

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SECCIÓN DE POSTGRADO
MENCIÓN CIENCIA DE LOS MATERIALES**



**RECUBRIMIENTO POR ARCO ELÉCTRICO-SMAW CON CARBUROS DE
CROMO Y TUNGSTENO RESISTENTES A LA ABRASIÓN-INFLUENCIA DE LA
DIFUSIÓN DE CARBONO**

Tesis presentada por el Bachiller:

PABLO MAMANI CALLA,

para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
CIENCIA DE LOS MATERIALES**

Lima – Perú
2009

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE	
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
HIPÓTESIS	
OBJETIVOS	

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO SECCIÓN I

	Pág.
RECUBRIMIENTOS PROTECTORES Y TEORÍA DEL DESGASTE	1
1.1 OBJETIVOS DE LOS RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	1
1.2 CLASIFICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	2
1.2.1 ACEROS TÉRMICAMENTE TRATABLES	2
1.2.2 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	2
1.2.3 ACEROS INOXIDABLES SEMIAUSTENÍTICOS	3
1.2.4 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS	3
1.2.5 ACEROS AUTENÍTICOS AL MANGANESO	3
1.2.6 CARBUROS DE HIERRO (HIERROS FUNDIDOS ALEADOS)	3
1.2.7 CARBUROS DE CROMO	3
1.2.8 CARBURO DE TUNGSTENO	4
1.3 DESGASTE	5
1.3.1 CLASES DE DESGASTE	5
1.3.1.1 DESGASTE POR ABRASIÓN	5
1.3.1.2 MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASIÓN	6
1.3.1.3 DESGASTE POR IMPACTO	7

1.3.1.4	DESGASTE POR EROSIÓN	8
1.3.1.5	DESGASTE POR CAVITACIÓN	8
1.3.1.6	DESGASTE POR FRICCIÓN (ADHESIVO)	8
1.3.1.7	DESGASTE POR CORROSIÓN	8
1.3.1.8	DESGASTE POR CALOR	8
1.4	TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	9
1.4.1	SELECCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA PARA RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	9
1.4.1.1	PROCESO DE SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO	9
1.4.1.1.1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO CON ELECTRODO REVESTIDO SOLDADURA (SMAW)	11
1.4.1.2	PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ABIERTO	11
1.4.1.3	PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO	12
1.5	SELECCIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES RESISTENTES A LA ABRASIÓN	14
1.5.1	ELECTRODOS REVESTIDOS PARA RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	15
1.5.2	MATERIALES DE APORTE Y FUNDENTES PARA RECUBRIMIENTOS DE PROCESO DE SOLDADURA AUTOMÁTICA	16
SECCIÓN II		
1.6	METALURGIA DE LOS RECUBRIMIENTOS DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO	17
1.6.1	INFLUENCIA DE ELEMENTOS ALEANTES EN LA FORMACIÓN DE CARBUROS	17

1.6.7	DIFUSIÓN DE CARBONO EN RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	32
1.6.8	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES (APORTE TÉRMICO DE CALOR)	33
1.6.9	PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	34
1.6.9.1	PRECALENTAMIENTO	34

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO POR ARCO ELÉCTRICO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

2.1	SELECCIÓN DE MATERIALES Y PREPARACIÓN DE PROBETAS	35
2.1.1	SELECCIÓN DEL METAL BASE PARA LOS ENSAYOS	35
2.1.1.1	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36	35
2.1.1.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36	35
2.1.1.3	MICROESTRUCTURA DEL ACERO ASTM A 36	35
2.1.2	SELECCIÓN DE MATERIALES DE APORTE	36
2.1.2.1	ELECTRODOS DIN E6-60 (64w) (CITODUR 600)	37
2.1.2.2	ELECTRODO DIN E10-65cz (CITODUR 1000)	37
2.1.2.3	ELECTRODO DIN E4-60 (65 w) st (TOOLCORD)	37
2.1.2.4	ELECTRODO EXADUR 43	38
2.1.3	SELECCIÓN DE MATERIALES DE APORTE COMO COJÍN AMORTIGUADOR	38
2.1.3.1	ELECTRODO AWS E-7018	39
2.1.3.2	ELECTRODO AWS E-9016- B3	39
2.1.3.3	ELECTRODO DE ACERO INOXIDABLE AWS E-308-15	40

2.2	ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	41
2.2.1	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA EN FORMULARIO (WPS) ELECTRODO CITODUR 600	41
2.2.2	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA EN FORMULARIO (WPS) ELECTRODO CITODUR 1000	42
2.3	PREPARACIÓN DE PROBETAS	43
2.3.1	SELECCIÓN DEL AMPERAJE ADECUADO	44
2.3.2	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS A DEPOSITAR	45
2.4	ENSAYOS DE DUREZA DEL METAL DEPOSITADO	45
2.4.1	DUREZA SUPERFICIAL PROMEDIO DEL METAL DEPOSITADO	45
2.4.2	DUREZA EN LAS DIFERENTES DE CAPAS DEPOSITADAS	45
2.4.3	DUREZA SUPERFICIAL DEL METAL DEPOSITADO EN LAS PROBETAS	47
2.5	DETERMINACIÓN DE LAS MICROESTRUCTURAS	48
2.5.1	MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS DE ELECTRODO DIN E6-60 (64w) CITODUR 600	48
2.5.2	MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS DE ELECTRODO DIN E 10-65cz CITODUR 1000	51
2.5.3	MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS DE ELECTRODO DIN E 4-60 (65 w) st -TOOLCORD	54
2.5.4	MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS DE ELECTRODO EXADUR 43	57

CAPÍTULO III

DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA Y DILUCIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES

3.1	EQUIPO PARA DETERMINAR DIFUSIÓN DE CARBONO EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS	60
3.2	PREPARACIÓN DE PROBETAS	60

3.3 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE CARBONO EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS	61
3.3.1 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-6-60 (64W) CITODUR 600	61
3.3.1.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA	61
3.3.1.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA	62
3.3.1.3 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA	63
3.3.2 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO E10-65CZ – CITODUR 1000	64
3.3.2.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA	64
3.3.2.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA	65
3.3.2.3 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA	66
3.3.3 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO E-4, 60 (65W)ST-TOOLCORD	67
3.3.3.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA	67
3.3.3.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA	68
3.3.3.3 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA	69
3.3.4 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO EXADUR 43	70
3.3.3.4.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA	70
3.3.3.4.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA	71

CAPÍTULO IV

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO

4.1 PARÁMETROS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN	72
4.1.1. RUEDA DE CAUCHO	72
4.1.2. MATERIAL ABRASIVO	72
4.1.3 FLUJO DE ARENA	72

4.1.4	TRANSMISIÓN DEL MOTOR	72
4.1.5	CONTADOR DE REVOLUCIÓN DE RUEDA	72
4.1.6	TIEMPO DE ENSAYO	72
4.1.7	FUERZA APLICADA	72
4.1.8	BALANZA ANALÍTICA	73
4.1.9	EQUIPO DE ENSAYO DE ABRASIÓN	73
4.2	CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO DE ABRASIÓN	74
4.3	ENSAYO DE ABRASIÓN DE CARBUROS DE CROMO	74
4.3.1	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN ELECTRODO DIN E6-60 (64W) CITODUR 600	74
4.3.2	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN ELECTRODO DIN E10-65 CZ-CITODUR 1000	75
4.3.3	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN ELECTRODO DIN EXADUR 43	75
4.4	ENSAYO DE ABRASIÓN DE CARBUROS DE TUNGSTENO	75
4.4.1	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN ELECTRODO DIN E4 -60 (65W) ST-TOOLCORD	76
4.5	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA EN VOLUMEN POR ABRASIÓN DE CARBUROS DE CROMO	76
-	ELECTRODO DIN E-60 (64W) C – CITORDUR 600	77
-	ELECTRODO DIN E10-65 CZ –CITODUR 1000	77
-	ELECTRODO EXADUR 43	78
4.6	PÉRDIDA DE VOLUMEN POR ABRASIÓN DE CARBUROS DE TUNGSTENO	78
-	ELECTRODO DIN E4-60 (65W) ST. TOOLCORD	78
4.7	PROBETAS DESGASTADAS POR ENSAYO DE ABRASIÓN	79

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE ABRASIÓN Y DIFUSIÓN DE CARBONO	80
5.1 DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE PESO PROMEDIO POR ABRASIÓN DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO	81
5.1.1 DIAGRAMA DE PÉRDIDAS DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO DIN E-6-60 (64w) c (CITODUR 600)	81
5.1.2. DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO DIN E-10-75cz (64W)C (CITODUR 1000)	82
5.1.3. DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO EXADUR 43	82
5.1.4. DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE PESO PROMEDIO DE CARBUROS DE TUNGSTENO VS. DUREZA ROCKWELL ELECTRODO DIN E-4-60 (65W) st (TOOLCORD)	83
5.1.5 DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO DE CARBUROS CROMO ELECTRODO DIN E-6-60 (64W)c CITODUR 600	83
5.1.6 DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO DIN E-10-65cz (CITODUR 1000)	84
5.1.7 DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODO EXADUR 43	84
5.1.8 DIAGRAMA DE COMPARACIÓN DE VARIACIÓN DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODOS DE CARBURO DE CROMO, CITODUR 600, CITODUR 1000 Y EXADUR 43	85
5.1.9 DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODO DE CARBURO DE TUNGSTENO – TOOLCORD	85

5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA	87
5.2.1	DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-6-60 (64W) C CITODUR 600 VS DUREZA DE LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS	88
5.2.2	DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-10-65 cz - CITODUR 1000 VS DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS	88
5.2.3	DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-4-60 (65W) st - TOOLCORD VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS	89
5.2.4	DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO EXADUR 43 VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS O CORDONES DEPOSITADOS	89
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DILUCIÓN DE CROMO Y TUNGSTENO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA	90
5.3.1	DIAGRAMA DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO DIN E-6-60 (64W) C CITODUR 600	91
5.3.2	DIAGRAMA DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO DIN E-10-65 CZ-CITODUR 1000	91
5.3.3	DIAGRAMA DE DILUCIÓN DE CROMO Y TUNGSTENO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO E-4-60(65W) ST TOOLCORD	92
5.3.4	DIAGRAMA DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO EXADUR 43	92
	CONCLUSIONES	94
	BIBLIOGRAFÍA	95
	ANEXOS	100
	NORMA ASTM G65 DE ENSAYO DE ABRASIÓN	
	PLANOS DE EQUIPO DE ENSAYO DE ABRASIÓN	

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
FOTOGRAFIA N° 1 Probetas para Ensayo de Abrasión	44
FOTOGRAFIA N° 2 Microscopio Electrónico SEM-EDX	60
FOTOGRAFIA N° 3 Equipo de Ensayo de Abrasión	73
FOTOGRAFIA N° 4 Probetas Desgastadas de Ensayo de Abrasión	79

ÍNDICE DE MICROFOTOGRAFÍAS Y MICROGRAFÍAS

➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 1 de Martensita	21
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 2 de Austenita	22
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 3 de Carburos de Red	23
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 4 de Carburos Dispersos	24
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 5 de Metal Base	36
➤ MICROFOTOGRAFIA N° 6 de la interfase Ferrita y Perlita, carburo de Cromo (Interfase)	49
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 7 Microfotografía de Capa 1ª-Ferrita y Carburo de Cromo	49
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 8 Carburo de Cromo en Matriz Austenítica (Capa 2)	50
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 9 Carburo de Cromo y Carburo de Hierro (Capa 3)	50
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 10 Carburo de Cromo y carburo de Hierro (superficie)	51
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 11 Carburo de Cromo-Interfase	52
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 12 Carburo de Cromo de Matriz Poligonal (Capa 1)	52
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 13 Carburo de Cromo (Capa 2)	53
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 14 Interfase y Carburo de Cromo (Capa 3)	53
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 15 Carburo de cromo de matriz eutéctica (superficie)	54
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 16 Interfase Electrodo Toolcord Ferrita – Perlita, carburo de Hierro y Tungsteno	55

➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 17 Carburo de Hierro y Tungsteno en Matriz Austenítica (Capa 1)	55
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 18 Carburo de Hierro en Matriz Austenítica (Capa 2)	56
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 19 Martensita y Carburo de Tungsteno (capa 3)	56
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 20 Martensita y Carburo de Tungsteno (superficie)	57
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 21 Interfase y capa 1 – Carburo de Cromo Poligonal	58
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 22 Carburo de Cromo Poligonal (Capa 2)	58
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 23 Carburo de Cromo Primario (Capa 3)	59
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 24 Carburo de Cromo de Matriz Poligonal (Superficie)	59

MICROFOTOGRAFÍA OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEN)

➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 25 Difusión de carbono de eléctrodo DIN E6-60 (64w) Citodur 600 1 ^{era} capa depositada	61
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 26 Citodur 600 2 ^{da} capa depositada	62
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 27 Citodur 600 3 ^{ra} capa depositada	63
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 28 Difusión de carbono electrodo E10-65CZ Citodur 1000 – 1 ^{era} capa depositada	64
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 29 Citodur 1000 – 2 ^{da} capa depositada	65
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 30 Citodur 1000 – 3 ^{era} capa depositada	66
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 31 Electrodo Toolcord 1 ^{era} capa depositada	67
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 32 Electrodo Toolcord 2 ^{da} capa	68
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 33 Electrodo Toolcord 3 ^{ra} capa	69
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 34 Electrodo Exadur 43 – 1 ^{ra} capa	70
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 35 Electrodo Exadur 43 – 2 ^{da} capa	72

➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 17 Carburo de Hierro y Tungsteno en Matriz Austenítica (Capa 1)	55
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 18 Carburo de Hierro en Matriz Austenítica (Capa 2)	56
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 19 Martensita y Carburo de Tungsteno (capa 3)	56
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 20 Martensita y Carburo de Tungsteno (superficie)	57
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 21 Interfase y capa 1 – Carburo de Cromo Poligonal	58
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 22 Carburo de Cromo Poligonal (Capa 2)	58
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 23 Carburo de Cromo Primario (Capa 3)	59
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 24 Carburo de Cromo de Matriz Poligonal (Superficie)	59

MICROFOTOGRAFÍA OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEN)

➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 25 Difusión de carbono de eléctrodo DIN E6-60 (64w) Citodur 600 1 ^{era} capa depositada	61
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 26 Citodur 600 2 ^{da} capa depositada	62
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 27 Citodur 600 3 ^{ra} capa depositada	63
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 28 Difusión de carbono electrodo E10-65CZ Citodur 1000 – 1 ^{era} capa depositada	64
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 29 Citodur 1000 – 2 ^{da} capa depositada	65
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 30 Citodur 1000 – 3 ^{era} capa depositada	66
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 31 Electrodo Toolcord 1 ^{era} capa depositada	67
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 32 Electrodo Toolcord 2 ^{da} capa	68
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 33 Electrodo Toolcord 3 ^{ra} capa	69
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 34 Electrodo Exadur 43 – 1 ^{ra} capa	70
➤ MICROFOTOGRAFÍA N° 35 Electrodo Exadur 43 – 2 ^{da} capa	72

RECUBRIMIENTO POR ARCO ELÉCTRICO-SMAW CON CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO RESISTENTES A LA ABRASIÓN-INFLUENCIA DE LA DIFUSIÓN DE CARBONO

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar el método de aplicación de recubrimientos superficiales resistentes al desgaste por abrasión de los electrodos que depositan aleaciones de recubrimientos protectores compuestos por carburos metálicos de cromo y tungsteno, fabricados por la empresa SOLDEXA – OERLIKON Perú. Asimismo, el diseño y la construcción de un equipo de ensayo de abrasión según Norma ASTM G 65 en el Instituto de Soldadura de la Universidad Nacional del Callao.

El trabajo de investigación se desarrolló en la Empresa SOLDEXA-OERLIKON, el Instituto de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica-Energía de la Universidad Nacional del Callao y el Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, durante un periodo de cinco años.

Con el ensayo de abrasión, se demostró que la variable de mayor importancia en el ensayo de abrasión de bajo esfuerzo es el contenido de carbono; los carburos primarios de cromo de matriz hexagonal, que presentan una mayor resistencia a la abrasión y alta dureza, es el caso del electrodo Exadur 43 y Toolcord.

Para establecer el tipo de carburo, se realizó el análisis metalográfico con el microscopio metalográfico y el microscopio electrónico de barrido (SEM), en la determinación de la difusión de carbono y dilución de cromo y tungsteno. La medición de la dureza se efectuó con un durómetro en escala ROCKWELL "C".

Con el trabajo de investigación efectuado se ha demostrado que los electrodos de carburos de cromo y tungsteno, fabricados por la empresa SOLDEXA – OERLIKON Perú, se encuentran dentro de los estándares internacionales por presentar una microestructura de carburos de cromo y tungsteno de matriz poligonal (hexagonal) que tienen alta resistencia a la abrasión y presentan alta dureza. Con los resultados del presente trabajo de investigación, se aporta significativamente a la Industria de fabricación de electrodos y a las Empresas Minero Metalúrgicas y de Construcción en la aplicación de recubrimiento con carburo de cromo y tungsteno.

COATING FOR ELECTRIC ARC-SMAW WITH CHROMIUM AND TUNGSTEN CARBIDES ABRASION-INFLUENCE OF CARBON DIFFUSION

ABSTRACT

The objective of this research work is to evaluate the method of application of surface coatings resistant to abrasive wear of the alloy electrodes deposited protective coatings composed of metal carbides of chromium and tungsten, manufactured by the company SOLDEXA - OERLIKON Peru. Also the design and construction of an abrasion test equipment according to ASTM G 65 at the Welding Institute, National University of Callao.

The research was conducted in the Company SOLDEXA-OERLIKON, Welding Institute of the Faculty of Mechanical Engineering, Energy, National University of Callao and the Electron Microscopy Center of the Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, over a period of five years.

With the abrasion test, demonstrated that the most important variable in the abrasion test effort is low carbon content, the primary carbides of chromium hexagonal array, having a higher abrasion resistance and high hardness, is Exadur electrode case 43 and Toolcord.

To set the type of carbide metallographic analysis was made with the metallographic microscope and scanning electron microscopy (SEM) in the determination of carbon diffusion and dilution of chromium and tungsten. The hardness measurement was made with a durometer scale ROCKWELL "C".

With the research work carried out has shown that the electrodes of chromium and tungsten carbide, manufactured by the company SOLDEXA - OERLIKON Peru, are within international standards for filing a microstructure of chromium and tungsten carbide matrix polygonal (hexagonal) those have high resistance to abrasion and high hardness present. With the results of this research work is contributed significantly to the electrode manufacturing industry and mining and metallurgical company and Construction in the application of coating of chromium and tungsten carbide.

INTRODUCCIÓN

El desgaste por abrasión es el tipo de desgaste que tiene mayor incidencia en el costo de mantenimiento de equipos en la industria minera, en el movimiento de tierras, rocas y minerales en la construcción, el mantenimiento de carreteras y en la construcción de edificios. El desgaste por abrasión representa el 50% del tipo de desgaste producido en la industria Minero Metalúrgica y de Construcción.

La pérdida de material por abrasión atenta contra la economía de las empresas por el mantenimiento continuo con soldadura empleando electrodos de recubrimiento duro: carburos de cromo y tungsteno.

El estudio de la resistencia a la abrasión es de gran importancia para determinar la duración del recubrimiento, la dureza obtenida en la superficie y la influencia de la microestructura y los carburos en la dureza y resistencia a la abrasión.

La difusión del carbono en la formación de carburos de cromo y tungsteno influye en la resistencia a la abrasión; a mayor cantidad de capas de recubrimiento depositado, se produce mayor difusión de carbono y dilución de elementos aleantes (cromo y tungsteno).

Con el presente trabajo de investigación se obtiene:

- La mayor dureza superficial del recubrimiento protector.
- Una microestructura que produzca una buena dureza superficial, para aumentar la resistencia al desgaste.
- Una microestructura resistente al desgaste por abrasión.
- Se logra prolongar la vida útil de una superficie recubierta con soldadura.

HIPÓTESIS

HIPÓTESIS GENERAL:

El factor de mayor importancia para determinar la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo en los carburos de cromo y tungsteno depositados por arco eléctrico – SMAW es la microestructura no la dureza.

HIPÓTESIS ESPECÍFICO:

A mayor número de capas o cordones depositados con recubrimiento de carburos de cromo y tungsteno por arco eléctrico, se produce mayor difusión de carbono y dilución de elementos aleantes con la consiguiente disminución de las propiedades mecánicas, manifestada en la microestructura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar un método de aplicación de recubrimientos superficiales de carburos de cromo y tungsteno, mejorando las propiedades mecánicas y una microestructura resistente a la abrasión, para conseguir la mayor vida útil de la superficie recubierta, evitando la difusión de carbono en la última capa del metal depositado y con el consiguiente ahorro económico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Obtener la máxima dureza en la tercera capa depositada en las probetas de ensayo de abrasión.
2. Diseñar y construir el equipo de abrasión norma ASTM G 65.
3. Evaluar el contenido de carbono como formador de carburos y microestructuras resistentes a la abrasión.
4. Evaluar la pérdida de dureza por dilución de elementos aleantes y difusión de carbono empleando microscopía electrónica de barrido (SEM)
5. Obtener el carburo primario hexagonal, para una mayor resistencia a la abrasión.
6. Evaluar la microestructura como factor de dureza para determinar la resistencia a la abrasión.
7. Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de bajo esfuerzo por Norma ASTM G-65 de carburos, cromo y tungsteno.
8. Seleccionar la aleación adecuada para una mayor resistencia a la abrasión.
9. Evaluar la resistencia a la abrasión de los electrodos del recubrimiento protector producido por la empresa SOLDEXA-OERLIKON.
10. Evaluar la dureza y microestructura de recubrimientos protectores resistentes a la abrasión formada por aleaciones de carburos metálicos, cromo y tungsteno.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

SECCIÓN I

RECUBRIMIENTOS PROTECTORES Y TEORÍA DE DESGASTE

1.1 RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Los recubrimientos protectores o endurecimientos superficiales se obtienen al depositar una o varias capas de material de aporte resistentes al desgaste sobre componentes metálicos para extender su vida útil de servicio.

Las ventajas que presentan los recubrimientos protectores son:

- Aumentar la resistencia al desgaste.
- Fácil empleo de aleaciones Extra – Duros (Carburos)
- De fácil aplicación en el lugar de mantenimiento.
- Empleo ventajoso de aleaciones especiales.
- Disponer de capas duras sobre metal base tenaz.
- Economía en el uso por:
 - Mayor vida útil de la máquina recuperada.
 - Reducción del mantenimiento y reemplazo de piezas de maquinarias.
 - Recuperación de piezas desgastadas.
 - Reparar órganos de máquinas, sin cambiar toda la máquina.
 - Proteger las superficies de las piezas o elementos de máquinas sujetos a fuerte desgaste, prolongando su vida productiva en forma indefinida.
 - Empleo de metales base de bajo costo, aplicando recubrimiento protector solo en las superficies que requieren protección (Paulo Moino, USA) [43].

1.2 CLASIFICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Los recubrimientos protectores se clasifican en:

1.2.1 ACEROS TÉRMICAMENTE TRATABLES

Algunos tipos de aceros térmicamente tratables se usan como materiales de recubrimiento protector. Estos aceros producen superficies duras resistentes a la abrasión por enfriamiento rápido. (Lincoln, Electric Company) [57]

a) Aceros de alto carbono.-

La velocidad de enfriamiento de los aceros de alto carbono debe ser rápida, para producir una máxima resistencia a la abrasión. La resistencia a la abrasión de los recubrimientos soldados con alto carbono aumenta con la dureza.

b) Aceros aleados de medio carbono.-

Este tipo de recubrimiento se usa para proporcionar protección contra desgaste de metal a metal.

Presentan alta resistencia a la tracción, ductilidad y de esta forma resisten a la deformación y las rajaduras de impacto.

c) Aceros de herramientas.-

Los recubrimientos con estas aleaciones se usan para reparar bordes desgastados o superficies de herramientas y dados.

1.2.2 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Los aceros inoxidable austeníticos no son materiales duros. Estas aleaciones proporcionan una excelente tenacidad; son recubrimientos dúctiles con resistencia excepcionalmente buena al astillado originado por fuerzas repetidas de impacto, además de proporcionar una buena resistencia a la corrosión.

Los recubrimientos con acero inoxidable austenítico son usados como capa base para otros materiales de recubrimiento duro.

1.2.3 ACEROS INOXIDABLES SEMIAUSTENÍTICOS

Presentan buena resistencia al impacto y al desgaste. Los recubrimientos son duros al depositarse o se endurecen con el impacto en servicio o pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Estas aleaciones se realizan en base a hierro, que contienen hasta 20% de elementos aleantes: 1 a 2% de carbono y de 5 a 12% de cromo.

1.2.4 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Los aceros inoxidables del tipo 410 y 420 producen recubrimientos de metal denso homogéneo, con buena resistencia a la fisuración. Los recubrimientos de acero inoxidable martensítico son usados para desgaste de metal a metal.

1.2.5 ACEROS AUSTENÍTICOS AL MANGANESO

Los aceros austeníticos al manganeso son tenaces, y ligeramente menos resistentes a la abrasión que los materiales semiausteníticos son aleaciones para resistencia al impacto.

El depósito contiene de 11 a 14% de manganeso y es endurecible con el trabajo.

1.2.6 CARBUROS DE HIERRO (HIERROS FUNDIDOS ALEADOS)

Las fundiciones blancas se utilizan para recubrimientos duros y su dureza se debe a la acción de la cementita. El recubrimiento es menos compacto y con más tendencia a la fisuración.

1.2.7 CARBUROS DE CROMO

Los carburos de cromo tienen menor dureza y resistencia a la abrasión que los carburos de tungsteno, pero una resistencia al impacto ligeramente superior.

Los carburos de cromo son considerados como materiales duros y frágiles comparados con otros materiales de recubrimiento duro.

1.2.8 CARBURO DE TUNGSTENO

El carburo de tungsteno es el más duro de los recubrimientos duros y de mayor resistencia al desgaste por abrasión. Se emplea para proteger partes de máquinas que están en contacto con material severamente abrasivo.

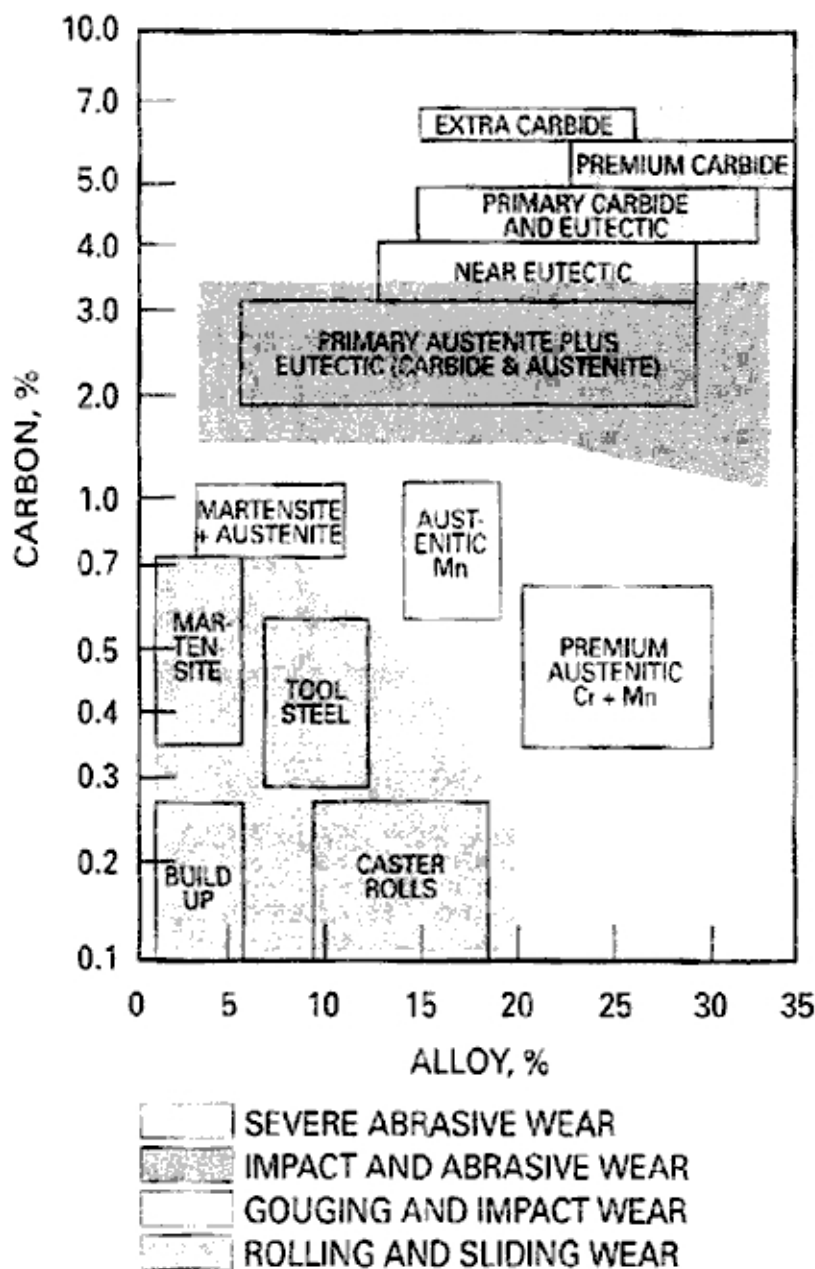


Figura Nº 1: Mapa de Aplicaciones de Recubrimientos Protectores

Fuente: AWS – WELDING HANDBOOK [4]

1.3 DESGASTE

El desgaste es un fenómeno por medio del cual pequeñas partículas son removidas de la superficie de trabajo de una pieza.

El desgaste produce una disminución de las dimensiones de la pieza afectada.

Es el deterioro de la superficie de un material debido al uso; es una pérdida paulatina de masa y volumen por causa de algún agente externo. (Paulo Moino)[43].

1.3.1 CLASES DE DESGASTE

El desgaste se basa en la pérdida de material en forma gradual, y las clases de desgaste según BEZ ZAHNER, USA [24] son:

- Desgaste por abrasión.
- Desgaste por impacto.
- Desgaste por fricción.
- Desgaste por corrosión.
- Desgaste por calor (temperatura).
- Desgaste por erosión.
- Desgaste por cavitación.

1.3.1.1 DESGASTE POR ABRASIÓN

El desgaste por abrasión es provocado por acción de partículas sólidas duras extrañas al material base (fricción con piedras, cascajo, arenilla, arena y otros materiales sólidos no metálicos).

El grado de abrasión es reflejada por la naturaleza de las partículas abrasivas: forma, dureza, tamaño, grado de humedad, ángulo de incidencia con la superficie, presión o impacto a la partícula abrasiva y la velocidad relativa de las partículas en relación con la superficie desgastada. (Paulo Moino, USA)[43].

Existen tres tipos de abrasión:

a) Abrasión con bajo esfuerzo.-

Producido por partículas pequeñas que se deslizan libremente sobre una superficie a ángulo de incidencia bajo, y presiones bajas.

b) Abrasión de alto esfuerzo.-

Producido por la molienda del abrasivo entre dos superficies metálicas. Los esfuerzos generados sobre la superficie son grandes, muchas veces superiores al límite elástico del metal.

c) Abrasión por desgarramiento.-

Causado por partículas grandes que hacen impacto en la superficie a ángulos grandes de incidencia. Las presiones ejercidas sobre la superficie son muy elevadas.

1.3.1.2. MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASIÓN

Las condiciones físicas y mecánicas que afectan el desgaste por abrasión son:

- **Tamaño de partícula.-** Ambientes con partículas de menor tamaño son más abrasivos y atacan más rápido a la matriz expuesta que los ambientes con partículas mayores.
- **Peso de partículas.-** Partículas más pesadas tienen un porcentaje de desgaste mayor y afectan los niveles de impacto resultantes.
- **Forma de partícula.-** Las partículas más afiladas o angulares son más agresivas y generan acciones cortantes y rayado más altos.
- **Dureza de las partículas.-** Minerales más duros (escala de MOHS) aumentan el porcentaje de desgaste sin tener en cuenta la dureza del metal en la superficie.
- **Textura de partícula**
 - **Medio fibroso.-** Los medios fibrosos no tienen efecto sobre el desgaste.

