

# **ANÁLISIS GEOMECÁNICO DE ESCORIAS DE ACERÍA. POSIBILIDADES DE USO EN OBRAS VIALES**

**MARIO VALENZUELA O., Ingeniero Civil, Profesor Depto. Ingeniería Civil**  
Universidad de Concepción, [marioval@udec.cl](mailto:marioval@udec.cl)

**PEDRO TOLEDO R., Ingeniero Civil Químico, Profesor Dpto. Ingeniería Civil Química**  
Universidad de Concepción, [petoledo@udec.cl](mailto:petoledo@udec.cl)

**MAURICIO HERMOSILLA S., Ingeniero Civil, Profesor Departamento Ingeniería Civil**  
Universidad de Concepción, [mahermos@udec.cl](mailto:mahermos@udec.cl)

**ANGIELLO SAFFIRIO JAQUE., Alumno Memorista, Departamento Ingeniería Civil**  
Universidad de Concepción.

## **RESUMEN**

Se presentan los resultados de la caracterización mecánica del material denominado Escoria de Acería, subproducto proveniente de la fabricación de acero en la Siderúrgica Huachipato, ubicada en la Octava Región de Chile.

Mediante el resultado de un programa clásico de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y luego mediante ensayos físico-químicos de última generación, realizados en los laboratorios de la Universidad de Concepción, se han establecido las posibilidades de uso que tienen las Escorias de Acería como material alternativo en la construcción de bases y sub-bases de pavimentos.

Finalmente, a escala de laboratorio, se ha realizado una estabilización de superficie mediante la oxidación acelerada de las escorias, a objeto de minimizar la tendencia a la hidratación y cementación que presenta este material compactado en obra y expuesto al intemperismo. Los resultados obtenidos indican que sí es posible pensar en la estabilización comercial del producto.

## **1. INTRODUCCION**

En la Compañía Siderúrgica Huachipato, ubicada en la octava región de Chile, como subproducto del proceso de fabricación del acero, se generan importantes cantidades de un material granular denominado “Escoria de Acería”.

En la zona, la escoria de acería se ha utilizado en la construcción de Bases y Sub-Bases de pavimentos, como también en carpetas de rodados granulares, tanto en obras del MOP como en obras privadas, principalmente en el ámbito forestal.

También es sabido que después de la colocación y compactación en obra, ocurren reacciones de cementación e hidratación que podrían ser favorables en el caso de carpetas de rodado granular o canchas de acopio, pero a veces, han sido la causa principal en el agrietamiento o deformación prematura de pavimentos. La caracterización y evaluación de los parámetros de diseño, obtenidos a través de las clásicas metodologías de la mecánica de suelos, particularmente los requisitos de calidad referenciados en el Volumen 5 del Manual de Carreteras, no entregan información suficiente que permita tomar decisiones respecto de la estabilidad del material en el tiempo y por tanto predecir el comportamiento futuro de los pavimentos. Así, por muchos años, la utilización de la escoria y el control respecto de las probables reacciones de cementación e hidratación se han manejado sin una evaluación físico-química del material, quedando su uso, aceptación o rechazo, fundamentado en el conocimiento empírico y a la buenas o malas experiencias de los usuarios.

En el presente estudio, aparte de la caracterización mecánica clásica y su discusión, se investiga la composición química del material mediante ensayos de última generación y se estudian las posibles reacciones que ocurrirían in situ. Se entrega una metodología de laboratorio sencilla, realizada bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, que permite inferir la susceptibilidad a la hidratación que pueda presentar una partida de este material.

## 2. CARACTERIZACION GEOMECANICA

Se ha realizado un muestreo normado desde los acopios de la empresa concesionaria Heckett Multiserv, de la banda comercial (0"-2") utilizada principalmente en la construcción de Bases y Sub-Bases, para luego, mediante una metodología clásica de laboratorio, determinar las características ingenieriles del material. Los resultados son los siguientes:

**TABLA 1 : Ensayos Granulométricos (Norma LNV 105-86) y Clasificación USCS**

<b>Criba</b>	<b>(% en peso que pasa por la malla)</b>
2"	98
1 1/2"	92
1"	79
3/4"	68
1/2"	53
3/8"	42
N°4	27
N°10	20
N°40	11
N°200	5
Indice de Plasticidad IP	N.P.
Peso Específico, Gs	3.65
Clasificación USCS	GP

**TABLA 2 : Ensayo de Compactación Proctor Modificado y CBR (Norma LNV 92-85)**

DMPM (Kg/cm <sup>3</sup> )	W optima (%)	CBR (%)
2.620	7.9	134

CBR determinado al 95% DMPM para 0.2" de penetración. No se observa hinchamiento después de la saturación

