

I.- ÍNDICE

1.- Resumen / Abstract	1
2.- Introducción y objetivos	3
2.1.- Introducción.....	3
2.2.- Motivación.....	3
2.3.- Objetivos del estudio.....	4
3.- Estado del conocimiento	7
3.1.- El proceso de producción de la escoria.....	7
3.2.- Caracterización básica de la escoria de horno de arco eléctrico.....	10
3.2.1.- Caracterización física.....	10
3.2.2.- Caracterización química y mineralógica.....	11
3.3.- El problema de la estabilidad volumétrica de la escoria de acero de horno de arco eléctrico.....	13
3.3.1.- Origen químico de la expansividad volumétrica.....	13
3.3.2.- Clasificación de la escoria de acería según su potencial expansivo. Normas UNE y PG-3.....	15
3.3.3.- Métodos de tratamiento de la escoria de acería de horno de arco eléctrico a nivel mundial.....	17
4.- Plan y procedimiento de trabajo	21
5.- Ensayos de laboratorio	23
5.1.- Identificación visual de las submuestras.....	23
5.2.- Granulometría.....	24
5.2.1.- Partículas 0/70 continuo.....	24
5.2.2.- Partículas de diámetro superior a 5,6 mm.....	26
5.2.3.- Partículas de diámetro inferior a 5,6 mm.....	27
5.3.- Análisis de densidades, absorción y porosidad.....	27
5.3.1.- Densidades.....	28
5.3.1.1.- Método de la balanza hidrostática.....	28
5.3.1.2.- Método del picnómetro.....	29
5.3.2.- Absorción y porosidad.....	29
5.3.3.- Resultados.....	30
5.4.- el ensayo de estabilidad volumétrica.....	31
5.4.1.- Descripción del ensayo de estabilidad volumétrica normalizado UNE-EN 1744-1.....	31
5.4.2.- Observaciones sobre el ensayo de expansividad normalizado UNE-EN 1744-1.....	34
5.4.3.- Otros métodos de determinación de la estabilidad volumétrica en escorias de acería.....	37
5.4.4.- Variaciones propuestas del ensayo UNE-EN 1744-	

1 para el estudio de la estabilidad volumétrica por granulometrías.....	39
5.4.5.- Ejecución, resultados y análisis datos.....	41
5.4.5.1.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre todo-uno siderúrgico.....	41
5.4.5.1.1.- Diseño de la granulometría de la muestra.....	41
5.4.5.1.2.- Ficha técnica del ensayo.....	41
5.4.5.1.3.- Resultados e interpretación.....	44
5.4.5.1.4.- Análisis de datos.....	45
5.4.5.1.5.- Estudio de las posibilidades predictivas de la regresión no lineal sobre el comportamiento volumétrico de la escoria en el ensayo de vapor.....	49
5.4.5.2.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre muestra con 0/5,6 siderúrgico y 5,6/22 inerte.....	54
5.4.5.2.1.- Diseño de la granulometría de la muestra.....	54
5.4.5.2.2.- Ficha técnica del ensayo.....	56
5.4.5.2.3.- Resultados e interpretación.....	58
5.4.5.2.4.- Análisis de datos.....	59
5.4.5.3.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre muestra con 0/5,6 inerte y 5,6/22 siderúrgico.....	62
5.4.5.3.1.- Diseño de la granulometría de la muestra.....	62
5.4.5.3.2.- Ficha técnica del ensayo.....	63
5.4.5.3.3.- Resultados e interpretación.....	65
5.4.5.3.4.- Análisis de datos.....	66
5.5.- Estudio de composición química.....	67
5.5.1.- Objetivos.....	67
5.5.2.- Fundamentos del método de la fluorescencia.....	68
5.5.3.- Preparación de muestras.....	69
5.5.4.- Resultados e interpretación.....	71
5.6.- Estudio de composición mineralógica.....	72
5.6.1.- Objetivos.....	72
5.6.2.- Fundamentos de la difracción.....	72
5.6.3.- El método del polvo cristalino.....	73
5.6.4.- Preparación de muestras.....	75
5.6.5.- Resultados e interpretación.....	75
5.7.- Observaciones con el microscopio digital	78
6.- Análisis global de resultados.....	81
6.1.- Estudio de la superficie específica aportada por cada huso granulométrico en el ensayo de estabilidad volumétrica UNE-EN 1744-1.....	81
6.2.- Comparación e interpretación de los distintos fenómenos expansivos observados, a la luz de los demás ensayos y resultados.....	82
7.- Conclusiones.....	85
8.- Algunas sugerencias para futuras investigaciones.....	87