- **Medio frágil.**- Los medios frágiles son fácilmente triturados o molidos; tienen bajos niveles de abrasión.
- **Medio cementado.**- Son medios sedimentarios formados en el contorno de rocas y son más abrasivos.
- **Medio consolidado.**- Son partículas que requieren altas cargas de compresión o impacto para ser reducidas y son muy abrasivas.
- **Velocidad de partículas.**- Altas velocidades aumentan el nivel de abrasión con el tiempo.
- **Ángulo de ataque.**- Ángulos pequeños o bajos de ataque (hasta 30°) aumentan el porcentaje de desgaste por abrasión, ángulos altos (cerca de 90°) aumentan los niveles de impacto.
- **Condiciones de medio de trabajo**
 - **Medios secos.**- Tienen menor efecto de abrasión
 - **Medios húmedos-pastosos y barrocos.**- Presentan más alta abrasión y presentan un mayor contacto con la matriz del metal o depósito.
 - **Medios húmedos.**- Presentan una abrasión elevadísima; las velocidades de las partículas son más altas y las partículas son muy agresivas (Paulo Moino, USA) [43]

1.3.1.3 DESGASTE POR IMPACTO

Es provocado por impactos cíclicos o repetidos, en contacto violento entre la pieza y un material extraño que puede ser metálico o no metálico.

El impacto es un golpe que produce cambios en la estructura del metal base. La magnitud de las alteraciones depende del tamaño del elemento extraño y de la fuerza del golpe. El desgaste se produce por desprendimiento, por fatiga, por repetidos impactos.

1.3.1.4 DESGASTE POR EROSIÓN

Desgaste provocado por sólidos en suspensión, en líquidos o gases que se encuentran en movimiento. La energía cinética de las partículas abrasivas es transferida al componente para un deterioro superficial.

1.3.1.5 DESGASTE POR CAVITACIÓN

Desgaste provocado por líquido en movimiento. Es la generación y posterior implosión de burbujas de vapor de agua producto de un cambio de velocidades en el fluido que implica cambios de presión hidráulica en el sistema.

El desgaste se produce cuando las ondas de choque microfisuran el material base.

1.3.1.6 DESGASTE POR FRICCIÓN (ADHESIVO)

Es el contacto deslizante o rodante de una superficie metálica a otra. Se desgasta la pieza de menor índice de dureza.

1.3.1.7 DESGASTE POR CORROSIÓN

Es el deterioro gradual de las superficies metálicas por efecto de la atmósfera, las sales, los ácidos, etc.

- Corrosión es un ataque químico o electroquímico sobre un material y el medio que lo rodea.
- En ambientes secos, y a alta temperatura se produce corrosión por oxidación.
- Corrosión electroquímica por efecto del medio ambiente, las sales y los ácidos.

1.3.1.8 DESGASTE POR CALOR

Producido por fatiga térmica, se debe a la repetición de ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Los choques térmicos provocan fracturas o fisuras por los esfuerzos residuales.

1.4 TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

La selección del proceso de soldadura más adecuado y la técnica de soldadura más apropiado tienen la misma importancia que la selección de la aleación, los requerimientos de servicio, las características físicas de la pieza de trabajo, las propiedades metalúrgicas del metal base, la forma y composición de la aleación, la habilidad del soldador y el costo de operación.

Los procesos de soldadura de mayor aplicación en la industria son:

- Soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW).
- Soldadura TIG (GTAW).
- Soldadura semiautomática tubular (FCAW).
- Proceso automático por arco sumergido (SAW).
- Metalizado por arco eléctrico.
- Recubrimiento por plasma.
- Soldadura oxiacetilénico.

1.4.1 SELECCIÓN DE PROCESO DE SOLDADURA PARA RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Los procesos de soldadura por arco eléctrico, generalmente preferidos por razones de velocidad de deposición y bajo costo, son:

- a) Proceso de soldadura Manual con Electrodo Revestido (SMAW).
- b) Proceso de soldadura por arco abierto o con alambre tubular (FCAW).
- c) Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

1.4.1.1 PROCESO DE SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

El proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW) se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto. El calor producido por el arco eléctrico funde el extremo del electrodo y quema el revestimiento produciéndose la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de

gotas del metal fundido desde el alma del electrodo hasta el baño de fusión en el material base.

En el arco eléctrico, las gotas del metal fundido se proyectan recubiertas de escoria fundida procedente del recubrimiento; por efecto de la tensión superficial y la viscosidad, la escoria flota en la superficie.

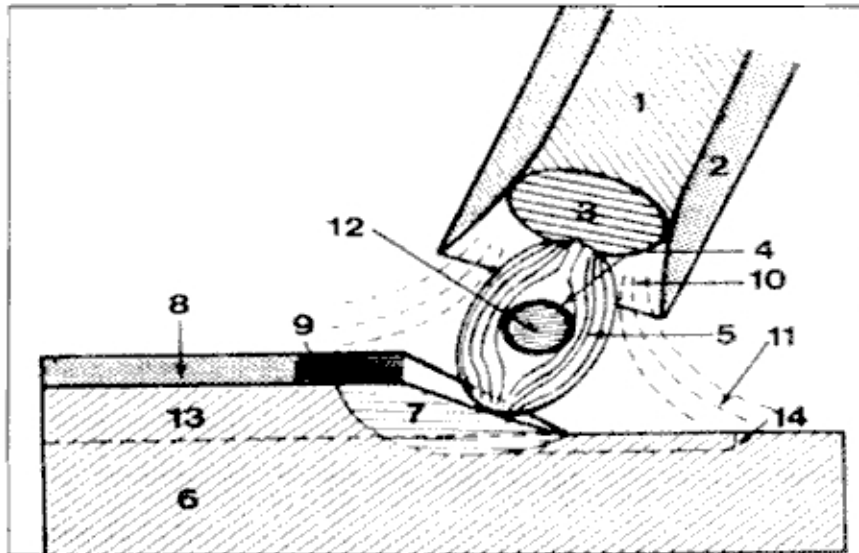


Figura N° 2 Fusión de Electrodo
Fuente: Manual de Soldadura OERLIKON [44]

Partes:

1. Alma del electrodo
2. Revestimiento
3. Gota en formación
4. Gota líquida
5. Arco
6. Metal base
7. Baño de fusión y cráter del metal base en fusión
8. Escoria sólida
9. Escoria líquida
10. Cráter del electrodo
11. Protección gaseosa
12. Transferencia del metal (gotas)
13. Cordón depositado
14. Penetración

1.4.1.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

a) Ventajas

- **Disponibilidad de electrodos en el mercado.-**

Existe una gran variedad de aleaciones disponibles en forma de electrodo revestido.

- **Espesor del material base.-**

Dentro de ciertas limitaciones prácticas y económicas, gran variedad de espesores pueden ser recubiertos por este proceso de soldadura.

- **Posiciones de soldadura.-**

Existen electrodos utilizados como recubrimiento protector disponibles para trabajos en todas las posiciones (plana, horizontal, vertical y sobre cabeza).

- **Versatilidad.-**

Los electrodos revestidos se pueden emplear al aire libre y en lugares remotos.

b) Desventajas

- Presenta una dilución de dos o tres capas para obtener las mínimas propiedades antidesgaste (Cuadro N° 1).

- Baja eficiencia de deposición de 0,5 a 3,0 Kg/Hora.

1.4.2 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ABIERTO

a) Ventajas

Disponibilidad de material de aporte

Disponibilidad de aleaciones en forma de alambre tubular, con posibilidad de desarrollar aleaciones específicas, en función de la demanda.

- Alta deposición con un rango de 2 a 11 Kg/Hr.

- **Integridad del depósito.-** Buena recuperación de elementos a través del arco eléctrico.
- **Facilidad de operación.-** Se requiere mínimo tiempo de entrenamiento del operador.
- **Versatilidad.-** Menor que el electrodo revestidos pero se puede soldar al aire libre.

b) Desventajas

- **Dilución.-** Se requiere de dos a tres capas para obtener buenas propiedades antidesgaste.
- **Posición de soldadura.-** No todos los alambres se emplean en todas las posiciones. Muchos son diseñados solo para posición plana y horizontal.

1.4.3 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

a) Ventajas

- **Proceso automatizado.-** Es un proceso de recubrimiento automático por soldadura.
- **Alta deposición.-** Económico para reconstruir grandes zonas desgastadas. Presenta una deposición de 4 a 15 Kg./Hr.
- **Facilidad de operación.-** El operador requiere poco entrenamiento.
- **Depósito de soldadura.-** El proceso produce un depósito: liso, limpio y sano.
- **Ambiente de taller.-** El arco eléctrico no es visible debido a la cobertura de fundente.
- **Integridad del depósito.-** Buena recuperación de elementos a través del arco eléctrico.

b) Desventajas

- **Disponibilidad de aleaciones y fundentes.** Limitado a ciertas aleaciones.

- **Posición de soldadura.**- El proceso está limitado a posición plana y recubrimiento cilíndrico debido al uso del fundente como protección.
- **Espesor de recubrimiento.**- El proceso de arco sumergido está limitado a zonas grandes que se prestan para proceso automático.
- **Alta dilución.**- Se requiere múltiples capas para maximizar las propiedades antidesgaste.
- Presenta elevada entrada de calor que puede distorsionar al metal base.
- **Versatilidad.**- Está limitado a operaciones en el taller debido a que el equipo es automático.

CUADRO N° 1

CARACTERÍSTICA DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA CON RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

PROCESO DE SOLDADURA	MATERIAL CONSUMIBLE	% DILUCIÓN METAL - BASE	ESPESOR MÍNIMO RECOMENDADO (mm)	VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN Kg/hr.
Arco Manual (SMAW)	Electrodo Revestido	10 - 30%	2	1 - 3
MIG - MAG (GMAW)	Alambre Sólido	10 - 25%	2	2 - 10
Arco Abierto (FCAW)	Alambre Tubular	10 - 25%	3	2 - 10
Arco Sumergido (SAW)	Alambre y Fundente	10 - 40%	3	4 - 15
TIG (GTAW)	Varilla	10 - 20%	1	0.5 - 2
Oxiacetilénico	Varilla y Fundente	5 - 10%	0,5	0.5 - 2

FUENTE.- CATÁLOGO DE ELECTRODOS INDURA - SANTIAGO DE CHILE, 2001[36]

1.5 SELECCIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES RESISTENTES A LA ABRASIÓN

Las aleaciones en base a carburos metálicos son:

- Carburo de Hierro.
- Carburo de Cromo.
- Carburo de Tungsteno.
- Carburo de Vanadio.
- Tienen buena resistencia a la abrasión.

1.5.1 ELECTRODOS REVESTIDOS PARA RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

CUADRO N° 2 DE ELECTRODOS REVESTIDOS PARA RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

NORMA DIN	NOMBRE OERLIKON	DUREZA HRC	NUMERO MÁXIMO DE CAPA	APLICACIONES
DIN E-7-65KC	CITOMANGAN	20-28, hasta 50 HRC en trabajo	M	IMPACTO SEVERO Resistencia a la abrasión junto con cargas de impacto: <ul style="list-style-type: none"> - Para relleno de piezas de acero al Mn. - Cruces de rieles - Martillos de molienda.
DIN E-1-40R	CITODUR 350	27-30	M	FRICCIÓN METÁLICA, SIN ABRASIÓN, POCA RESISTENCIA AL IMPACTO: <ul style="list-style-type: none"> - Base para recubrimiento protector. - Ruedas de carros metaleros. - Reconstrucción de ejes. - Rodillos, orugas, ruedas dentadas, engranajes, etc.
DIN E-6-60 (64W)C	CITODUR 600	52-58	3	ABRASIÓN MÁS IMPACTO: <ul style="list-style-type: none"> - Quijadas de chancadora. - Martillos de molino. - Zarandas. - Bordes de yunques de molino.
DIN E-10-65-CZ	CITODUR 1000	57-62	2	ABRASIÓN SEVERA (SIN GOLPE): <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia hasta 900 °C - Paletas de mezcladores. - Cubos de dragas, etc.
	EXADUR 43	60	2	ALTA ABRASIÓN CON LIGERO IMPACTO: <ul style="list-style-type: none"> - Martillos de molienda. - Industria ladrillera. - Tomillos transportadores.
DIN E-4-60 (65W)St	TOOLCORD	50-65	2	ROZAMIENTO METAL/METAL + CALOR <ul style="list-style-type: none"> - Reconstrucción de filos cortantes, Cizallas, Brocas, etc.

FUENTE.- MANUAL DE SOLDADURA-OERLIKON-1998, [44]

1.5.2 MATERIALES DE APORTE Y FUNDENTES PARA RECUBRIMIENTOS DE PROCESO DE SOLDADURA AUTOMÁTICA

**CUADRO N° 3
COMBINACIONES DEL ALAMBRE PS1 CON DIVERSOS FUNDENTES PARA
RECUBRIMIENTO PROTECTOR CON ARCO SUMERGIDO**

FLUJO	MAQUINABILIDAD	APLICACIÓN
250 A	SI	<ul style="list-style-type: none"> - DESBASTE METAL-METAL. - COJÍN AMORTIGUADOR: BASE DE RECUBRIMIENTOS DE MAYOR DUREZA.
350 A	PASTILLA CARBURADA	<ul style="list-style-type: none"> - RESISTENCIA AL IMPACTO. - EXCELENTE RESISTENCIA A ABRASIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Ruedas de carros metaleros. • Cadenas de orugas. • Ruedas guía. • Rodillos transportadores.
450 A	NO	<ul style="list-style-type: none"> - RESISTENTE A ALTA ABRASIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Mantles de chancadores primarios. • Ruedas guías de tractores. • Rodillos para alta abrasión.

FUENTE.- MANUAL DE SOLDADURA-OERLIKON-1998, [44]

SECCIÓN II

1.6 METALURGÍA DE LOS RECUBRIMIENTOS DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO

1.6.1 INFLUENCIA DE ELEMENTOS ALEANTES EN LA FORMACIÓN DE CARBUROS

La adición de elementos aleantes en un acero mejora las siguientes propiedades:

- Aumenta la templabilidad.
- Mejora las propiedades físicas a baja y alta temperatura.
- Mejora las propiedades mecánicas a baja y alta temperatura.
- Mejora la resistencia a temperaturas ordinarias.
- Mejora la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
- Aumenta la resistencia al desgaste.
- Aumenta la resistencia a la corrosión.
- Mejora las propiedades magnéticas.

TABLA Nº 1 COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS ALEANTES EN UN ACERO

ELEMENTO ALEANTE	GRUPO Nº 1		GRUPO Nº 2	
	DISUELTO EN FERRITA		COMBINADO EN CARBURO	COMBINADO COMO CARBURO COMPUESTO
Níquel	Ni		—	
Silicio	Si		—	
Aluminio	Al		—	
Cobre	Cu		—	
Manganeso	Mn	← →	Mn	(Fe, Mn) ₃ C (Fe, Cr) ₃ C, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₈ W ₂ C Mo ₂ C V ₄ C ₃ TiC CbC
Cromo	Cr	← →	Cr	
Tungsteno	W	← →	W	
Molibdeno	Mo	← →	Mo	
Vanadio	V	← →	V	
Titanio	Ti	← →	Ti	
Columbio	Cb	← →	Cb	

FUENTE.- INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA – AVNER [22]

1.6.2 ELEMENTOS ALEANTES FORMADORES DE CARBURO

Tienen tendencia a formar carburos los elementos aleantes: Cromo, Manganeso, Molibdeno, Vanadio, Tungsteno, Titanio y Columbio. Estos elementos aleantes se caracterizan porque en los aceros, en presencia de una cantidad suficiente de carbono, forman carburos y, en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido de carbono son solubles en ferrita.

El Vanadio, Titanio y Molibdeno tienen una tendencia muy fuerte a formar carburos. El Tungsteno y Cromo tienen una tendencia moderada.

El Manganeso tiene una tendencia débil en la formación de carburos.

Los carburos formados por diferentes elementos aleantes son duros y frágiles; los formados por Cromo y Vanadio son más duros y resistentes al desgaste; los carburos formados por Molibdeno, Tungsteno y Vanadio se caracterizan por tener gran estabilidad a temperatura elevada, manteniendo sus propiedades mecánicas.

TABLA N° 2 ELEMENTOS FORMADORES DE CARBUROS

CARBURO	ELEMENTOS FORMADORES DE CARBURO
M_6C	
$M_{23}C_6$	Mo, W
$(Fe_x)_3C$	Mn, Cr
M_7C_3	

M_2C	V, Nb, Ta
MC	Ti, Zr

FUENTE.- METAL HANDBOOK VOL-5. – 1998 [3]

TABLA N° 3 ELEMENTOS ALEANTES FORMADORES DE CARBUROS

IVA	VA	VIA	VIIA	VIII
Ti (2,94)	V (2,63)	Cr(2,49)	Mn(2,24 – 2,73)	Fe (2,48)
↓		↙ ↘		
Zr (3,20)	Nb(2,85)		Mo(2,72)	
	↓		↓	
	Ta(2,85)		W(2,74)	

FUENTE.- METAL HANDBOOK VOL 5. – 1998, [3]

1.6.2.1 CLASIFICACIÓN DE CARBUROS METÁLICOS

Los carburos se clasifican en tres grupos:

a) Carburos Binarios o Primarios:

- Vanadio (CV), $V_4 C_3$
 - Niobio
 - Tantalio ($Ta_2 C$)
 - Titanio
 - Zirconio
- (→ MC, $M_2 C$)

b) Carburos Ternarios (Secundarios):

- Cromo (Alto %) → $Cr_{23} C_6$
 - Molibdeno ($Fe_3 Mo_3 C$, $Fe_2 Mo_2 C_6$), $Mo_6 C$
 - Tungsteno ($Fe_4 W_2 C$), $W_6 C$
- (→ $M_6 C$ y $M_{23} C$)

c) Carburos Complejos (Mezclados):

- Cromo (Bajo %)
 - Manganeso
- $(Fe, Cr)_3 C$ → $(Fe_{0,8} Cr_{0,2})_3 C$
 $(Fe, Cr)_7 C_3$ → $(Fe_4 Cr_3)_3 C$
 $(Fe, Cr)_{23} C_6$ → $(Fe_8 Cr_{15})_3 C_6$
 [→ $(M)_3 C$, $(M)_7 C_3$, $(M)_{23} C_6$]

1.6.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CARBUROS DE HIERRO, CROMO Y TUNGSTENO.

CUADRO N° 5
DUREZA VICKERS (HV) POR TIPO DE CARBURO

TIPO DE CARBURO	DUREZA VICKERS (HV) – (DPH)
Carburo de Hierro (Fe_3C)	1100
Carburo de Cromo (Cr_7C_3)	1600
Carburo de Molibdeno (Mo_2C)	1800
Carburo de Tungsteno (WC)	2100
Carburo de Niobio (Columbio) (CbC)	2400
Carburo de Tungsteno (W_2C)	2500
Carburo de Vanadio (VC)	2800
Carburo de Titanio (TiC)	3200

FUENTE.- PAULO MOINO THERMADYNE STOODY, USA. [43]

1.6.3.1 ENSAYO DE DUREZA DE CARBUROS

El propósito del ensayo de dureza es determinar la idoneidad de un material para un propósito específico o uso propuesto. El ensayo de dureza es valioso debido a la relación entre la dureza y otras propiedades físicas del material.

Las escalas de dureza empleadas para medir la dureza de carburos son:

- Dureza ROCKWELL C (HRC)
- Dureza VICKERS (HV – DPH)
- Microdureza KNOOP (HK)

FUENTE.- INTRODUCCIÓN A LA METALURGÍA FÍSICA, 1980 [22]

1.6.4 MICROESTRUCTURA Y TAMAÑO DE GRANO DE LOS CARBUROS

La resistencia al desgaste de metales y aleaciones está en función de la microestructura; que a su vez, depende de la composición química y el ciclo térmico.

Los recubrimientos duros por soldadura se clasifican por su microestructura en:

- Aleaciones Martensíticas
- Aleaciones Austeníticas
- Aleaciones de Carburos

Fuente: Mckay, USA-2004, [42]

1.6.4.1 MARTENSITA

Es la microestructura o fase más común y es ampliamente utilizada en los depósitos de aleaciones de recubrimientos duros; es resistente a los tipos de desgaste suavemente abrasivos y contra ciertos ambientes severamente abrasivos. La martensita es una fase microestructural de alta dureza, que aumenta con el incremento de carbono. La martensita es formada por enfriamiento rápido de un acero. Los depósitos de aleaciones martensíticas tienen moderada ductilidad, mediana resistencia al impacto, buena resistencia al desgaste metal-metal.

Las aleaciones martensíticas de alto contenido de carbono presentan excelente resistencia a la abrasión por esmerilado.



Martensita

MICROFOTOGRAFÍA Nº 1 DE MARTENSITA

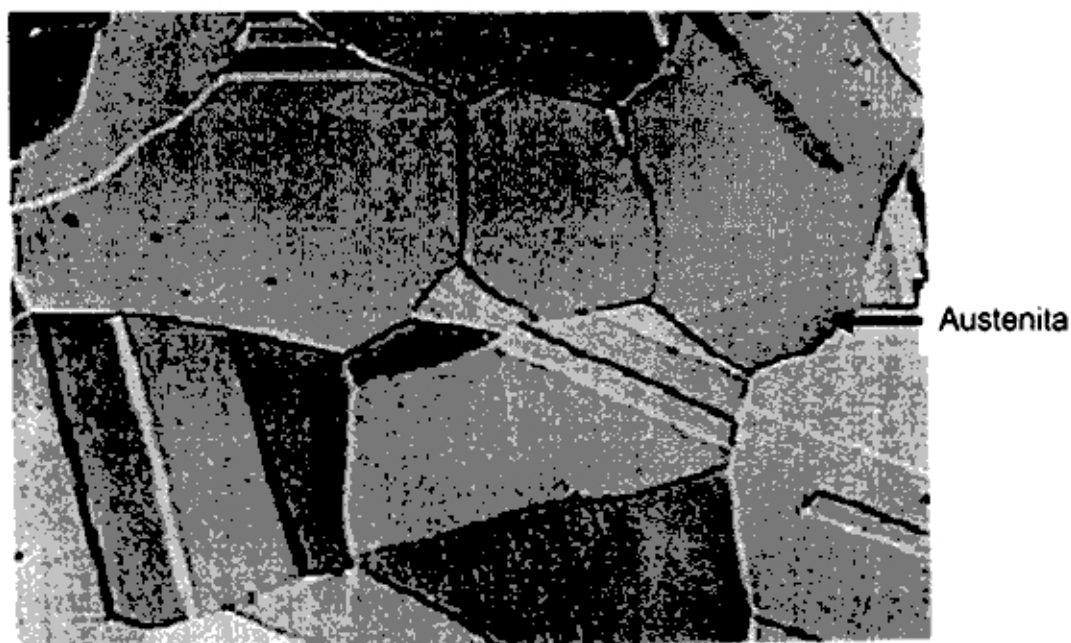
FUENTE.- MCKAY, 2004, [42]

1.6.4.2 AUSTENITA

La austenita es una microestructura blanda y dúctil; se autoendurece rápidamente durante el trabajo bajo impacto. Los aceros austeníticos al manganeso (aceros HADFIELD), con contenidos de 0,5 a 1% de carbono y de 13 a 20% de elementos aleantes (Mn, Cr y Ni).

La austenita presenta excelente resistencia al impacto y buena resistencia a la abrasión. Los depósitos austeníticos tienen un núcleo tenaz y dúctil, el cual soporta una capa superficial que se endurece durante el trabajo.

Los depósitos austeníticos son excelentes como cojines amortiguadores antes de recibir recubrimientos protectores. (Fig. N° 2).



MICROFOTOGRAFÍA N° 2 DE AUSTENITA
FUENTE.- MCKAY, 2004, [42]

1.6.4.3 CARBUROS

Los carburos se clasifican en:

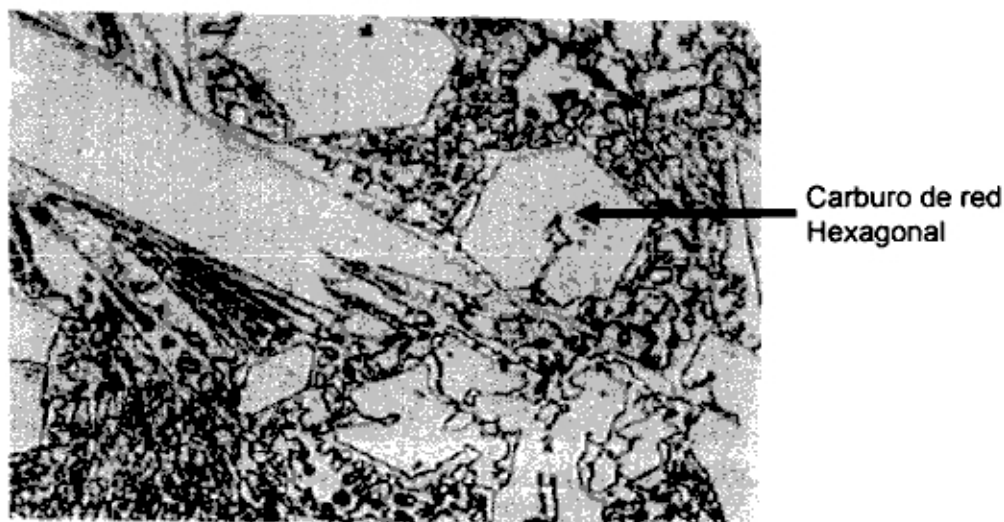
- Carburo de red o hexagonal.
- Carburo disperso o globular.

1.6.4.3.1 CARBUROS DE RED (HEXAGONAL EN MATRIZ AUSTENÍTICA)

Los carburos de red se forman por precipitación de una aleación de alto contenido de carbono (3 a 7% de carbono). Forman una red continua en el metal solidificado.

Este tipo de carburo es una microestructura extremadamente dura y frágil. Tienen poca resistencia al impacto y buena resistencia a la abrasión. En estos depósitos la fase de carburo rodea a la fase matriz, que generalmente es austenita. Los carburos de red sirven para aumentar la resistencia al desgaste por abrasión de bajo y alto esfuerzo.

Los depósitos de recubrimiento presentan alta dureza y baja ductilidad, por lo que son susceptibles de formación de fisuras.



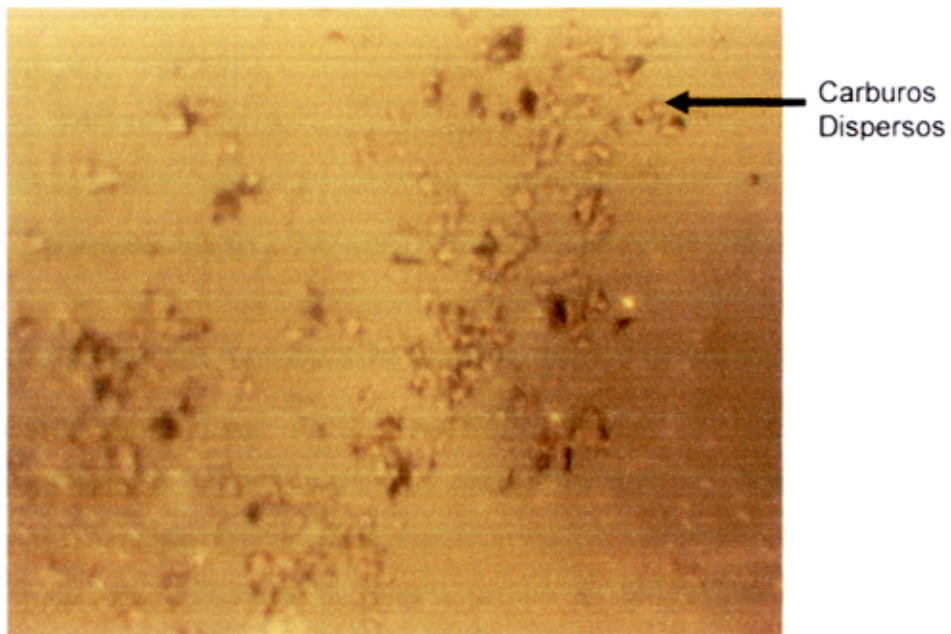
**MICROFOTOGRAFÍA Nº 3 DE CARBURO DE RED O MATRIZ AUSTENÍTICA
FUENTE.- MCKAY, 2004, [42]**

1.6.4.3.2 CARBUROS DISPERSOS

Los carburos dispersos están rodeados por el metal de liga. Un porcentaje relativamente alto de carburo disperso puede estar contenido en un depósito (% de carbono menor al 3% de C), antes que la resistencia y ductilidad del depósito alcancen los valores del carburo. La mayor dispersión del carburo en el depósito de soldadura refleja las propiedades del metal de liga o matriz.

Son las propiedades de la matriz las que controlan el empleo de carburo disperso.

-Los carburos dispersos mejoran todo tipo de desgaste; además presentan buena resistencia a la abrasión.



**MICROFOTOGRAFIA N° 4 DE CARBUROS DISPERSOS
FUENTE.- PROPIO DEL AUTOR**

TABLA N° 4

ALEACIONES DE RECUBRIMIENTO DE METAL DURO BASADAS EN HIERRO

COMPOSICIÓN QUÍMICA	DUREZA ROCKWELL C (HRC)	MICROESTRUCTURA – CARBUROS
0,2C; 1,5 Mn; 0,7% Cr	28	Ferrita – Bainita
0,3%C; 5%Cr-1% W	50	Martensita-austenita
1,0%C-14%Mn-4%Cr-3,5% Ni	20 (Soldada) 35 (Endurecido)	Austenita retenida Austenita
3%C – 25%Cr	47	Austenita/Carburo de cromo
5%C – 25%Cr	47	Austenita/Carburo de cromo
2%C – 7%Cr – 6% Ti	53	Martensita/Carburo de Titanio
6%C – 28%Cr	59	Austenita/Carburo de Cromo
6%C- 19% Cr – 5% Mo- 5% Cb – 2%W – 2%V	60	Austenita/Carburo de cromo/Carburos de Cb, W, V complejos

FUENTE.- BENTZ ZAHNER-STOODY COMPANY [24]

1.6.5 DIAGRAMA FASE DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO

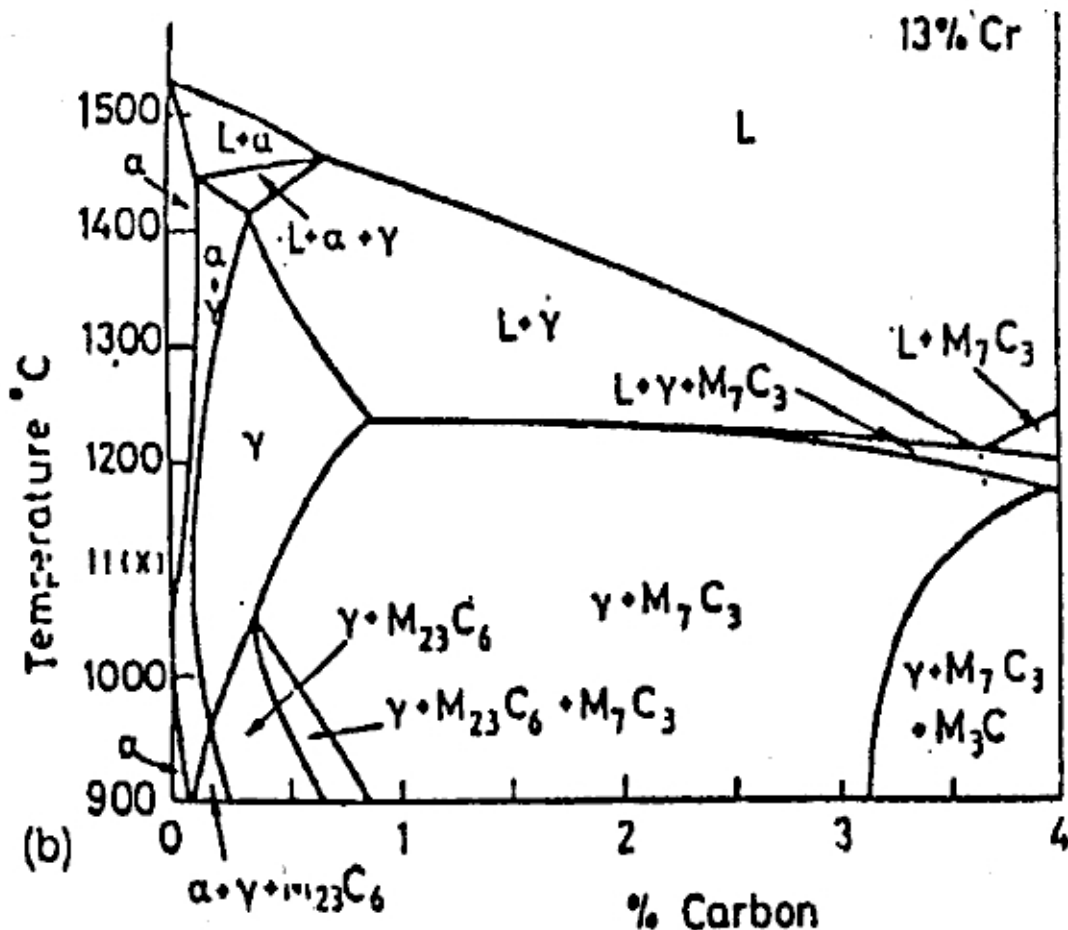
En los diagramas de fase: Fe-C, Fe – Fe₃C, Fe-Cr, Fe-W, al agregar mayor cantidad de carbono a la aleación, se excede la solubilidad del carbono y se presenta un exceso de carbono, los átomos de carbono se unen con los átomos metálicos, tales como: hierro, cromo y forman carburos metálicos. Ciertos elementos tienen un afinidad mayor con el carbono que otros y preferencialmente se juntan con el carbono para formar carburos: el tantalio, titanio, columbio, circonio, vanadio, tungsteno, cromo y hierro son elementos que forman carburos, enumerados en orden descendente de su tendencia a la formación de carburos. El tungsteno tiene una afinidad relativamente alta con el carbono y que teóricamente debería formar fácilmente carburos de tungsteno.

