación. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas. México. 2001.
61. López I., A., Alonso H., E., Castañeda G., E., Rodríguez P., M., Duffus S., A.. Influencia del coeficiente de dilución sobre la dureza de la capa aportada en el relleno superficial. 5<sup>as</sup> Jornadas de Investigación Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas. México. 2001.
62. Lucio A., y otros, Metalurgia de las ferroligas. Universidad Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1979. Pág. 607.
63. Lvov B., B., Mecanismo y cinética en la reducción carbotérmica de óxidos. Metalurgia del Hierro. Enero 1986, Moscú. Pág.4-8. (En ruso)
64. Maldonado S., y A., Velasco. Estructura y Química de Recubrimientos Duros. Encuentro Internacional de Soldadura Industrial. Saltillo, Méjico, 2001. Pág. 242-250.
65. Marcelo M., D. Electrodo Tubulares Revestidos para el Relleno Superficial de Piezas Sometidas a Desgaste. Tesis de Maestría. UCLV.1999.
66. Mariño, C., M., Estudio Acerca del Tratamiento Térmico a Martillos de Molienda de Productos de la Industria Niquelífera. Tesis de Maestría. Instituto Minero-Metalúrgico de Moa. 1998. Pág. 64.
67. Martínez P., F. Selección de aceros y Tratamientos Térmicos para el trabajo de suelo. Construcción de Maquinaria. Vol. 9. N° 3, 1984. Pág. 9 – 29.
68. Martínez S. La metalurgia extractiva del vanadio. Desarrollos en el decenio de los 80. Revista Metalurgia, Madrid, 30 (1), 1994.
69. Ministerio de Economía y Planificación y el Ministerio de Finanzas y Precios resolución conjunta N° 1 / 2005. Ed. Gaceta de Cuba. Ciudad de la Habana. 2005.
70. Misloviski A., V. Mineralogía. Ed. Aguilar. Madrid. 1966. Pág 690.

71. Morales R., F. Perdomo G., L., Del Pino P., U., y Quintana P., R. Diseño y análisis de experimentos con mixturas para obtener cargas aleantes para consumibles de soldaduras en la recuperación de piezas en la industria agroindustrial azucarera. Rev. Centro Azúcar. Univ. Central de Las Villas. No 3. 2005.
72. Morales R., F., Perdomo G., L., Quintana P., R. Fernández M., E. y Rodríguez P., M. Electrodo tubular desarrollado a partir de una ferroaleación del tipo FeCrV. Factible de uso en la industria cubana. XI Congreso Metalúrgico Cubano. La Habana. METANICA 2005. ISSN 1607-6281.
73. Morales R., F., Perdomo G., L., Quintana P., R. y Cruz C., A. Fernández M., E. Fabricación de ferroaleaciones del tipo FeCrV a partir de residuales catalíticos para ser utilizados en cargas aleantes de soldadura. VIII Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales. Editorial Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2004a.
74. Morales R., F., Perdomo G., L., Quintana P., R. y Fernández M., E. Empleo de residual catalítico y cromita refractaria cubana para la obtención de una ferroaleación para ser utilizada como carga aleante en consumibles de soldadura. III Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica. Santa Clara. 2004b.
75. Morales R., F., Perdomo G., L., Quintana P., R., y Cruz C., A.,. Residuales catalíticos de vanadio. Fuente para el desarrollo de ferroaleaciones al cromo vanadio. Conferencia Internacional Medio Ambiente Siglo XXI. Santa Clara. 2002.
76. NC 04-11:72. Ensayo de dureza Vickers en materiales metálicos.
77. NC 05-63:85. Ensayo de materiales. Uniones soldadas. Método para la determinación de dureza.
78. Norma Empresarial NRIB 968-87. Análisis químico. Determinación gravimétrica de azufre total. Método del cloruro de bario. Empresa "Pedro Soto Alba", 1987.
79. Norton G., A. y Croat C., G. U.S Department of Interior y U.S. Geological Survey. Editorial United States Government, Washington: 2002 en línea <http://www.minerals.usgs.gov/minerals.html>. [Consulta 9 de Noviembre del 2003].
80. Organización Mundial de la Salud. Concise International Chemical Assessment Document No. 29: Vanadium Pentoxide and other Inorganic Vanadium Compounds (No. 29). [en línea]: [http://www.who.int/pcs/cicad/summaries/cicad\\_29.html](http://www.who.int/pcs/cicad/summaries/cicad_29.html). [Consulta 29 de Abril del 2002].
81. Ortiz N., O. Recuperación de piezas por métodos de soldadura. Capítulo V: Materiales de aportación. Pág. 128 – 183. CIME. 1992.

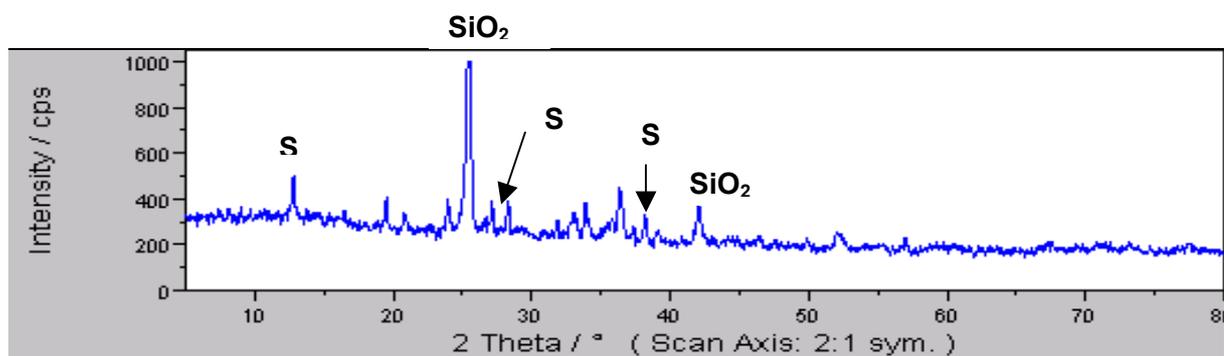
82. Perdomo G. L. Obtención de un fundente aglomerado para el recargue a partir de los productos de la reducción de la cromita refractaria cubana. Tesis Doctoral. UCLV. 1999.
83. Perdomo G., L. Estudio del proceso metalúrgico reductivo de cromitas para obtener componentes destinados a la elaboración de fundentes empleados en la S.A.W. Tesis de Maestría. U.C.L.V. 1997.
84. Perdomo G., L. Quintana P., R., Cruz C., A. Procesamiento de residuales de soldadura automática para obtener aleaciones tipo FeCrMn y matrices destinadas a la fabricación de fundentes SAW. II Encuentro de Ingeniería de Materiales. La Habana. Septiembre. 1998. Pág. 289 – 294.
85. Perdomo G., L., Quintana P., R., Cruz C., A., Castellano E., J., García S., L., Formoso P., A., Cores S., A. Empleo de cromitas refractarias para la obtención de fundentes aglomerados utilizados en la soldadura por arco sumergido (SAW). Revista Metalurgia. Madrid 39. 2003. Pág. 268-278.
86. Perdomo González, Quintana P., R., Cruz C., A. Obtención de componentes de fundentes fundidos y cerámicos a partir de los productos de la reducción de cromitas refractarias. Rev. Construcción de maquinaria. No 1 Enero – Abril, 1996.
87. Pérez A., M., S. Validación analítica y estimación de incertidumbre en ensayos de escorias por FRX. XI Congreso Metalúrgico Cubano. La Habana. METANICA 2005. ISSN 1607-6281.
88. Pero-Sanz Elor, J., A. Materiales para Ingeniería. Fundiciones férreas. Ed. Dossat. Madrid. 1994. Pág. 154.
89. Perry, J., H. y H., Chilton. Chemical Engenieer HandBook. Ed Mc. Graw-Hill. Nueva York. 1999.
90. Potapov N., N. Materiales para soldar. Tomo I. Gases protectores y fundentes. Ed. Construcción de Maquinaria. Moscú. 1989. Pág. 542.
91. Proenza F., J. Mineralización de cromitas en la faja ofilíticas Mayarí – Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas. Tesis Doctoral. Universitat de la Facultat de Geología. Barcelona. Diciembre. 1997.
92. Pyrih R., y S., R., Richard. Proceso para la recuperación de vanadio. Septiembre 19, 1978. U.S. Pat. No. 4 115 110.

