VI. RESULTADOS

6.1. Determinación de volumen de probetas

Como se a mencionado anteriormente, para el análisis de este trabajo fue necesario realizar pruebas experimentales con probetas de concreto, por ello se ha cuidado que la producción de residuos sea la mínima posible, por tal motivo, se trabajó probetas de dimensiones menores a las señaladas por la ASTMC31, *"Práctica Estándar para elaborar y curar probetas de ensayo de concreto en campo"* (6 x 12 pulgadas).

Las probetas utilizadas presentaron las siguientes dimensiones:

***Tabla 6.1**. Dimensiones de probeta utilizada.*

Dimensiones de Probeta	
d (cm)	h (cm)
4	8

Con las dimensiones presentadas en la tabla anterior se puede obtener el volumen de las probetas, para posteriormente calcular las proporciones de materiales adecuadas para la mezcla. Para hacer este cálculo se empleó la fórmula del volumen para un cilindro, la cual se presenta en la siguiente tabla así como los resultados a los que se llegó:

***Tabla 6.2.** Fórmula del volumen de un cilindro y resultados obtenidos.*

Volumen Probeta ($V=\pi r^2 h$)		
	m^3	cm^3
V	0.000100531	100.5309649

Estos datos serán utilizados posteriormente.

6.2. Modificación de Proporciones de Materiales y Relación Agua Cemento

Los fabricantes de cemento han hecho estudios para ver la proporción adecuada de materiales para obtener un concreto de calidad, es decir que tengan un buen manejo, fluidez, consistencia, estas relaciones son específicas para cada tipo de cemento.

Tabla 6.3. Proporciones de materiales.

F'c = 250 kg_f/cm^2 (1 m^3)		
Material	**Peso (Kg)**	**Porcentaje (%)**
Cemento	370.00	18.3168
Arena	654.00	32.3762
Grava	786.00	38.9109
Agua	210.00	10.3960
Total	2020.00	100.0000

FUENTE: Cementos Cruz Azul.

Como se puede observar, las proporciones facilitadas por la tabla 6.3, han sido diseñadas para preparar un metro cúbico de concreto con una resistencia de 250 Kg_f/cm^2, sin embargo, como la probeta a utilizar presenta un volumen menor a éste (100.5309649 cm^3) será necesario modificar estas cantidades. Este cálculo se hará mediante una regla de tres.

Tabla 6.4. Relación de materiales, modificada.

f'c = 250 kg/cm^2 (1 m^3)		
Material	**Peso (Kg)**	**Porcentaje (%)**
Cemento	370.00	18.3168
Arena	654.00	32.3762
Grava	786.00	38.9109
Agua	210.00	10.3960
Total	2020.00	100.0000

Si se compara la tabla 6.3 y la 6.4, se puede observar que los porcentajes siguen siendo los mismos, la única variación que se presenta es en los pesos, lo anterior es una comprobación de que el cálculo realizado es correcto ya que el porcentaje no debe presentar variación alguna, pues la relación debe ser la misma sólo que en diferente peso.

6.3. Cálculo de Concentraciones de Sales Metálicas.

Este cálculo es una parte fundamental de este trabajo, ya que con ello que se da inicio a la experimentación. Para esto es necesario conocer la proporción de cada uno de los materiales para la preparación de la mezcla.

Como primer punto, se debe tener conocimiento de la masa molecular de la sal metálica a utilizar para que de esta forma se haga un cálculo que revele la relación

molar del metal en la sustancia utilizada. Posteriormente, se obtendrán, con ayuda de la tabla 6.4, las cantidades de sal metálica que se necesitan para la probeta, cabe mencionar que en este paso se observará un cambio en las proporciones de los materiales, ya que ahora se agregaran las sales como parte de materiales, es decir, la sal metálica se incluirá en la mezcla como un agregado, por lo tanto la tabla 6.4 sufrirá cambios, pues incluirá gramos de sal metálica, estos pesos a su vez irán cambiando conforme se aumente la concentración de sal y se cambie de metal a analizar, se manejarán cuatro concentraciones diferentes.

A continuación se muestran las tablas obtenidas de las predicciones de proporciones de materiales para la mezcla de concreto con cada uno de los metales.

6.3.1. Concentraciones para Sulfato de Cadmio.

Tabla 6.5. *Relación molar de Sulfato de Cadmio.*

	Sal	Metal	R. Molar
	Sulfato Cadmio*5$H_2$0	Cadmio	
P.Molecular	769.56	112.4	2.282206
Relación	1	3	99.90%

Los valores de la tabla 6.5 se utilizan para obtener la relación de metal con respecto a la sal que se está manipulando, con ello, se calculó el porcentaje de metal para cada concentración a manejar.

Tabla 6.6*. Proporciones de materiales incluida la sal metálica, Sulfato de Cadmio.*

Muestra (g)	Sulfato de Cadmio									
204	Peso (g)	0.00%	1.00%		3.00%		5.00%		7.50%	
Cemento	37.37	18.32%	36.99	18.13%	36.25	17.77%	35.50	17.40%	34.56	16.94%
Arena	66.05	32.38%	65.39	32.05%	64.07	31.40%	62.75	30.76%	61.09	29.95%
Grava	79.38	38.91%	78.58	38.52%	77.00	37.74%	75.41	36.97%	73.42	35.99%
Agua	21.21	10.40%	21.00	10.29%	20.57	10.08%	20.15	9.88%	19.62	9.62%
Sal	0.00	0.00%	2.04	1.00%	6.12	3.00%	10.20	5.00%	15.30	7.50%
Metal	0.00	0.00%	0.89	0.44%	2.68	1.31%	4.47	2.19%	6.70	3.29%

En esta tabla se reporta el resultado del cálculo que se hizo para la modificación de materiales para una mezcla de concreto, obsérvese que se tiene como nuevo componente la sal metálica. Conforme la concentración se cambia, se modifican las proporciones de los materiales a utilizar, sin descuidar que la suma de los porcentajes equivalentes para los materiales siempre arroja como resultado el 100%.

6.3.2. Concentraciones para Cromo +3

Para este utilizar el Cromo+3, fue necesario realizar una reducción de Cromo+6 a Cromo+3, cuyo procedimiento se explicó en el capítulo de materiales y métodos. Los pasos para llegar a la concentración a utilizar fue la misma que se siguió para la sal de Sulfato de Cadmio. La sal de la que se partió fue dicromato de potasio, cuya masa molecular y relación se muestran en la tabla siguiente (6.7):

Tabla 6.7. *Relación molar de Cromo +3.*

	Sal	Metal	
	$K_2Cr_2O_7$	Cromo	R. Molar
Peso Molecular	294.19	51.996	2.83179941
Relación	1	2	99.90%

A diferencia de las concentraciones utilizadas para Cadmio, con Cromo fueron reducidas, debido a que en este caso se tuvo que reducir la sal de la cual se iniciaba el método, sin embargo la suma de las proporciones sigue siendo la misma (100%).

Tabla 6.8*. Proporciones de materiales incluida la sal metálica, Cromo+3.*

Muestra (g)	Cromo									
204	Peso (g)	0%	0.50%		1.00%		2.50%		5.00%	
Cemento	37.37	18.32%	37.18	18.23%	36.99	18.13%	36.43	17.86%	35.50	17.40%
Arena	66.05	32.38%	65.72	32.21%	65.39	32.05%	64.40	31.57%	62.75	30.76%
Grava	79.38	38.91%	78.98	38.72%	78.58	38.52%	77.39	37.94%	75.41	36.97%
Agua	21.21	10.40%	21.10	10.34%	21.00	10.29%	20.68	10.14%	20.15	9.88%
Sal	0.00	0.00%	1.02	0.50%	2.04	1.00%	5.10	2.50%	10.20	5.00%
Metal	0.00	0.00%	0.36	0.18%	0.72	0.35%	1.80	0.88%	3.60	1.77%

6.3.3. Concentraciones para Sulfato de Níquel

Para la sal de Sulfato de Níquel, al igual que para las dos sales anteriores, es necesario conocer su peso molecular para poder tener la relación molecular y así seguir al cálculo de la concentración de esta Sal en la mezcla para concreto.