En el acero, la solubilidad de carburo de tungsteno en hierro es tan alta, que raramente se forman carburos puros de tungsteno en aleaciones de hierro depositados por soldadura.

Para evaluar las temperaturas de tratamiento térmico y de soldadura más convenientes de las microestructuras presentes en las aleaciones, es importante emplear el diagrama Fe-Cr. En estos diagramas se ven los constituyentes microscópicos correspondientes a aleaciones Hierro-Carbono-Cromo.

A diferentes temperaturas, los constituyentes: Ferrita (alfa), austenita (Gamma), que aparecen en aceros al carbono: C_1 , C_2 y C_5 , cuya fórmula $(CrFe)_4C$, $(CrFe)_7C_3$ y el $(CrFe)_3C$. (Ver diagramas N°s 1,2 y 3).

DIAGRAMA N° 1 DE CARBURO DE CROMO



FUENTE.- METALS HANDBOOK Vol. IV [3]

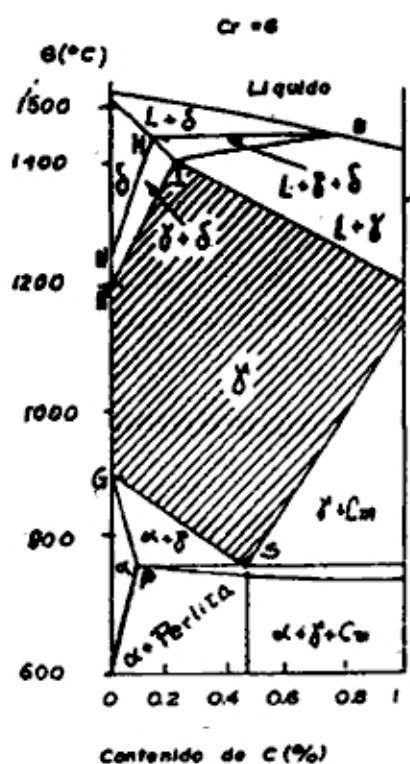
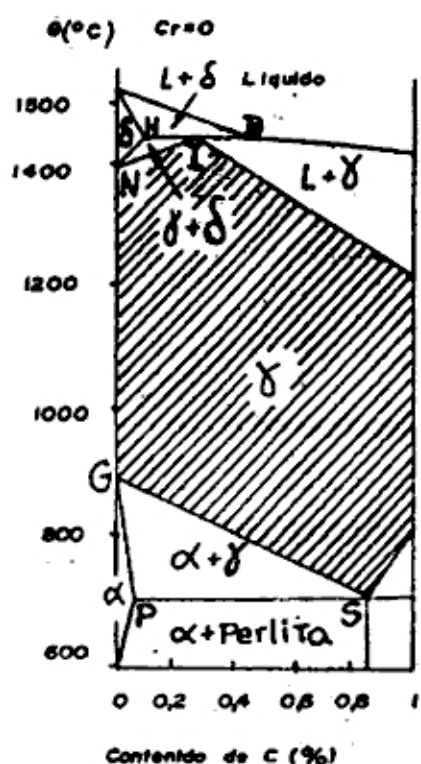
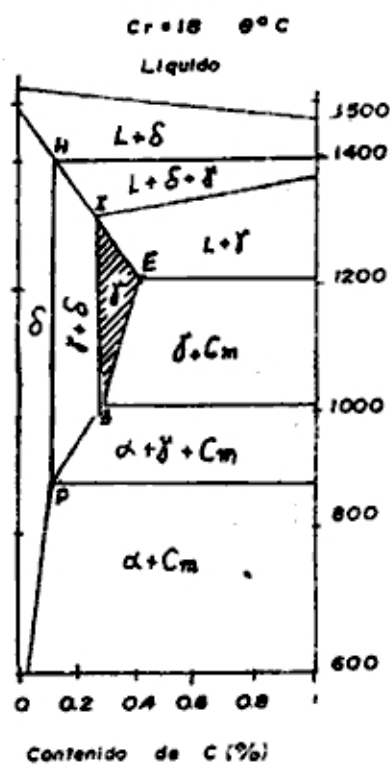
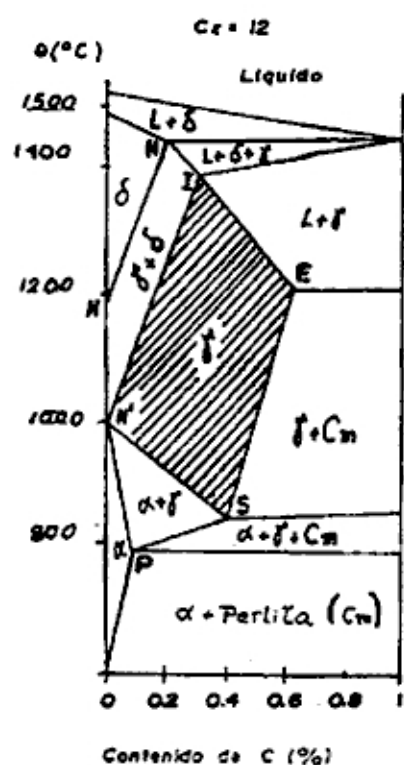
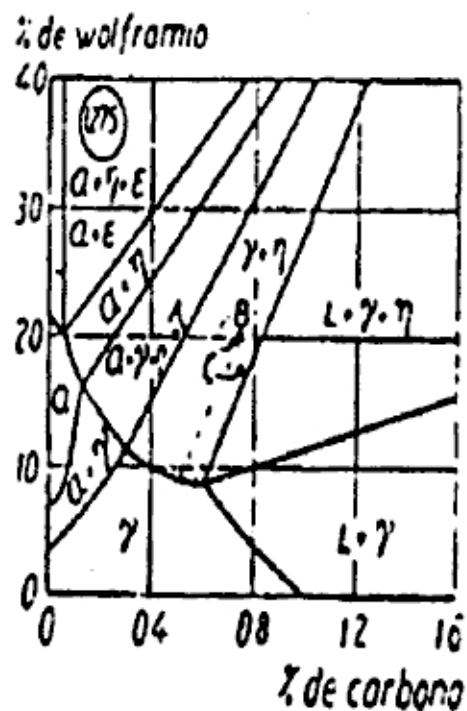
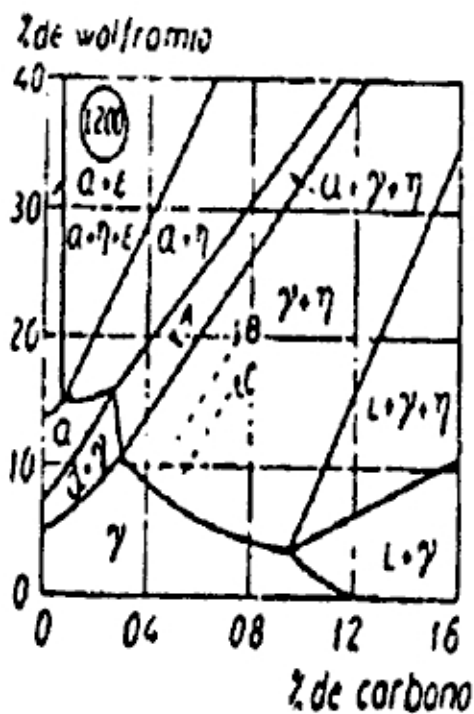
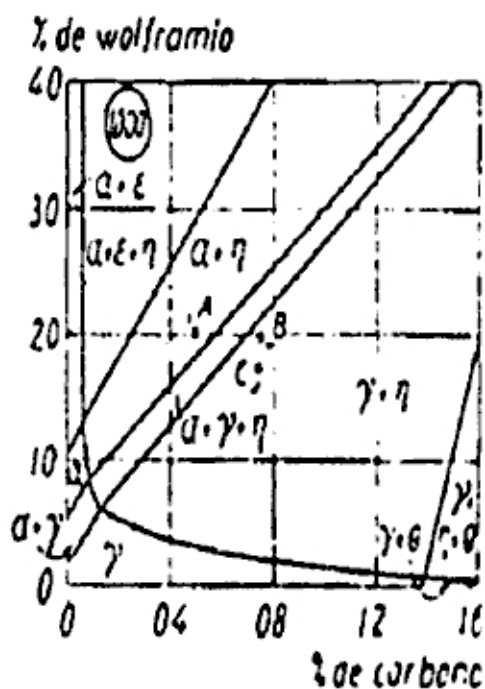
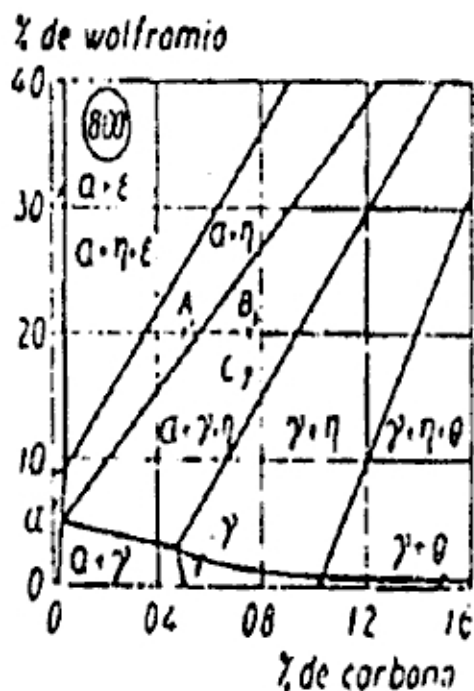


DIAGRAMA N° 2
DIAGRAMAS DE FASE DE FORMACIÓN DE CARBUROS DE CROMO



FUENTE.- METALS HANDBOOK VOL. V [3]

DIAGRAMA N° 3
DIAGRAMAS DE FASE DE CARBURO DE TUNGSTENO



FUENTE.- METALS HANDBOOK VOL. IV [3]

1.6.6 DILUCIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES Y CARBUROS EN RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Dilución es la proporción en la que el metal base, o de soldadura previamente depositada, participa, a través de su propia fusión, en la composición química de la zona fundida.

La dilución se expresa como el porcentaje de metal base fundido e incorporado a la soldadura que se combina con el material de aporte en el depósito de soldadura.

Conocido el % de dilución, se puede determinar la composición química del metal depositado con la fórmula:

$$\% \text{ Dilución} = \frac{B}{A - B} \times 100\%$$

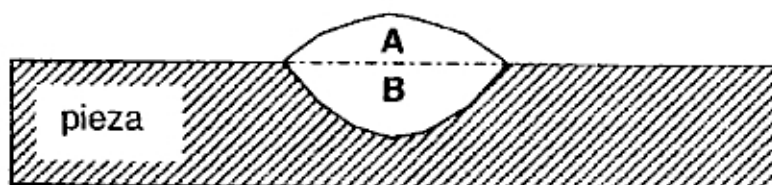


FIGURA Nº 3 : EFECTO DE LA DILUCIÓN DEL METAL DE APORTE

Fuente: AWS – WELDING HANDBOOK-2000, [4]

1.6.6.1 VARIABLES DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO EN LA DIFUSIÓN DE CARBONO Y DILUCIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES

La mayor cantidad de recubrimientos con carburos metálicos se realiza con el proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW).

Las variables que afectan la dilución de elementos aleantes y carburos son:

- Amperaje.
- Polaridad.
- Diámetro del electrodo.
- Longitud del electrodo.
- Espaciado de los cordones.
- Oscilación del electrodo.
- Velocidad de avance.
- Posición de soldadura e inclinación del electrodo.

Fuente: AWS – WELDING HANDBOOK-2000, [8]

1.6.6.1.1 AMPERAJE

El aumento del amperaje incrementa la dilución; el arco eléctrico (SMAW) aporta mayor cantidad de calor, y presenta mayor penetración y fusión del metal base.

1.6.6.1.2 POLARIDAD

La polaridad directa. Electrodo al negativo (DCEN), presenta menor penetración y menor dilución. En comparación con la polaridad invertida electrodo al positivo (DCEP). La corriente alterna presenta una dilución intermedia.

1.6.6.1.3 DIÁMETRO DEL ELECTRODO

A menor diámetro de electrodo y empleando amperajes medios, presenta menor dilución; a mayor diámetro de electrodo y empleando amperajes altos, presenta mayor dilución.

1.6.6.1.4 LONGITUD DEL ELECTRODO

Una longitud mayor de electrodo disminuye la dilución, mediante el aumento de la fusión del electrodo y difusión de la energía del arco eléctrico.

Una longitud pequeña de electrodo aumenta la dilución dentro de ciertos límites.

1.6.6.1.5 ESPACIADO DE CORDONES DE SOLDADURA

El espaciado de los cordones de soldadura más el solapamiento reduce la dilución de los cordones previamente depositados; al añadir al charco de soldadura, se funde menor cantidad de metal.

1.6.6.1.6 OSCILACIÓN DEL ELECTRODO

A mayor oscilación del cordón de soldadura, se reduce la dilución; el cordón recto sin oscilación presenta la máxima dilución.

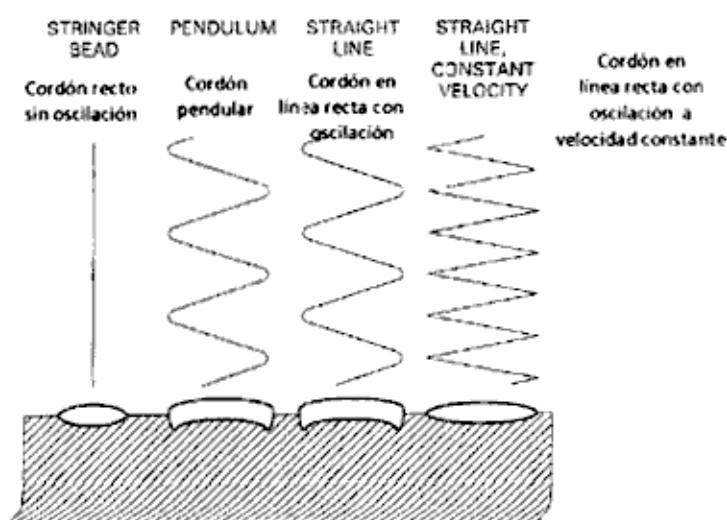


Figura N° 4: Oscilaciones y Penetración de Cordones de Soldadura y efectos de dilución

Fuente: AWS – WELDING HANDBOOK-2000, [8]

1.6.6.1.7 VELOCIDAD DE AVANCE

Una disminución de la velocidad de avance disminuye la cantidad de metal fundido y aumenta la cantidad de superficie depositada por unidad de tiempo y por lo que disminuye la dilución.

1.6.6.1.8 POSICIÓN DE SOLDADURA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN

La posición de soldadura en la superficie del metal base influye en la dilución obtenida, dependiendo de la posición de soldadura y la inclinación del electrodo. La gravedad hará que el charco de soldadura permanezca delante del cordón de soldadura.

- La posición vertical ascendente presenta mayor dilución.
- La posición plana presenta menor dilución.

TABLA N° 5 % DE DILUCIÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA

Proceso de Soldadura	% Dilución	Observaciones
Electro escoria (ERW)	100%	El metal base contribuye totalmente con la zona fundida.
Haz de electrones	100%	Excepto si se emplea hilo de aporte.
Láser	100%	Excepto si se emplea hilo de aporte.
Arco eléctrico manual (SMAW)	20 – 30% 30 – 40% 10 – 20%	En general; Pase de raíz; Operaciones de recubrimiento
Arco sumergido (SAW)	25 – 50% 10 – 15%	En general, En operaciones de recubrimiento
MIG / MAG (GMAW)	25 – 50% 15 – 30%	Arco en Spray; Arco en cortocircuito.
TIG (GTAW)	20 – 50% 100%	En general; Sin material de aporte.

FUENTE.- CATÁLOGO DE ELECTRODOS INDURA-1997, [36]

1.6.7 DIFUSIÓN DE CARBONO EN RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Difusión es el movimiento de átomos en un material. Los átomos se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración para producir una composición homogénea y uniforme.

En recubrimientos protectores existe difusión de elementos aleantes (dilución) y difusión de carbono. (Fuente: SMITH W.)- [59]

La difusión se rige por dos leyes

- 1ª Ley de Fick
- 2ª Ley de Fick

En soldadura se aplica la 2da Ley de Fick.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Donde:

D = coeficiente de difusión

C = Concentración (%)

t = Tiempo (seg)

X = Distancia de difusión

Para difusión de carburo se emplea la fórmula:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{Erf} \left(\frac{X}{2 \sqrt{Dt}} \right)$$

Donde:

Cs = Concentración de carbono en la superficie.

Cx = Concentración de carbono a determinar.

Co = Concentración de carbono en el acero.

Erf = Función error.

D = Coeficiente de difusión.

X = Distancia a cementar.

t = Tiempo.

1.6.8 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES (APORTE TÉRMICO DE CALOR)

El aporte térmico durante el proceso de soldadura es el calor aportado para realizar la soldadura. El aporte térmico depende de tres aspectos:

- La tensión e intensidad de soldadura (amperaje, voltaje).
- La velocidad de soldadura (v).
- El rendimiento térmico.

El aporte térmico se calcula con la fórmula:

$$H_m (\text{Joules / mm}) = \frac{V \times I}{v} \times f$$

Donde:

V = Tensión (voltaje)

I = Intensidad (Amp.)

v = Velocidad de soldadura

f = Eficiencia

TABLA N° 6 EFICIENCIA TERMICA EN PROCESOS DE SOLDADURA

PROCESO DE SOLDADURA	EFICIENCIA (f)
Oxiacetilénico	35%
TIG (GTAW)	20 – 50%
MIG – MAG (GMAW)	70 – 85%
Arco Eléctrico Manual (SMAW)	70 – 80%
Arco Abierto (FCAW)	65 – 85%
Arco Sumergido (SAW)	90 – 99%

FUENTE.- Introducción a la Metalurgia de Soldadura, de CARLOS FOSCA.- [32]

1.6.9 PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

1.6.9.1 PRECALENTAMIENTO

Los objetivos del precalentamiento son:

- Reducir la velocidad de enfriamiento de las piezas.
- Disminuir las pérdidas de calor en materiales de alta conductividad de calor (Cu, Al).

Existen varios métodos para determinar la temperatura de precalentamiento:

FUENTE: Introducción a la Metalurgia de Soldadura, de CARLOS FOSCA.- [32]

Método AWS – D1.1, 2008

$$C_E = \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Método Seferian

$$T_p = 350 \sqrt{C_T - 0,25}$$

$$C_t = C_q + C_e$$

$$C_t = C_q (1 + 0,005e)$$

$$C_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

Donde:

T_p = Temperatura de precalentamiento

C_q = Equivalente químico de carbono

C_t = Equivalente total de carbono

e = Espesor del material (mm)

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO POR ARCO ELÉCTRICO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

2.1 SELECCIÓN DE MATERIALES Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

2.1.1 SELECCIÓN DE METAL BASE PARA LOS ENSAYOS

Se emplea como metal base para ensayos de soldabilidad de recubrimientos superficiales. El acero ASTM A36 de acuerdo con la Norma ASTM G65 de ensayo de abrasión en seco.

2.1.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36

% C	% Mn	%Si	Otros
0,27 - 0,29	1,2	0,4	0,20 Cu (Min)

FUENTE.- Smith W.- 1999 [59]

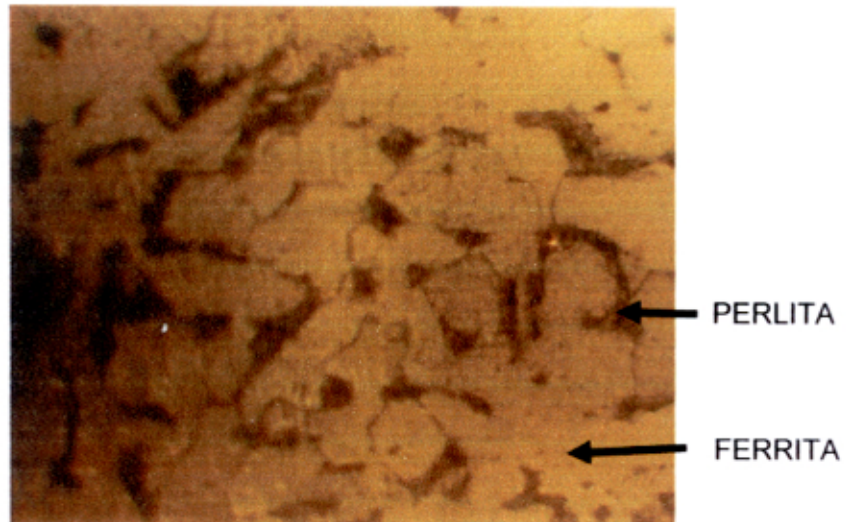
2.1.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36

Resistencia a la Tracción (Psi x 10 ³ (MPa))	Límite Elástico (Psi x 10 ³ (MPa))	Ductilidad (Elongación) % en 2"	Dureza (HRC)
58 (400)	32 (220)	23	17

FUENTE.- Smith W.- 1999 [59]

2.1.1.3 MICROESTRUCTURA DEL ACERO ASTM A36

Por su composición química, el acero ASTM A36 presenta una microestructura de ferrita y perlita.



MICROFOTOGRAFÍA N° 5 (Metal Base)
100X (REACTIVO NITAL – 5) FERRITA Y PERLITA
FUENTE: PROPIO DEL AUTOR

2.1.2 SELECCIÓN DE MATERIALES DE APORTE

Para recubrimientos por soldadura, se seleccionó los electrodos:

TABLA N° 7

NORMA DIN	EXSA – OERLIKON
- DIN E – 6 – 60 (64W) C	CITODUR 600
- DIN E – 10 – 65 CZ	CITODUR 1000
- DIN E – 4 – 60 (65 W) St	TOOLCORD EXADUR 43

FUENTE.- CATÁLOGO DE ELECTRODOS EXSA OERLIKON-2000,[45]

2.1.2.1 ELECTRODO DIN E6 – 60 (64w) (CITODUR 600)

- **Composición química del metal depositado**

C%	Mn%	Si%	Cr%	Mo	V
0,5	0,3	0,4	7,0	0,5	0,5

- **Propiedades mecánicas**

	Dureza
ROCWELL C	52 - 58
VICKERS	610 – 700

- **Microestructura:** Carburos de Cromo distribuidos uniformemente.

2.1.2.2. ELECTRODO DIN E 10 – 65cz (CITODUR 1000)

- **Composición química del metal depositado**

C%	Mn%	Si%	Cr%
4,0	1,1	0,6	36

- **Propiedades mecánicas**

	Dureza
ROCWELL C	57 – 62
VICKERS	700 - 800

- **Microestructura:** Carburo de Cromo

2.1.2.3 ELECTRODO DIN E 4 – 60 (65 w) st (TOOLCORD)

- **Composición química**

C%	Mn	Si	Cr	Mo	V	W
0,9	0,5	0,5	4,2	4,48	0,9	1,1

- **Propiedades mecánicas**

<u>Dureza</u>	Al depositar	Autoendurecido
ROCWELL C	50 - 65	64 - 66
VICKERS	552 - 840	815 - 870

- **Microestructura:** Acero rápido (carburo de Tungsteno)

2.1.2.4 ELECTRODO EXADUR 43

- **Composición química**

<u>C%</u>	<u>Cr</u>	<u>Nb</u>	<u>Mn</u>
5,5	22,0	8,0	1,1

- **Propiedades mecánicas**

Dureza

ROCWELL C	63 (2 ^{da} Capa)
-----------	---------------------------

- **Microestructura:** Austenita con carburos de Nb y Cr.

2.1.3 SELECCIÓN DE MATERIALES DE APORTE COMO COJÍN AMORTIGUADOR

Se emplea como cojín amortiguador los siguientes electrodos:

- Electrodo AWS E – 7018 (Electrodo básico).
- Electrodo de acero inoxidable AWS E – 308 - 15
- Electrodo AWS E 9016 - B3 (Electrodo básico).

2.1.3.1 ELECTRODO AWS E – 7018

- **Composición química**

<u>C%</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>
0,08	1,25	0,50

- **Propiedades mecánicas**

<u>Resistencia a la tracción</u>	<u>Límite Elástico</u>	<u>Resistencia al Impacto</u>
510-610 N/mm ²	380 N/mm ²	140 J
74000 – 80000 Lb/pulg ²		

- **Microestructura:** Ferrita y Perlita

2.1.3.2 ELECTRODO AWS E 9016 – B3

- **Composición química**

<u>C%</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>
0,06	0,90	0,50	2,25	1,00

- **Propiedades mecánicas**

<u>Resistencia a la tracción</u>	<u>Límite Elástico</u>	<u>Resistencia al Impacto</u>
620 N/mm ²	482 N/mm ²	120 J
90 000 Lb/pulg ²	70000 Lb/Pulg ²	

- **Microestructura:** Ferrita y Perlita - Bainita

2.1.3.3 ELECTRODO DE ACERO INOXIDABLE AWS E-308-15

- **Composición química**

<u>C%</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>Ni</u>
0,06	0,8	0,7	19,0	10,0

- **Propiedades mecánica**

<u>Resistencia a la tracción</u>	<u>Límite Elástico</u>	<u>Resistencia al Impacto a 20°C</u>
550-650 N/mm ²	> 340 N/mm ²	> 50 . J.
94000 Lb/pulg ²	> 50000 Lb/Pulg ²	

- **Microestructura:** Austenita


2.2 ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

2.2.1 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA EN FORMULARIO (WPS) DE ELECTRODO CITODUR 600

CUADRO Nº 7 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Nombre de la compañía: EXSA-OERLIKON Proceso de soldadura: SMAW	Identificación # : PROBETA Nº 1 Revisión: Fecha: 25/01/05 Por: Ing. Pablo Mamani C. Tipo - Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Mecanizada L Automática <input type="checkbox"/>
DISEÑO DE LA JUNTA UTILIZADA Tipo: Simple: Doble: Respaldo: Si: No: <input checked="" type="checkbox"/> Material de respaldo: Abertura de raíz: Dimensión de la cara de raíz: Ángulo de bisel: Radio(J-U) Limpieza de respaldo: Si: No: Método Recubrimiento: <input checked="" type="checkbox"/>	POSICIÓN: PLANA (1G) Posición de la ranura: Filete: <input type="checkbox"/> Progresión vertical: Arriba: <input type="checkbox"/> Abajo: <input type="checkbox"/> Recubrimiento: <input checked="" type="checkbox"/>
METALES BASE Especificación del material: ACERO ESTRUCTURAL Tipo o grado: ASTM A 36 Espesor: ½" Diámetro (tubería)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito: L Globular: <input type="checkbox"/> Spray: <input type="checkbox"/> Corriente: AC L DCEP: <input checked="" type="checkbox"/> DCEN: Pulsada: L Otra
METALES DE APORTE Especificación AWS : DIN E6-60(64W) Clasificación AWS : (CITODUR 600)	TÉCNICA Cordón recto u oscilatorio: <input checked="" type="checkbox"/> Multipase o un solo pase : <input checked="" type="checkbox"/> Número de electrodos Orientación del Electrodo Longitudinal: <input checked="" type="checkbox"/> Lateral Angulo Distancia del tubo de contacto a la pieza Martilleo Limpieza interpasos: Mecánico (Piqueta) y escobilla de acero
PROTECCIÓN Flux Gas Composición Electrodo-Flux (Clase) Ratio de flujo Tamaño del gas cup.	TRATAMIENTO POSTSOLDADURA Temperatura Tiempo
PRECALENTAMIENTO Precaent. Temp. Min Interpase Temp., Min Max	

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

# de pase o capa	Proceso	Aporte		Corrientes		Voltaje	Velocidad de avance	Detalles de la junta
		Clase	Diam.	Tipo & Polaridad	Amperaje o velocidad de alimentación			
1	SMAW	Recubrimiento	1/8"	(+) Invertida	130	30V	200mm/min	CITODUR 600  ASTM A36


FUENTE.- NORMA AWS D.1.1 - 2007, [9]

2.2.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA EN FORMULARIO WPS DE ELECTRODO CITODUR 1000

CUADRO Nº 8 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Nombre de la compañía: EXSA-OERLIKON Proceso de soldadura: ARCO ELECTRICO MANUAL - SMAW	Identificación #: PROBETA Nº 4 Revisión: Fecha: 25/01/05 Por: Ing. Pablo Mamani C. Tipo - Manual <input checked="" type="checkbox"/> Mecanizada <input type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/>
DISEÑO DE LA JUNTA UTILIZADA Tipo: Simple: Doble: Respaldo: Si: No: <input checked="" type="checkbox"/> Material de respaldo: Abertura de raíz: Dimensión de la cara de raíz: Ángulo de bisel: Radio(J-U) Limpieza de respaldo: Si: No: L Método Recubrimiento: <input checked="" type="checkbox"/>	POSICIÓN: PLANA (1G) Posición de la ranura: Filete: Progresión vertical: Arriba L Abajo: L Recubrimiento: <input checked="" type="checkbox"/>
METALES BASE Especificación del material: ACERO ESTRUCTURAL Tipo o grado: ASTM A 36 Espesor: ½" Diámetro (tubería)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito: L Globular: L Spray: L Corriente: AC L DCEP: <input checked="" type="checkbox"/> DCEN: Pulsada: L Otra
METALES DE APORTE Especificación AWS : DIN E-10-65 cz Citodur 1000 Clasificación AWS : Recubrimiento duro Cojin amortiguador : E 7018	TÉCNICA Cordón recto u oscilatorio: <input checked="" type="checkbox"/> Multipase o un solo pase : <input checked="" type="checkbox"/> Número de electrodos Orientación del Electrodo Longitudinal: <input checked="" type="checkbox"/> Lateral Angulo Distancia del tubo de contacto a la pieza Martilleo Limpieza internases: Mecánico (Piqueta) y escobilla de acero
PROTECCIÓN Flux Gas Composición Electrodo-Flux (Clase) Ratio de flujo Tamaño del gas cup.	TRATAMIENTO POSTSOLDADURA Temperatura Tiempo
PRECALENTAMIENTO Prealent. Temp. Min Interpase Temp., Min Max	

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

# de pase o capa	Proceso	Aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de avance	Detalles de la junta
		Clase	Diam.	Tipo & Polaridad	Amperaje o velocidad de alimentación			
2	SMAW	Recubrimiento	3/16"	(+) Invertida	150	40	220mm/min	CITODUR 1000  ASTM A36

FUENTE.- NORMA AWS D.1.1 2007, [9]

2.3 PREPARACIÓN DE PROBETAS

La probeta de ensayo de abrasión para soldadura por recubrimiento duro Norma ASTM G-65 es de forma rectangular de las siguientes dimensiones:

- Espesor (e) = $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm)
- Ancho (a) = 1" (25,4 mm)
- Largo (L) = 2" $\frac{1}{2}$ (63,4 mm).