**TABLA 3 : Ensayo de Desgaste, Método de Los Ángeles (Norma LNV 75-84)**

Grado de Ensayo	Pérdida de Masa (%)
4	18

**TABLA 4 : Ensayo de Permeabilidad, Método de Carga Constante**

Grado de Compactación	K (cm/sg)
95 % DMPM	$2.70 \cdot 10^{-3}$

#### **Potencial de Hinchamiento (PVC)**

Este ensayo, realizado en acuerdo a las recomendaciones de la FHA C-260 (Federal Housing Administration, USA), utilizado principalmente para cuantificar la potencialidad de cambio volumétrico producto del hinchamiento que presentan las arcillas, no ha pesquisado ningún grado o cambio de volumen en las escorias.

#### **Sales Solubles (Norma LNV 8-84)**

El contenido de sales solubles se ha determinado en 0.21%. Este resultado indica que los cloruros y sulfatos solubles en agua presentes en la muestra son muy pequeños.

#### **Resultados de la Caracterización Mecánica**

A la vista de los resultados obtenidos en la caracterización mecánica, se puede inferir que el material cumple plenamente con las exigencias del Manual de Carreteras del MOP. Sin embargo, el hecho que las escorias, no pocas veces, presenten reacciones de cementación e hidratación en obra, indica que los análisis convencionales de la mecánica de suelos no interpretan correctamente, o no son suficientes para comprender el comportamiento de estos materiales.

### **3. ANÁLISIS QUÍMICOS**

#### **3.1. Análisis Superficial (XPS)**

La Espectroscopía de Fotoelectrón de Rayos X (XPS) tiene como característica principal el análisis atómico de superficie, que permite determinar la composición y concentración de elementos y compuestos superficiales. Decapados sucesivos del material (entre 6 a 10 capas

atómicas) mediante bombardeo con iones argón, permiten construir un perfil de concentración hacia el interior del material. Este tipo de análisis es de última generación y se realiza en los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción. En lo principal, la interpretación de los análisis es la siguiente :

- La escoria presenta en su superficie una capa de polvo de color blanco, la cual es rica en carbonatos, óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio. Estos elementos son solubles en medios ligeramente ácidos e inestables a temperaturas sobre los 60°C.
- El análisis XPS sobre una superficie fresca y limpia, que no reacciona frente a ácidos, revela la presencia de C, O, Si, Ca como elementos principales y Mg, Fe, Mn, V y Cl como elementos secundarios. La escoria es rica en silicatos insolubles y térmicamente estables. La concentración atómica superficial se indica a continuación:

Mg	Fe	Mn	O	V	Ca	C	Cl	Si
1.70	3.15	0.27	50.69	0.61	21.79	18.54	0.76	2.49

- Hacia el interior del material, se detectó un aumento en la concentración atómica de óxidos de calcio y una disminución de carbonatos de calcio. También se encuentra una cantidad decreciente de la concentración de carbono que se distribuye en ácidos carboxílicos, alcoholes, ésteres y cadenas alifáticas, todos compuestos orgánicos propios del ambiente industrial desde dónde se obtiene la escoria de acería.
- Existe una alta presencia de fases compuestas de silicatos insolubles y estables a temperaturas mayores a los 1200°C otorgándole a las escorias un esqueleto mineral altamente resistente contra los agentes mecánicos, situación favorable para que este material sea utilizado como elemento granular en obras de ingeniería.

### 3.2. Análisis Químicos de Bulto o Convencionales

Para la realización de estos ensayos las muestras fueron trituradas y sometidas a molienda en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la universidad de Concepción, hasta llegar a una granulometría extremadamente fina (todo el material bajo malla N°200). Se debe tener presente que la caracterización de las concentraciones globales pueden diferir de las determinadas mediante XPS en la superficie de las escorias.