93. Quintana P, R., Perdomo G., L., Cruz C., A. Estrategia de utilización limpia de residuales catalíticos sólidos del proceso de obtención de  $H_2 SO_4$  en el desarrollo de consumibles de soldadura. Revista: Minería y Geología. Moa. 13, 2 (2001). Pág. 37-46.
94. Quintana P., R. Perdomo G., L., Cruz C., A y Gómez P., C., R. Estrategia de utilización de minerales cubanos en el desarrollo de materiales para soldar. Evento Internacional Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Cienfuegos. Diciembre. 1998.
95. Quintana P., R., Perdomo G., L., Cruz C., A. Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco sumergido. Revista CENIM. N° 39, Madrid, 2003. Pág. 25 – 34.
96. Quintana P., R., Perdomo G., L., Cruz C., A. Procedimiento de obtención simultánea de escoria esponjosa y aleación de cromo destinada a la confección de fundentes aglomerados para soldadura bajo fundente (SAW). Certificado de invención # 22793. La Habana. 2002.
97. Quintana P., R., Perdomo G., L., Cruz C., A., Gopmez R., L., Garcia S., L., Cerpa N., A., y Cores S., A. Obtención simultánea de ferroaleación multicomponente y escoria a partir de arenas negras, para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco eléctrico. Revista Metalurgia. No. 40. Madrid. 2004. Pág. 294-303.
98. Quintana P., R., Perdomo G., L., Cruz C., A.. Concepción y perspectiva de planta multipropósito tipo para la producción de consumibles de soldadura y otros productos para la industria Sideromecánica a partir de recursos cubanos y residuos sólidos industriales. XI Congreso Metalúrgico Cubano. La Habana. 2005.
99. Resumen de prensa de la Fundación Terram [en línea], 8 de Mayo del 2001, Santiago de Chile, en línea: <http://www.chiper.cl/news/2002/05/08/n3.asp>. [Consulta 23 de abril del 2002].
100. Riss A., y Khodorosky. Production of Ferroalloys. Moscú. Editorial de lenguas extranjeras. 1975. Pág. 278. (En ruso)
101. Rivera B., V. Electrodo Tubular Revestido para la Soldadura de Reacondicionamiento de piezas de hierro fundido gris. Tesis Doctoral, UCLV, 2003.
102. Rivera B., V. Rodrigues P., M. Electrodo tubulares para la soldadura de hierro fundido gris. III Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica. COMEC 2004. Santa Clara. 2004.

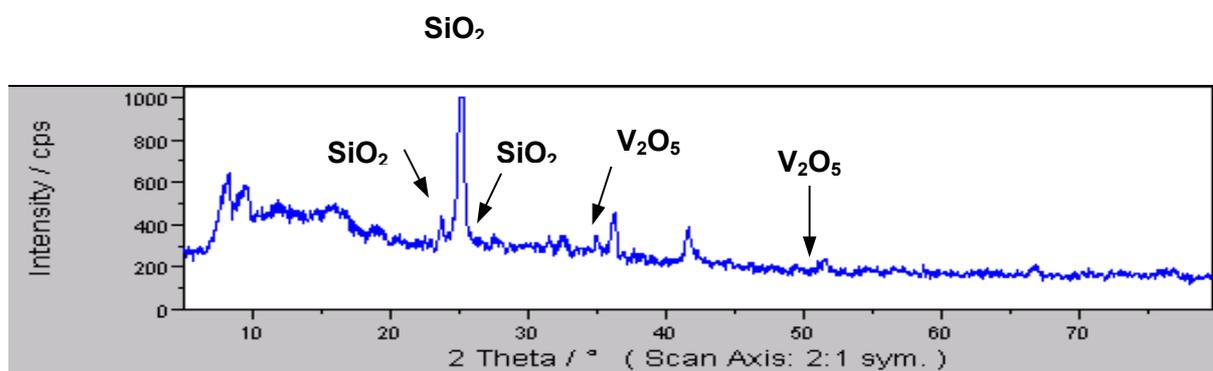
103. Rodríguez C. Fundamentos de Tribología. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1991.
104. Rodríguez P., M y Rivera B., V. Electrodo tubular para relleno superficial de piezas sometidas a desgastes por impacto, Conferencia Internacional COMEC 2002, UCLV, 2002.
105. Rodríguez P., M. Electrodo Tubular Revestidos para el Relleno Superficial de Centralizadores, Estabilizadores y Piezas Sometidas a Condiciones de Desgaste Similares. Tesis Doctoral. U.C.L.V. 1992a.
106. Rodríguez P., M. Influencia de la intensidad de corriente en la estructura de metal depositado durante el relleno superficial. Revista Construcción de maquinaria. Año 18, No. 3. La Habana. 1993b.
107. Rodríguez P., M. Quintana P., R. Consideraciones sobre la interrelación químico-físico del rutilo en la estabilidad del arco. Revista Construcción de maquinaria. Año 18, No. 1. La Habana. 1993a.
108. Rodríguez P., M. Quintana P., R. Consideraciones sobre las interacciones químico-físicas del rutilo en la estabilidad del arco, 1<sup>era</sup> Conferencia Física, UCLV, 1992b.
109. Salcines M., C., M. Tecnología de Fundición. Tomo 1. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Pág. 548. 1987.
110. Santiesteban, E. Perspectivas del desarrollo en Cuba de las aleaciones base cromo, níquel y manganeso. Metalurgia 99. Ciudad Habana. 1999.
111. Shieldalloys Metallurgical Corporation. Ferroalloys & Alloying Additives Online Handbook. Htm. (Tomado el 6 de mayo del 2003). EE.UU.
112. Suruhashi S. High basic fused flux for submerged arc welding. Número de Patente JP11277294. Kobe Steel Ltd. 1999. Pag10-12.
113. Sustavov, S., P. Valoración de las posibilidades cinéticas de sulfuración en escorias residuales de aceleración, Metalurgia Ferrosa N° 9, Moscú. 1986.
114. Universidad Autónoma de Madrid. Propiedades del vanadio. [en línea], [Consulta 21 de Mayo del 2002].
115. Vanadio y la salud. 2005, en línea <http://www.dsalud.com/noticias.htm>. [Consulta 2 de Mayo del 2005]
116. Voskovoinikov V., S., Kudrin V., H., Yakushev A., M. Metalurgia General. Ed. Mir. Moscú. 1982. Pág 533.

117. Zachfara V., G. Preparación de carbones para la coquificación. Ed. Metalurgia. Moscu.1981. Pág 278. (En ruso)

## ANEXOS



a. Calentado a 400 °C



b. Calentado a 800 °C

Figura 1. Difractogramas del residual catalítico calentado

**Tabla 1. Composición química de los minerales de la carga**

Componentes	Mineral					
	Caliza	Fluorita	Catalizador	Cromita	Coque	Ceniza coque
SiO <sub>2</sub>	0,34	3,2	47,6	5,8	0	88,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,35	1,6	26,5	0	0
FeO	0,15	0	0,8	16,2	0	0
MgO	0,68	0	0,1	17,0	0	1,6
CaO	55,2	0,25	0,5	0,4	0	2,2
Na <sub>2</sub> O	0	0	6,9	0	0	4,4
K <sub>2</sub> O	0	0	3,3	0	0	3,7
H <sub>2</sub> O	0	0	19,1	0	0	0
CO <sub>2</sub>	43,4	0	0	0	0	0
C fijo	0	0	0	0	86,4	0
Cenizas	0	0	0	0	12,0	0
S	0	0	11,5	0	1,1	0
CaF <sub>2</sub>	0	96,2	0	0	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	8,6	0	0	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	32,9	0	0