De acero estructural ASTM A 36.

Sobre la probeta se deposita 1, 2, 3 cordones de soldadura con electrodo de recubrimiento duro, mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW).

Las probetas se prepararon con la siguiente numeración:

PROBETA N° 0

Probeta estándar de Acero SAE 1090

PROBETA N° 1, 2, 3

Electrodo DIN E-6 -60 (64w)c (Citodur 600)

PROBETA N° 4, 5, 6

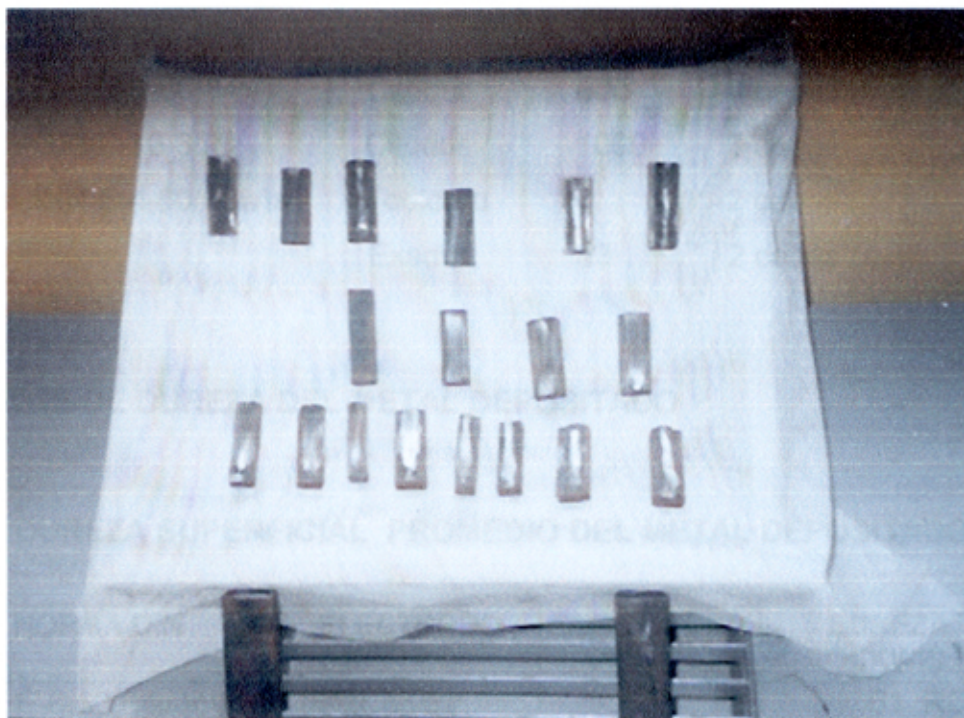
Electrodo DIN E-10-65 cz (Citodur 1000)

PROBETA N° 7, 8, 9

Electrodo DIN E-4-60 (65w) st (Toolcord)

PROBETA N° 10, 11, 12

Electrodo Exadur 43



FOTOGRAFÍA N° 1
PROBETAS PARA ENSAYO DE ABRASIÓN

2.3.1 SELECCIÓN DEL AMPERAJE ADECUADO

Se empleó máquina de soldar multiproceso de corriente continua RH-400-S – MARCA HOBART (SOLDANDINAS), DE 400 AMPERIOS

- **Electrodo de 3,2 mm de diámetro:**
130 AMP
- **Electrodo de 5 mm de diámetro:**
150 AMP

2.3.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS A DEPOSITAR

Se realizó la selección de número de capas a depositar del catálogo del fabricante.

- DIN E-6-60(64w)c	Citodur	600	3 capas
- DIN E-10-65cz	Citodur	1000	3 capas
- DIN E-4-60(65w)st	Toolcord		2 capas
-	Exadur	43	2 capas

2.4 ENSAYOS DE DUREZA DEL METAL DEPOSITADO

2.4.1 DUREZA SUPERFICIAL PROMEDIO DEL METAL DEPOSITADO

NORMA DIN	ELECTRODO	DUREZA (HV) VICKERS	DUREZA ROCKWELL
- DIN E-6-60(64w)c	Citodur	600	61 RC
- DIN E-10-65CZ	Citodur	1000	62 RC
- DIN E-4-60(65W)ST	Toolcord		65,5 RC
	Exadur	43	70 RC

Fuente: Catálogo de productos especiales EXSA-OERLIKON-2000 [45]

2.4.2 DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS

ELECTRODO NORMA DIN E-6-60(64w) CITODUR 600	Nº DE CAPAS	DUREZA HRC
	Interfase	25
1	59	
2	58	
3	59.5	

ELECTRODO NORMA DIN E-10-65cz CITODUR 1000	Nº DE CAPAS	DUREZA HRC
	Interfase	25,5
1	65.5	
2	66,5	
3	67	

ELECTRODO NORMA DIN E-4-60(65w)st TOOLCORD	Nº DE CAPAS	DUREZA HRC
	Interfase	26
1	66.5	
2	67	
3	68	

ELECTRODO EXADUR 43	Nº DE CAPAS	DUREZA HRC
	Interfase	27
1	63	
2	71.5	
3	69.5	

2.4.3 DUREZA SUPERFICIAL DEL METAL DEPOSITADO EN LAS PROBETAS

ELECTRODO DIN E-60-60(64w)c CITODUR 600

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL "HRC"
1	61
2	64
3	59

ELECTRODO DIN E-10-65(cz) CITODUR 1000

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL "HRC"
4	61.0
5	62.0
6	62.5

ELECTRODO DIN E-4-60(65w) st TOOLCORD

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL "HRC"
7	65.5
8	64.5
9	66.5 (Templado en agua)

ELECTRODO EXADUR 43

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL "HRC"
10	71
11	72
12	70

2.5 DETERMINACIÓN DE LA MICROESTRUCTURAS

Se realizó el análisis metalográfico con el microscopio metalográfico METAVAL de 1500X (aumentos). Empleando para el ataque químico reactivos de acuerdo al tipo de carburo. El análisis metalográfico se ejecutó en la capa superficial, y en las diferentes capas depositadas por soldadura; la interfase del metal base y el recubrimiento por soldadura.

2.5.1 MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS

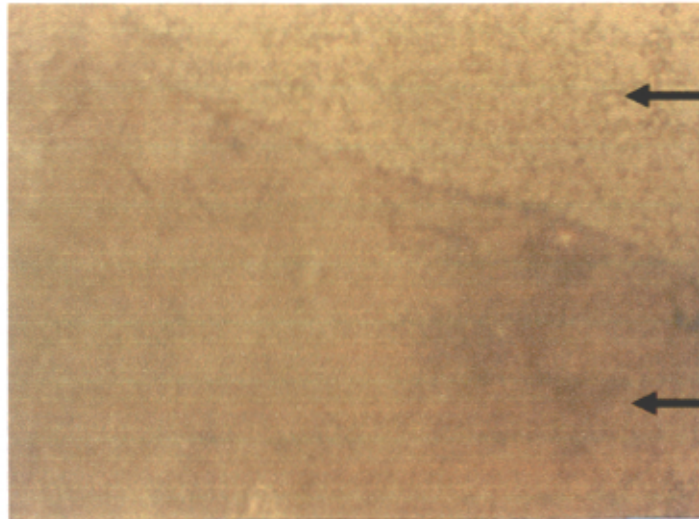
Electrodo DIN E6-60 (64w)

Citodur 600

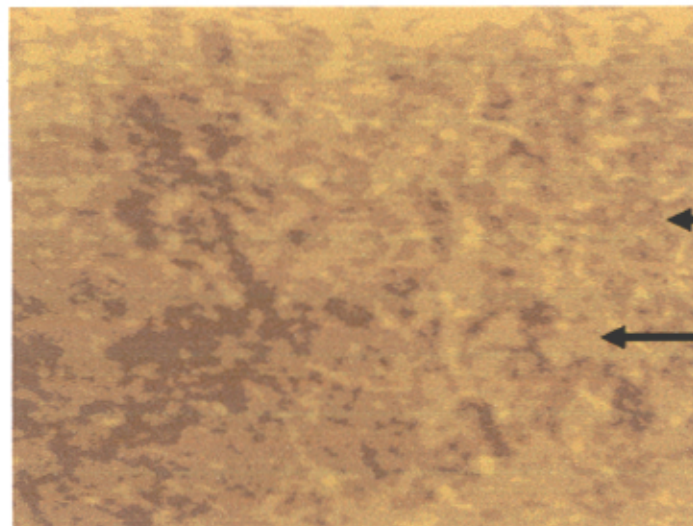
Nº de capa	Microestructura
Interfase	Ferrita-Perlita-, Carburo de Cromo (microf. Nº 6)
1	Ferrita y Carburo de Cromo (microfotografía. Nº 7)
2	Carburo de Cromo de matriz austenítica (microf. Nº 8)
3	Carburo de Cromo y Carburo de Hierro (microf. Nº 9)
Superficie	Carburo de Cromo y Carburo de Hierro (microf. Nº 10)

REACTIVO DE VILELA	
Acido Clorhídrico	5 ml
Acido Pírico	1 g
Alcohol Etilico 95%	100 ml

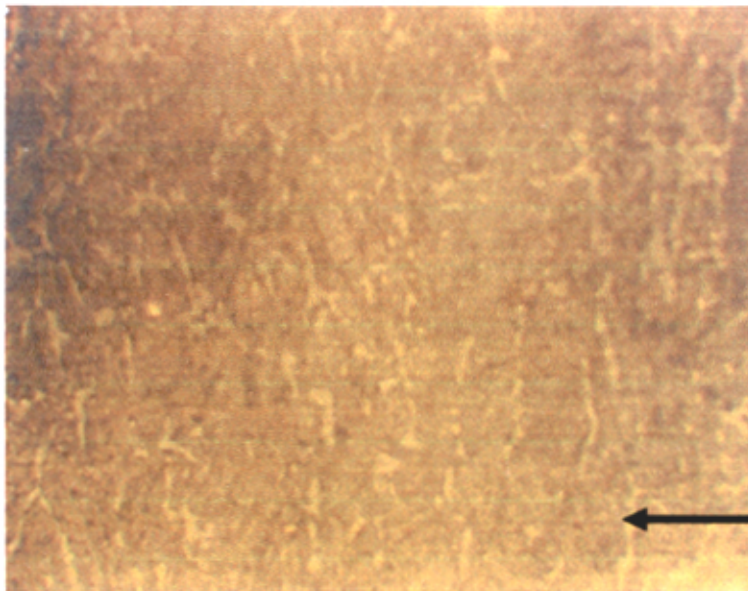
Fuente: Metal Handbook Vol. V, 1998 [3]



MICROFOTOGRAFÍA N° 6
500X (REACTIVO DE VILELA)
MICROESTRUCTURA FERRITA-PERLITA, CARBURO
DE CROMO (INTERFASE)

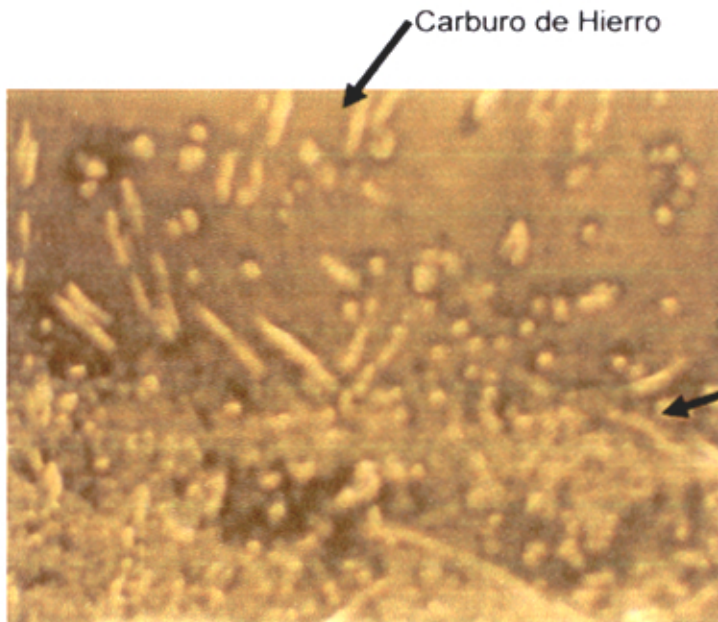


MICROFOTOGRAFÍA N° 7
200X (REACTIVO DE VILELA)
FERRITA Y CARBURO DE CROMO (CAPA 1)



Carburo de Cromo

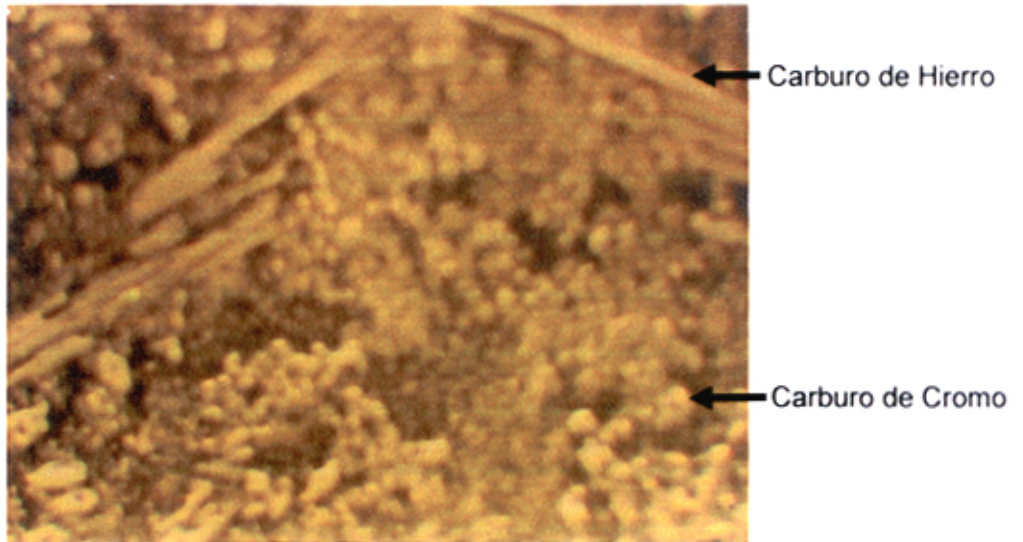
MICROFOTOGRAFÍA N° 8
200X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO EN MATRIZ AUSTENITICA (CAPA 2)



Carburo de Hierro

Carburo de Cromo

MICROFOTOGRAFÍA N° 9
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO Y CARBURO DE HIERRO (CAPA 3)



**MICROFOTOGRAFÍA N° 10
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO y CARBUROS DE HIERRO
(SUPERFICIE)**

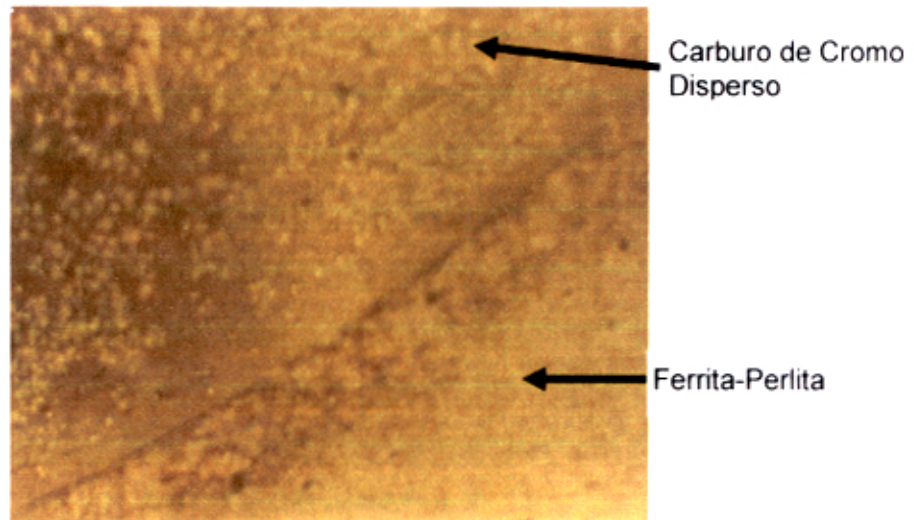
2.5.2 MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS

Electrodo DIN E-10-65 cz

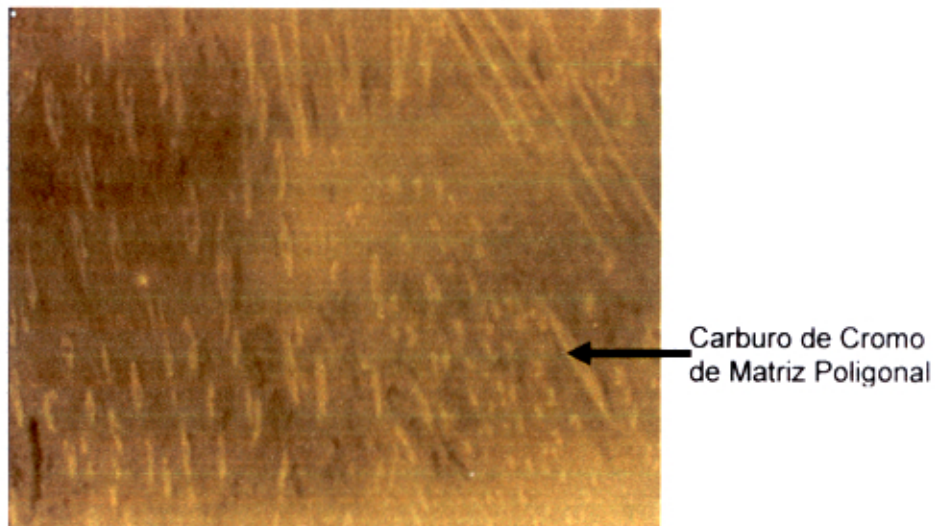
Citodur 1000

N° de capa	Microestructura
Interfase	Ferrita-Perlita, Carburo de Cromo disperso (Microfotografía. N° 11)
1	Carburo, de Cromo de matriz poligonal (Microfotografía N° 12)
2	Carburo de cromo (Microfotografía N° 13)
3	Interfase y Carburo de Cromo (Microfotografía N° 14)
Superficie	Carburo de Cromo de Matriz Eutéctica (Microfotografía N° 15)

REACTIVO DE ATAQUE: REACTIVO DE VILELA



MICROFOTOGRAFÍA N° 11
500X (REACTIVO DE VILELA)
FERRITA – PERLITA, CARBURO DE CROMO DISPERSO
(INTERFASE)

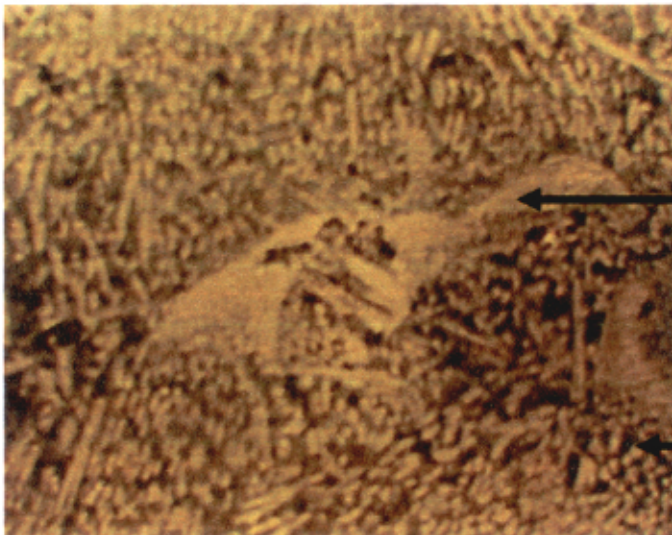


MICROFOTOGRAFÍA N° 12
200X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO DE MATRIZ POLIGONAL
(CAPA 1)



← Carburo de Cromo

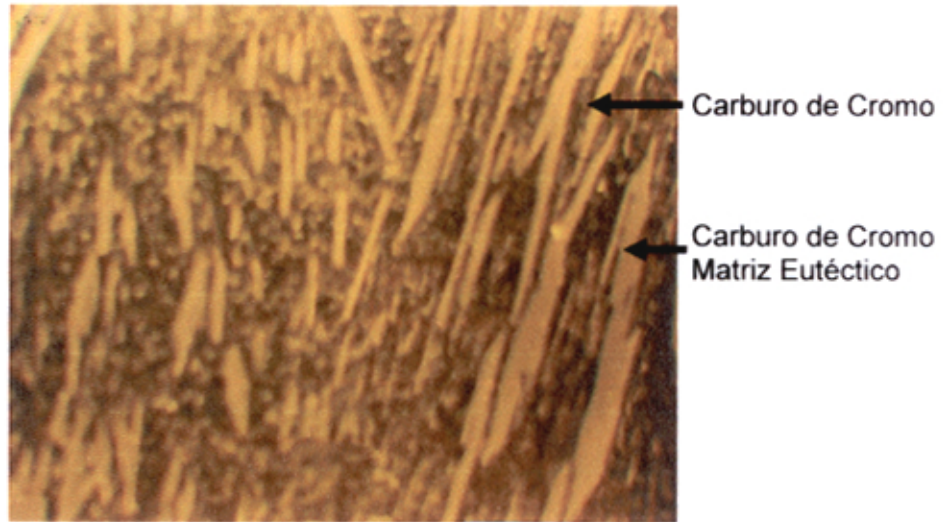
**MICROFOTOGRAFÍA N° 13
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO (CAPA 2)**



← Interfase

← Carburo de Cromo

**MICROFOTOGRAFÍA N° 14
500X (REACTIVO DE VILELA)
INTERFASE Y CARBURO DE CROMO
(CAPA 3)**



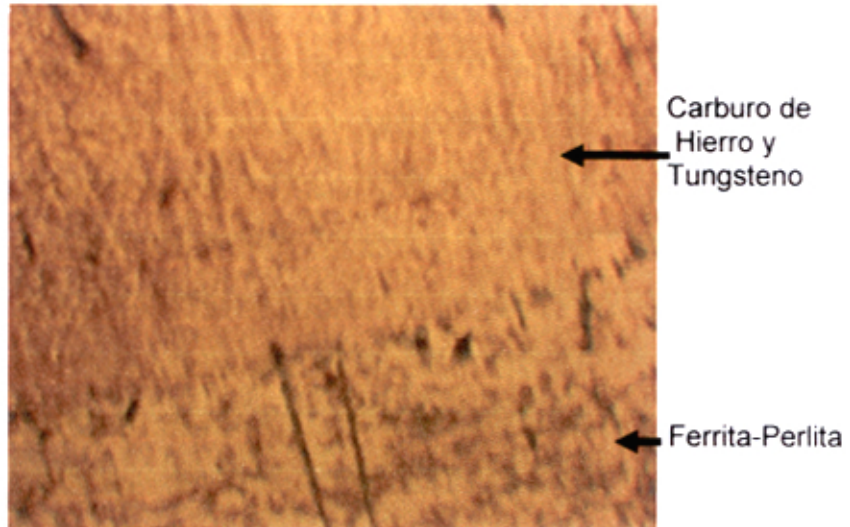
MICROFOTOGRAFÍA N° 15
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE CROMO DE MATRIZ EUTÉCTICA
(SUPERFICIE)

2.5.3 MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS

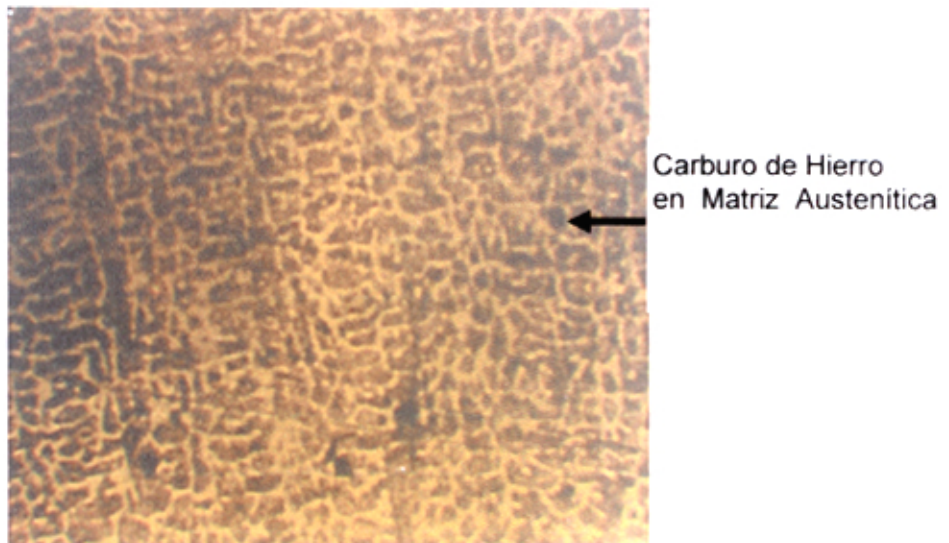
Electrodo DIN E4-60 (65 w) st-Toolcord

N° de capa	Microestructura
Interfase	Ferrita-Perlita, Carburo de Hierro y Tungsteno (Microfotografía N° 16)
1	Carburo de Hierro y Tungsteno en matriz austenítica (Microfotografía N° 17)
2	Carburo de Hierro en matriz austenítica (Microfotografía N° 18)
3	Martensita y Carburo de Tungsteno (Microf. N° 19)
Superficie	Martensita y Carburo de Tungsteno (Microf. N° 20)

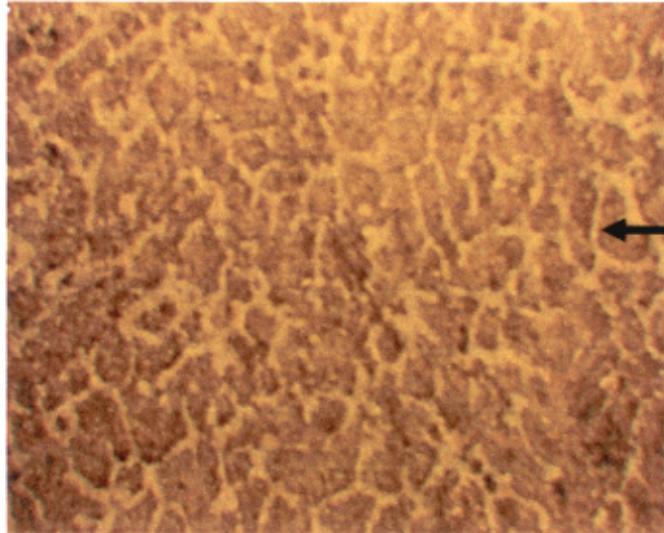
REACTIVO DE ATAQUE: REACTIVO DE VILELA



MICROFOTOGRAFÍA N° 16
500X (REACTIVO DE VILELA)
FERRITA-PERLITA, CARBURO DE HIERRO Y TUNGSTENO
(INTERFASE)



MICROFOTOGRAFÍA N° 17
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE HIERRO Y TUNGSTENO EN MATRIZ AUSTENÍTICA
(CAPA 1)



Carburo de Hierro
Matriz Austenítica

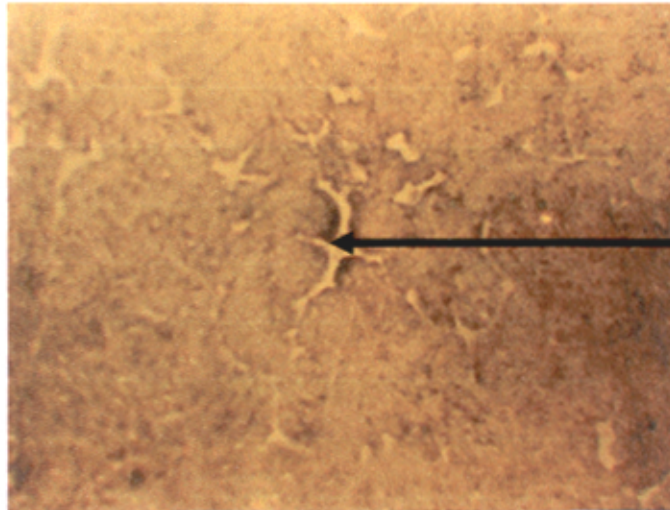
MICROFOTOGRAFÍA N° 18
500X (REACTIVO DE VILELA)
CARBURO DE HIERRO EN MATRIZ AUSTENÍTICA
(CAPA 2)



Martensita

Carburo de
Tungsteno

MICROFOTOGRAFÍA N° 19
200X (REACTIVO DE VILELA)
MARTENSITA Y CARBURO DE TUNGSTENO
(CAPA 3)



Carburo de Tungsteno

**MICROFOTOGRAFÍA N° 20
500X (REACTIVO DE VILELA)
MARTENSITA Y CARBURO DE TUNGSTENO
(SUPERFICIE)**

2.5.4 MICROESTRUCTURA DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CAPAS DEPOSITADAS

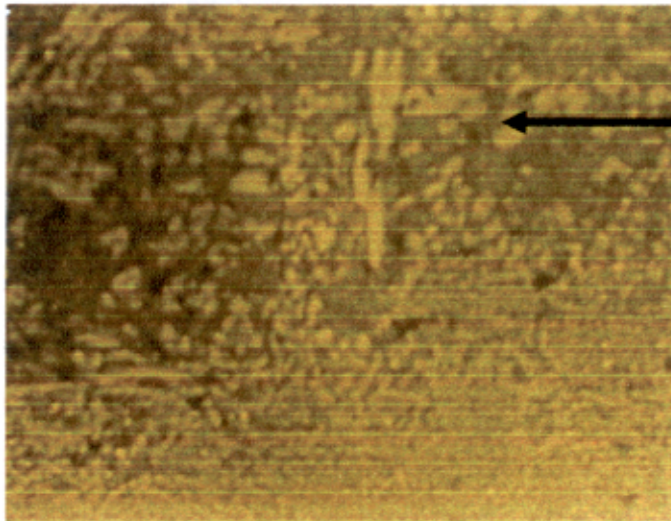
Electrodo - Exadur 43

N° de capa	Microestructura
1	Carburo de Cromo Poligonal (Microf. N° 21)
2	Carburo de Cromo (Microfotografía N° 22)
3	Carburo de Cromo Primario (Microfotografía N° 23)
Superficie	Carburo de Cromo Primario de Matriz Poligonal (Hexagonal) (Microfotografía N° 24)

REACTIVO DE MURAKAM'S

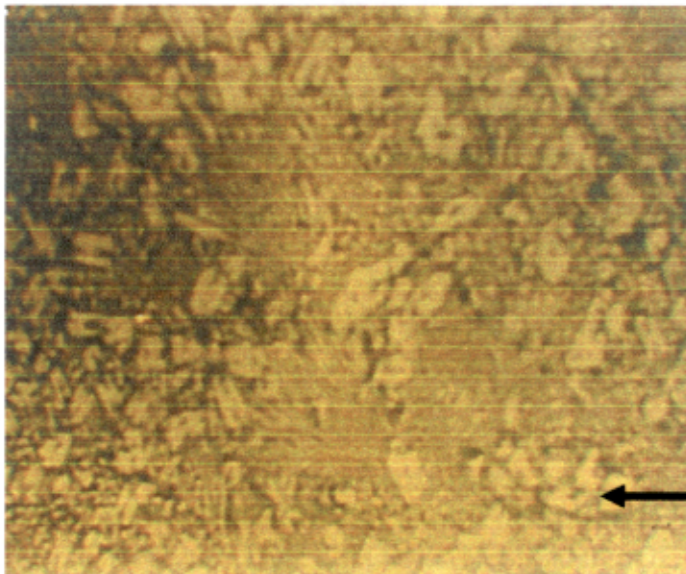
$K_3Fe(CN)_6$	10 gr.
NaOH	10 gr.
H ₂ O	100 ml

FUENTE: Metal Handbook VOL. V, [3]



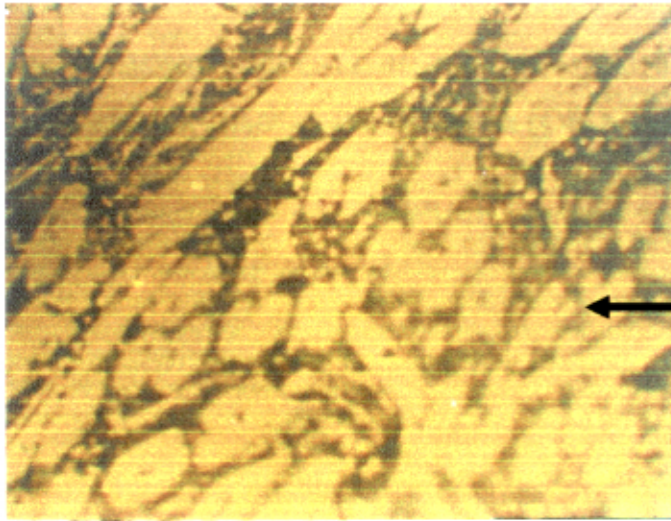
Carburo de Cromo Poligonal

MICROFOTOGRAFÍA N° 21
200X (REACTIVO DE MURAKAM'S)
CARBUROS DE CROMO POLIGONAL
(CAPA 1)



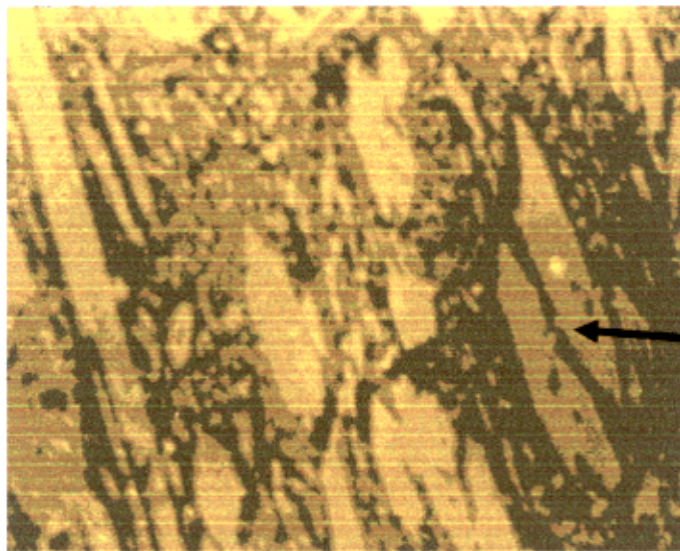
Carburo de Cromo Poligonal

MICROFOTOGRAFÍA N° 22
500X (REACTIVO DE MURAKAM'S)
CARBUROS DE CROMO POLIGONAL
(CAPA 2)



Carburo de
Cromo Primario

MICROFOTOGRAFÍA N° 23
500X (REACTIVO DE MURAKAM'S)
CARBURO DE CROMO PRIMARIO
(CAPA 3)



Carburo de
Cromo Primario
de Matriz
Poligonal

MICROFOTOGRAFÍA N° 24
500X (REACTIVO DE MURAKAM'S)
CARBURO DE CROMO PRIMARIO DE
MATRIZ POLIGONAL
(SUPERFICIE)

CAPÍTULO III

DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA Y DILUCIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES

3.1 EQUIPO PARA DETERMINAR DIFUSIÓN DE CARBONO EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS

La difusión de carbono se determinó en microscopio electrónico de BARRIDO-SEM-EDX marca PHILIPS XL-20 del Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, empleando Microanálisis cualitativo y cuantitativo, Microscopio electrónico de Barrido, equipado con detector de electrones retrodispersados EDAX DX- (SEM-EDX) visualiza muestras con ampliación de imagen hasta 400,000X (Aumentos).