La denominación de las muestras analizadas es:

**MQ1:** Muestra de Escoria Nueva o Fresca, sin tratamientos previos

**MQ2:** Muestra de Escoria Vieja (más de 6 meses en acopio), sin tratamientos previos

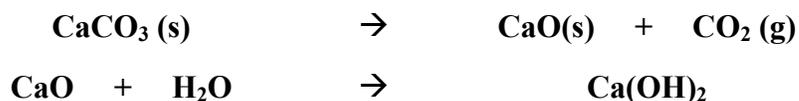
**TABLA 5 : Resultados Análisis Químicos Escorias Sin Tratamiento**

<b>Elementos Químicos(%)</b>	<b>Escorias Nuevas MQ1</b>	<b>Escorias Viejas MQ2</b>
CaCO <sub>3</sub>	9.12	9.26
MgCO <sub>3</sub>	1.27	0.92
CaO	26.18	32.95
MgO	7.52	4.87
SiO <sub>2</sub>	10.93	8.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.33	1.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.6	29.86
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.39	0.13
TiO <sub>2</sub>	1.2	1.08
MnO	2.84	2.84
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.029	4.55
K <sub>2</sub> O	0.024	0.014
P.H.	11.58	12.36
P.P.C.	5.68	6.91

**Comentarios:**

El análisis de los ensayos ha permitido identificar que los elementos inestables y causantes de los cambios volumétricos de expansión son la concentración de carbonatos de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y la concentración de óxidos de calcio (CaO).

Las ecuaciones estequiométricas que explican la reacción de estos elementos frente al intemperismo son:



De las ecuaciones se observa que la reacción casi espontánea del CaCO<sub>3</sub> tiende a la formación de óxidos de calcio CaO (cal libre) y a la liberación de dióxido de carbono CO<sub>2(G)</sub> en forma de gas. Luego, si existe disponibilidad de agua, la cal libre presentará una reacción de hidratación. Es importante indicar que las reacciones descritas anteriormente se ven favorecidas en ambientes ácidos y a temperaturas relativamente bajas (60°C).

Se estima que la ocurrencia de estas reacciones en obra traen aparejado los problemas de cementación e hidratación del material. La mitigación de este efecto, hace pensar en la estabilización de las escorias, antes de su aplicación en obra.

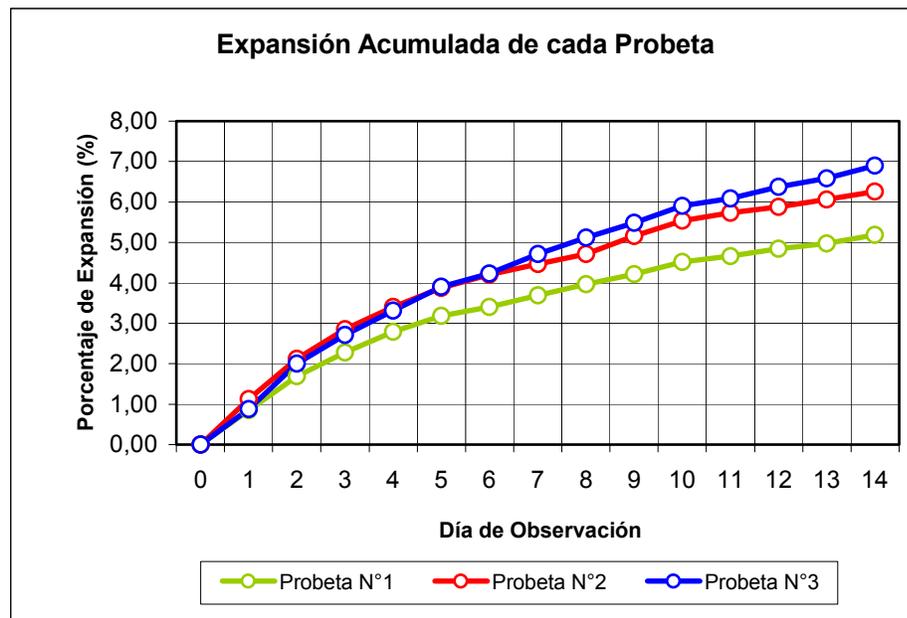
Como antecedente adicional, conviene indicar que el análisis y evaluación de la relación Sílice – Sesquióxidos, utilizada tradicionalmente en ingeniería vial para estudiar la posibilidad de degradación química en un suelo, no ha sido clara o no entrega información en el presente caso.

#### 4. MEDICION DEL POTENCIAL DE HIDRATACIÓN

Para medir o cuantificar la expansión que es capaz de sufrir una muestra compactada en laboratorio, se ha recurrido al ensayo ASTM D-4792 “Expansiones Potenciales en Agregados por Efectos de Hidratación”. Este ensayo de expansión realizado bajo condiciones controladas de humedad y temperatura (sobre 60°C), fue realizado en el laboratorio zonal del IDIEM. Los resultados son los siguientes:

**TABLA 6 : Expansión Total Acumulada. Muestras sin Tratamiento**

Probeta N°	Densidad compactada seca (Kg/cm3)	Expansión a los 14 días (%)
1	2.838	5.19
2	2.820	6.26
3	2.793	6.9



**GRÁFICO 1 : Expansiones acumuladas. Muestras sin tratamientos**

Las deformaciones encontradas en las tres probetas obedecen a una misma tendencia, esto nos indica que el comportamiento de las escorias frente al proceso de hidratación es el mismo.