Tabla 6.9. *Relación molar de Sulfato de Níquel.*

	Sal	Metal	
	Sulfato Níquel*6H20	Níquel	R. Molar
P. Molecular	262.87	58.71	4.47743144
Relación	1	1	99.40%

Esta sal, se manejó a las mismas concentraciones que la sal de Sulfato de Cadmio, con ello, posteriormente se podrá hacer una comparación directa de estas dos sales, al ver cuál de ellas presenta mayor resistencia a las mismas concentraciones.

***Tabla 6.10**. Proporciones de materiales incluida la sal metálica, Sulfato de Níquel.*

Muestra (g)	Sulfato de Níquel									
204	Peso (g)	0.00%	1.00%		3.00%		5.00%		10.00%	
Cemento	37.37	18.32%	36.99	18.13%	36.25	17.77%	35.50	17.40%	33.63	16.49%
Arena	66.05	32.38%	65.39	32.05%	64.07	31.40%	62.75	30.76%	59.44	29.14%
Grava	79.38	38.91%	78.58	38.52%	77.00	37.74%	75.41	36.97%	71.44	35.02%
Agua	21.21	10.40%	21.00	10.29%	20.57	10.08%	20.15	9.88%	19.09	9.36%
Sal	0.00	0.00%	2.04	1.00%	6.12	3.00%	10.20	5.00%	20.40	10.00%
Metal	0.00	0.00%	0.46	0.22%	1.37	0.67%	2.28	1.12%	4.56	2.23%

6.3.4. Concentración para Óxido de Plomo

Esta sal es la última de las cuatro a las que se trató, obsérvese que ésta es la sal a la que se le ha otorgado las concentraciones más bajas a comparación de las tres sales anteriores.

***Tabla 6.11.** Relación molar de Óxido de Plomo (IV).*

	Sal	Metal	
	Acetato de Plomo Pb_3O_4	Plomo	R. Molar
P. Molecular	685	207.19	1.1031512
Relación	1	3	99.90%

La metodología que se manejó es la misma que para las sales anteriores, los resultados que se obtuvieron se registran a continuación.

***Tabla 6.12**. Proporciones de materiales incluida la sal metálica, Óxido de Plomo.*

Muestra (g)	Óxido de Plomo									
204	Peso (g)	0%	0.25%		0.75%		1.25%		1.75%	
Cemento	37.37	18.32%	37.27	18.27%	37.09	18.18%	36.90	18.09%	36.71	18.00%
Arena	66.05	32.38%	65.88	32.30%	65.55	32.13%	65.22	31.97%	64.89	31.81%
Grava	79.38	38.91%	79.18	38.81%	78.78	38.62%	78.39	38.42%	77.99	38.23%
Agua	21.21	10.40%	21.15	10.37%	21.05	10.32%	20.94	10.27%	20.84	10.21%
Sal	0.00	0.00%	0.51	0.25%	1.53	0.75%	2.55	1.25%	3.57	1.75%
Metal	0.00	0.00%	0.46	0.23%	1.39	0.68%	2.31	1.13%	3.24	1.59%

Es importante mencionar que en el inicio de este trabajo se trabajarían las cuatro sales metálicas a las mismas concentraciones, sin embargo conforme la experimentación iba avanzando se tuvieron algunas dificultades por lo cual se decidió cambiar las concentraciones, tal es el caso de Óxido de Plomo y Cromo+3, para corroborar se

pueden consultar las tablas 6.8 y 6.12. Esto se reduce a que las probetas presentaban un mal fraguado, ya que cuando se sacaron del molde se deshacían y algunas otras al momento de ser metidas al curado se despedazaban dentro del agua.

Al analizar las tablas, se puede ver que los pesos de los materiales cambian conforme la concentración aumenta y la sal metálica utilizada difiere, esto es una causa de la relación molar que cada sal presenta.

6.4. Pesos de probetas después de veintiocho días

Las probetas estuvieron en un proceso de curado que tuvo una duración de veintiocho días, éste consistió en meter las probetas en agua con la finalidad de que no perdieran humedad, al transcurrir estos días, son sacadas para continuar con las pruebas aplicables para este estudio (resistencia a la compresión, extracción PECT y absorción atómica). Al retirarlas del curado, éstas fueron pesadas para registrar si se había presentado algún cambio en su peso (aumentado o disminuido), los pesos que se registraron fueron mayores al inicial, esto debido a que la probeta ganó humedad en su estructura mientras estaba en el proceso de curado, sin embargo los pesos no excedieron de aproximadamente del treinta por ciento.

Tabla 6.13. *Registro de aumento de pesos según concentraciones y sal metálica utilizada.*

Metal	Concentración (%)	$P_{inicial}$ (g)	P_{final}(g)	Aumento (g)	Aumento (%)
Cadmio	0.44%	204.00	263.15	59.15	28.9951
Cadmio	1.31%	204.00	271.00	67.00	32.8431
Cadmio	2.19%	204.00	231.50	27.50	13.4804
Cadmio	3.29%	204.00	269.65	65.65	32.1814
Cromo +3	0.18%	204.00	265.38	61.38	30.0858
Cromo +3	0.35%	204.00	263.10	59.10	28.9706
Cromo +3	0.88%	204.00	275.10	71.10	34.8529
Cromo +3	1.77%	204.00	248.70	44.70	21.9118
Níquel	0.22%	204.00	260.65	56.65	27.7696
Níquel	0.67%	204.00	270.90	66.90	32.7941
Níquel	1.12%	204.00	270.50	66.50	32.5980
Níquel	2.23%	204.00	251.60	47.60	23.3333
Plomo	0.23%	204.00	269.75	65.75	32.2304
Plomo	0.68%	204.00	272.85	68.85	33.7500
Plomo	1.13%	204.00	261.40	57.40	28.1373
Plomo	1.59%	204.00	255.80	51.80	25.3922

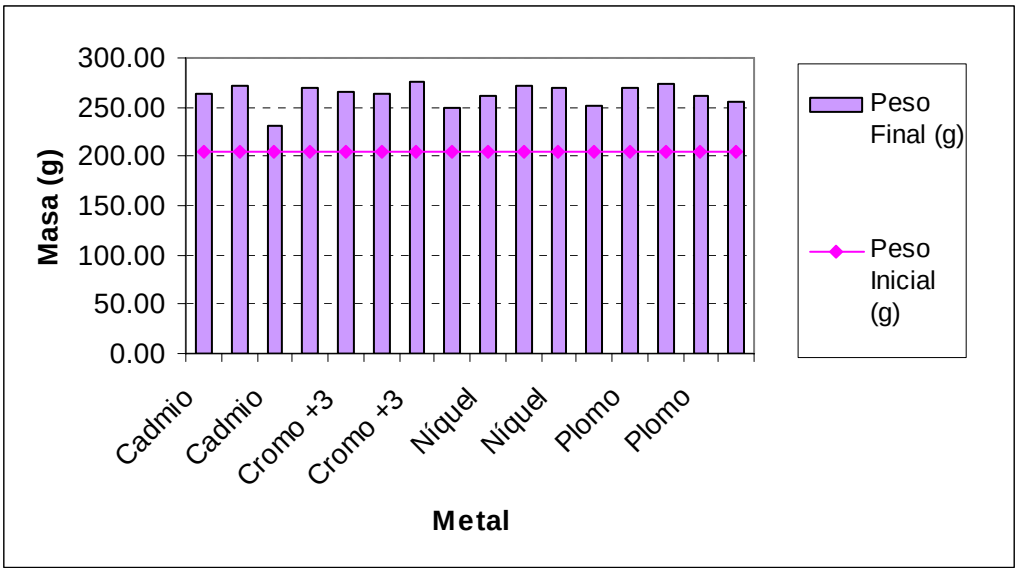


Figura 6.1. *Peso de probetas después de 28 días en curado.*

En la gráfica se puede observar que los cuatro metales presentan un aumento similar, sin embargo la línea que representa al cadmio tiene un descenso amplio, a comparación de los demás metales, y aumenta nuevamente, lo cual se pudo deber a las condiciones en las que estuvieron sometidas las probetas. En la siguiente gráfica 6.2, se puede apreciar de una forma más clara el aumento en el peso que las probetas presentaron respecto al peso inicial (204g).