FOTOGRAFÍA N° 2 : MICROSCOPIO ELECTRÓNICO SEM – EDX

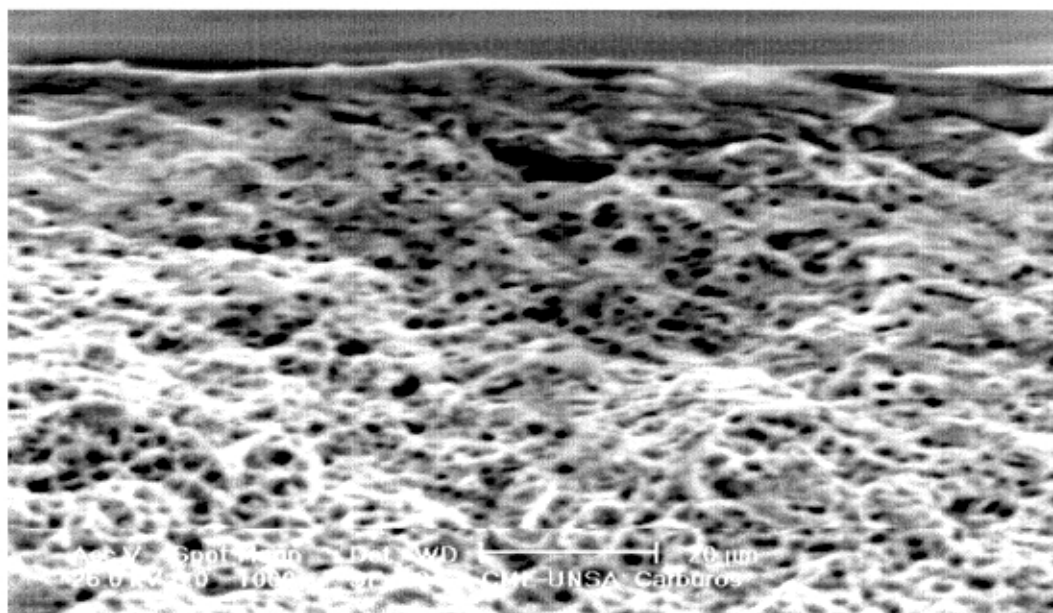
3.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS

La preparación de probetas se realizó a partir de las probetas ya preparadas para el ensayo de abrasión y se realizaron cortes, con disco de corte y con plasma, luego se fracturó para el análisis de difusión de carbono en las diferentes capas de recubrimiento por soldadura, mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM – EDX).

3.3 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE CARBONO EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS

3.3.1 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E 6-60 (64w) c – CITODUR 600

3.3.1.1. EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA Nº 25 ELECTRODO CITODUR 600 1ª CAPA

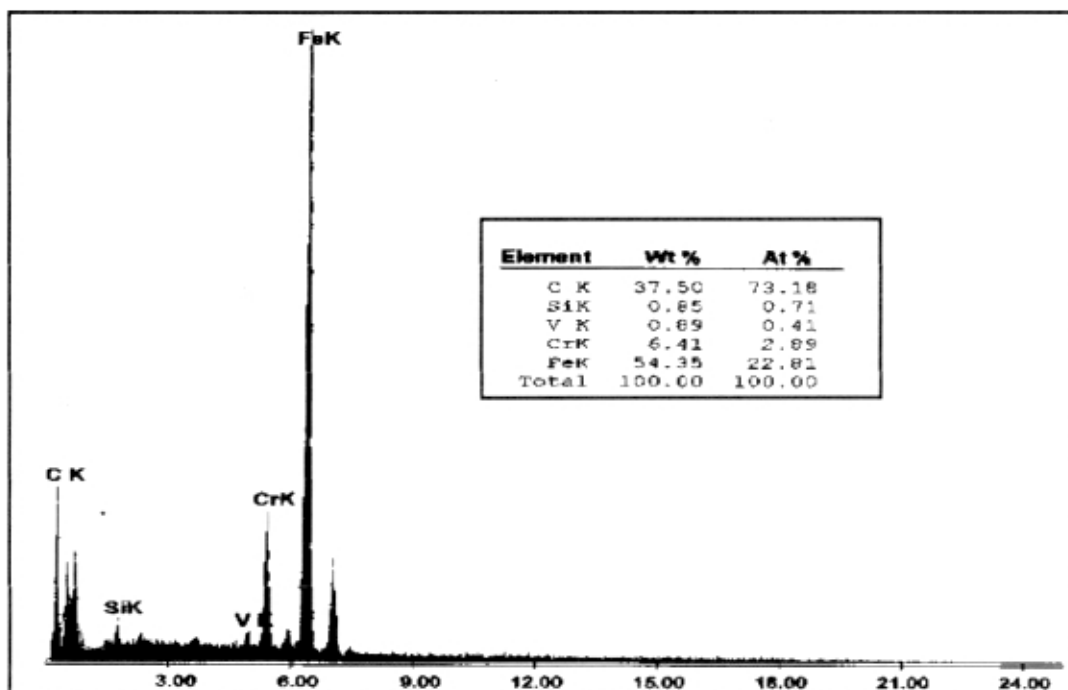
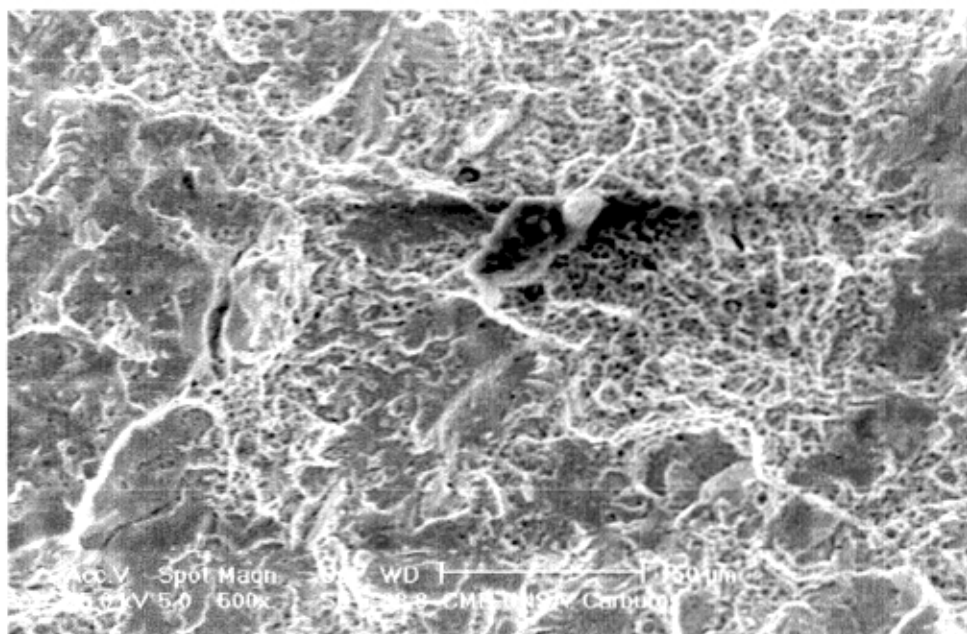


FIG. Nº 5 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX (MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO) ELECTRODO CITODUR 600 – 1ª CAPA

En la primera capa depositada se produce mayor difusión de carbono: 37,50% y una dilución de 6,41% de cromo por el mayor aporte térmico de calor.

3.3.1.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 26 ELECTRODO CITODUR 600 2^{da} CAPA

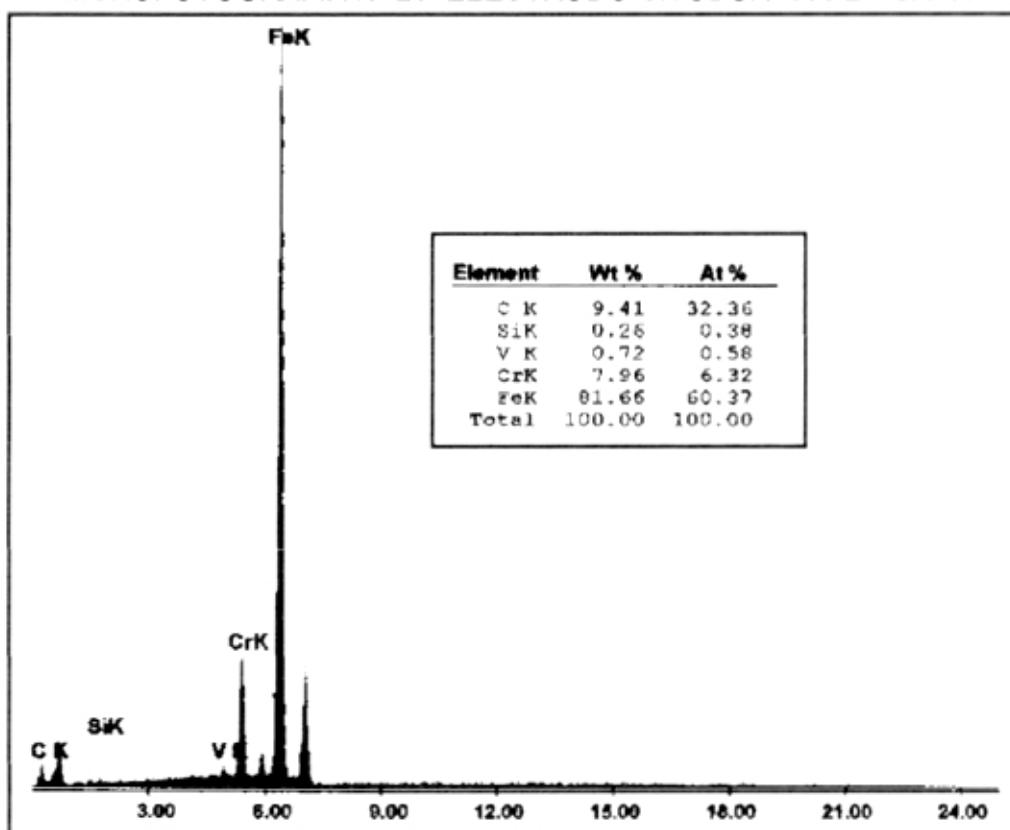
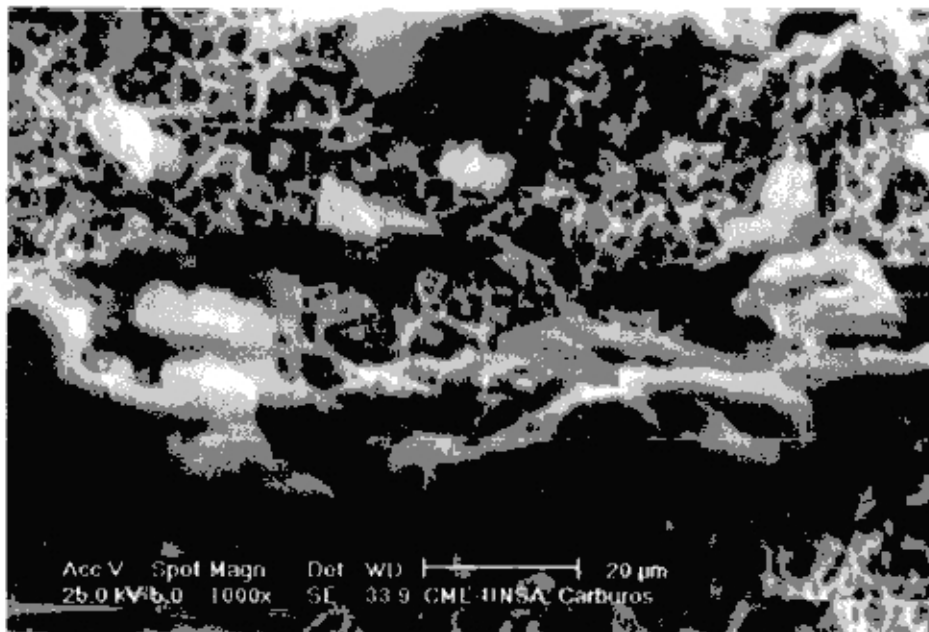


FIG. N° 6 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO CITODUR 600 -2^{da} CAPA

En la segunda capa depositada para el electrodo Citodur 600 se produce menor difusión de carbono, a diferencia de la primera capa: C = 9,41%. Esta difusión se produce por aporte térmico de calor, y la dilución de cromo es de: 7,96%.

3.3.1.3 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 27 ELECTRODO CITODUR 600 3^{ra} CAPA

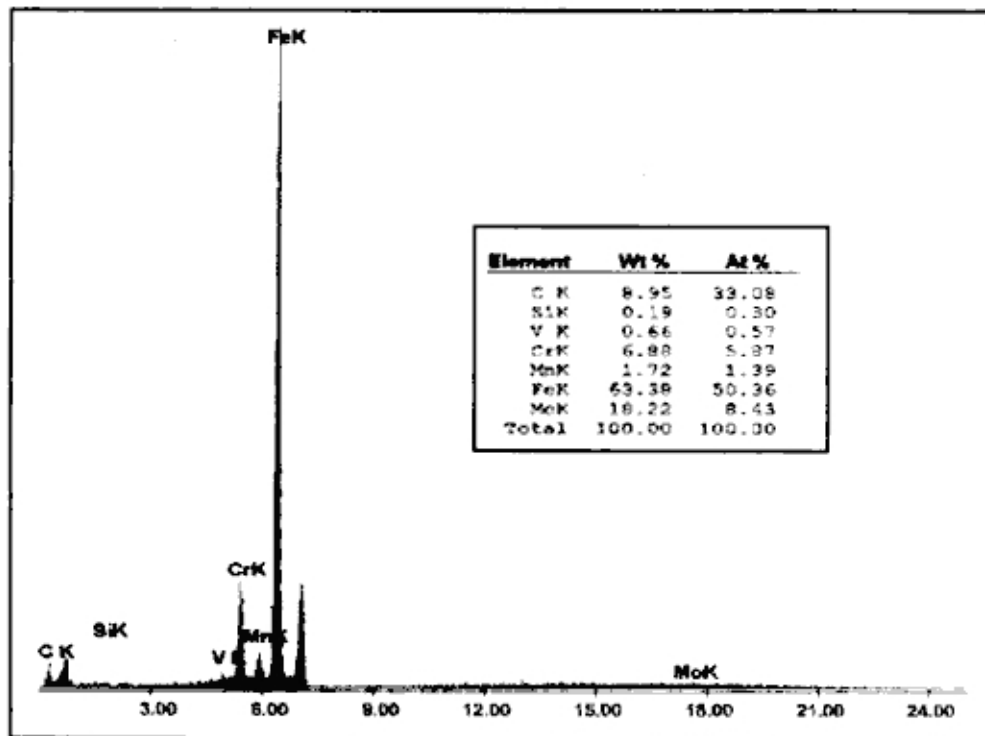
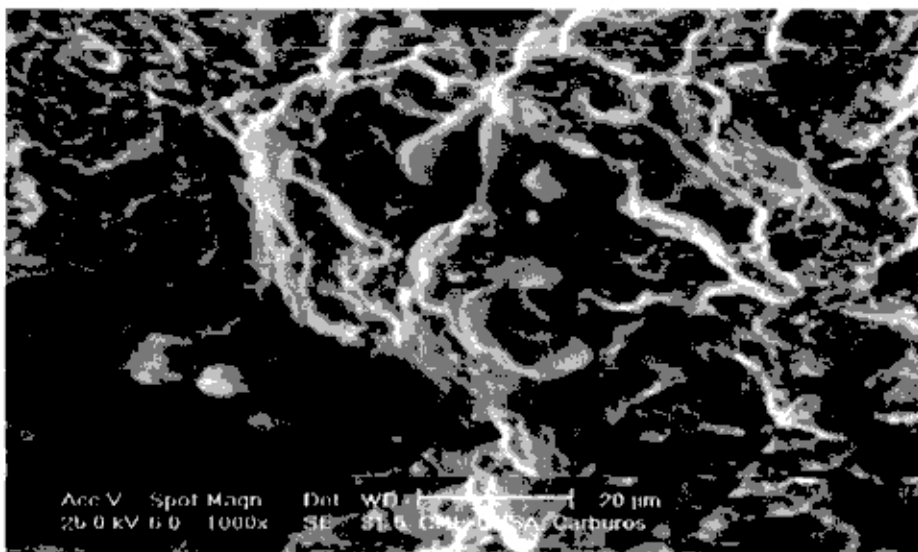


FIG. N° 7 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO CITODUR 600 - 3^{ra} CAPA

En la tercera capa depositada, se produce menor difusión de carbono por estar en contacto con el medio ambiente: C = 8,95%, por lo que el enfriamiento es rápido y presenta una dilución de cromo de: 6,88%.

3.3.2 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO E10-65 cz – CITODUR 1000

3.3.2.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA Nº 28 ELECTRODO CITODUR 1000 1ªCAPA

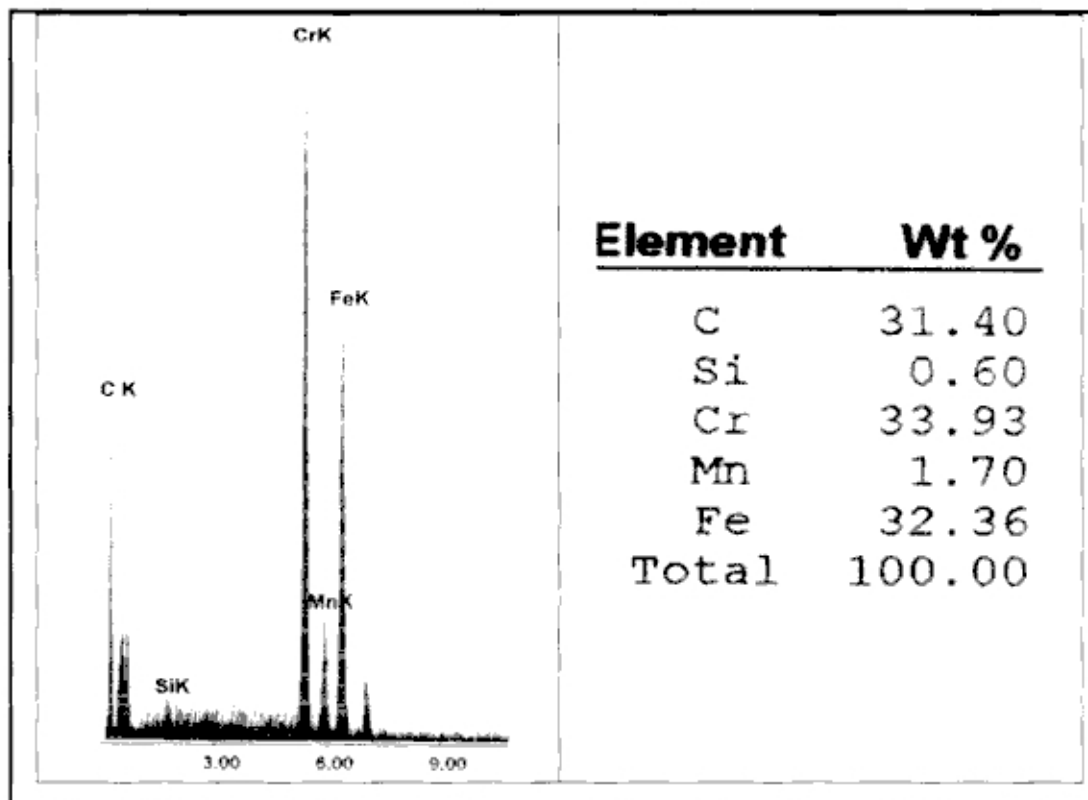
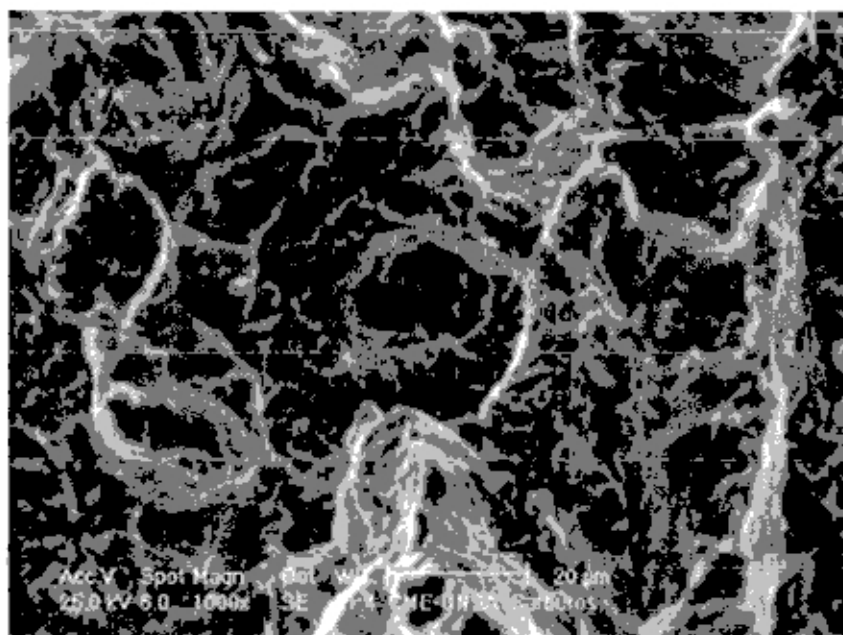


FIG. Nº 8 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX ELECTRODO CITODUR 1000-1ª CAPA

Se produce mayor difusión de carbono en la primera capa depositada C=31,40% y la dilución de cromo: 33,93%.

3.3.2.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 29 ELECTRODO CITODUR 1000 2^{da} CAPA

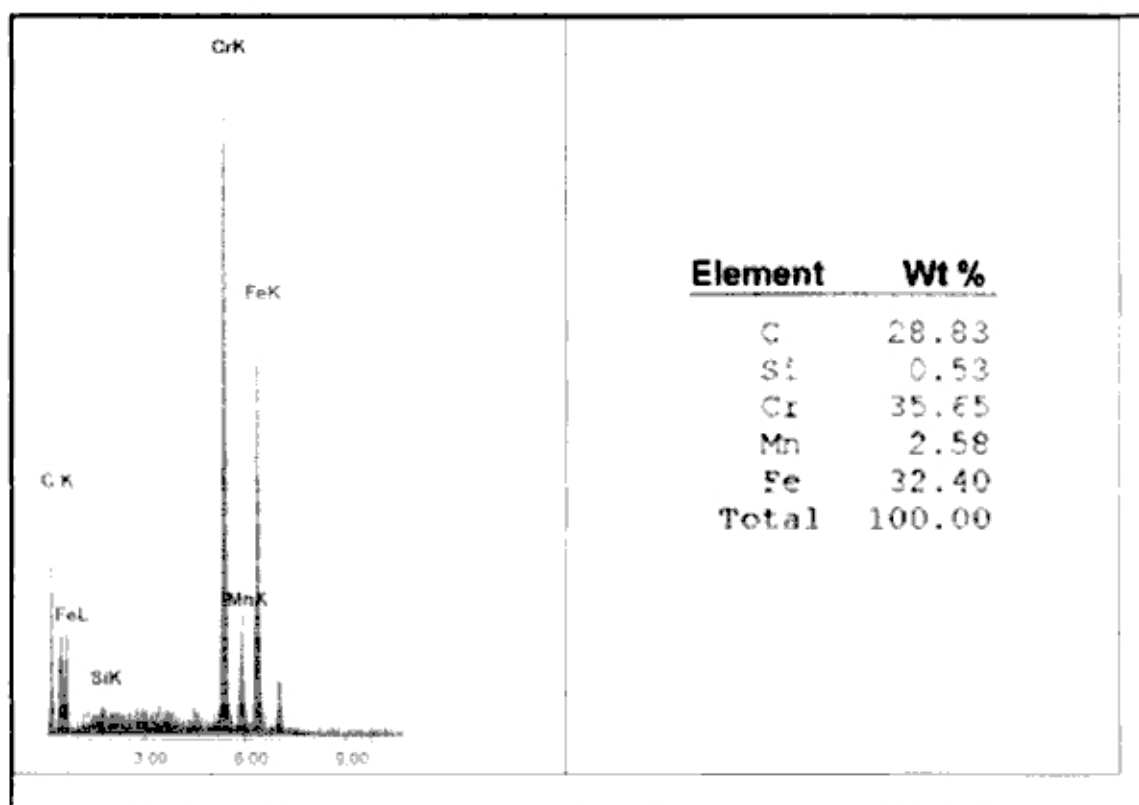
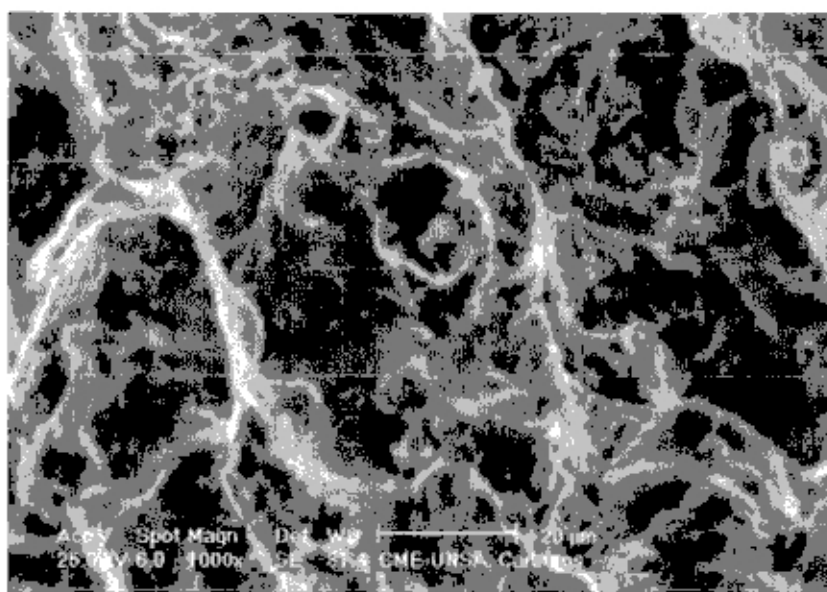


FIG. N° 9 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO CITODUR 1000-2^{da} CAPA

Disminuye la difusión de carbono, en la segunda capa depositada C=28,83% y dilución de cromo: 35,65%.