Durante los primeros dos días se observan expansiones fulminantes, llegando a un máximo de 1.12% en la probeta N°2. Además, del gráfico se observa que a la fecha de término del ensayo el proceso de expansión aún no se ha estabilizado.

En promedio, la expansión acumulada resultó de un 6.12% , muy superior al 0.50 % permitido por la norma ASTM D-4792.

## 5. TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE MUESTRAS EN LABORATORIO

El ensayo propuesto por ASTM ha podido confirmar y cuantificar la alta susceptibilidad a la expansión que le provee a la escoria el proceso de oxidación e hidratación. Por lo tanto, cualquier intento de utilización de este material como base o sub-base de pavimentos, pasa obligadamente por un proceso de estabilización química.

En una etapa muy primaria del estudio se ha propuesto, a escala de laboratorio, un tratamiento superficial basado principalmente en la inmersión de muestras en agua previamente acidulada (concentración 0.1 molar de ácido clorhídrico, Ph=1) y mantenida a una temperatura entre 60°C y 80°C durante 14 días.

Es importante indicar que durante el proceso de inmersión se observó una rápida disolución de sales, formando una delgada costra en la superficie del agua. Las muestras de escoria adquirieron un cambio de color en la superficie de los granos, asemejándose a la oxidación de un metal.

Las muestras así tratadas, fueron nuevamente sometidas a ensayos químicos de bulto y a los ensayos de expansión descritos anteriormente (ítem 4). La partida y denominación de muestras ensayadas es la siguiente :

- MQ3 Muestra de Escoria Nueva , tratada
- MQ4 Muestra de Escoria Vieja (más de 6 meses), tratada

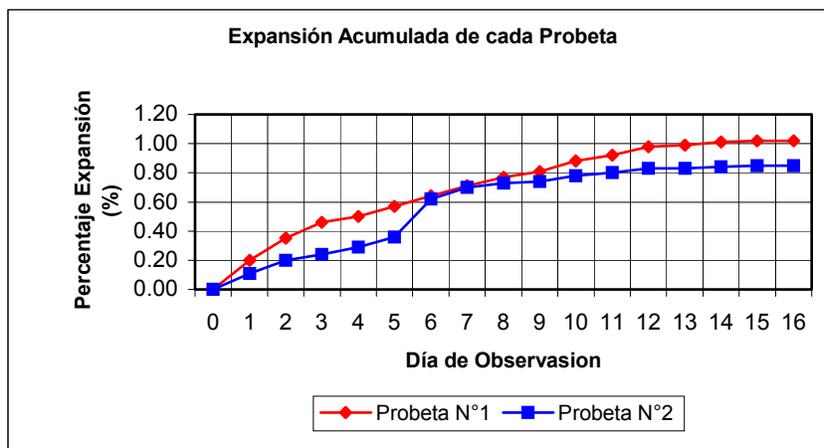
**TABLA 7 : Resultados Ensayos Químicos de bulto. Escorias con Tratamientos**

<b>Elementos Químicos(%)</b>	<b>Escorias Nuevas MQ3</b>	<b>Escorias Viejas MQ4</b>
CaCO <sub>3</sub>	<b>7.9</b>	<b>5.08</b>
MgCO <sub>3</sub>	1.4	0.46
CaO	<b>28.76</b>	<b>38.15</b>
MgO	7.58	4.94
SiO <sub>2</sub>	10.78	8.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.86	1.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.03	30.55
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.14
TiO <sub>2</sub>	1.18	1.03
MnO	3.1	3.19
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.19	4.68
K <sub>2</sub> O	0.023	0.012
P.H.	12.32	12.53
P.P.C.	4.06	3.17

La aceleración del proceso de oxidación provocado por la combinación de saturación, ambiente ácido y temperatura, se ha traducido en un 20% de disminución en las concentraciones de CaCO<sub>3</sub> y un aumento del 14 % en las concentraciones de CaO.