Donde la línea rosa es el peso inicial, 204 gramos, para todas las probetas (diferentes concentraciones y variación de sal), mientras que las barras lilas, representan los pesos registrados después de retirar las probetas del curado.

6.5. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una prueba que se aplica a las probetas después de haber cumplido los 28 días de edad, es importante mencionar que antes de aplicar esta prueba fue necesario realizar sobre la parte superior e inferior de la probeta una capa de azufre denominada *"cabeceo de azufre"* para que la fuerza aplicada se distribuyera homogéneamente sobre la superficie.

Se trabajó dentro de el laboratorio de mecánica, en el cual se encuentra la prensa de compresión, fue necesario tener una clase sobre el manejo de ésta pues fue la primera vez que se realizaba esta prueba, la máquina consiste en un pistón que es el cual aplica

la fuerza sobre el objeto a estudiar, tres perillas para ajustar el rango de carga a aplicar, pantalla de registro de carga aplicada y dos válvulas que cumplen con el objetivo de cargar y descargar el aire necesario para llevar a cabo la compresión.

Figura 6.2. Ajuste de Carga.

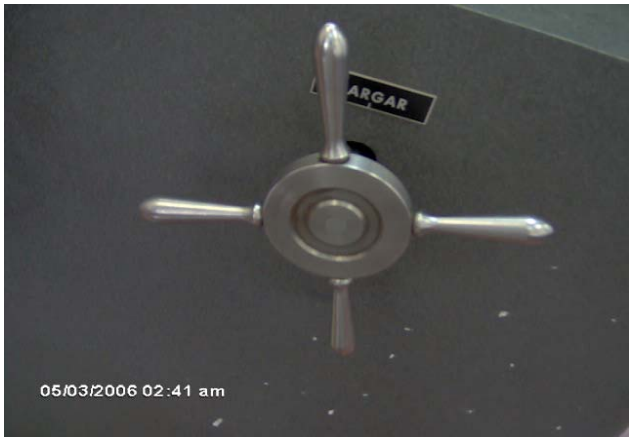


Figura 6.3. Válvula de carga de aire.

Figura 6.4. Válvula de descarga de aire.

Figura 6.5. Pantalla de registro de fuerza aplicada.

Figura 6.6. Equipo de compresión.

Esta prueba es relativamente rápida y se aplica para todas las probetas, incluyendo *"testigos o blancos"* (probetas sin adición de sal metálica), para comparar la carga resistida por cada uno de los cilindros con sal respecto a los que no tienen ningún contenido de sal metálica. Los resultados que fueron arrojados por este ejercicio se presentan en las tablas siguientes, el reporte se muestra por metal, es decir, individualmente para hacer un análisis y posteriormente se muestra en conjunto para poder determinar que metal presenta la mejor resistencia con respecto al teórico y la resistencia obtenida para las probetas testigo.

6.5.1. Resistencia en Probetas Testigo o Blancos

Se prepararon cuatro probetas testigo o blancos, es decir, sin ningún contenido de sal metálica, las lecturas que se tuvieron se promediaron obteniendo la siguiente resistencia.

Tabla 6.14. *Datos reportados de probetas testigo.*

Resistencia (Kg_f/cm^2) 28 días
290.6567148
290.6567148
290.6567148
290.6567148

La proporción de materiales y la relación agua-cemento, con la que fueron preparadas las probetas testigo, inicialmente eran para obtener una resistencia a la compresión de 250 Kg_f/cm^2, sin embargo, cuando las probetas se sometieron a esta prueba se comprobó que la resistencia era mayor, tabla 6.14.

6.5.2. Resistencia en Probetas con Agregado de Sal Metálica

Se hizo un análisis de probetas que contenían sales metálicas, cuatro diferentes, fueron curadas en agua durante veintiocho días, los valores que se obtuvieron se reportan en la siguientes tablas, las cuales están ordenadas conforme la sal que se agregó.

6.5.2.1. Resistencia en Probetas con Sulfato de Cadmio

Las primeras probetas de concreto preparadas fueron las que contenían Sulfato de Cadmio, al transcurrir los veintiocho días se sacaron del curado (agua), para aplicar la prueba de resistencia a la compresión. Como se mencionó en el capítulo de materiales y métodos, antes de realizar esta prueba se hizo cabeceo de azufre en cada una de las probetas.

Los resultados que se obtuvieron al someter las probetas a esta prueba se reportan a continuación (tabla 6.15):

Tabla 6.15. *Valores de resistencias obtenidas para las probetas de cadmio.*

Cadmio	Resistencia (Kg_f/cm^2) 28 días
0.44%	304.781716
1.31%	316.4530785
2.19%	179.3145692
3.29%	204.5141019

Al hacer una comparación entre las tablas 6.15 y 6.16, testigos y Cadmio, respectivamente, se puede ver que la resistencia de las probetas de Cadmio ha disminuido respecto a las probetas testigo, sin embargo esta resistencia no es muy baja por lo que se puede decir que la resistencia obtenida por este metal es buena y observando a la gráfica de la figura 6.8 se ve que la resistencia que se alcanzó en el concreto al adicionar Cadmio rebasa a la resistencia reportada para los testigos.

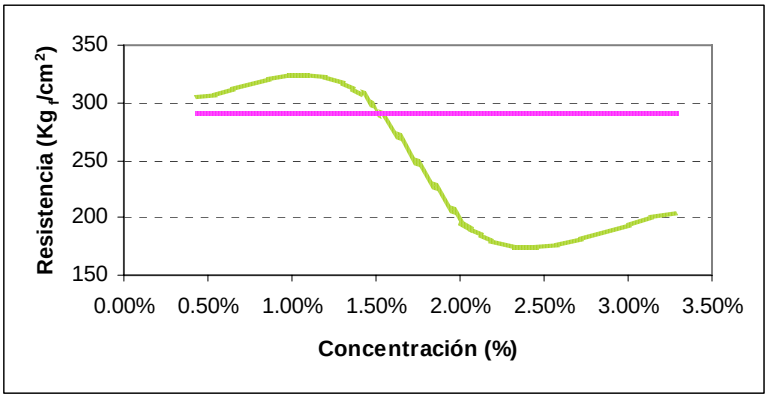


Figura 6.7. Resistencia de testigo vs. Cadmio.

6.5.2.2. Resistencia en Probetas con Cromo +3

Las resistencias que se consiguió con Cromo +3, es cercana a la de las probetas testigos, sin embargo no superior a ella, no por eso se tienen resultados que no favorezcan esta prueba ya que, si se analiza la gráfica de la figura 6.8 se ve que la resistencia de este metal es casi igual a la del testigo, aquí cabe resaltar que aunque no supera los valores de los blancos se logra una resistencia bastante aceptable ya que, como se ha mencionado, los blancos superaron la resistencia esperada.

Tabla 6.16. *Resistencia de testigo vs. Cromo +3.*

Cromo +3	Resistencia (Kg_f/cm^2) 28 días
0.18%	145.3615147
0.35%	230.244151
0.88%	285.4178646
1.77%	270.5634033

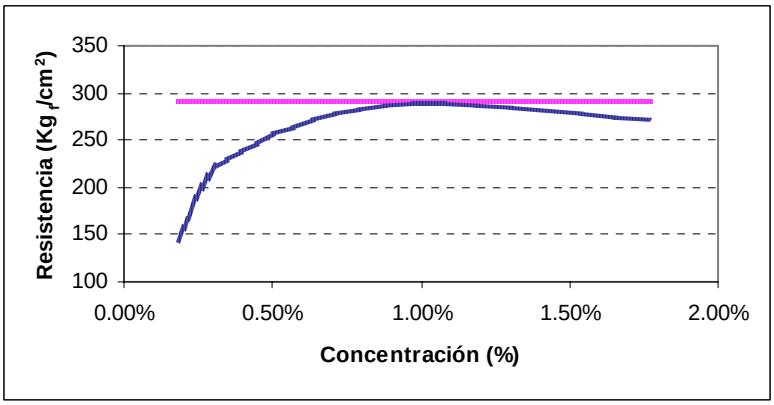


Figura 6.8. Resistencia de testigo vs. Cromo +3.