**Tabla 2. Valores extremos de las variables de entrada**

Variable	Min, (g)	Max, (g)	Media (Xi <sub>o</sub> )	X'i*	
				Min, (g)	Max, (g)
X1	70	190	130	10,52	28,57
X2	50	230	140	7,52	34,59
X3	350	440	395	50,63	66,17
$\sum X_{i0}$			665		

\* La ponderación se realiza con la expresión siguiente:  $X'i = (Xi/\sum Xi_0) \times 100$

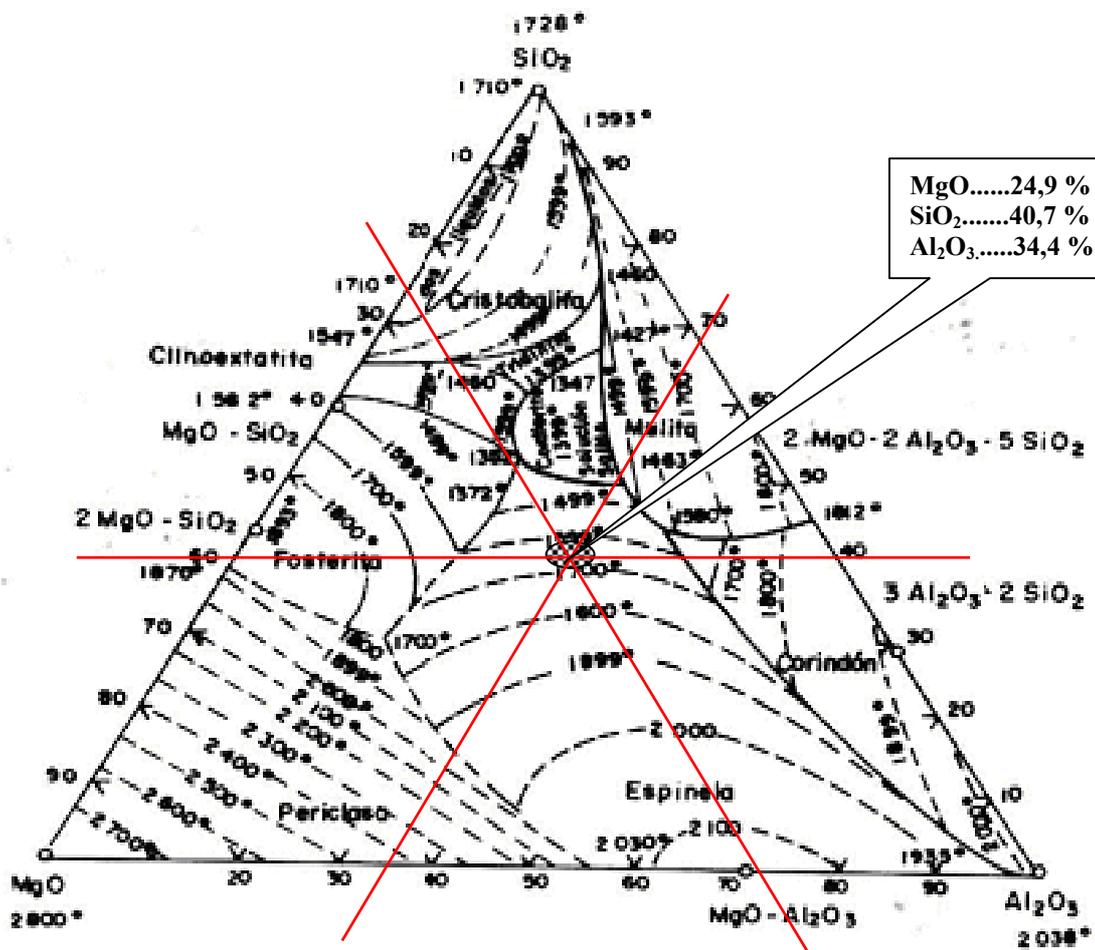


Figura 2. Diagrama ternario  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{MgO}$

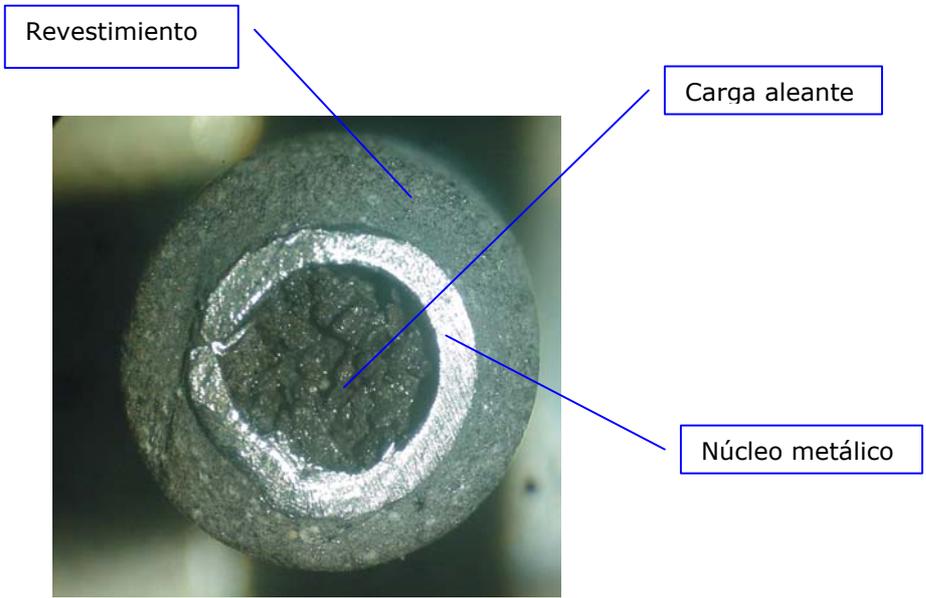
**Tabla 3. Matriz completa del diseño**

Exp,	X1	X2	X3	X1'	X2'	X3'	Valido
1	+	+	(.....)	28,57	34,59	(36,84)	No (<)
2	+	(.....)	+	28,57	(5,27)	66,16	No (<)
3	(.....)	+	+	(.....)	34,59	66,16	No (>100)
4	-	-	(.....)	10,52	7,51	(81,97)	No (>)
5	-	(.....)	-	10,52	(38,85)	50,63	No (>)
6	(.....)	-	-	(41,86)	7,51	50,63	No (>)
7	+	-	(.....)	28,57	7,51	(63,92)	Si
8	+	(.....)	-	28,57	(20,80)	50,63	Si
9	-	+	(.....)	10,52	34,59	(54,63)	Si
10	-	(.....)	+	10,52	(23,32)	66,16	Si
11	(.....)	+	-	(14,78)	34,59	50,63	Si
12	(.....)	-	+	(26,33)	7,51	66,16	Si

**Tabla 4. Matriz final del diseño de experimento**

Corrida	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		ΣXi en g
	g	%*	g	%*	g	%*	
7(A)	190	5,3	50	1,4	425	11,8	665
8(B)	190	5,3	138	3,9	337	9,4	665
9(C)	69,96	1,9	230	6,5	365	10,2	665
10(D)	69,96	1,9	155	4,3	440	12,3	665
11(E)	98,30	2,7	230	6,5	337	9,4	665
12(F)	175,1	4,9	50	1,4	440	12,3	665
<b>G</b>	132,2	3,7	142	4,0	390	10,9	665