3.3.2.3 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 30 ELECTRODO CITODUR 1000 3^{ra} CAPA

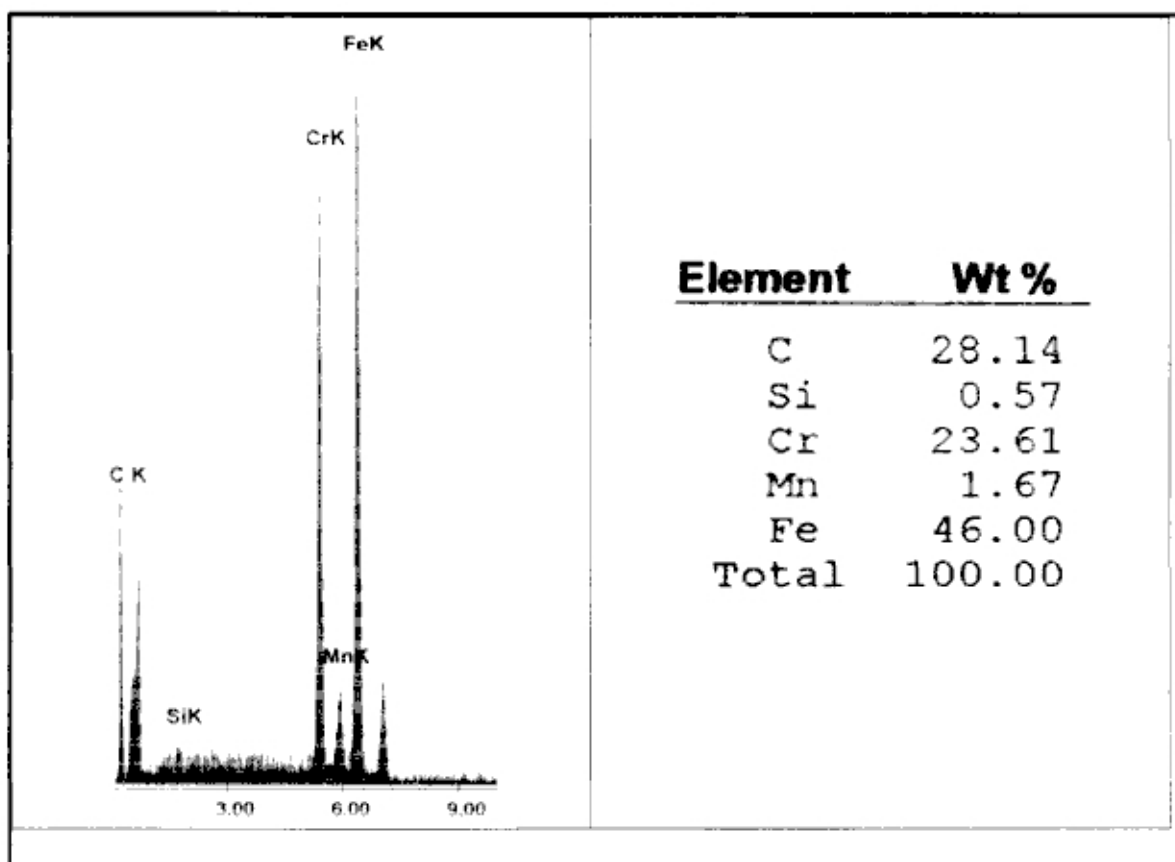
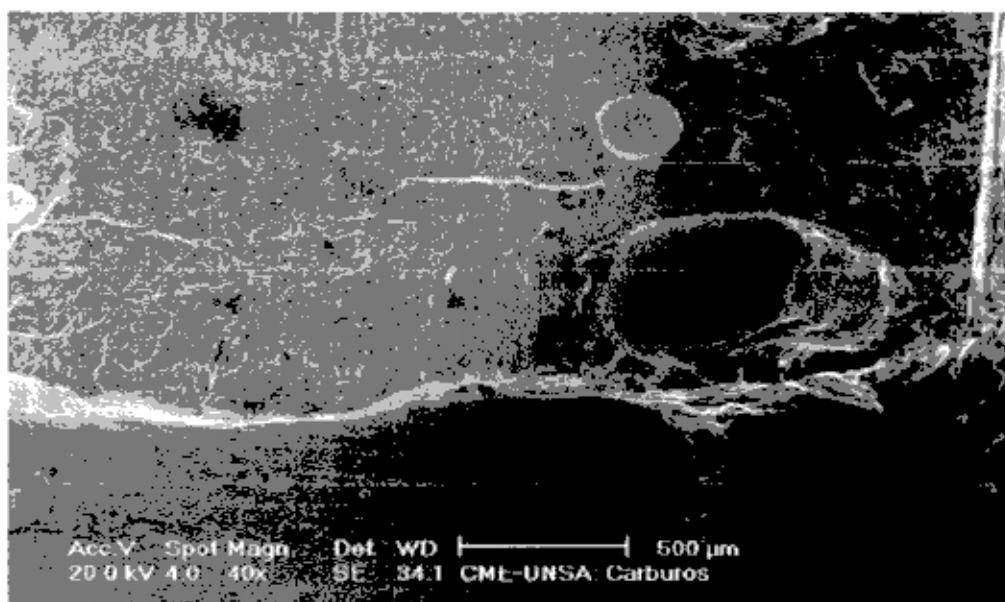


FIG. N° 10 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO CITODUR 1000- 3^{ra} CAPA

En la tercera capa depositada, con el electrodo Citodur 1000, se produce menor difusión de carbono C = 28,14% por enfriamiento rápido de la última capa de recubrimiento, y la dilución de cromo es menor Cr = 23,61%.

3.3.3 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO E-4-60 (65W) st – TOOLCORD

3.3.3.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 31 ELECTRODO TOOLCORD 1ª CAPA

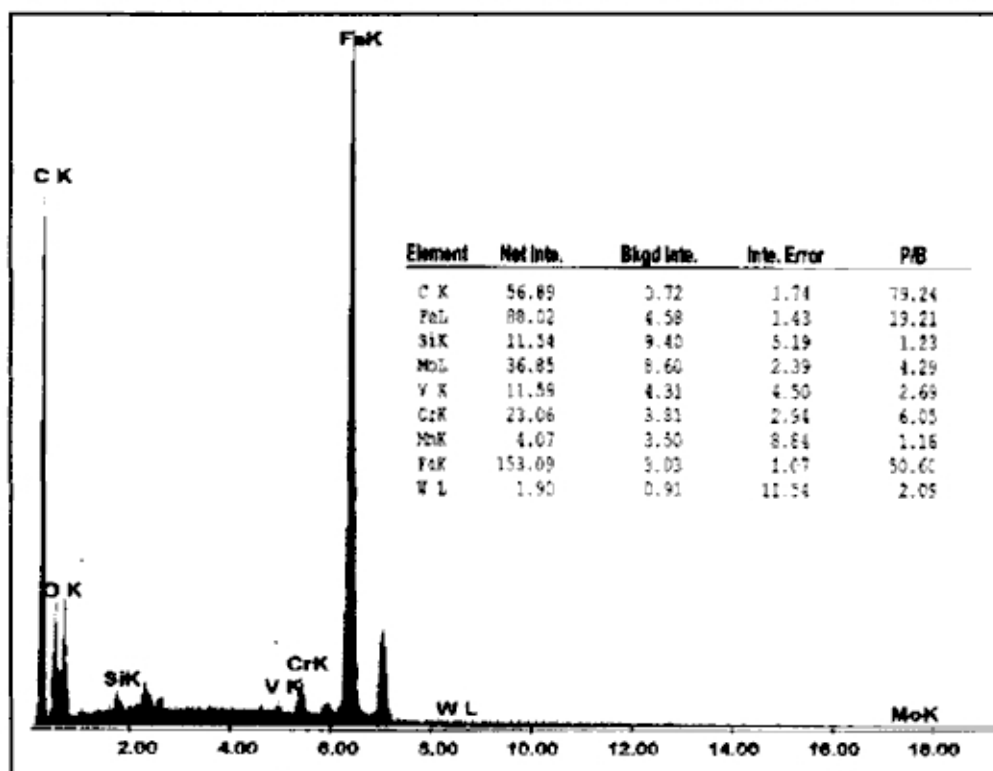
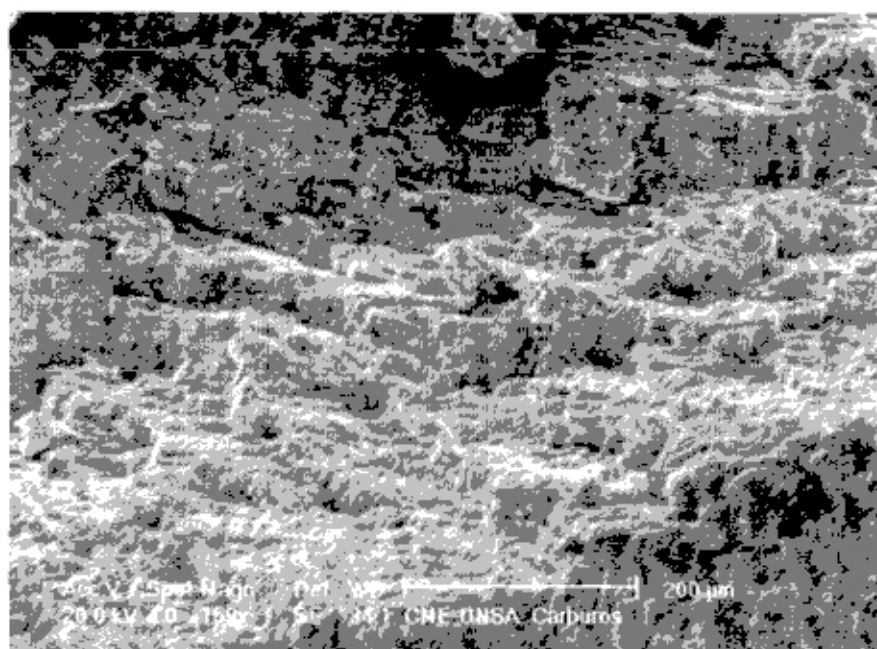


FIG. N° 11 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX ELECTRODO TOOLCORD – 1ª CAPA

El electrodo Toolcord deposita carburo de Tungsteno y Carburo de Cromo. En la primera capa, presenta mayor contenido de carbono: C = 56,89% y dilución de Cromo = 23,06%, dilución de W = 1,90%.

EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 32 ELECTRODO TOOLCORD 2^{da} CAPA

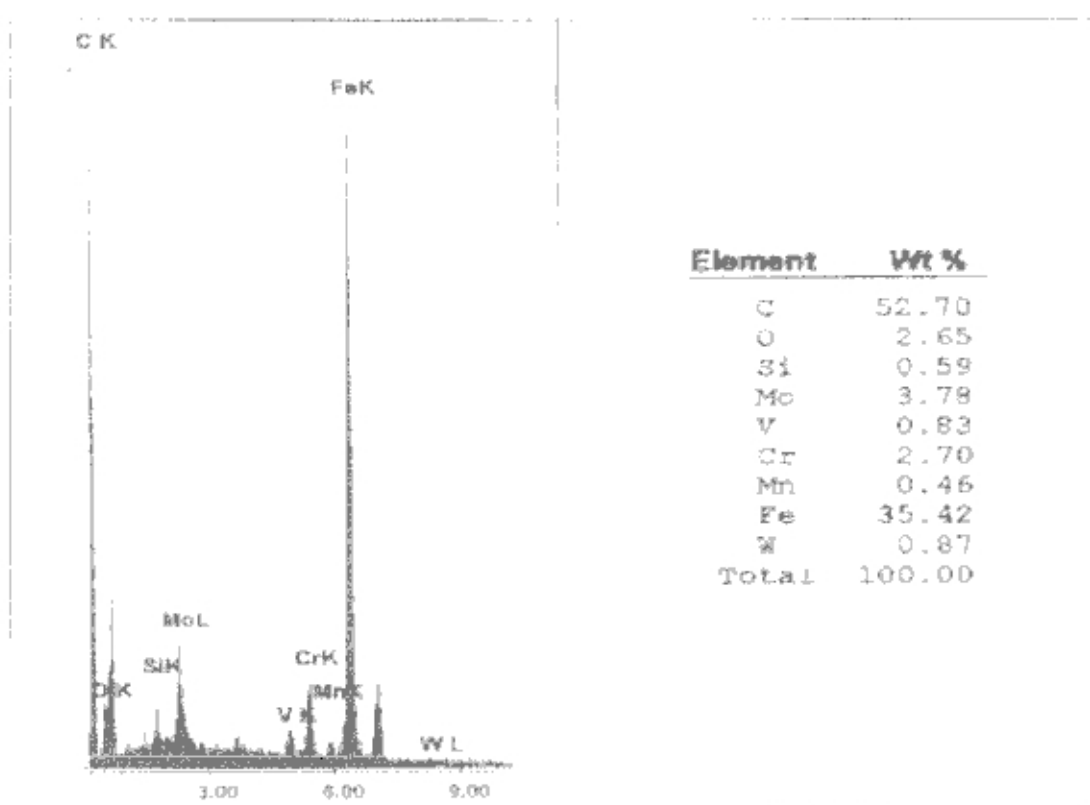
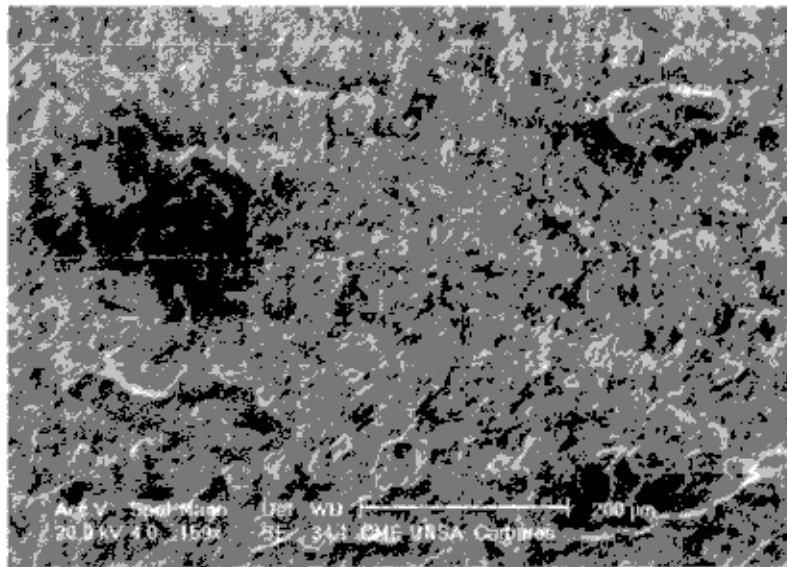


FIG. N° 12 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO TOOLCORD-2^{da} CAPA

En la segunda capa depositada, el electrodo Toolcord presenta una difusión: C = 52,70% y dilución de Cr = 2,70%, dilución de W = 0,87%.

3.3.3.2 EN LA TERCERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFIA N° 33 ELECTRODO TOOLCORD 3^{ra} CAPA

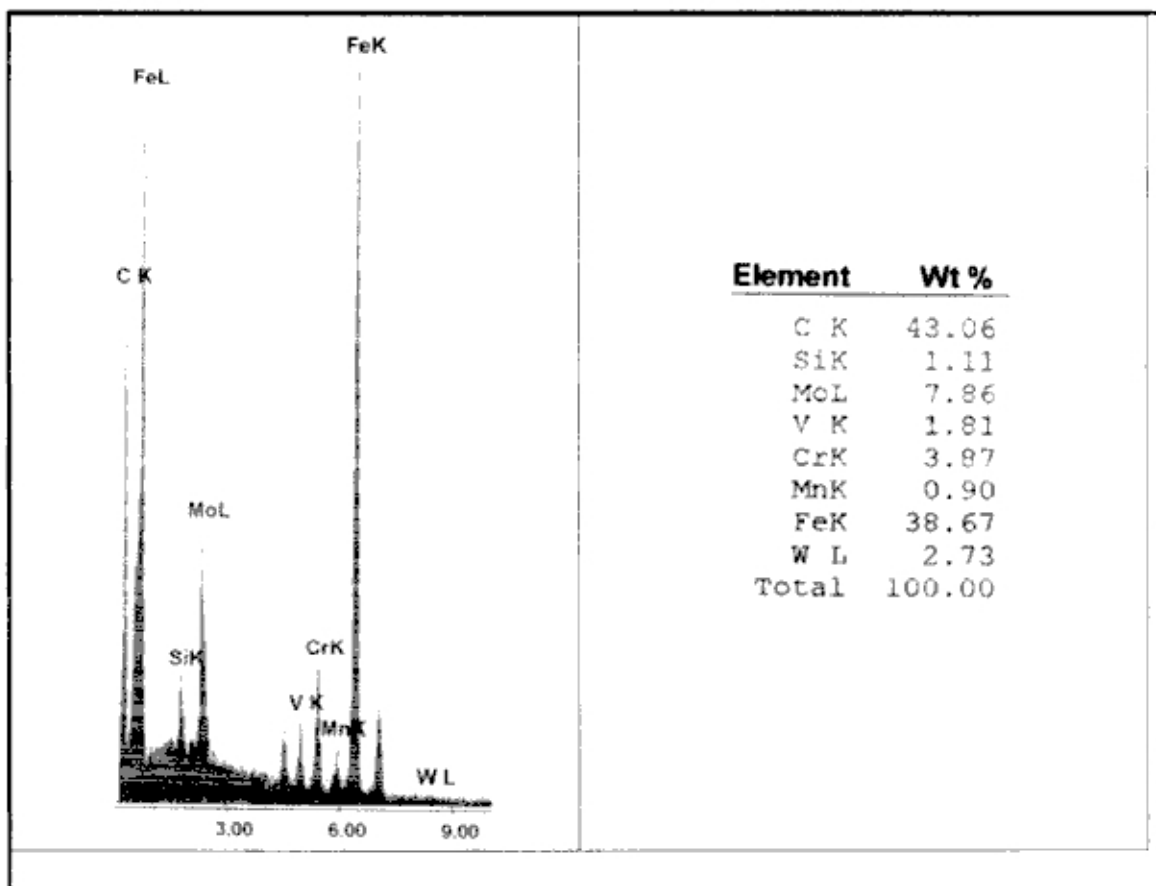
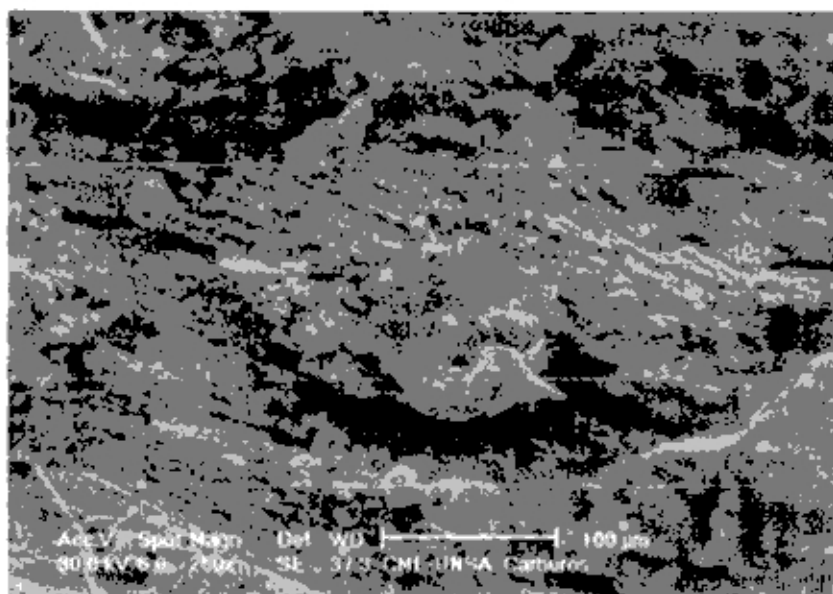


FIG. N° 13 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO TOOLCORD-3^{ra} CAPA

En la tercera capa, el electrodo Toolcord presenta una difusión de carbono de 43,06%, siendo menor que la primera capa y segunda capa depositada y la dilución de Cromo es 3,87%, la dilución de Tungsteno es 2,73%.

3.3.4 DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO EXADUR 43

3.3.4.1 EN LA PRIMERA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 34 ELECTRODO EXADUR 43 1ª CAPA

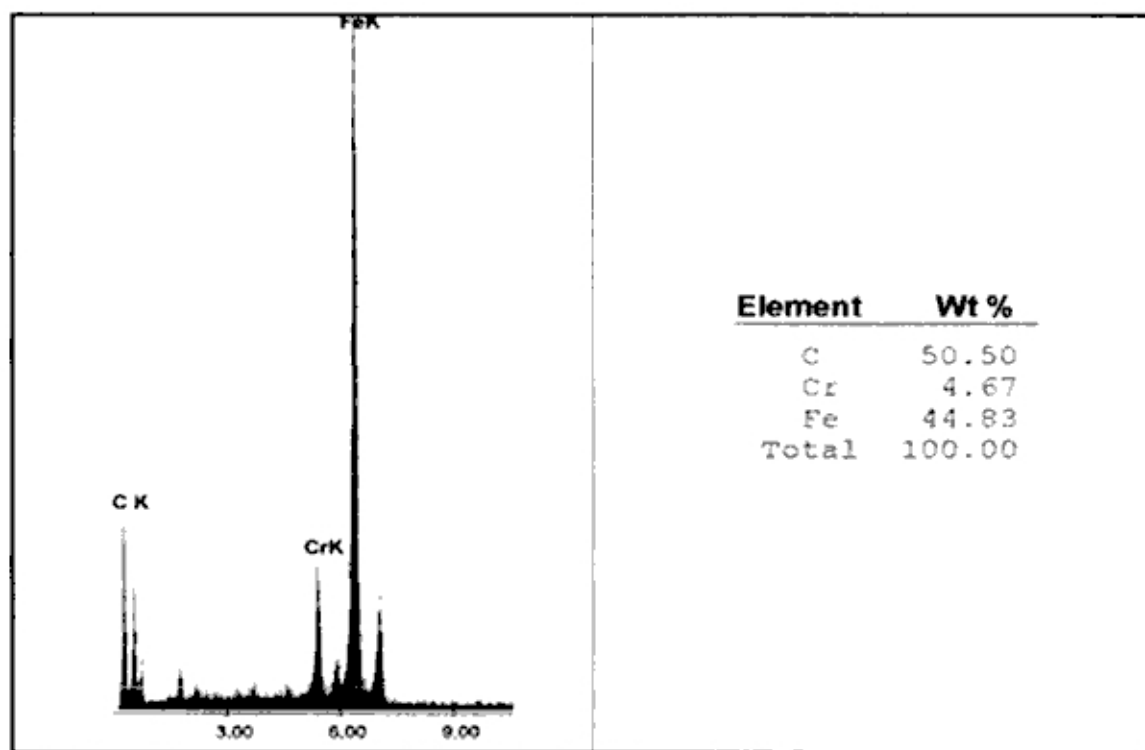
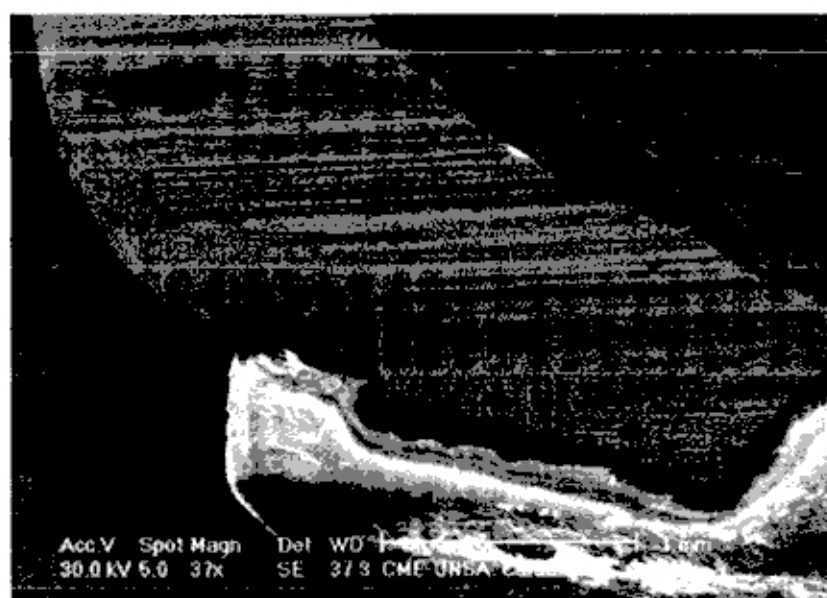


FIG. N° 14 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO EXADUR 43-1ª CAPA

La difusión de carbono en la primera capa depositada del electrodo Exadur 43 es 50,50% y la dilución de cromo es 4,67%. La primera capa depositada presenta mayor difusión de carbono y mayor dilución de cromo.

3.3.4.2 EN LA SEGUNDA CAPA DEPOSITADA



MICROFOTOGRAFÍA N° 35 ELECTRODO EXADUR 43 2^{da} CAPA

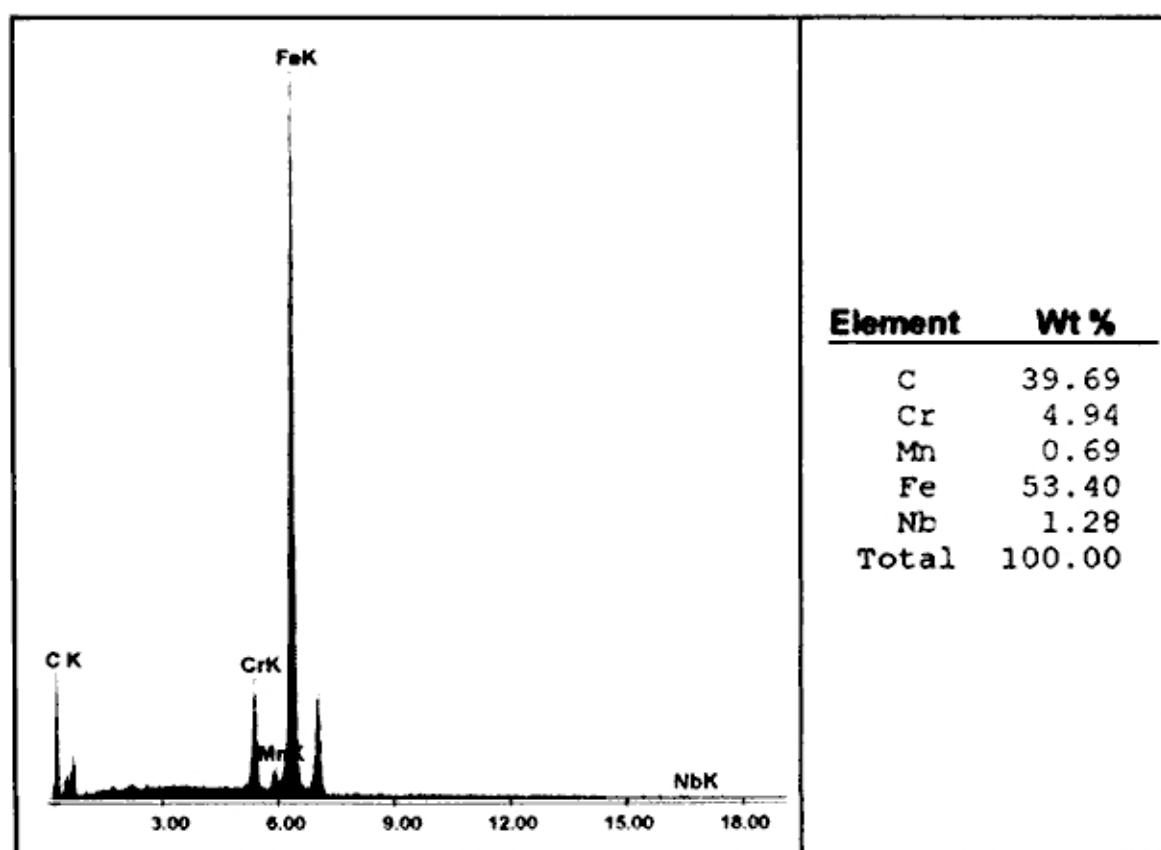


FIG. N° 15 ANÁLISIS QUÍMICO DE DIFUSIÓN DE CARBONO CON EDX
ELECTRODO EXADUR 43-2^{da} CAPA

La difusión de carbono en la segunda capa depositada por el electrodo Exadur 43 es 39,69% y la dilución de cromo: 4,94%. Presenta menor difusión de carbono y menor dilución que la primera capa depositada.

CAPÍTULO IV

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES DE CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO

4.1 PARÁMETROS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN

Por Norma ASTM G65 procedimiento "A", los parámetros de ensayo de abrasión son:

4.1.1. RUEDA DE CAUCHO

Disco de acero de 9" de diámetro, recubierto con una capa exterior de caucho clorobutil, con una dureza de 60 Shore.

4.1.2. MATERIAL ABRASIVO

Arena de cuarzo con tamaño de grano AFS 50 – 70 (100 micras).

4.1.3 FLUJO DE ARENA

La tobera debe producir un caudal de 300 g/min (0,55 A 0,88lbs/min).

4.1.4 TRANSMISIÓN DEL MOTOR

240 RPM, motor de 1 Hp.

4.1.5 CONTADOR DE REVOLUCIÓN DE RUEDA

El número de revoluciones de la rueda es de 6000 RPM

4.1.6 TIEMPO DE ENSAYO

25 minutos

4.1.7 FUERZA APLICADA

130 Newton, 30 lb (13,608 kg).

4.1.8 BALANZA ANALÍTICA

La balanza usada para medir la pérdida de masa de la probeta de prueba tiene una sensibilidad de 0,001gr (balanza analítica digital).

4.1.9 EQUIPO DE ENSAYO DE ABRASIÓN

El equipo de ensayo de abrasión Norma ASTM G 65 es un método de ensayo estandarizado, que usa arena de cuarzo en partículas de tamaño AFS (50 a 70) como abrasivo, flotando en una capa delgada de 350 g/min entre la probeta de prueba y una rueda de caucho de 9 pulgadas de diámetro. La rueda gira a una revolución de 240 RPM. Se ha aplicado el procedimiento "A" de Ensayo con arena seca.

Prueba severa que clasifica los materiales metálicos sobre una amplia escala de pérdida de volúmenes desde una resistencia a abrasión baja a extrema (Anexo N° 2 - Fotografía N° 3)



**FOTOGRAFÍA N° 3 EQUIPO DE ENSAYO DE ABRASIÓN
(PLANOS EN ANEXO N° 2)**

4.2 CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO DE ABRASIÓN

Se realizó la calibración de la máquina de ensayo de abrasión Norma ASTM G 65, mediante la probeta de acero SAE 1090.

PROBETA N° 0

Peso de probeta estándar	=	154,403 g.
Peso de probeta desgastada	=	140,242 g.
Pérdida de peso por abrasión	=	14,161 g.