6.5.2.3. Probetas con Sulfato de Níquel

En el análisis que se aplicó a Níquel resulto un poco favorable, como se aprecia en la figura 6.9, conforme la concentración de metal aumentaba, la resistencia disminuía, por lo tanto, se tiene que la resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la concentración de metal, es importante señalar que el valor más alto de resistencia que se obtuvo fue mayor a la esperada y se iguala a la que presentó la probeta testigo.

Tabla 6.17. *Resistencia de testigo vs. Níquel3.*

Níquel	Resistencia (Kg_f/cm^2) 28 días
0.22%	292.0493206
0.67%	223.0821786
1.12%	130.2417951
2.23%	75.86385621

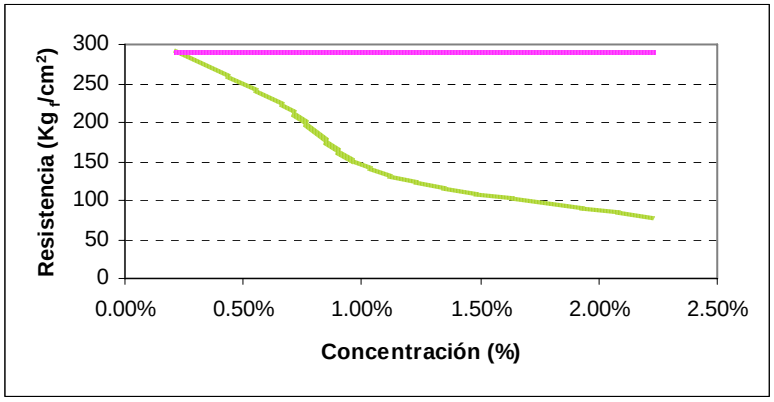


Figura 6.9. Resistencia de Testigo vs. Níquel.

6.5.2.4. Probetas con Óxido de Plomo

Para el Plomo se tiene un caso similar a la de Níquel, ya que de la misma manera se ha observado que al aumentar la concentración se presenta una disminución en la resistencia, aunque se acepta la resistencia que se ha reportado, teniendo para esto usos que presentan esta resistencia.

Tabla 6.18. *Resistencia de testigo vs. Plomo.*

Plomo	Resistencia (Kg_f/cm^2) 28 días
0.23%	201.5962612
0.68%	206.6361678
1.13%	242.7112882
1.59%	82.23005393

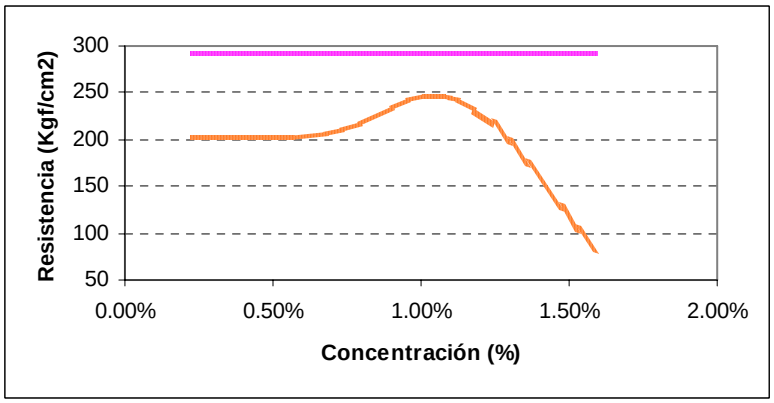


Figura 6.10. Resistencia de Testigo vs. Plomo.

6.5.2.5. Comparación para todos los Metales

Al comparar los resultados que fueron registrados para todos los metales, se puede percatar que, la resistencia esperada era de 250 Kg_f/cm^2, sin embargo, la obtenida para los testigos (sin sal metálica) fue mayor, así mismo se puede observar que para los

cilindros que en su estructura contenían Cadmio presentan mayor resistencia a la de los testigos, así mismo la resistencia obtenida por Níquel fue cercana a la de testigos, mientras que las probetas de cromo+3 y plomo registran un decremento en ella, sin embargo haciendo una comparación de datos entre los cuatro metales utilizados se observa que el que presenta menor resistencia son los que están compuestos por cromo +3, aunque en la concentración más alta de plomo se tiene una resistencia mucho más baja que las que presenta cromo +3, lo anterior se puede atribuir a que los enlaces que el plomo forma con los compuestos del cemento no son tan fuertes. Los datos presentados en la tabla 6.19 se pueden entender e interpretar mejor si se ven reflejados en una gráfica, la cual se presenta a continuación.

Tabla 6.19. *Recopilación de resistencias.*

Metal	Concentración (%)	Resistencia Real (kg_f/cm^2)	Resistencia Real (kg_f/cm^2)	Porcentaje obtenido	Desviación (%)
Cadmio	0.44%	290	304.7817	105.10%	-5.10%
Cadmio	1.31%	290	316.4531	109.12%	-9.12%
Cadmio	2.19%	290	179.3146	61.83%	38.17%
Cadmio	3.29%	290	204.5141	70.52%	29.48%
Cromo +3	0.18%	290	145.3615	50.12%	6.70%
Cromo +3	0.35%	290	230.2442	79.39%	1.58%
Cromo +3	0.88%	290	285.4179	98.42%	20.61%
Cromo +3	1.77%	290	270.5634	93.30%	49.88%
Níquel	0.22%	290	292.0493	100.71%	-0.71%
Níquel	0.67%	290	223.0822	76.92%	23.08%
Níquel	1.12%	290	130.2418	44.91%	55.09%
Níquel	2.23%	290	75.8639	26.16%	73.84%
Plomo	0.23%	290	201.5963	69.52%	30.48%
Plomo	0.68%	290	206.6362	71.25%	28.75%
Plomo	1.13%	290	242.7113	83.69%	16.31%
Plomo	1.59%	290	82.2301	28.36%	71.64%

En la figura 6.11, se aprecia claramente que las resistencias alcanzadas son cercanas a la reportada de las probetas testigo, por lo que se tiene que los resultados que se han obtenido son aceptables, y en algunos casos son superiores a los que se presenta este.

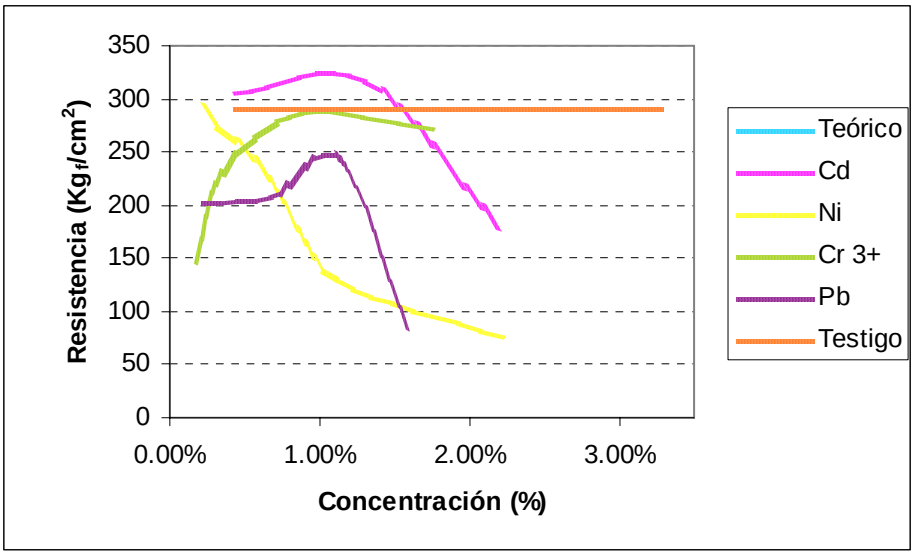


Figura 6.11. Comparación de resistencias de metales analizados, testigos y teórico.