\* Por ciento con relación a la carga del horno



**Figura 3. Perfil de cierre a tope para el electrodo tubular**



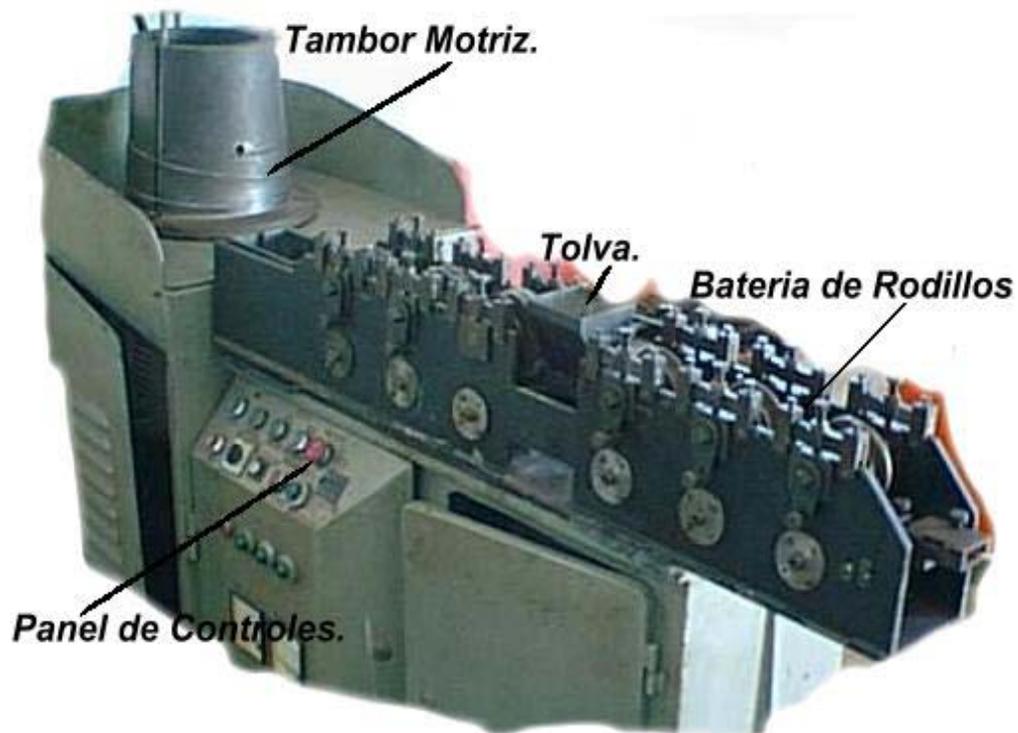


Figura 5. Vista de la máquina para conformar electrodo

Tabla 5. Composición química de minerales del revestimiento

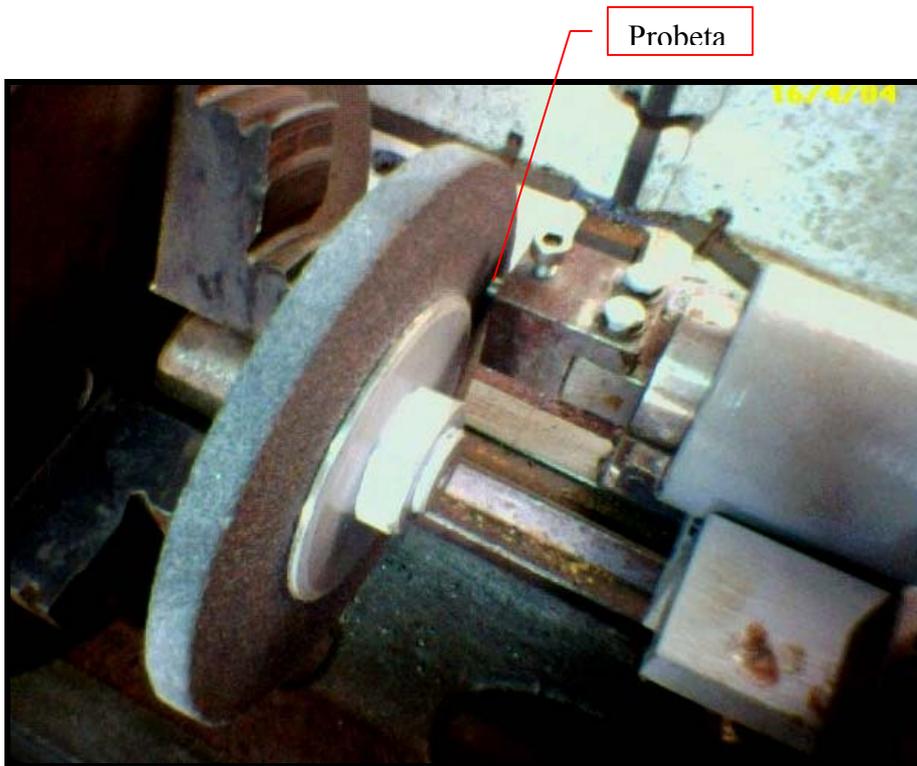
Mineral	Composición química en %	
Rutilo (TiO <sub>2</sub> )	TiO <sub>2</sub> = 98%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1,81%
Grafito		

Tabla 6. Composición del revestimiento del electrodo

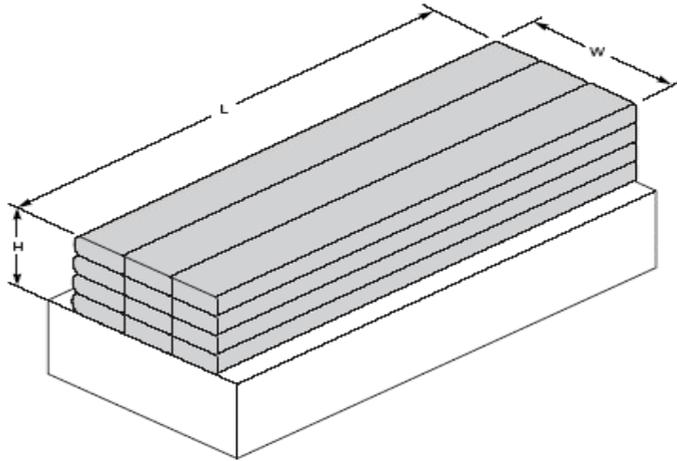
Minerales	Cantidad en (%)
Calcita	40
Fluorita	32
Rutilo	8
Grafito	20



**Figura 6. Depósito de soldadura**

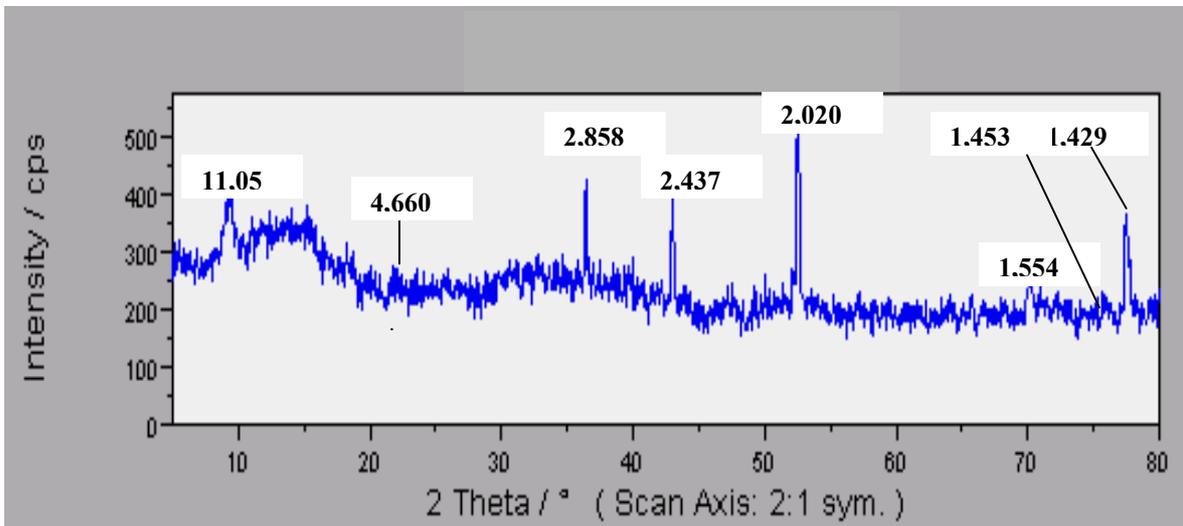


**Figura 7. Instalación experimental para el estudio de la resistencia al desgaste mediante prueba de abrasión (PIN-DISCO ABRASIVO)**