**TABLA 8 : Expansión Total. Muestras con Tratamiento**

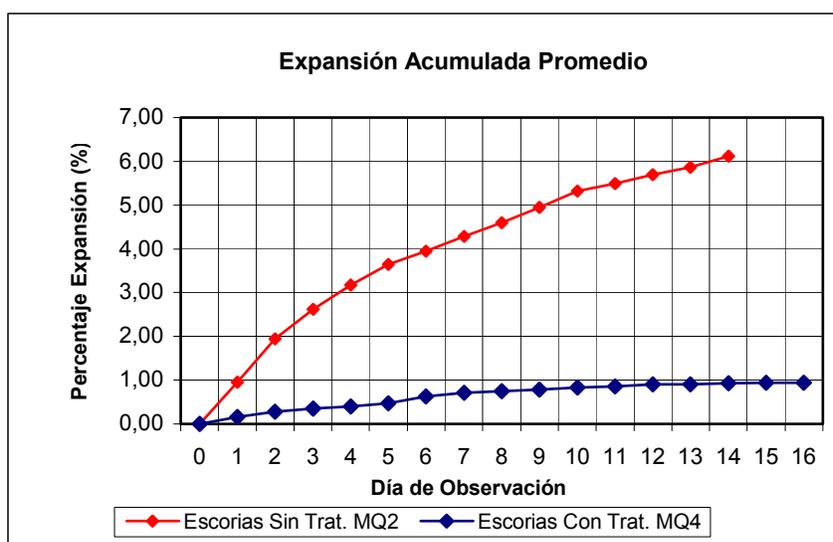
Probeta N°	Expansión a los 14 días (%)
1	1.01
2	0.84



**GRÁFICO 2 : Expansiones acumuladas. Muestras con Tratamiento**

En las muestras tratadas se observa una brusca reducción de la expansión. Entre los días 15 y 16 no se observó un incremento de expansión de las probetas, lo que hace pensar en una posible estabilización del proceso.

En promedio, la expansión total del orden de 0.94%, valor muy cercano al 0.5 % exigido por la norma ASTM D-4792.



**GRÁFICO 3 : Expansión de Escorias con Tratamiento y Escorias sin Tratamiento**

## 6. CONCLUSIONES

El seguimiento y análisis de obras donde se ha utilizado la escoria de acería ha evidenciado la ocurrencia de reacciones de cementación e hidratación, que podrían ser favorables en el caso de carpetas de rodado granular o canchas de acopio, pero a veces, han sido la causa principal en el agrietamiento o deformación prematura de pavimentos y radieres. La ocurrencia de esta reacción, no se ha podido predecir a través de los ensayos convencionales de la mecánica de suelos.

En el presente trabajo se ha estudiado la banda comercial tamaño (0"-2") a través del muestreo normado de acopios existentes en la empresa concesionaria Heckett MultiServ. La comparación de resultados con los requisitos de calidad exigidos por el Manual de Carreteras del MOP, para sub-bases y bases de pavimentos, permiten establecer que la escoria de acería posee propiedades mecánicas aptas para su uso en obras de ingeniería vial, en donde las posibilidades de expansión y/o cementación sean permitidas, en caso contrario se debe pensar en su estabilización.

Tomando como referencia el ensayo ASTM D-4792 que permite evaluar el potencial de expansión en agregados granulares que contienen componentes susceptibles de hidratación, las escorias ensayadas presentan índices de expansión que no aconsejan su uso como agregados para bases o sub-bases de pavimentos.

Los análisis de XPS han sido claves para identificar los elementos de superficie que favorecen las reacciones físico-químicas de hidratación, básicamente carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ), y además para orientar el estudio de estabilización superficial de las escorias.

Se ha realizado, a escala de laboratorio, una estabilización superficial de las escorias consistente en una oxidación acelerada a través de la inmersión en agua acidulada con ácido clorhídrico y temperatura sobre  $60^\circ \text{C}$ . Después del tratamiento las muestras ensayadas bajo los conceptos de ASTM D-4792 han reducido drásticamente la susceptibilidad a la expansión, hasta valores recomendados para su uso. Este hecho hace concluir que es posible estabilizar las escorias a una escala comercial, mediante esta u otra metodología.

En la práctica de la ingeniería, se ha observado que la oxidación y lixiviación de las escorias mediante la exposición de acopios al intemperismo, principalmente lluvias invernales, minimiza el efecto indeseable de la hidratación en obra. Los análisis químicos realizados sobre escoria envejecida no han entregado índices claros que permitan aseverar esta evidencia.

## 7. REFERENCIAS

- Especificaciones y Métodos de Muestreo y Ensaye de la Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas, Dirección Nacional de Vialidad – 1986
- Manual de Carreteras Volumen N°5, Especificaciones Técnicas Generales - Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad – 1997.
- ASTM D-4792 “Standard Test Method for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.”