6.6. Extracción PECT

La extracción PECT se realiza inmediatamente después de aplicar la prueba de resistencia a la compresión, debido que en este ejercicio la probeta se rompe, resultan pedazos de la probeta, los cuales son utilizados en la extracción PECT. Se pesan cinco gramos de la muestra, probeta, y después de determinar que reactivo de extracción se va usar, se agregan cincuenta mililitros del reactivo. Al llegar a este punto se ponen las muestras en agitación durante 24 horas a 60 rpm. Al pasar este tiempo se retiran de agitación y se filtran las muestras, se mide el pH de ésta y si es mayor a dos se agrega ácido nítrico hasta bajarlo a un pH menor a dos, el volumen promedio para cada ejemplar es aproximadamente de 3 mililitros, posteriormente se llevan a absorción atómica.

6.7. Prueba de Absorción Atómica

Después de haber aplicado la prueba de resistencia a la compresión se prosiguió a hacer una de las últimas pruebas, no por ello menos importante. En esta prueba se han analizado dos muestras por composición de cada una de las probetas que en su interior contienen metal.

Como primer punto se tuvo que calibrar el equipo (Espectronic AA), este paso se repetía cada que se cambiaba de metal a analizar y por lo tanto de lámpara, como primeros resultados se registraron las curvas de calibración para cada metal, seguido de su composición dentro de la muestra.

Para tener una validación confiable de los resultados que se analizaron, las lecturas se hicieron por triplicado para cada muestra, estos datos fueron promediados para posteriormente graficar y observar el comportamiento de cada ejemplar conforme la concentración aumentaba.

6.7.1. Absorción Atómica para Cadmio

El primer metal que se analizó fue Cadmio, se utilizaron soluciones estándar para poder calibrar la lámpara que diera lectura a este metal, las concentraciones fueron las mostradas en la tabla 6.20, de esas concentraciones se tuvo la absorbancia para cada una de ellas. Con estos datos, en seguida se graficarán y así ver el comportamiento de éstos.

Tabla 6.20. *Curva de calibración para Cadmio.*

Estándar	
Concentración	**Absorbancia**
0.00%	0.0000
1.00%	0.0570
1.50%	0.0989
3.00%	0.1736
5.00%	0.2758
7.50%	0.3926

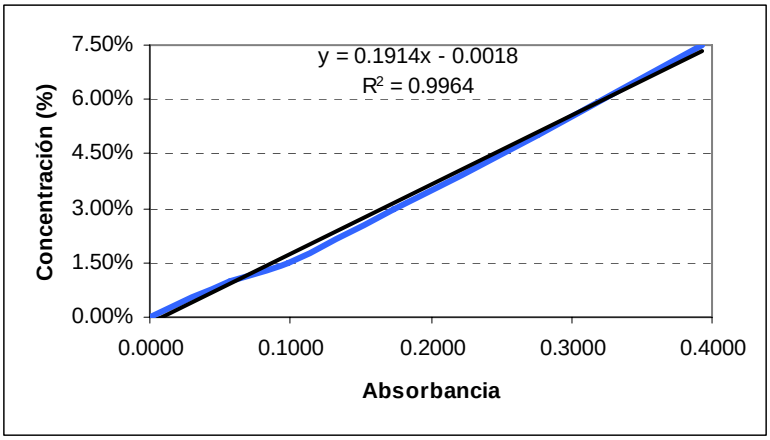


Figura 6.12. Curva de calibración para Cadmio.

Observando la gráfica 6.12, podemos ver que la regresión a los datos experimentales de la curva de calibración se ajusta perfectamente, estoes benéfico para las pruebas que se realizaron ya que nos indica que el ajuste es casi igual al de una línea recta.

Tabla 6.21. *Lecturas para Cadmio.*

[Sal]	[Metal]	Absorbancia	ppm
1.00%	0.44%	0.0304	0.0000
3.00%	1.31%	1.5873	0.0007
5.00%	2.19%	1.5274	0.0023
10.00%	3.29%	0.0100	0.0045

Después de hacer la curva de calibración, se analizaron las muestras para determinar la concentración de metal contenido en ellas, los resultados que se obtuvieron se registran en la tabla 6.21, de acuerdo al porcentaje de metal agregado en cada probeta, se refleja que el aumento de concentración de metal es directamente proporcional al contenido final de metal en el lixiviado, es decir, conforme aumentaba la concentración del metal en la muestra, la concentración de metal en el lixiviado también era mayor, lo anterior se puede ver con mayor claridad en la siguiente figura (6.13):

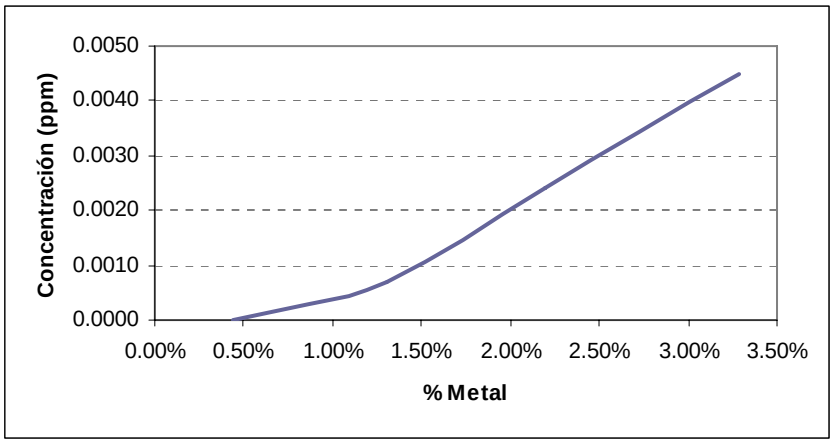


Figura 6.13. Lecturas obtenidas para Cadmio.

El mismo procedimiento que se siguió para las muestras que contenían Cadmio, se hizo para las muestras del resto de los metales utilizados (Cromo+3, Níquel y Plomo).

6.7.2 Absorción Atómica para Cromo+3

Al analizar la curva de calibración para Cromo +3 (Figura 6.14), se llega a la conclusión de que el ajuste que se tiene es bueno, debido a que (como se ha mencionado anteriormente) la línea de regresión es cercana a uno, las concentraciones de los estándares que se utilizaron se presentan en la tabla 6.22.

Tabla 6.22. *Curva de calibración para Cromo +3.*

Estándar	
Concentración	**Absorbancia**
0.00%	0.0000
1.00%	0.0052
2.00%	0.0103
3.00%	0.0150
4.00%	0.0202
5.00%	0.0236
6.00%	0.0270

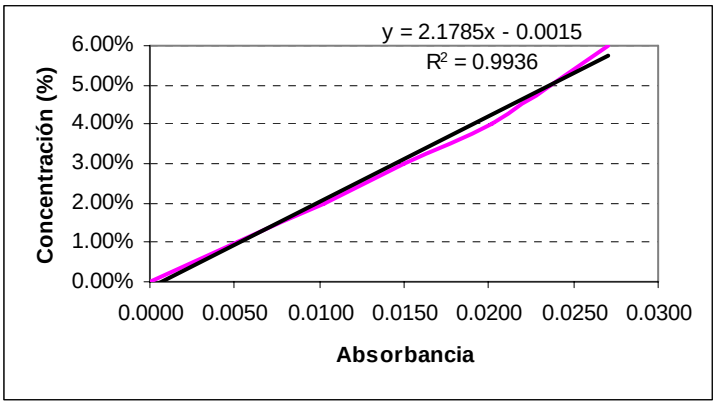


Figura 6.14. Curva de calibración para Cromo+3.