**Figura 8. Esquema de la probeta para análisis químicos de los depósitos de los electrodos tubulares**

Para diámetro de electrodos de 3.12mm, L = 64 mm; W = 13 mm; L = 16 mm



**Figura 9. Difractograma de la escoria de la corrida D**



**Figura 10. Muestra de las escorias**

**Tabla 7. Composición química de las escorias, en %**

Componentes	Corrida						
	A	B	C	D	E	F	G
<b>C</b>	0,37	0,37	0,35	0,38	0,35	0,4	0,37
<b>CaF<sub>2</sub></b>	5,0	7,2	7,6	7,6	6,9	4,2	7,2
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,7	2,6	2,1	2,2	2,3	3,1	1,6
<b>MgO</b>	17,8	17,2	17,5	18,5	17,7	18,0	17,5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	30,8	30,6	30,2	30,2	30,7	31,1	30,2
<b>SiO<sub>2</sub></b>	24,5	25,5	26,5	25,5	25,5	24,0	25,2
<b>S</b>	2,6	2,0	1,8	1,8	1,8	2,7	2,2
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8
<b>CaO</b>	6,1	5,6	4,5	4,6	5,3	6,3	6,0
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,26	0,23	0,25	0,33	0,25	0,35	0,23
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,25	0,21	0,18	0,17	0,2	0,22	0,2
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,2	2,1	2,0	1,8	2,3	2,4	2,3
<b>MnO</b>	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,5	1,4
<b>FeO</b>	3,4	2,9	3,3	3,3	3,1	3,3	3,3

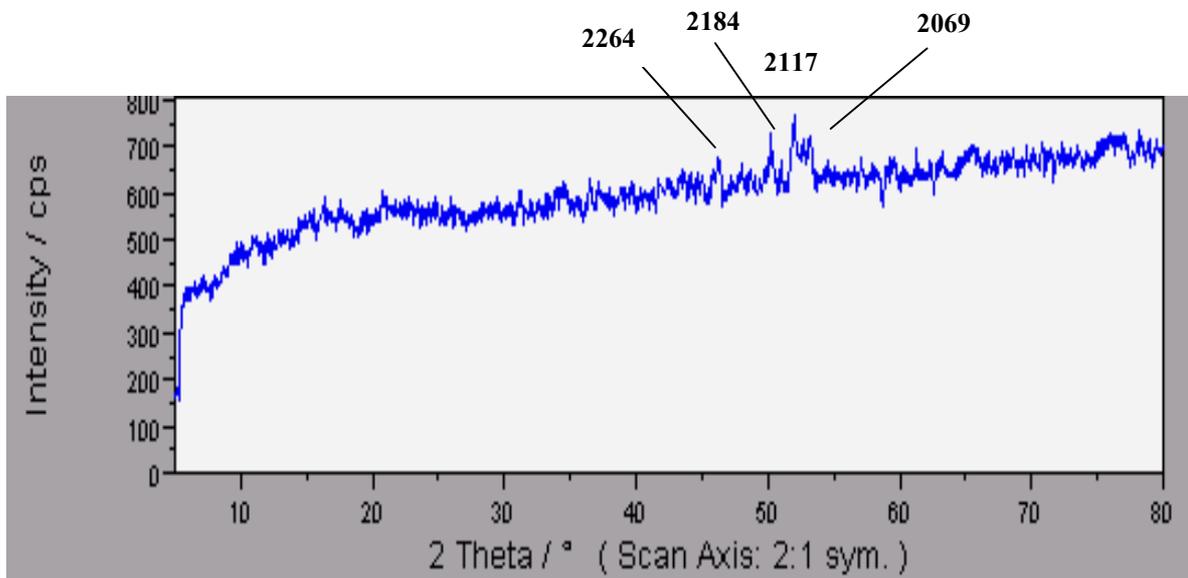


Figura 11. Difractograma de la ferroaleación de la corrida D

Tabla 8. Parámetros del difractograma de la aleación en la corrida D

Lectura	d Å	I <sub>rel</sub>		Lectura	d Å	I <sub>rel</sub>	Observ.
1	13.331	47.06		16	2.406	35.29	
2	9.788	170.59		17	2.368	47.06	
3	7.386	41.18		18	2.264	35.29	
4	7.199	35.29		19	2.184	100.00	Banda ancha
5	6.649	35.29		20	2.118	70.59	
6	5.589	35.29		21	2.069	64.71	Banda ancha
7	4.682	35.29		22	1.954	35.29	
8	4.432	47.06		23	1.875	35.29	
9	4.238	47.06		24	1.822	35.29	
10	3.872	35.29		25	1.797	35.29	
11	3.632	41.18		26	1.749	35.29	
12	3.401	29.41		27	1.745	47.06	
13	2.860	47.06		28	1.638	29.41	
14	2.658	35.29		29	1.567	47.06	
15	2.454	35.29		30	1.445	41.18	



**Figura 12. Muestra de las ferroaleaciones**

**Tabla 9. Composición química de las aleaciones en %**

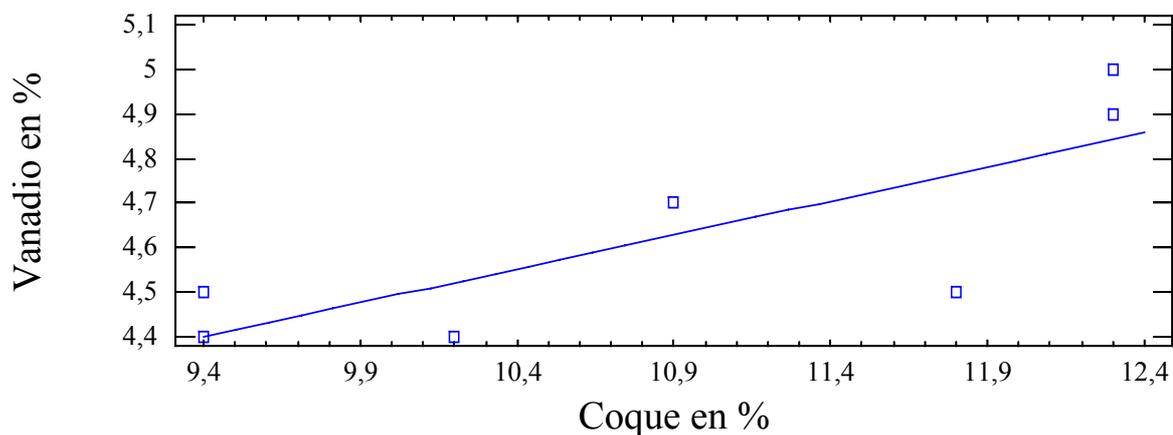
Elementos	Corrida						
	A	B	C	D	E	F	G
<b>C</b>	5,8	5,8	5,6	5,7	5,8	6,0	5,8
<b>Mg</b>	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,8
<b>Al</b>	0,9	1,2	1,1	1,0	1,4	1,8	1,0
<b>Si</b>	4,4	4,5	4,4	4,8	4,6	4,3	4,4
<b>P</b>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
<b>S</b>	0,16	0,18	0,10	0,17	0,18	0,13	0,18
<b>Ti</b>	0,29	0,28	0,26	0,24	0,24	0,25	0,25
<b>V</b>	4,3	4,5	4,4	5,0	4,3	4,2	4,7
<b>Cr</b>	46,5	46,0	46,5	49,0	46,3	48,0	47,5
<b>Mn</b>	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5
<b>Ni</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>Fe</b>	33,5	34,0	33,2	30,6	33,0	31,0	32,0

**Tabla 10. Rendimiento del proceso para la formación de las aleaciones**

Corridas	Cantidad de materiales que salen del horno, g			Rendimiento frente a la carga, %	
	Total	Aleación	Escoria	Aleación	Escoria
<b>B</b>	2 518,8	896,3	1 622,5	25,0	45,25
<b>D</b>	2 443,7	847,5	1 596,2	23,64	44,35

**Tabla 11. Resultados de las corridas B y D, (masa en %)**

Rendimiento del cromo y el vanadio						
Corridas	Cantidad de cromo, g			Cantidad de vanadio, g		
	Escoria (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Aleación (Cr)	Rendimiento %	Escoria (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Aleación (V)	Rendimiento %
<b>B</b>	34,10	416,68	92,68	4,0	40,30	91,42
<b>D</b>	28,73	415,32	92,23	2,71	42,38	96,03