9.- Referencias bibliográficas.....	89
--------------------------------------------	-----------

II.- LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Horno de arco eléctrico y horno de afino.....	9
Figura 2.- Aspecto de la escoria negra.....	11
Figura 3.- Aspecto de la escoria blanca, con impurezas de hierro y escoria negra.....	11
Figura 4.- Aumento de volumen del hierro en función del estado de oxidación.....	14
Figura 5.- Cuarteador.....	21
Figura 6.- Tamizador.....	21
Figura 7.- Vista general de una escoria siderúrgica 0/70	23
Figura 8.- Heterogeneidad de distintas partículas de escoria siderúrgica de horno de arco eléctrico.....	23
Figura 9.- Heterogeneidad de los finos siderúrgicos.....	23
Figura 10.- Curva granulométrica fracción 0/70 mm.....	24
Figura 11.- Curva granulométrica fracción 0/22 mm.....	25
Figura 12.- Comparación curva granulométrica 0/22 con una ZA-20.....	25
Figura 13.- Curva granulométrica fracción 5,6/70 mm.....	26
Figura 14.- Curva granulométrica fracción 5,6/22 mm.....	26
Figura 15.- Curva granulométrica fracción 0/5,6 mm.....	27
Figura 16.- Criba de lavado.....	29
Figura 17.- Picnómetro.....	29
Figura 18.- unidad de vapor UNE-EN 1744-1.....	31
Figura 19.- Sección de una unidad de vapor.....	32
Figura 20.- Partes del cilindro de estabilidad volumétrica.....	32
Figura 21.- Comparativa entre la granulometría de ensayo y una ZA-25	34
Figura 22.- Comparativa entre la granulometría de ensayo y una ZA-20	35
Figura 23.- Comparación entre una explanada E3 para tráfico T00 y un cilindro de estabilidad volumétrica.....	35
Figura 24.- Comparativa entre la granulometría de ensayo y una ZA-40	36
Figura 25.- Superficie de esferas de vidrio donde se aprecia una mayor concentración de aceite quemado en la zona perimetral.....	43
Figura 26.- Papel de filtro sobre la muestra de escoria. Se aprecia un círculo de color óxido en la zona más exterior.....	43
Figura 27.- Superficie de la muestra de escoria donde se aprecian productos blanquecinos y de color óxido formados durante el ensayo....	43
Figura 28.- Interior de la muestra de escoria. Se observa una tonalidad más oscura en el centro a causa de que posee una mayor humedad.....	43
Figura 29.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre muestra 0/70.....	29
Figura 30.- Típico incremento de volumen de una escoria de acero según Motz y Geiseler.....	46
Figura 31.- Regresión no lineal sobre el ensayo de estabilidad volumétrica UNE-EN 1744-1 realizado sobre una muestra de granulometría original 0/70.....	49
Figura 32.- Comportamiento volumétrico de la escoria durante las primeras 24 horas del ensayo de estabilidad volumétrica UNE-EN	

1744-1.....	50
Figura 33.- Intento predictivo del comportamiento volumétrico de la escoria a partir de los datos obtenidos las 168 primeras horas de ensayo.....	52
Figura 34.- Intento predictivo del comportamiento volumétrico de la escoria a partir de los datos obtenidos hasta la estabilización del primer cilindro.....	54
Figura 35.- Variación de la curva granulométrica para el ensayo material fino-siderúrgico, material grueso inerte.....	55
Figura 36.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre muestra fina-siderúrgica y gruesa-caliza.....	58
Figura 37.- Regresión no lineal sobre el ensayo de estabilidad volumétrica UNE-EN 1744-1 realizado sobre una muestra de granulometría fina-siderúrgica y gruesa-caliza.....	61
Figura 38.- Variación de la curva granulométrica para el ensayo material fino-inerte y grueso-siderúrgico.....	63
Figura 39.- Ensayo de estabilidad volumétrica sobre muestra gruesa-siderúrgica y fina-caliza.....	65
Figura 40.- Expansión de la escoria de mayor diámetro (25,4 a 50,8mm) al someterla al ensayo ASTM D 4792/1995 después de triturarla a diámetro 0 a 25,4 mm, según Mancio (2001).....	66
Figura 41.- excitación y emisión de electrones tras el bombardeo del átomo con un haz de fotones de rayos X o electrones.....	68
Figura 42.- Molino de impacto.....	69
Figura 43.- Tamizado del material a través del tamiz 0,063 mm.....	69
Figura 44.- Balanza de alta precisión.....	70
Figura 45.- Vertido del crisol sobre el plato.....	70
Figura 46.- Aspecto de una perla vítrea ligeramente pegada al fondo del plato.....	70
Figura 47.- Difracción de rayos X.....	72
Figura 48.- Muestra en la cámara de polvo.....	73
Figura 49.- Entrada y salida del haz de Rayos X en la película fotográfica.....	73
Figura 50.- Impresión de los haces de rayos X sobre la película fotográfica.....	74
Figura 51.- Muestra de los productos de expansividad preparada para el ensayo de difracción.....	75
Figura 52.- Difractómetro de rayos X.....	75
Figura 53.- Difractograma fracción 0/70 antes del ensayo de estabilidad volumétrica.....	77
Figura 54.- Difractograma fracción 0/70 después del ensayo de estabilidad volumétrica.....	77
Figura 55.- Difractograma fracción 5,6/70 antes del ensayo de estabilidad volumétrica.....	77
Figura 56.- Difractograma de la fracción 0/5,6 después del ensayo de estabilidad volumétrica.....	78
Figura 57.- Difractograma de los productos blanquecinos aparecidos durante el ensayo de estabilidad volumétrica.....	78
Figura 58.- Grano blanquecino con impurezas negras visto con el microscopio a 8x.....	79