Analizando las muestras a las concentraciones que se hicieron las probetas, se llegó a los siguientes resultados (tabla 6.23):

Tabla 6.23. *Lecturas para Cromo+3.*

[Sal]	[Metal]	Absorbancia	ppm
0.50%	0.18%	0.0209	4.253
1.00%	0.35%	0.0062	1.183
1.75%	0.88%	0.0003	0.064
5.00%	1.77%	0.0573	0.024

En este análisis ocurre lo contrario a lo que se presentó en la Figura 6.14, con apoyo de la tabla 6.23 y la figura 6.15, se llega a que, entre menor sea el porcentaje de

metal utilizado en la matriz, la concentración en el lixiviado será menor, esto puede ser un resultado del comportamiento de la sal metálica al combinarse con los componentes del tipo de cemento que se empleó.

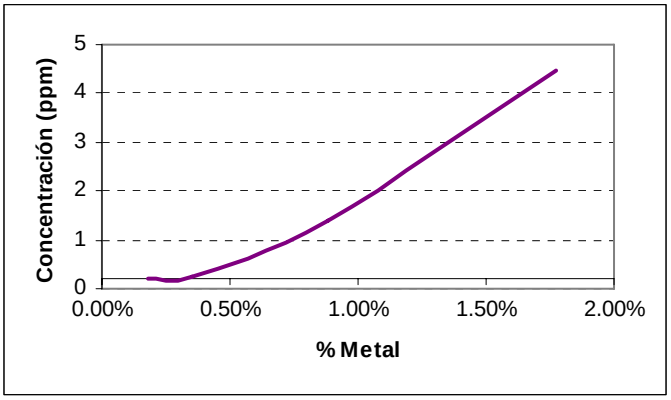


Figura 6.15. Lecturas obtenidas para Cromo+3.

6.7.3. Absorción Atómica para Níquel

Tabla 6.24. *Curva de calibración para Níquel.*

Estándar	
Concentración (ppm)	**Absorbancia**
0.00%	0.0000
1.00%	0.0089
2.00%	0.0174
3.00%	0.0258
4.00%	0.0354
5.00%	0.0417
6.00%	0.0494

Para el análisis de la curva de Níquel se sigue con el parámetro que se obtuvo para las dos curvas anteriores (Figuras 6.13 y 6.15, Cadmio y Cromo+3, respectivamente), se tiene un buen ajuste con respecto a la línea de regresión, sin embargo, esta curva es la que hasta el momento ha presentado un acercamiento mayor hacía el valor de la línea recta (uno).

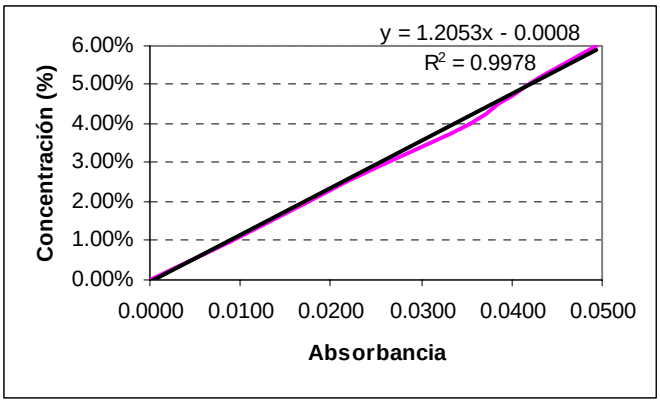


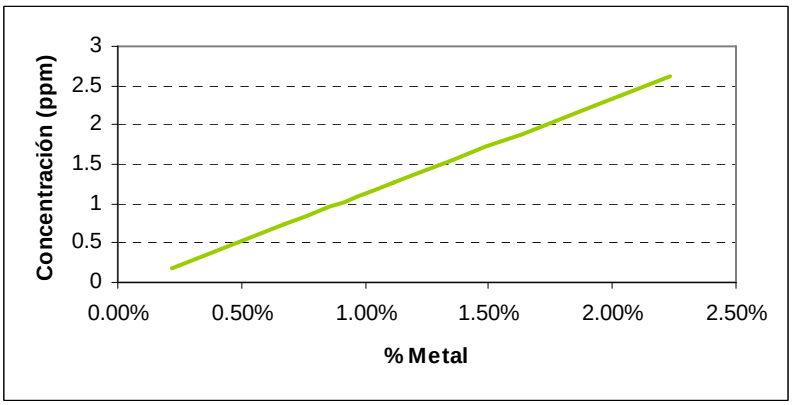
Figura 6.16. Curva de calibración para Níquel.

Al igual que para los metales anteriores (Cadmio y Cromo+3), para Níquel se tomaron muestras de la composición de las probetas que fueron hechas para aplicar la prueba de resistencia a la compresión. Sometiendo estas muestras a absorción atómica se llegó a los resultados que se presentan en la siguiente tabla (6.25):

Tabla 6.25. *Lecturas obtenidas para Níquel.*

[Sal]	[Metal]	Absorbancia	ppm
1.00%	0.22%	0.0357	0.1899
3.00%	0.67%	0.1940	0.7323
5.00%	1.12%	0.0188	1.2747
10.00%	2.23%	0.1621	2.6126

En ella se puede apreciar que el aumento en la concentración de porcentaje de metal en el lixiviado iba creciendo conforme la concentración de metal utilizado para la probeta era mayor. Para corroborar lo anterior, se muestra a continuación una figura (6.17) que hace una ilustración mas clara de la interpretación de los datos para este metal (tabla 6.25). Así que el comportamiento que se tuvo es bastante lógico, ya que como se ha mencionado líneas arriba el crecimiento de del porcentaje de metal en el lixiviado era proporcional al contenido de metal en la matriz.



Gráfica 6.17. Lecturas obtenidas para Níquel.

6.7.4. Absorción Atómica para Plomo

Finalmente se estudió el comportamiento del plomo, primero se calibró la lámpara que correspondiente a este metal, para de esta manera poder tener los datos para este metal. Al observar la curva que se tuvo para plomo, se aprecia que al igual que con las curvas anteriores (Cadmio, Cromo+3 y Níquel) el ajuste es bastante acertado, presentando una r de 0.993.

Tabla 6.26. *Curva de calibración para Plomo.*

Estándar	
Concentración	**Absorbancia**
0.00%	0.0000
3.00%	0.0186
5.00%	0.0372
7.50%	0.0519

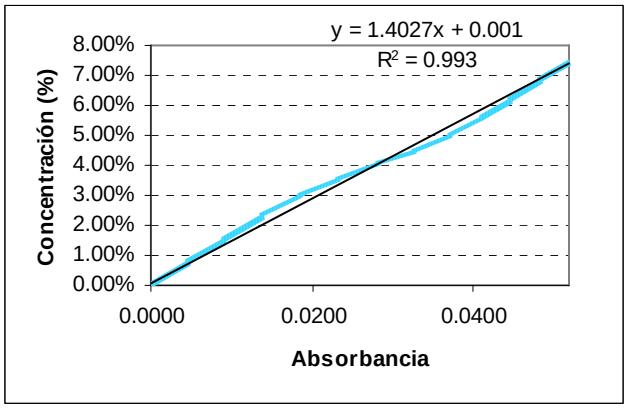
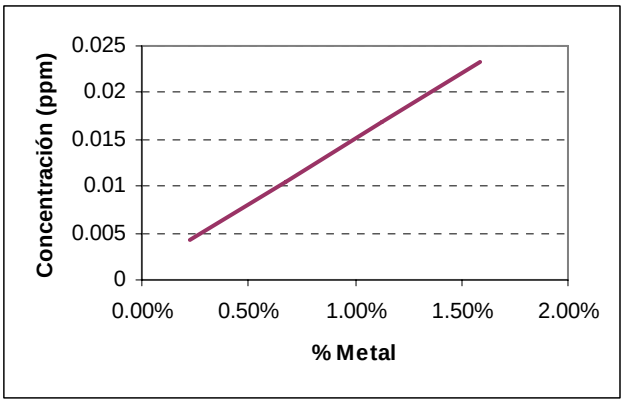


Figura 6.18. Curva de calibración para Plomo.