**Figura 13. Influencia del coque en la recuperación del vanadio**

**Tabla 12. Tratamiento estadístico para el contenido de cromo en la aleación**

Multiple Regression Analysis

-----  
 Dependent variable: Cromo metal  
 -----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Caliza	1,86465	0,176293	10,577	0,0005
Fluorita	2,1456	0,113106	18,9698	0,0000
Coque	2,90698	0,0872904	33,3025	0,0000

-----  
 Analysis of Variance  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	15544,0	3	5181,34	14684,32	0,0000
Residual	1,41139	4	0,352849		
Total	15545,4	7			

R-squared = 99,9909 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9864 percent  
 Standard Error of Est. = 0,594011  
 Mean absolute error = 0,381537  
 Durbin-Watson statistic = 2,77195  
 Ftable = 6,59

Cromo metal = 1,86465\*Caliza + 2,1456\*Fluorita + 2,90698\*Coque

Further ANOVA for Variables in the Order Fitted

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Caliza	13455,5	1	13455,5	38133,94	0,0000
Fluorita	1697,19	1	1697,19	4809,97	0,0000
Coque	391,328	1	391,328	1109,05	0,0000
Model	15544,0	3			

**Tabla 13. Tratamiento estadístico para el contenido de vanadio en la aleación**

Multiple Regression Analysis

-----  
 Dependent variable: Vanadio metal  
 -----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Caliza	0,131923	0,0868448	1,51907	0,2034
Fluorita	0,221932	0,055718	3,98314	0,0164
Coque	0,285641	0,0430007	6,6427	0,0027

-----  
 Analysis of Variance  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	140,977	3	46,9925	548,81	0,0000
Residual	0,342505	4	0,0856261		
Total	141,32	7			

R-squared = 99,7576 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99,6365 percent  
 Standard Error of Est. = 0,292619  
 Mean absolute error = 0,21201  
 Durbin-Watson statistic = 2,95599  
 Ftabla = 6,59

$$\text{Vanadio metal} = 0,131923 \cdot \text{Caliza} + 0,221932 \cdot \text{Fluorita} + 0,285641 \cdot \text{Coque}$$

-----  
 Further ANOVA for Variables in the Order Fitted  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Caliza	120,069	1	120,069	1402,24	0,0000
Fluorita	17,1305	1	17,1305	200,06	0,0001
Coque	3,7783	1	3,7783	44,13	0,0027
Model	140,977	3			

**Tabla 14. Tratamiento estadístico para el contenido de azufre en la aleación**

Multiple Regression Analysis

-----  
 Dependent variable: Azufre en el metal  
 -----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Caliza	0,0153122	0,0107354	1,42633	0,2269
Fluorita	0,0102908	0,0068876	1,4941	0,2095
Coque	0,00548073	0,00531555	1,03108	0,3608

-----  
 Analysis of Variance  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,173366	3	0,0577888	44,17	0,0016
Residual	0,00523373	4	0,00130843		
Total	0,1786	7			

R-squared = 97,0696 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 95,6044 percent

Standard Error of Est. = 0,0361723

Mean absolute error = 0,0225853

Durbin-Watson statistic = 2,83859

Ftabla = 6,59

Azufre metal = 0,0153122\*Caliza + 0,0102908\*Fluorita + 0,00548073

-----  
 Further ANOVA for Variables in the Order Fitted  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Caliza	0,155391	1	0,155391	118,76	0,0004
Fluorita	0,0165844	1	0,0165844	12,67	0,0236
Coque	0,00139102	1	0,00139102	1,06	0,3608
Model	0,173366	3			

**Tabla 15. Composición química (% at.) y estequiometría deducida de los microanálisis de las fases de carburos**

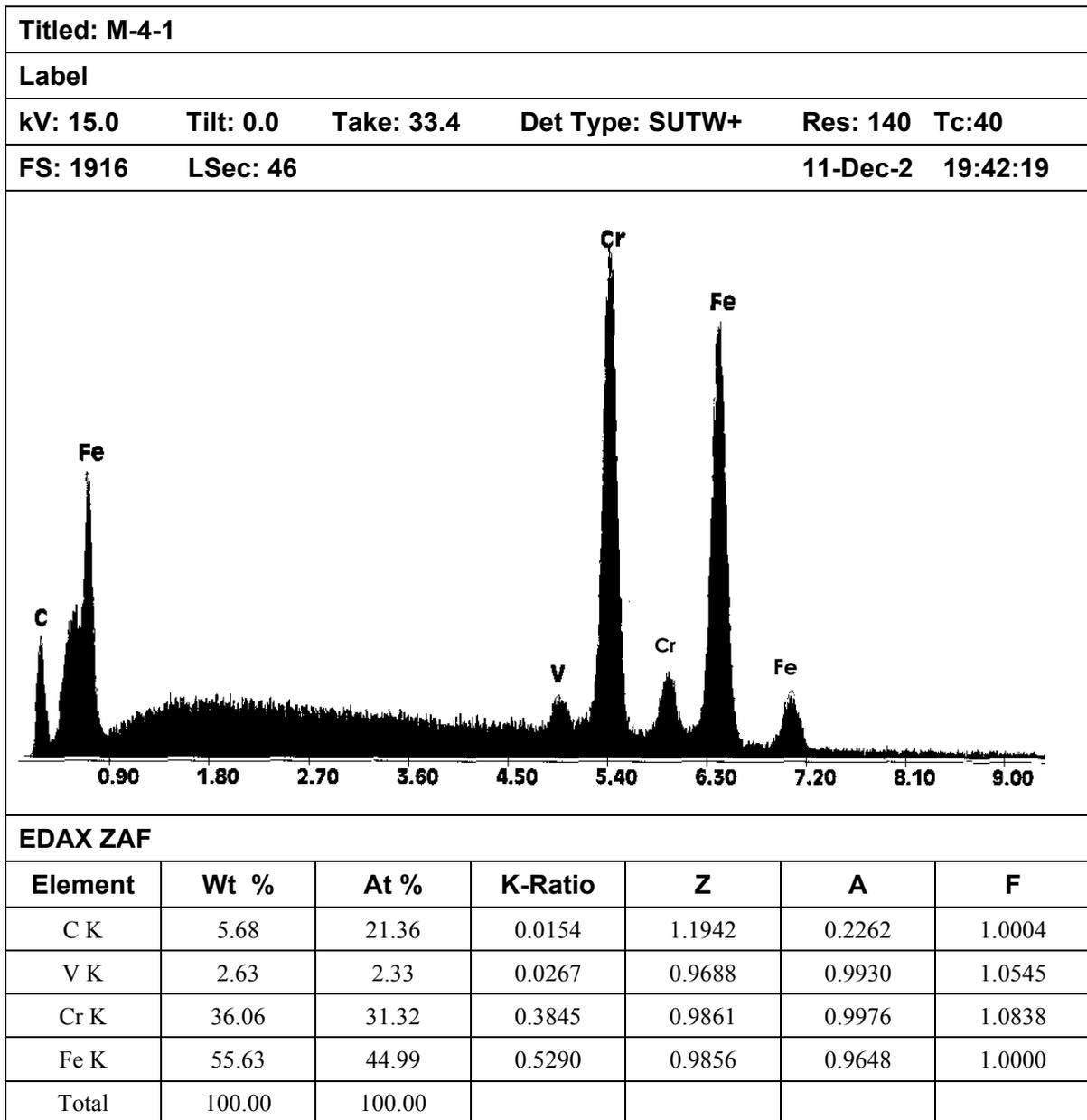
Electrodo	% C	% V	% Cr	% Fe	Formula desarrollada	Formula Global
<b>Corrida D</b>	22,23	4,05	32,08	41,64	(Cr <sub>32,08</sub> Fe <sub>41,64</sub> V <sub>4,05</sub> ) C <sub>22,23</sub>	(Cr;FeV) <sub>77,77</sub> C <sub>22,23</sub>
<b>Corrida B</b>	21,36	2,33	31,32	44,99	(Cr <sub>31,32</sub> Fe <sub>44,99</sub> V <sub>2,33</sub> ) C <sub>21,36</sub>	(Cr;FeV) <sub>78,64</sub> C <sub>21,36</sub>