Figura 59 - Afloración blanquecina en la superficie de un grano de escoria visionado a 10x.....	79
Figura 60.- Grano de escoria totalmente recubierto por un manto blanco visionado a 12x.....	79
Figura 61.- Afloración color óxido en la superficie de un grano de escoria visionado a 12.5x.....	79
Figura 62.- Partículas metálicas vistas por el microscopio a 12x.....	79
Figura 63.- Partícula metálica contemplada por el microscopio a 60x.....	79

III.- LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades físicas de la escoria.....	10
Tabla 2.- Caracterización química de la escoria.....	12
Tabla 3.- Diferencias químicas entre la escoria negra y blanca.....	12
Tabla 4.- Resumen de los factores que actúan sobre la estabilidad volumétrica.....	15
Tabla 5.- Clasificación de las escorias por su potencial expansivo según la norma UNE-EN 146130.....	16
Tabla 6.- Clasificación de las escorias por su potencial expansivo, según la norma UNE-EN 13242.....	16
Tabla 7.- Especificaciones normativas sobre el tratamiento de la escoria a nivel internacional.....	18
Tabla 8.- Densidad, absorción y porosidad de los áridos.....	30
Tabla 9.- Granulometría de ensayo.....	33
Tabla 10.- Principales ensayos sobre muestras confinadas en matriz ligante y partículas sueltas.....	39
Tabla 11.- Ficha técnica del ensayo sobre el todo-uno siderúrgico.....	42
Tabla 12.- Parámetros estadísticos del ensayo de estabilidad volumétrica realizado sobre la fracción 0/70.....	45
Tabla 13.- Estimación de los parámetros.....	47
Tabla 14.- Estudio de la varianza (Anova).....	47
Tabla 15.- Estimación de los parámetros.....	47
Tabla 16.- Estudio de la varianza (Anova).....	48
Tabla 17.- Estudio de la varianza (Anova).....	51
Tabla 18.- Estudio de la varianza (Anova).....	51
Tabla 19.- Comparación de parámetros.....	51
Tabla 20.- Estudio de la varianza (Anova).....	52
Tabla 21.- Estudio de la varianza (Anova).....	52
Tabla 22.- Comparación de parámetros.....	53
Tabla 23.- Ficha técnica del ensayo realizado con fino-siderúrgico y grueso-calizo.....	57
Tabla 24.- Parámetros estadísticos del ensayo de estabilidad volumétrica realizado sobre la fracción fina-siderúrgica y gruesa-caliza..	59
Tabla 25.- Estimación de parámetros.....	59
Tabla 26.- Estudio de la varianza (Anova).....	59
Tabla 27.- Estimación de los parámetros.....	60
Tabla 28.- Estudio de la varianza (Anova).....	60
Tabla 29.- Ficha técnica del ensayo realizado con finos calizos y gruesos siderúrgicos.....	64
Tabla 30.- Parámetros estadísticos del ensayo de estabilidad volumétrica realizado sobre la fracción fina-siderúrgica y gruesa-caliza..	67
Tabla 31.- Composición química de la escoria.....	71
Tabla 32.- Mineralogía detectada en las distintas muestras analizadas..	76