4.3 ENSAYO DE ABRASIÓN DE CARBUROS DE CROMO

4.3.1 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN

ELECTRODO DIN E 6-60 (64W) – CITODUR 600

TABLA N° 8

Electrodo DIN E6 – 60 (64 w) (Citodur 600)

Probeta N°	1	2	3
Capas depositadas	1	2	3
Peso inicial (g)	165,292	163,167	152,756
Peso final (g)	154,843	155,324	137,846
Pérdida de peso por abrasión (g)	10,449	7,843	14,910

4.3.2 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN

ELECTRODO DIN E 10-65 cz – CITODUR 1000

TABLA N° 9

Electrodo DIN E10 – 65 cz (Citodur 1000)

Probeta N°	4	5	6
Capas depositadas	1	2	3
Peso inicial (g)	122,833	119,696	168,468
Peso final (g)	121,471	118,388	167,416
Perdida de peso por abrasión (g)	1,362	1,308	1,052

4.3.3 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN

ELECTRODO EXADUR 43

TABLA N° 10

Electrodo Exádur 43

Probeta N°	10	11	12
Capas depositadas	1	2	3
Peso inicial (g)	153,740	155,610	190,723
Peso final (g)	153,267	155,336	189,880
Pérdida de peso por abrasión (g)	0,473	0,274	0,843

4.4 ENSAYO DE ABRASIÓN DE CARBUROS DE TUNGSTENO

4.4.1 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN

ELECTRODO DIN E 4-60 (65w) st - TOOLCORD

TABLA N° 11
Electrodo DIN E4 – 60 (65w) st (Toolcord)

Probeta N°	7	8	9
Capas depositadas	1	2	3 Templado en agua
Peso inicial (g)	125,748	171,609	172,778
Peso final (g)	114,149	151,918	160,081
Pérdida de peso por abrasión (g)	11,599	19,691	12,697

4.5 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA EN VOLUMEN POR ABRASIÓN DE CARBUROS DE CROMO

Para los carburos de cromo se emplea pérdida de volumen a diferencia de los carburos de hierro que emplea pérdida en peso.

$$\text{Pérdida volumen (mm}^3\text{)} = \frac{\text{Pérdida de masa (g)} \times 1000}{\text{Densidad (g/cm}^3\text{)}}$$

Electrodo DIN E 6 – 60 (64w) (Citodur 600)

en la 1^{ra} capa depositada

$$\text{Pérdida volumen (mm}^3\text{)} = \frac{10,449 \times 1000}{6,70 \text{ gr/cm}^3} = 1559,55 \text{ mm}^3$$

Densidad de carburo de Cromo = 6,70 g/cm³

TABLA N° 12**ELECTRODO DIN E-60 (64w) c – CITODUR 600**

Probeta N°	1	2	3
Capas depositadas	1	2	3
Pérdida de peso por abrasión (g)	10,449	7,843	14,910
Pérdida de volumen por abrasión (mm ³)	1559,55	1,170,59	2225,373

TABLA N° 13**Electrodo DIN E10 – 65 cz (Citodur 1000)**

Probeta N°	4	5	6
Capas depositadas	1	2	3
Pérdida de peso por abrasión (g)	1,362	1,308	1,052
Pérdida de volumen por abrasión (mm ³)	203,283	195,59	157,014

TABLA N° 14**Electrodo Exádur 43**

Probeta N°	10	11	12
Capas depositadas	1	2	3
Pérdida de peso por abrasión (g)	0,473	0,274	0,843
Pérdida de volumen por abrasión (mm ³)	70,597	40,895	125,820

4.6 PÉRDIDA DE VOLUMEN POR ABRASIÓN DE CARBUROS DE TUNGSTENO

Densidad del carburo de Tungsteno = $9,98 \text{ g/cm}^3$

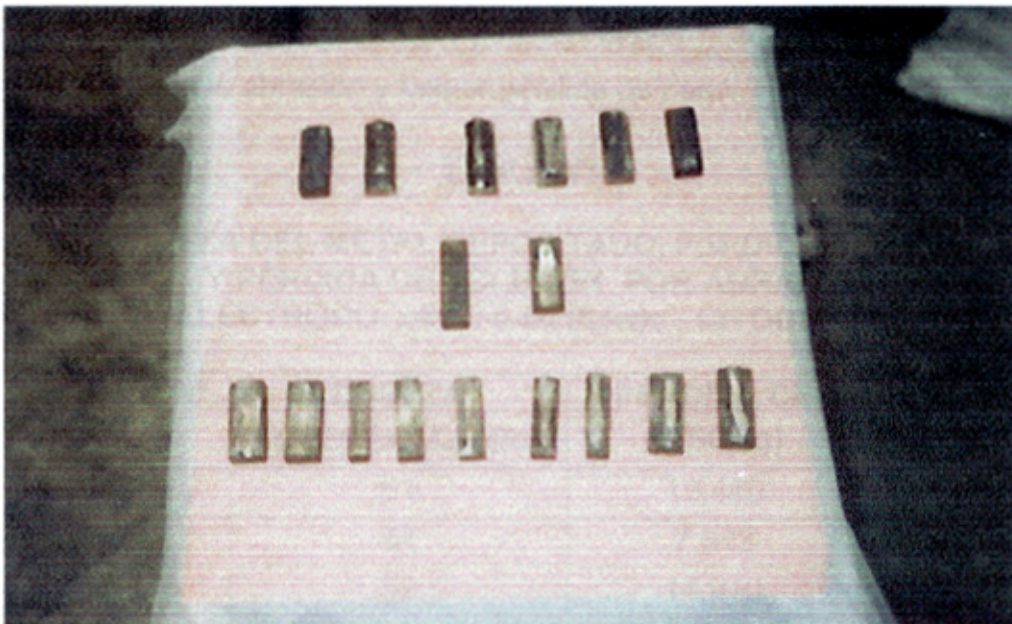
TABLA N° 15

Electrodo DIN E 4 – 60 (65w) st (Toolcord)

Probeta N°	7	8	9
Capas depositadas	1	2	3
Pérdida de peso por abrasión (g)	11,599	19,691	12,697
Pérdida de volumen por abrasión (mm^3)	1162,224	1973,046	1272,244 (Templado en agua)

4.7 PROBETAS DESGASTADAS POR ENSAYO DE ABRASIÓN

Realizado el ensayo de Abrasión de las probetas enumeradas, se ejecuta el pesado de las probetas desgastadas en balanza analítica digital con una precisión de 0,001 gr.



FOTOGRAFÍA N° 4

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE ABRASIÓN Y DIFUSIÓN DE CARBONO

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS CARBUROS DE CROMO Y TUNGSTENO

De los diagramas de pérdida de peso y volumen vs. dureza, se puede deducir que a mayor contenido de carburos en la aleación, presenta menor pérdida de peso en el ensayo de abrasión. A mayor contenido de cromo, mayor resistencia a la abrasión y menor pérdida de peso

TABLA N° 16

DUREZA DEL METAL DEPOSITADO, PÉRDIDA DE PESO Y PÉRDIDA DE VOLUMEN POR ABRASIÓN ELECTRODO DIN E-6-60 (64w)c - CITODUR 600

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL HRC	PÉRDIDA DE PESO (g)	PÉRDIDA DE VOLUMEN (mm ³)
1	61	10,449	1559,55
2	64	7,843	1170,54
3	59	14,910	2225,373

ELECTRODO DIN E-10-65 (cz) - CITODUR 1000

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL HRC	PÉRDIDA DE PESO POR ABRASIÓN (g)	PÉRDIDA DE VOLUMEN (mm ³)
4	61,0	1,362	203,283
5	62,0	1,308	195,59
6	62,5	1,052	157,014

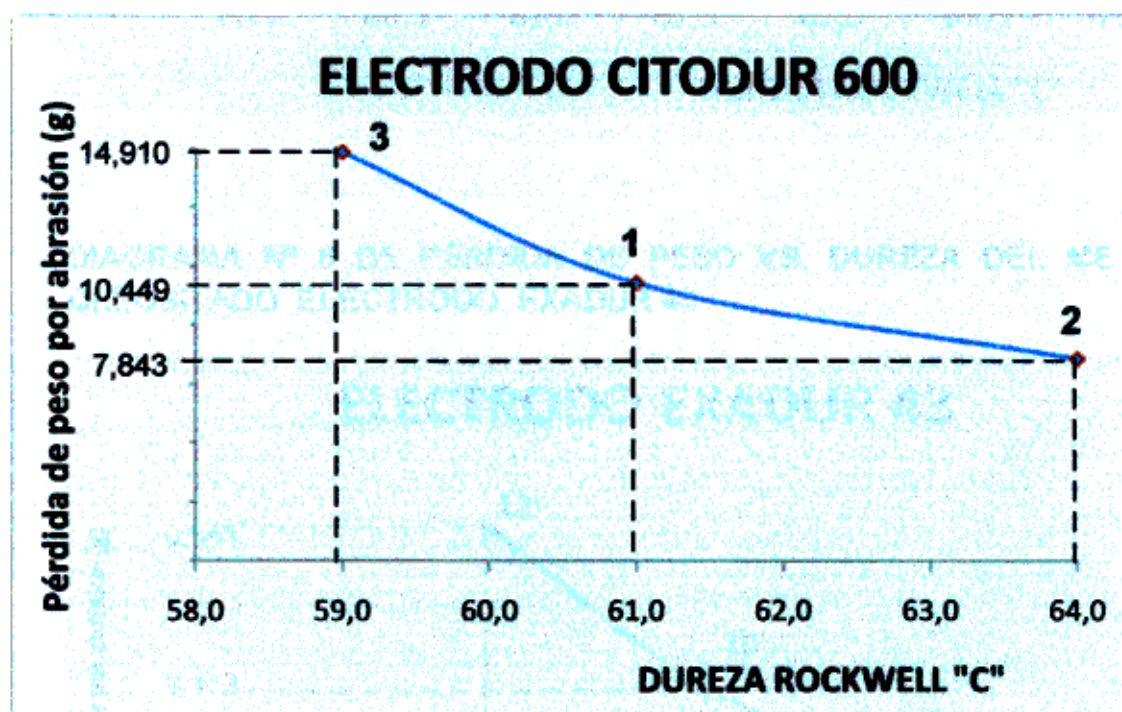
ELECTRODO DIN E-4-60 (65W) st TOOLCORD

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL HRC	PÉRDIDA DE PESO (g)	PÉRDIDA DE VOLUMEN (mm ³)
7	65,5	11,599	1162,224
8	64,5	19,691	1973,046
9	66,5 (Templado en agua)	12,697	172,244

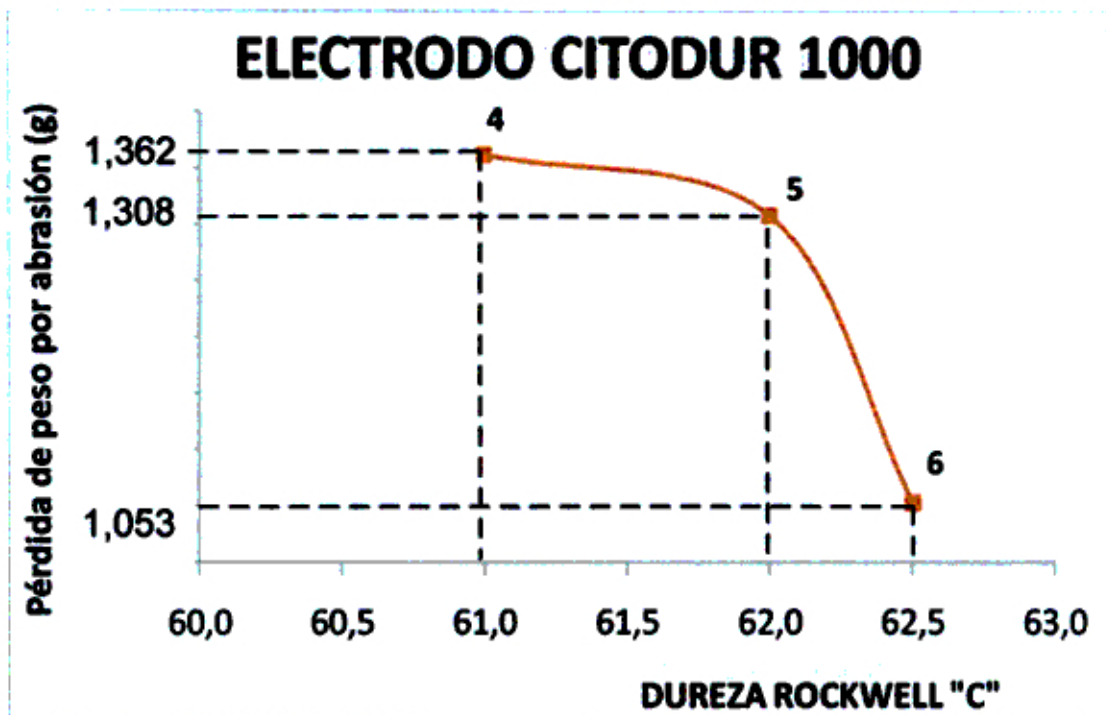
ELECTRODO EXÁDUR 43

PROBETA N°	DUREZA SUPERFICIAL HRC	PÉRDIDA DE PESO (g)	PÉRDIDA DE VOLUMEN (mm ³)
10	71	0,473	70,597
11	72	0,274	40,895
12	70	0,843	125,820

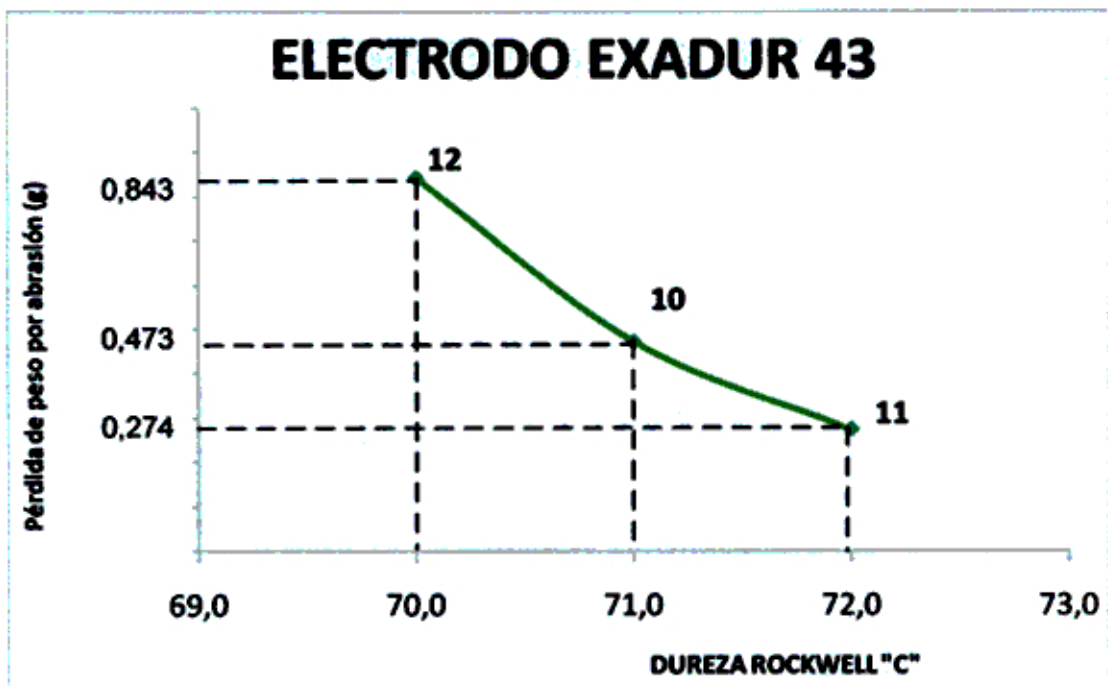
5.1.1 DIAGRAMA N° 4 DE PÉRDIDA DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO DIN E-6-60 (64w) c (CITODUR 600)



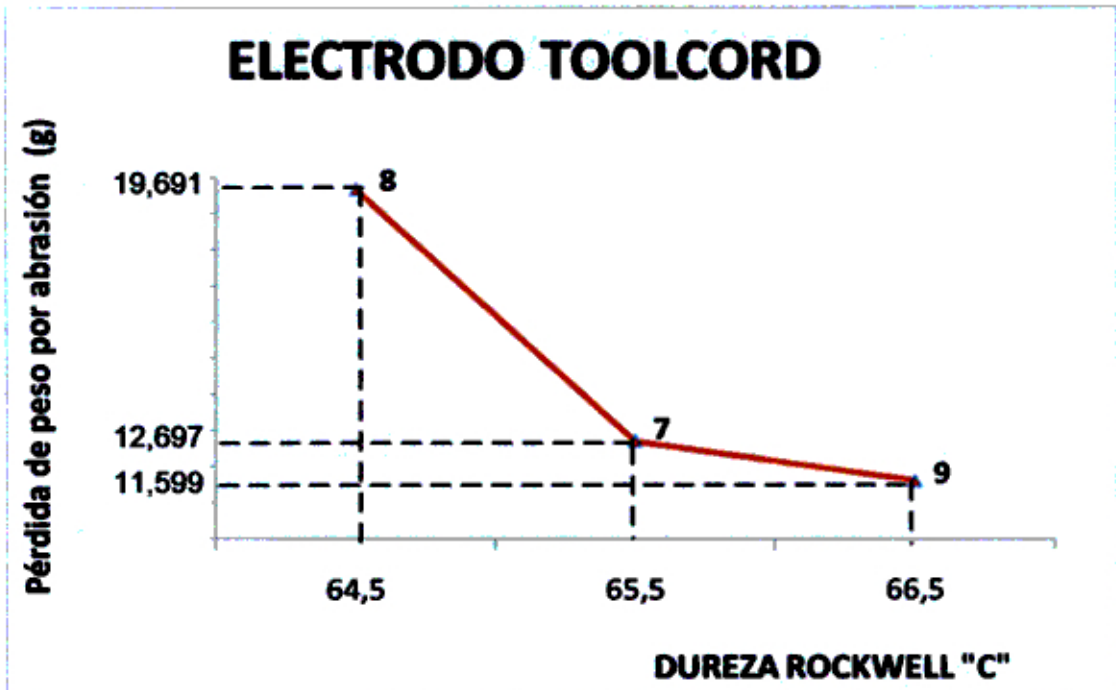
5.1.2. DIAGRAMA N° 5 DE PÉRDIDA DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO DIN E-10-65 cz (CITODUR 1000)



5.1.3. DIAGRAMA N° 6 DE PÉRDIDA DE PESO VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO ELECTRODO EXÁDUR 43

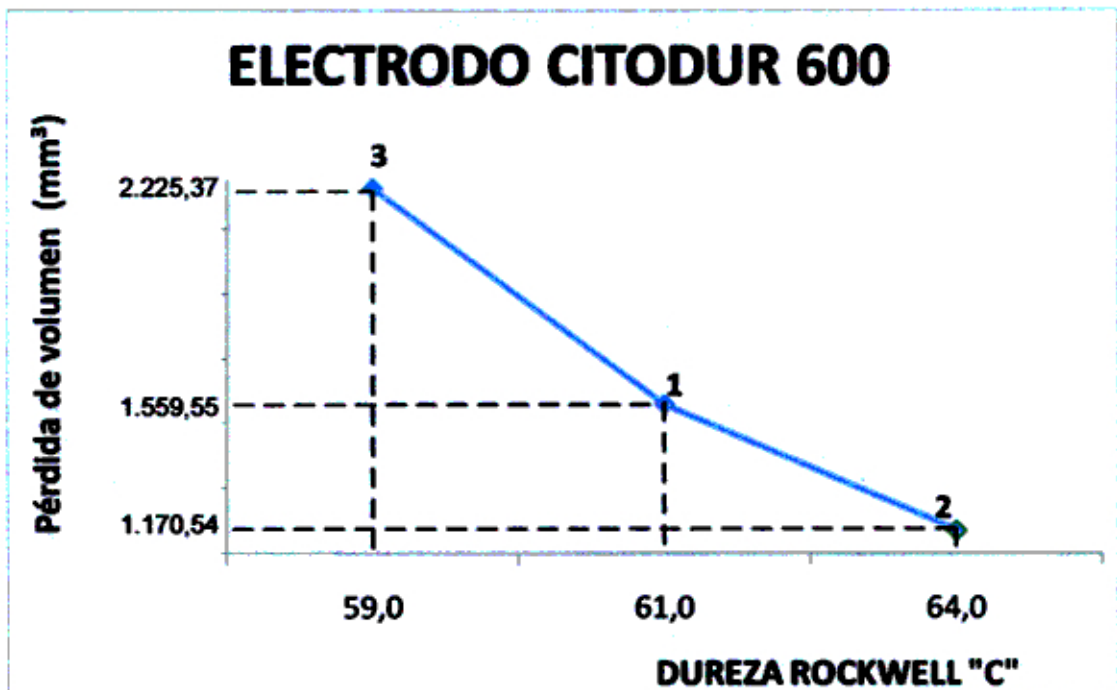


5.1.4 DIAGRAMA Nº 7 DE PÉRDIDA DE PESO PROMEDIO DE CARBUROS DE TUNGSTENO VS. DUREZA ROCKWELL ELECTRODO DIN E-4-60 (65w)st (TOOLCORD)

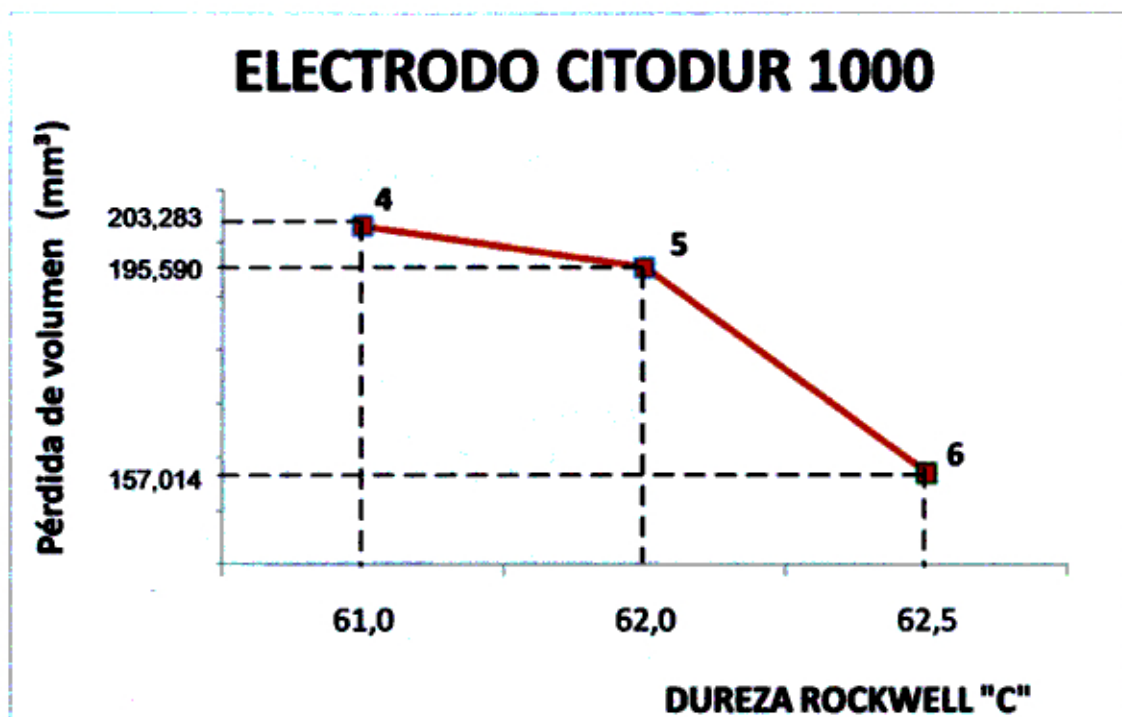


El electrodo DIN E-460 (65w)st presenta carburo de tungsteno, por lo que presenta una mayor resistencia a la abrasión.

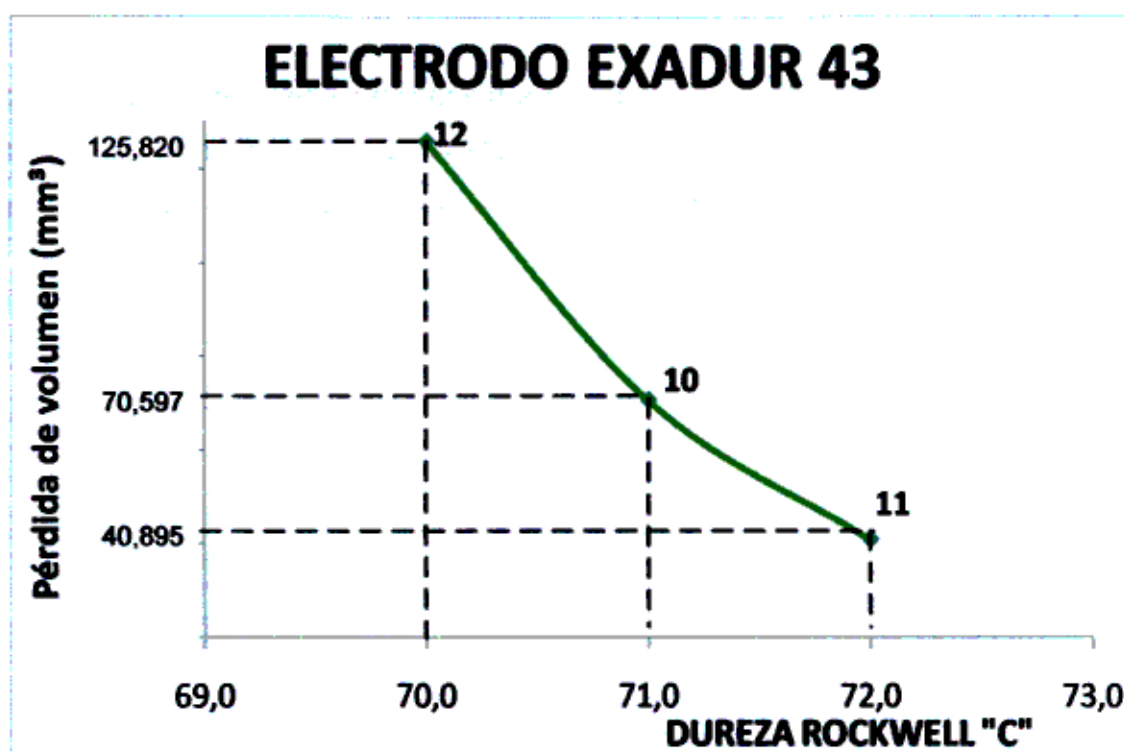
5.1.5 DIAGRAMA Nº 8 DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA DEL METAL DEPOSITADO DE CARBURO DE CROMO ELECTRODO DIN E-6-60(64w) c CITODUR 600



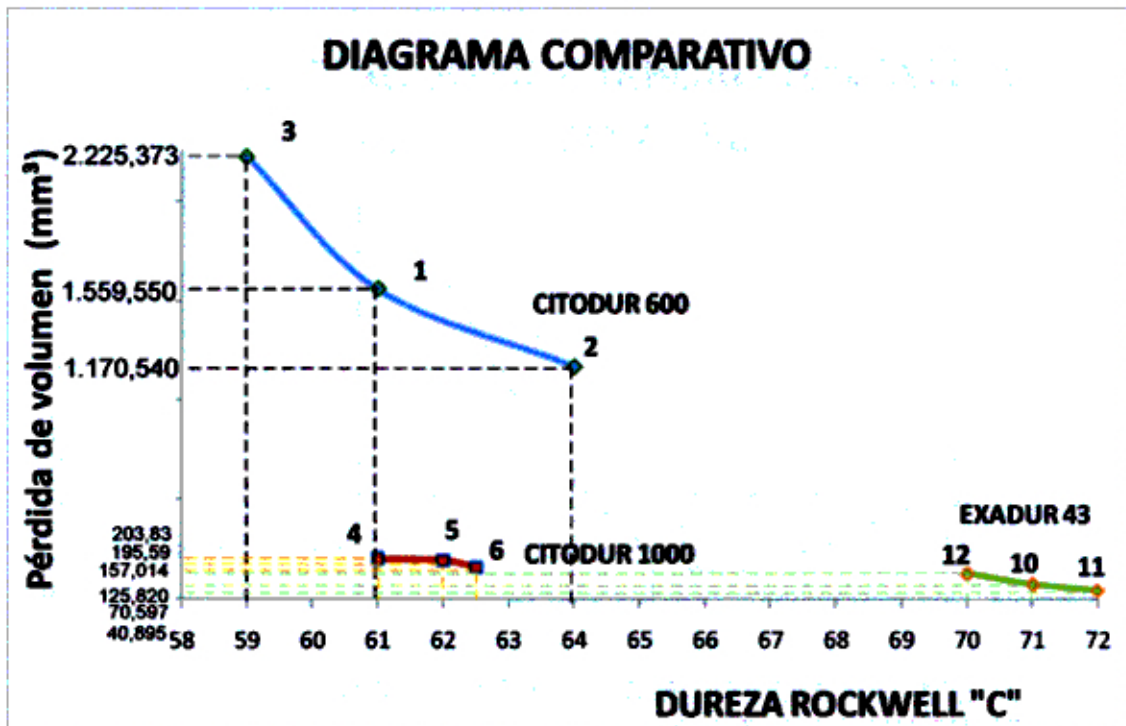
5.1.6 **DIAGRAMA Nº 9 DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODO DIN E-10-65cz (CITODUR 1000)**



5.1.7 **DIAGRAMA Nº 10 DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODO EXADUR 43**

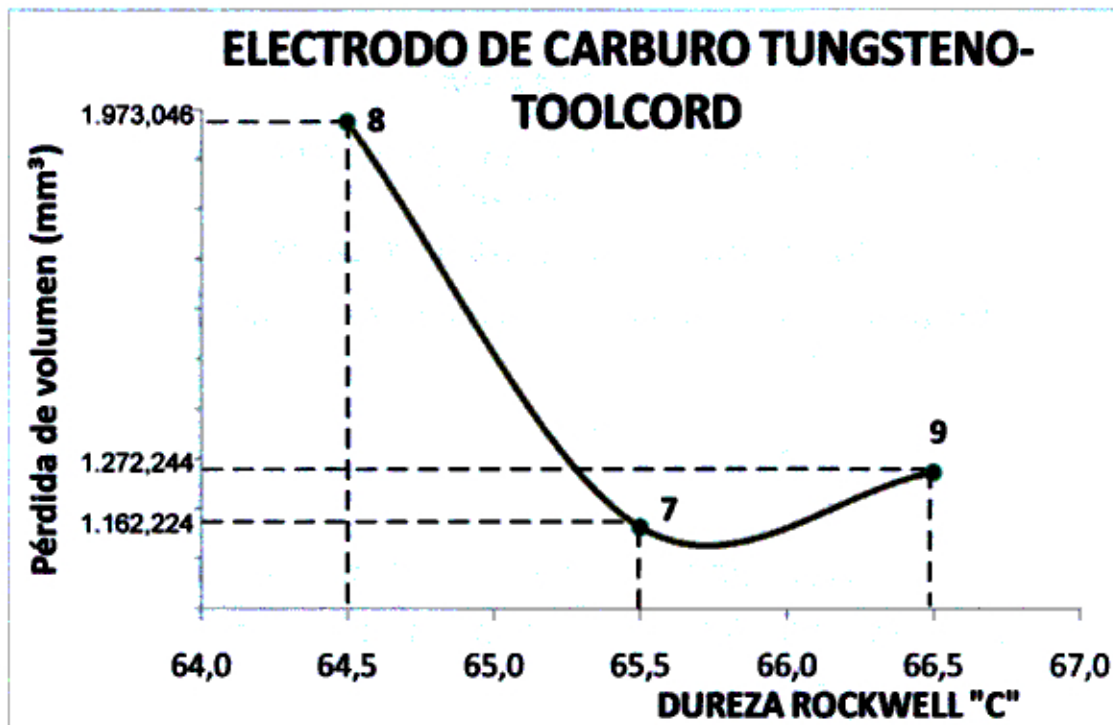


5.1.8 DIAGRAMA N° 11 COMPARACIÓN DE VARIACIÓN DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA ELECTRODOS DE CARBURO DE CROMO, CITODUR 600, CITODUR 1000 Y EXADUR 43



Los electrodos de mayor resistencia a la abrasión son los electrodos de carburo de cromo: Citodur 1000 y Exadur 43 que presentan como microestructura carburos de cromo primarios que presenta alta dureza.

5.1.9 DIAGRAMA N° 12 DE PÉRDIDA DE VOLUMEN VS. DUREZA DE ELECTRODO DE CARBURO DE TUNGSTENO - TOOLCORD



El electrodo Toolcord presenta como microestructura Martensita y Carburo de Tungsteno, y con tratamiento térmico, se puede mejorar la resistencia a la abrasión.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA

De los diagramas de difusión de carbono vs. dureza en las diferentes capas depositadas, se puede deducir que a mayor cantidad de cordones depositados, se produce mayor difusión de carbono y existe influencia en la dureza de las probetas.