Tabla 6.27. *Lecturas obtenidas para Plomo.*

[Sal]	[Metal]	Absorbancia	ppm
0.25%	0.23%	0.0029	0.0042
0.75%	0.68%	0.0019	0.0105
1.25%	1.13%	0.0073	0.0168
1.75%	1.59%	0.0886	0.0233

De las lecturas que se registran en la tabla 6.27 se llega a la conclusión de que se tiene un buen comportamiento de este metal, pues el incremento en la concentración en el lixiviado es proporcional al del porcentaje de metal que se agregó al crear la probeta inicial. Así mismo, se comprueba en la gráfica de la figura 6.19, en la que se ve la ascendencia, de las concentraciones, a la par.



Gráfica 6.19. Lecturas obtenidas para Plomo.

6.8. Límites de concentración permitidas de extracción PECT para determinar si es Residuo Peligroso o no

Los resultados que se registran en el capítulo anterior, presentaron un comportamiento grato, sin embargo se tuvo que recurrir a consultar si el producto al que se llegó era benéfico y factible para el medio ambiente, por lo que se consultaron las concentraciones máximas permitidas de cada uno los metales, de ésto se llegó a lo siguiente:

Tabla 6.28.*Concentraciones máximas permitidas.*

No. De INE	Constituyentes Inorgánicos	Concentración Máx. Permitida (mg/L)
C.1.01	Arsénico	5
C.1.02	Bario	100
C.1.03	**Cadmio**	**1**
C.1.04	**Cromo Hexavalente**	**5**
C.1.05	**Níquel**	**5**
C.1.06	Mercurio	0.2

Con los datos reportados de la tabla 6.28, se elaboraron gráficas para determinar y verificar si la concentración de metal contenido en el lixiviado representaba daño alguno para el medio.

6.8.1. Límites para Cadmio

En primera instancia se experimentó con los datos para Cadmio, sin embargo al observar la gráfica 6.20 se aprecia que la concentración de metal en el lixiviado está muy por debajo de la concentración máxima permitida, por lo que el uso en cementación de este metal es aceptable.

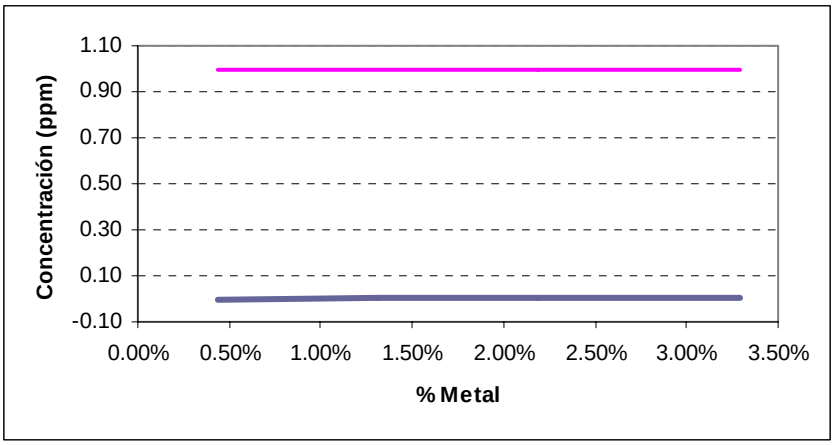


Figura 6.20. Comparación con concentración permitida para Cadmio.

6.8.2. Límites para Cromo +3

Las concentraciones que se reportaron al aplicar absorción atómica para Cromo+3, se muestran en la figura 6.21, así como el nivel permitido para Cromo, aunque la concentración de metal contenida en el lixiviado es alta no rebasa los límites que representan daño al ambiente.

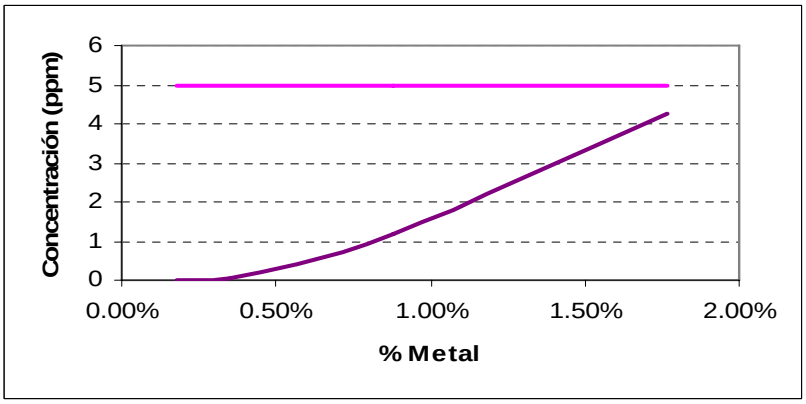
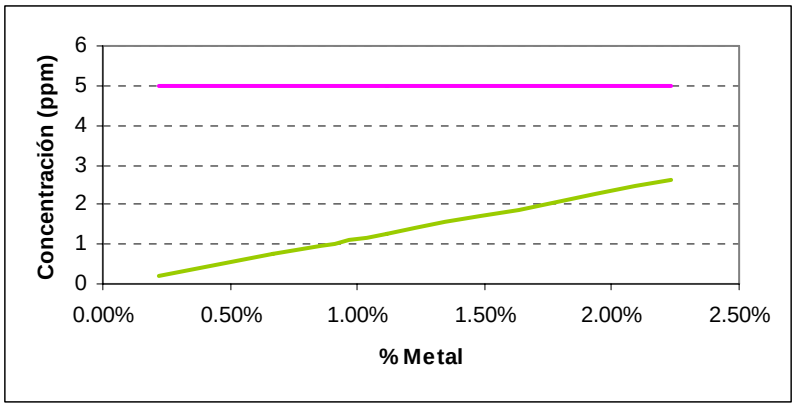


Figura 6.21. Comparación con concentración permitida para Cromo+3.

6.8.3. Límites para Níquel

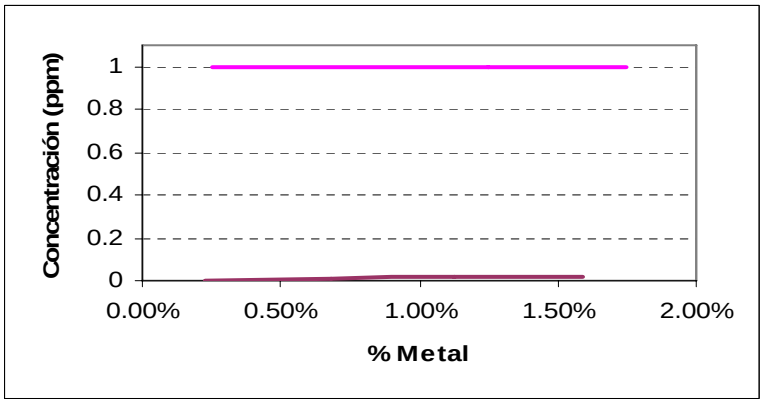
Con el análisis para níquel (figura 6.22) se presenta un caso similar, pues al igual que los metales anteriores, la concentración de éste está por debajo de lo que hace mención la norma C.1.05.



Gráfica 6.22. Comparación con concentración permitida para Níquel.

6.8.4. Límites para Plomo

Como comparación final se tiene el plomo, aunque este metal representa una amenaza mayor para el medio, como se aprecia en la Figura 6.23, al utilizarlo y tratarlo mediante esta técnica de solidificación disminuye considerablemente el riesgo que representa para la salud y el medio ambiente, ya que la concentración que es liberada en el lixiviado es mínima en comparación a la concentración permitida de descarga.



Gráfica 6.23. Comparación con concentración permitida para Plomo.

6.9. Retención de metal

Después de analizar el porcentaje de metal que había sido expulsado de las probetas y estaba contenido en el lixiviado, se prosiguió a averiguar cuánto del metal agregado se había quedado retenido dentro de la matriz de concreto, los cálculos involucraban el contenido de metal agregado en la probeta, inicialmente y la concentración que se obtuvo por absorción atómica en el capítulo anterior.