**Tabla 16. Composición química (% at.) y estequiometría deducida para los microanálisis de la matriz**

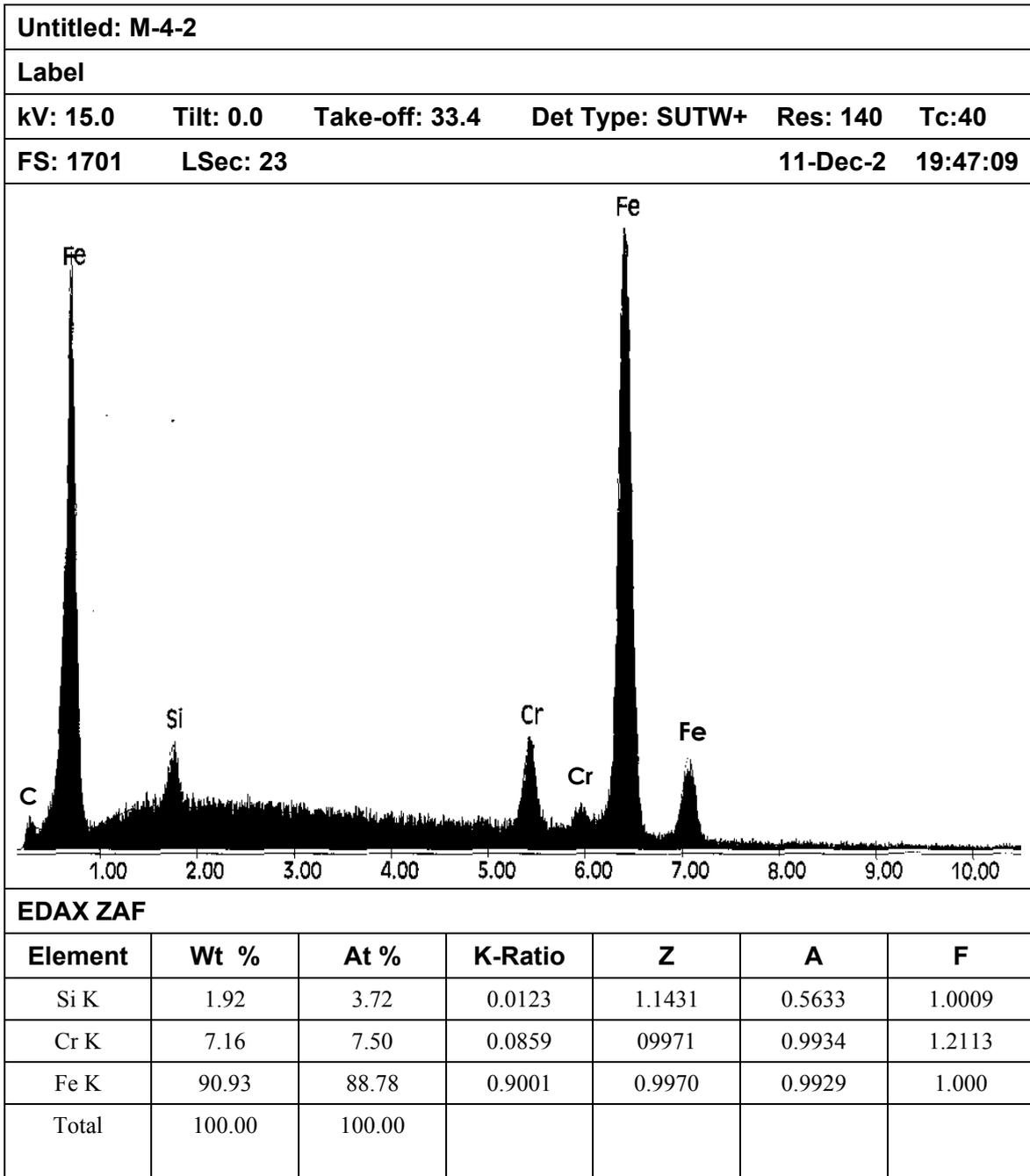
<b>Electrodo</b>	<b>% Si</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Fe</b>	<b>Formula desarrollada</b>
<b>Corrida D</b>	6,78	7,58	85,64	$\text{Fe}_{85,64}\text{Cr}_{7,58}\text{Si}_{6,78}$
<b>Corrida B</b>	3,72	7,50	88,78	$\text{Fe}_{88,78}\text{Cr}_{7,50}\text{Si}_{3,72}$

**Tabla 17. Composición química promedio de los depósitos de soldadura**

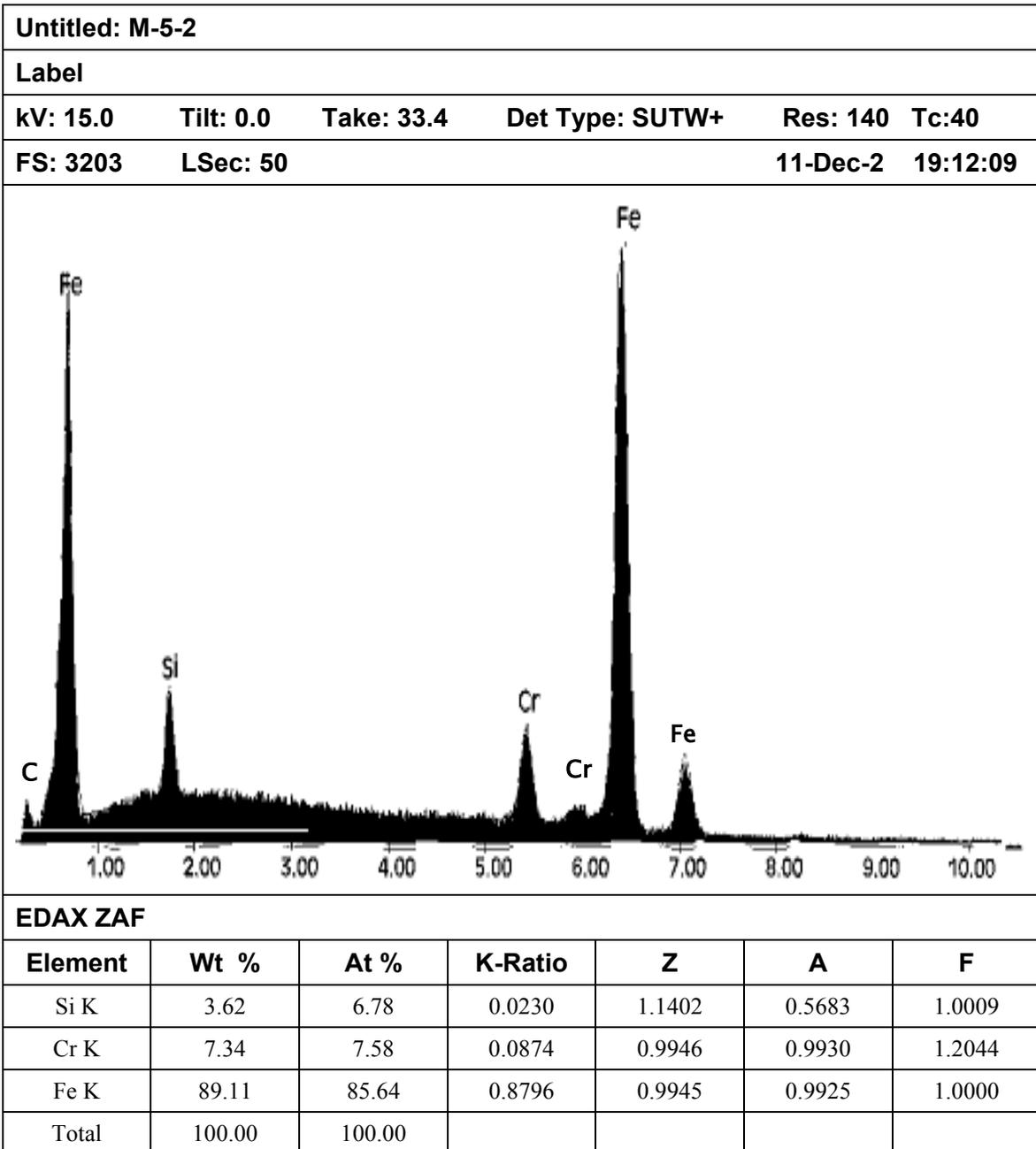
<b>Elementos</b>	<b>Composición química en %</b>	
	<b>Corrida B</b>	<b>Corrida D</b>
<b>C</b>	5,60	5,73
<b>Si</b>	0,87	1,62
<b>Mn</b>	0,6	0,63
<b>P</b>	0,035	0,038
<b>S</b>	0,09	0,023
<b>Cr</b>	14,63	17,28
<b>Ni</b>	0,11	0,14
<b>Ti</b>	0,1	0,2
<b>V</b>	0,68	1,89