TABLA N° 17

DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS Y DIFUSIÓN DE CARBONO

ELECTRODO DIN E-6-60 (64w) C CITODUR 600

N° CAPAS	DUREZA HRC	DIFUSIÓN DE CARBONO (%)
1	59	37,50
2	58	9,41
3	59,5	8,95

ELECTRODO DIN E-10-65Cz - CITODUR 1000

N° CAPAS	DUREZA HRC	DIFUSIÓN DE CARBONO (%)
1	65,5	31,40
2	66,5	28,83
3	67	28,14

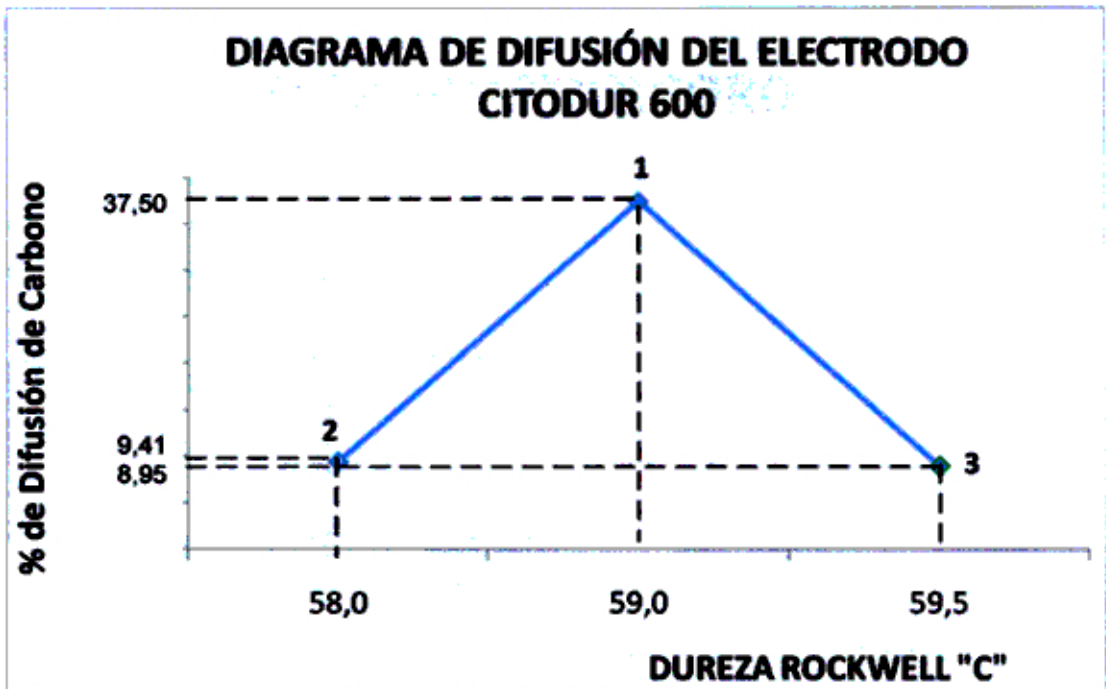
ELECTRODO DIN E-4-60 (65W) st TOOLCORD

N° CAPAS	DUREZA HRC	DIFUSIÓN DE CARBONO (%)
1	66,5	56,89
2	67	52,70
3	68	43,06

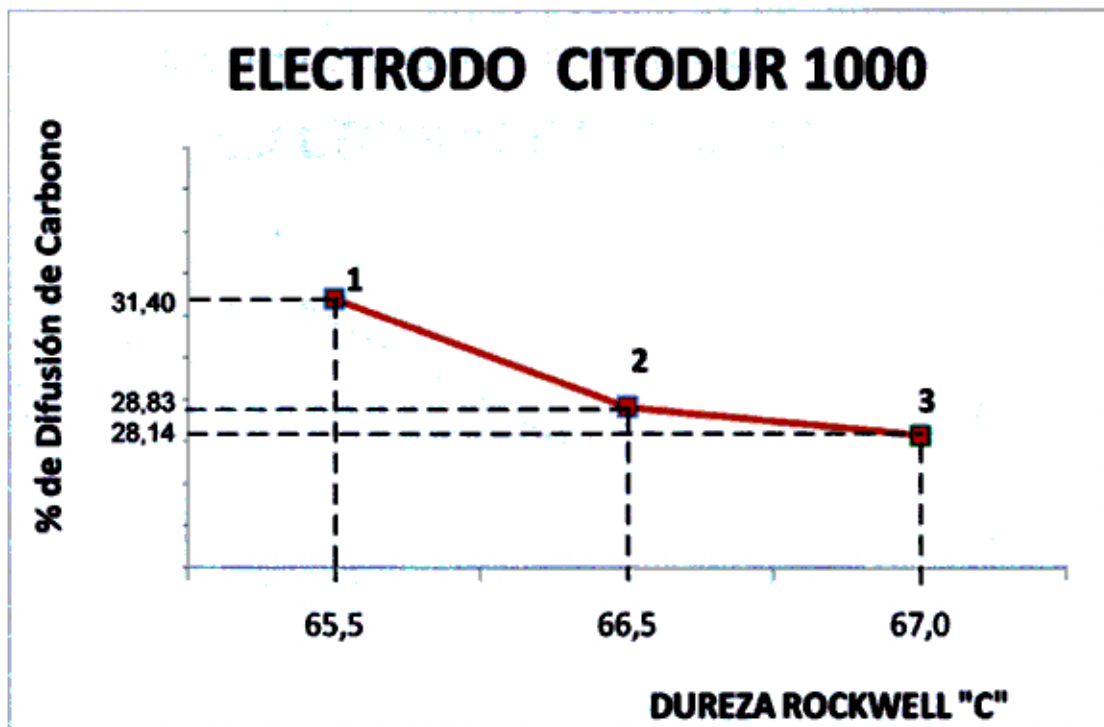
ELECTRODO EXADUR 43

N° CAPAS	DUREZA HRC	DIFUSIÓN DE CARBONO (%)
1	63	50,50
2	71,5	39,69
3	69,5	30,30

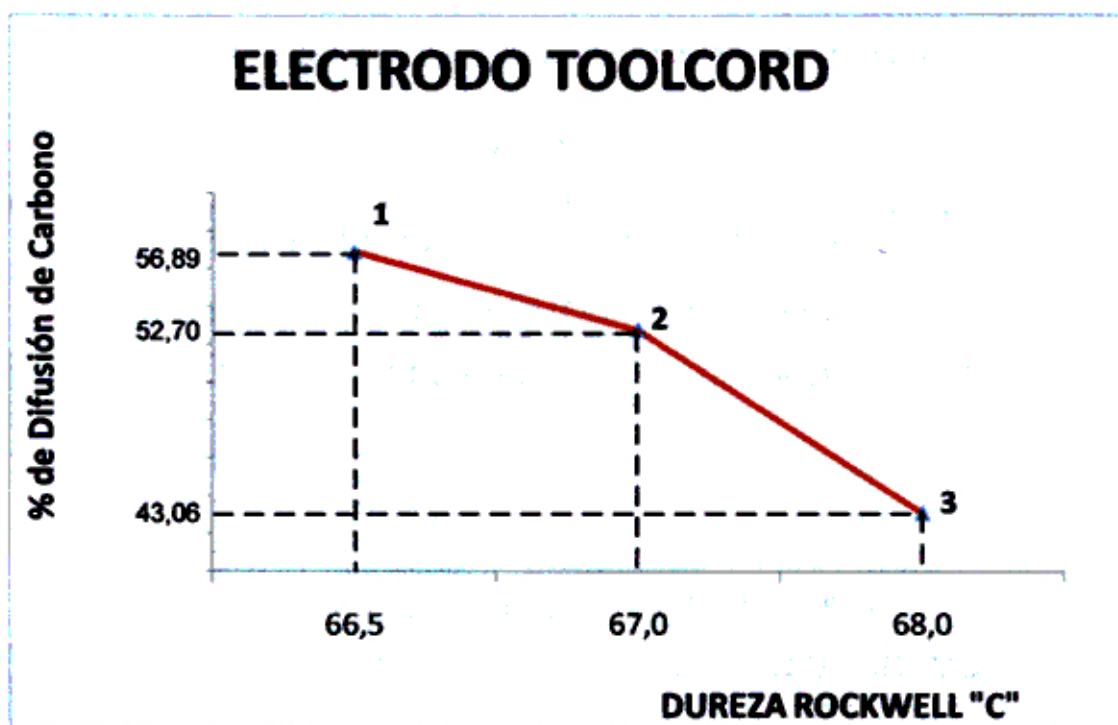
5.2.1 DIAGRAMA Nº 13 DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-6-60 (64W) c – CITODUR 600 VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS



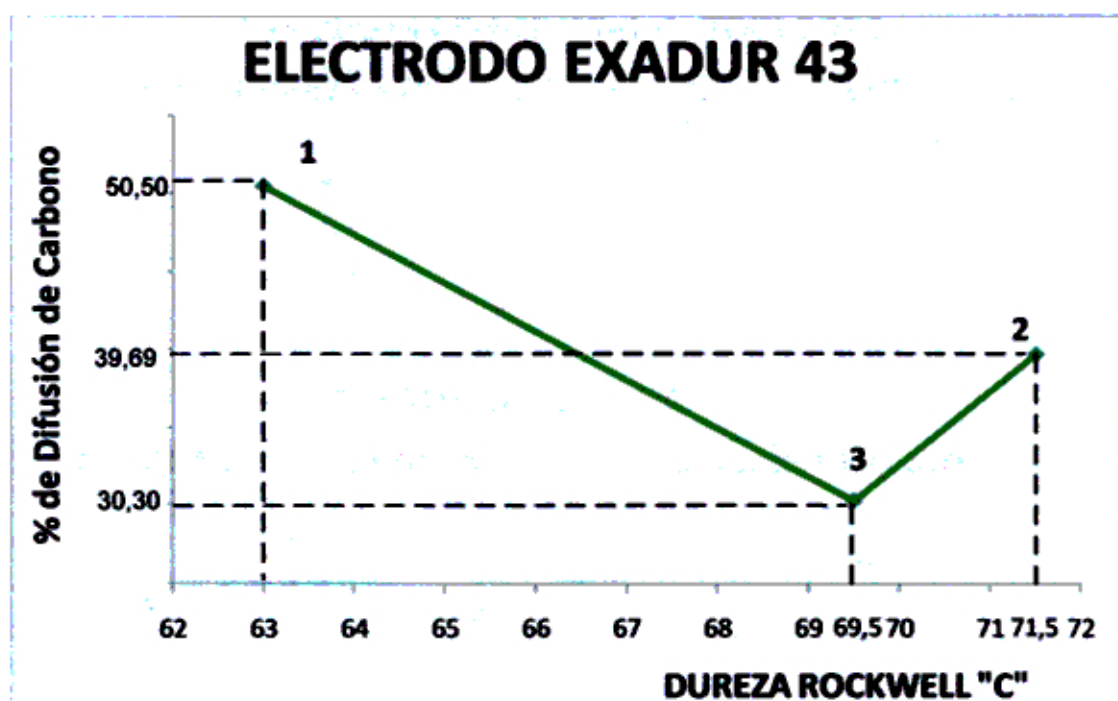
5.2.2 DIAGRAMA Nº 14 DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO DIN E-10-65 cz CITODUR 1000 VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS



5.2.3 DIAGRAMA N° 15 DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO E-4-60 (65w) st-TOOLCORD VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS



5.2.4 DIAGRAMA N° 16 DE DIFUSIÓN DE CARBONO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS CON ELECTRODO EXADUR 43 VS. DUREZA EN LAS DIFERENTES CAPAS O CORDONES DEPOSITADOS.



5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DILUCIÓN DE CROMO Y TUNGSTENO EN LOS CARBUROS DEPOSITADOS POR SOLDADURA

De los diagramas de difusión de cromo y tungsteno en las diferentes capas depositados vs. dureza, se puede determinar: a mayor cantidad de cordones depositados, se produce mayor dilución de cromo y tungsteno.

TABLA N° 18

DUREZA DE LAS DIFERENTES CAPAS DEPOSITADAS Y DILUCIÓN DE ELEMENTOS ALEANTES: CROMO Y TUNGSTENO

ELECTRODO DIN E-6-60 (64w) c - CITODUR 600

N° CAPAS	DUREZA HRC	DILUCIÓN DE CROMO (%)
1	59	6,41
2	58	7,96
3	59,5	6,88

ELECTRODO DIN E-10-65 cz - CITODUR 1000

N° CAPAS	DUREZA HRC	DILUCIÓN DE CROMO (%)
1	65,5	33,93
2	66,5	35,65
3	67	23,61

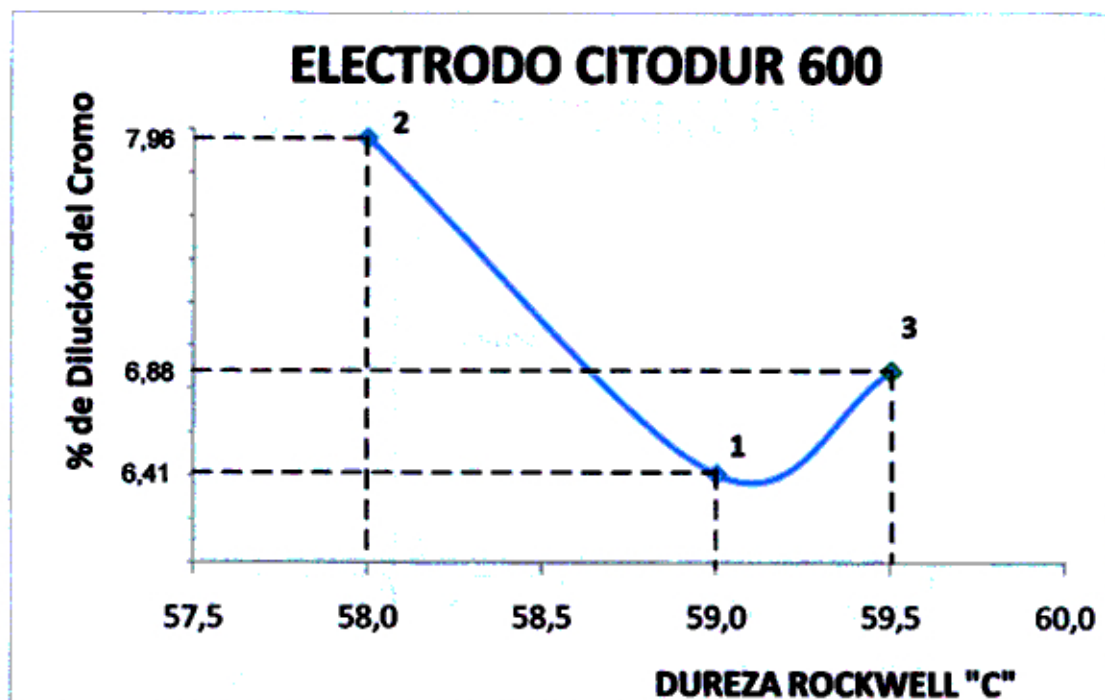
ELECTRODO DIN E-4-60 (65w) st TOOLCORD

N° CAPAS	DUREZA HRC	DILUCIÓN DE CROMO (%)	DILUCIÓN DEL TUNGSTENO (%)
1	66,5	23,06	1,90
2	67	2,70	0,87
3	68	3,87	2,73

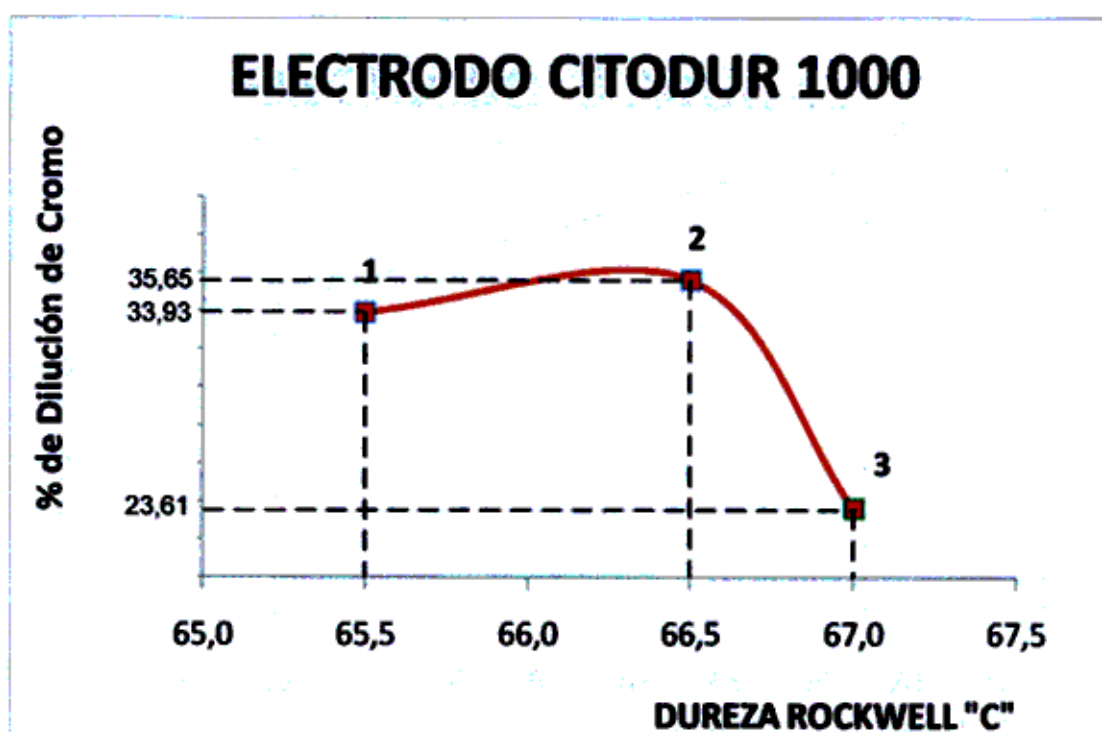
ELECTRODO EXADUR 43

N° CAPAS	DUREZA HRC	DILUCIÓN DE CROMO (%)
1	63	4,67
2	71,5	4,94
3	69,5	5,00

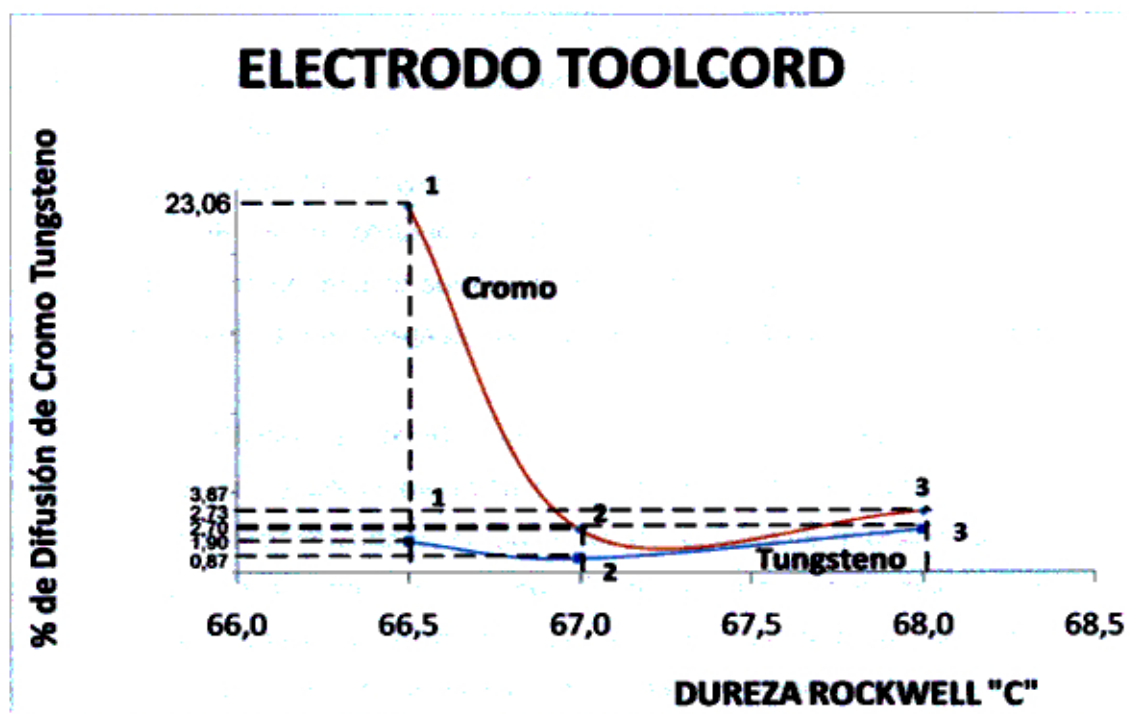
5.3.1 **DIAGRAMA Nº 17 DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO DIN E-6-60 (64w) c-CITODUR 600**



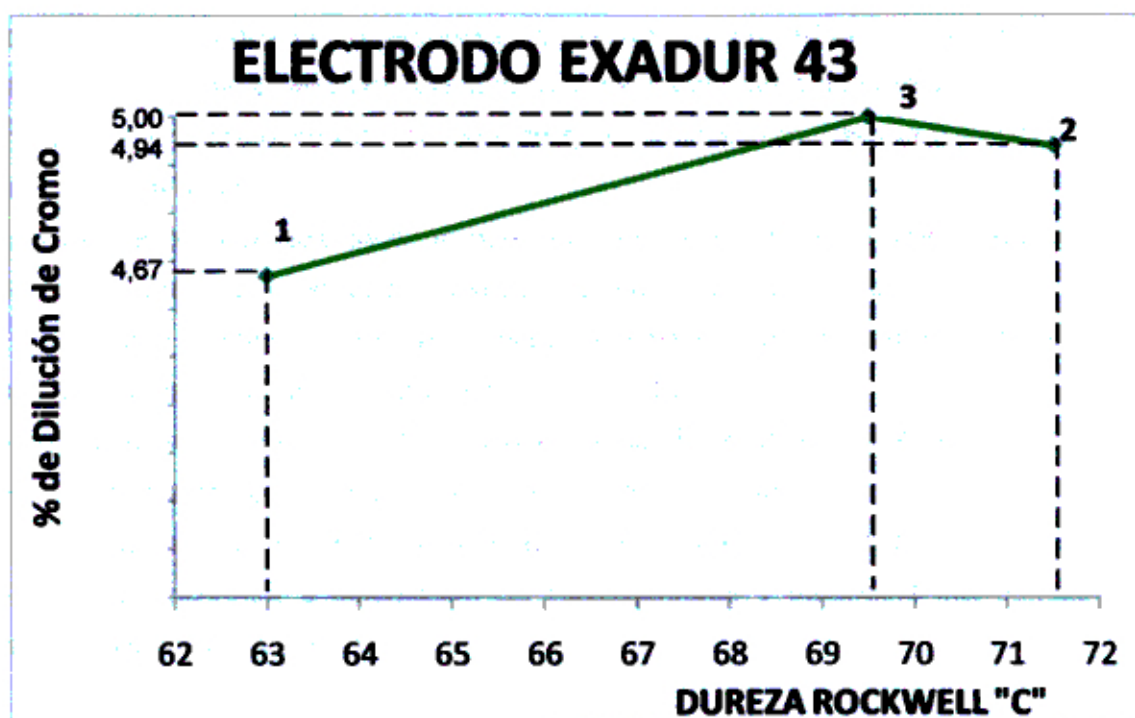
5.3.2 **DIAGRAMA Nº 18 DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO DIN E-10-65 cz – CITODUR 1000**



5.3.3 DIAGRAMA N° 19 DE DILUCIÓN DE CROMO Y TUNGSTENO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO E-4-60 (65 W) st - TOOLCORD



5.3.4 DIAGRAMA N° 20 DE DILUCIÓN DE CROMO VS. DUREZA EN LAS CAPAS DEPOSITADAS CON ELECTRODO EXADUR 43



CONCLUSIONES

1. En el presente trabajo de investigación, se ha demostrado que el factor más importante para determinar la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo de aleaciones de carburo de cromo y carburo de tungsteno es la microestructura y no la dureza.
2. La variable de mayor importancia determinada en el ensayo de abrasión de bajo esfuerzo es el contenido de carbono y carburos primarios de cromo de matriz hexagonal, que presentan mayor resistencia a la abrasión, como es el caso del electrodo EXADUR 43 (Microfotografías N° 23 y 24).
3. Los electrodos de recubrimiento superficial deben seleccionarse en función: del metal base, de los factores de desgaste que involucran y del acabado de la pieza a recuperar.
4. Los efectos de dilución se pueden disminuir al seleccionar electrodos de mayor contenido de carbono y cromo, para obtener una mejor microestructura
5. De los resultados experimentales, en particular del ensayo de abrasión, se determina que los electrodos Norma DIN E-4-60 (65w)-Toolcord y Electrodo Exadur 43 presentan mayor resistencia a la abrasión por contener carburos de tungsteno y carburos de cromo, de matriz austenítica hexagonal que presenta alta dureza.
6. Se ha demostrado que el proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW) sigue siendo el proceso de soldadura de mayor aplicación en el Perú, para depositar recubrimientos duros a menor costo y por su fácil aplicación.
7. Se ha demostrado que la resistencia a la abrasión de los electrodos de recubrimientos protectores fabricados por la empresa SOLDEXA – OERLIKON (Perú) satisface los estándares internacionales por presentar una microestructura de carburos de cromo y tungsteno de matriz poligonal (hexagonal) que tienen alta resistencia a la abrasión y presentan alta dureza.
8. La investigación realizada confirma que: a mayor cantidad de cordones depositados, se produce mayor difusión de carbono y dilución de elementos aleantes.
9. Al recubrir con electrodo EXADUR 43, el número máximo de capas a depositar es dos; en la tercera capa aplicada produce fisuras. (Fig. 35)
10. Se ha demostrado experimentalmente la influencia de la difusión de carbono y dilución de elementos aleantes, en la dureza de las probetas ensayadas.
11. El equipo de ensayo de abrasión diseñado y construido cumple con la Norma ASTM G-65, y se encuentra a disposición de investigadores y empresas interesadas en realizar ensayos de abrasión.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMB. Associacao Brasileira do Metais
Tecnología de Soldagen. Ed. Artes Gráficas Sau Paulo – 1979.
- [2] American Welding Society
Manual de Soldadura. Ed. Prentice Hispano Americana S.A. México
Tomo I, II y III (1991).
- [3] American Society For Metal
"Metal Handbook". Ed. ASM - USA 1998 6^{ta} Edición.
- [4] American Welding Society
"Welding Handbook". Ed. AWS USA 2000 9^{na} Edición.
- [5] American Welding Society
"The Practical Welding". Engineer" Ed. AWS - USA 2000.
- [6] American Welding Society
"Welding. Metallurgy". ED. AWS USA 1995 4ta edición.
- [7] American Welding Society
Extructural Welding. Code Steel D1.1. 2004.
- [8] American Welding Society
"Materials and Applications" Part 1 Welding Handbook, 8th.
Ed. Vol.3 – 1998.
- [9] American Welding Society
Guide for Welding Iron Castings. ED AWS 1989.
- [10] American Welding Society
"Welding. Processes Welding". Handbook, 8th. Ed Aws Vol. 2" 1985.
- [11] American Welding Society.
Welding Journal Agosto 1995. Dj Cotecki y Js Oeborn: *La resistencia a la
abrasión de aleaciones a bajo de hierro para recubrimiento protector.*
- [12] Augus H.T.
La resistencia al desgaste. Ed. Butterworth Londres – 1970.
- [13] American Society for metal
Metal handbook. Ed. ASM Vol. I.
- [14] American Society For Metal Handbook
"Hard Facing". By ARC Welding Vol. 6.

- [15] American Welding Society
"Welding Journal": Selección y uso de aleaciones para recubrimiento protector, Rj. Dawson, 1982.
- [16] American Welding Society welding Journal 1980
Pequeños talleres de recubrimientos duros mantienen en marcha a grandes empresas. Robert. N. Williams.
- [17] American Welding Society
Cuarenta maneras para mejorar su operación de recubrimiento protector. R.L. Chavanne USA 1980.
- [18] American Welding Society
"Welding Inspección Handbook". Ed. AWS. USA 2000 3^{ra} Edición
- [19] Apráiz Barreiro José
Aceros especiales. Ed. Dossat Madrid España 1971
- [20] ASTM
"Estandar practice abrasion test" G 65 – 85 Ed. ASTM 1999.
- [21] Askeland D.
Ciencia e Ing. de Materiales. Ed. Thomson 3^{ra} Edición México, 1998.
- [22] Avner
Introducción a la Metalurgia Física. Ed. Interamericano, México, 1980.
- [23] Blanc G.M.
Recargue y recubrimientos. Journal Soudure Paris, 1964.
- [24] Benz Zahner (Revista)
Teoría de desgaste. Stoody Company, USA, 1996.
- [25] Cabrera Sandoval, Manuel
Consideraciones metalúrgicas en la aplicación de recubrimientos duros para la recuperación y protección de materiales ferrosos que trabajan en medios altamente abrasivos. I Simposium Nacional de Ingeniería Metalúrgica 1983.
- [26] Calderón Celis, Marilú
Modelo Uliram para determinar nuevas composiciones químicas para materiales de aporte. Lima, 2004.

- [27] Dan Arthur
"Does Moly Improve Hardfacing Filler Metals" Welding Journal 1995.
- [28] Damodaran Raghu
"Proves ITS Worth In High –Volume Hardfacing Jobs". Welding Journal, 1996.
- [29] Edward M.
Aplicación de las técnicas de recubrimientos en construcciones metálicas. París, 1967. Soldage Et. Techniques Connexes.
- [30] Espinoza Beltrán
Nuevos materiales superduros. Revista de Avances y Prospectivas. México, 2004.
- [31] Fernández Flores, Guillermo
Metalurgia y Soldadura. Ed. COLSA, México, 1981.
- [32] Fosca Pastor, Carlos
Metalurgia de la soldadura. Ed. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [33] Giachino, Joseph W.
Técnica y práctica de soldadura. Ed. Reverte S.A. España, 2000.
- [34] Hernández Riesco, Germán
Manual de Soldadura. Ed. CESOL, Madrid, 2001.
- [35] Horwitz, Henry
Soldadura y práctica. Ed. Alfa Omega México D.F. 1990.
- [36] INDURA
Manual de la soldadura. Santiago de Chile, 1997.
- [37] INDURA INFORMATIVO MENSUAL
Recubrimiento y recuperación de piezas.
Santiago de Chile, 1997.
- [38] Kenneth, C. Ludems
Desgaste. Universidad de Michigan, USA, 1999.
- [39] Koch, Helmut
Manual de la tecnología de soldadura por arco. Ed. Reverte España, 1965.

- [40] MCKAY
Características de metalurgia y desgaste de depósitos para recubrimientos duros. USA, 1967.
- [41] MCKAY
Mantenimiento y reparación de triturador de rodillos. USA, 1970.
- [42] MCKAY
Aplicación de recubrimientos protectores, VI Simposio Internacional de Soldadura. Lima, Perú-2004.
- [43] Moino, Paulo
Análisis de Factores que Influyen en el desgaste. IV Simposio Internacional de Soldadura. Lima, Perú-1998.
- [44] OERLIKON
Manual de soldadura eléctrica. Lima, Perú-1998.
- [45] OERLIKON
Catálogo de Soldaduras Especiales. Lima, Perú-2000.
- [46] OERLIKON
SCHWEISSELEKTRODEN, Zurit, 1980.
- [47] OERLIKON
Teoría de desgaste y soluciones. Centro Tecnológico EXSA, Lima-Perú, 1990.
- [48] OERLIKON
Soldaduras especiales en mantenimiento de equipos-mineros. Herrera M. Lima, Perú-1999.
- [49] Pender, James
Soldadura. Ed. Mc Graw Hill, México, 1990.
- [50] Pirede, Máximo
Manual de soldadura eléctrica. Ed. LIMUSA México, 1981.
- [51] Portocarrero
Estudio de la resistencia al desgaste abrasivo de bajo y alto esfuerzo de las microestructuras de depósitos de recubrimiento duro de alto carbono. Ed. UNI-VALLE, Bogotá-Colombia.

- [52] Ravi Menon
"New Developments In Hardfacing. Alloy - Welding Journal, 1980.
- [53] Sarkar A.D.
Desgaste de metales. Ed. Continental, España, 1997.
- [54] Seferian, Daniel
Metalurgia de la soldadura. Ed. Tecnos S.A: Madrid, 1962.
- [55] Seferian, Daniel
Las soldaduras técnicas control. Ed. URMO, España, 1981.
- [56] The Lincoln Electric Company
The Procedure Handbook of ARC. Welding, USA, 1973.
- [57] The Lincoln Electric Company
Metal How To Weld Them, USA, 1979.
- [58] Smith, W.
Fundamento de la Ciencia e Ing. de Materiales. Ed. Mc Graw Hill, México, 2007.

INTERNET - INFOREFERENCIAS

1. Cormet "Harfacine Alloys for Abrasion and impact"
www.cormet.com/hardface.htm
2. Monografias.com
www.monografias.com/trabajos7/elecnev/elecnev.shtml
3. Recubrimientos duros
www.westarco.com/rode/recubri.pdt
4. Surface treating casting, molding, machining industrial
www.interactiva.org/business_industrial
5. Untitled Document
Memo.univalle.edu.co/cim/dureza.htm