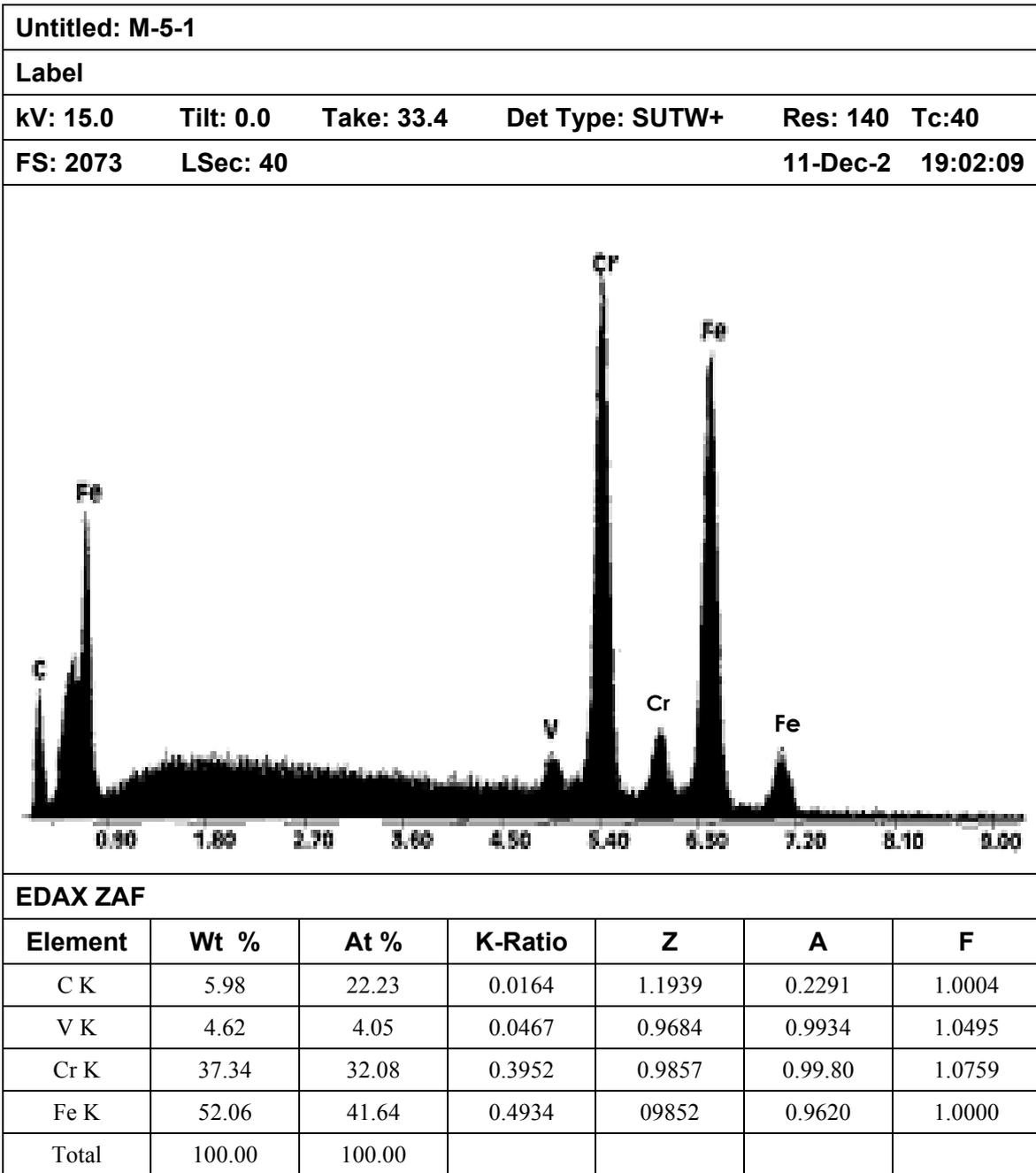
**Figura 14. Microanálisis de la fase carburo del electrodo con la carga aleante de la corrida B**



**Figura 15. Microanálisis característicos de la fase de la matriz del electrodo con la carga aleante de la corrida B**



**Figura 16. Microanálisis de la fase de la matriz en el deposito con el electrodo con la carga aleante de la corrida D**



**Figura 17. Microanálisis de la fase del carburo del deposito con el electrodo con la carga aleante de la corrida D**



**Tabla 18. Dureza de los depósitos de soldadura para los electrodos en HV**

Medición	Dureza en HV	
	Corrida B	Corrida D
1	665	690
2	673	698
3	665	698
4	664	695
5	670	697
<b>Promedio</b>	667,4	695,6
<b>Dureza en HRc</b>	58,2	59,8

**Tabla 19. Microdurezas de las fases de los depósitos de soldadura en HV**

Medición	Microdureza de las fases en HV			
	Corrida B		Corrida D	
	Matriz	Carburo	Matriz	Carburo
1	792.2	1402.0	846.6	1332.0
2	724.4	1150.0	762.0	1452.0
3	882.0	1197.0	796.0	1782.0
4	742.8	1246.0	792.0	1402.0
5	746.6	1168.0	789.5	1464.0
6	742.8	1187.0	824.2	1378.0
7	689.5	1168.0	784.0	1561.0
8	746.6	1378.0	846.6	1310.0
9	745.4	1164.0	797.0	1420.0
10	771.9	1181.0	781.1	1332.0
<b>Promedio</b>	758.4	1224.1	801.9	1443.3

**Tabla 20. Desgaste abrasivo de los depósitos de soldadura**

<b>Electrodos</b>	<b>Peso inicial en g</b>	<b>Peso final en g</b>	<b>Desgaste en g</b>	<b>Promedio en g</b>
<b>B-1*</b>	3,3160	3,2738	0,0422	0,0500
<b>B-2*</b>	3,206	3,1575	0,0485	
<b>B-3*</b>	3,1396	3,0802	0,0594	
<b>D-1*</b>	3,1732	3,1425	0,0307	0,0297
<b>D-2*</b>	3,120	3,0901	0,0299	
<b>D-3*</b>	3,0981	3,0695	0,0286	
<b>N700-1**</b>	3,0193	2,9765	0,0428	0,0484
<b>N700-2**</b>	3,320	3,2508	0,0508	
<b>N700-3**</b>	3,170	3,1183	0,0517	
<b>4004N-1**</b>	2,8058	2,7684	0,0374	0,0372
<b>4004N-2**</b>	3,0427	3,0076	0,0351	
<b>4004N-3**</b>	3,0427	3,0076	0,0351	
<b>Acero 45-1</b>	3,0211	2,8007	0,2204	0,2287
<b>Acero 45-2</b>	3,0625	2,8343	0,2282	
<b>Acero 45-3</b>	3,0826	2,8451	0,2375	
<b>Acero 45-2</b>	3,0625	2,8343	0,2282	
<b>Acero 45-3</b>	3,0826	2,8451	0,2375	

\* Electrodo revestido de la firma Eutectic Castolin