6.9.1 Retención en Matriz de Cadmio

Nuevamente, estos cálculos se realizan para cada uno de los metales con los que se trabajó, para que al final se pueda concluir con una comparación entre los cuatro metales que se analizaron, con la finalidad de ver el comportamiento que presentan.

Tabla 6.29. *Porcentaje de metal contenido en probeta, Cadmio.*

Muestra (g)	Sulfato de Cadmio			
204	1.00%	3.00%	5.00%	7.50%
Metal (g)	0.89	2.68	4.47	6.70
Metal (%)	0.44%	1.31%	2.19%	3.29%
ppm	0.0000	0.0007	0.0024	0.0045

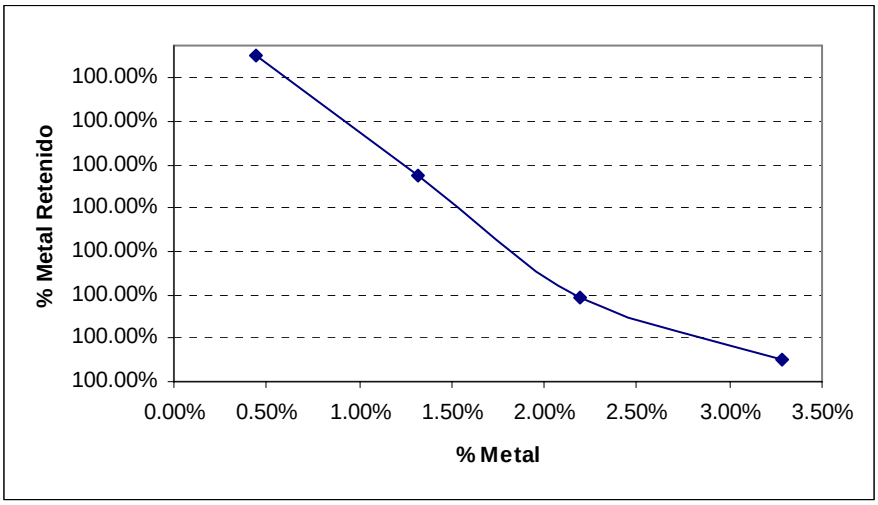


Figura 6.24. Porcentaje de metal agregado vs. Metal retenido.

En la tabla 6.30 se presentan los datos necesarios para poder obtener la gráfica que revele el porcentaje de metal retenido acorde al porcentaje de metal que fue agregado a la mezcla al preparar las probetas de concreto. Con ayuda de la gráfica 6.24, se percibe que el porcentaje más alto de retención se presenta cuando la concentración de metal es menor, es cierto que el porcentaje de retención se ve disminuido conforme el porcentaje de metal inicial aumenta, sin embargo, es importante resaltar que los valores de retención que se obtienen son de la magnitud de alrededor de 99.998%, siendo esta concentración la más baja, por lo tanto la retención que se ha obtenido para este metal es considerablemente buena, ya que es próxima a que la retención fuese de el 100 por ciento.

Tabla 6.30. Metal agregado, contenido en lixiviado y retenido.

Cadmio		1.00%	3.00%	5.00%	7.50%
Metal inicial	mg/muestra	0.2191	0.6573	1.0954	1.6431
Lixiviado	mg/muestra	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002
Soln. Ext.	ml/m	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
Muestra	g/m	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Peso	probeta	204.0000	204.0000	204.0000	204.0000
Llx	(g)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Lixiviado	(%)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Ret		0.2191	0.6573	1.0954	1.6431
Ret	(%)	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

En esta tabla se presentan los valores de metal en el lixiviado y retenido en la probeta de concreto, con estos datos se ve claramente que los resultados de retención son altos y prácticamente el porcentaje liberado de metal es casi nulo.

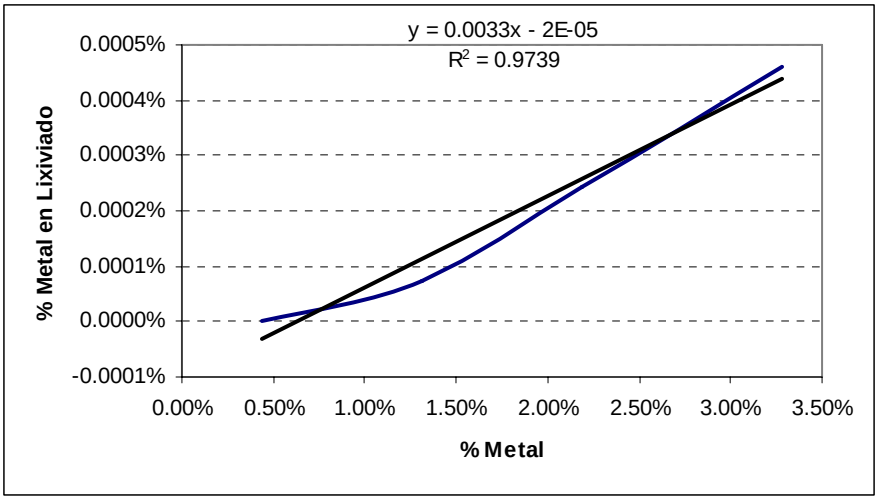


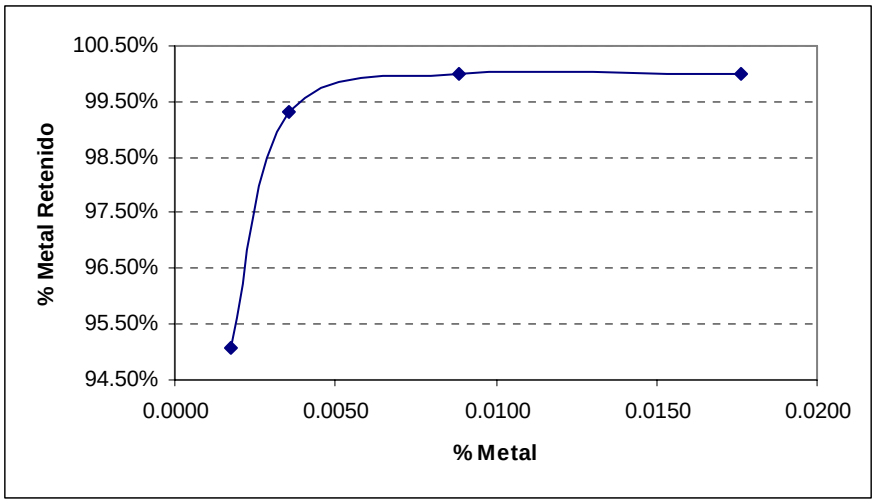
Figura 6.25. Porcentaje de metal inicial vs. Metal en el lixiviado.

Al aplicar una regresión lineal a los resultados se ha obtenido que el ajuste es aproximado a uno, por lo que se comprueba una vez más que cadmio presenta características favorables para esta técnica.

6.9.2. Retención en Matriz de Cromo +3

Tabla 6.31. Porcentaje de metal contenido en probeta, Cromo+3.

Muestra (g)	Cromo+3			
204	0.50%	1.00%	2.50%	5.00%
Metal (g)	0.3602	0.7204	1.8010	3.6020
Metal (%)	0.0018	0.0035	0.0088	0.0177
ppm	0.0236	0.0640	1.1827	4.2533



Gráfica 6.26. Porcentaje de metal agregado vs. metal retenido.

Tabla 6.32. *Metal agregado, contenido en lixiviado y retenido.*

Cromo +3		0.50%	1.00%	2.50%	5.00%
Metal inicial	g/muestra	0.0883	0.1766	0.4414	0.8828
Lixiviado	mg/l	0.2127	0.0591	0.0032	0.0012
Soln. Ext.	ml/m	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
Muestra	g/m	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Peso	probeta	204.0000	204.0000	204.0000	204.0000
LIx		0.0043	0.0012	0.0001	0.0000
Lixiviado	(%)	0.43%	0.12%	0.01%	0.00%
Ret		0.0839	0.1754	0.4414	0.8828
Ret	(%)	95.09%	99.32%	99.99%	100.00%

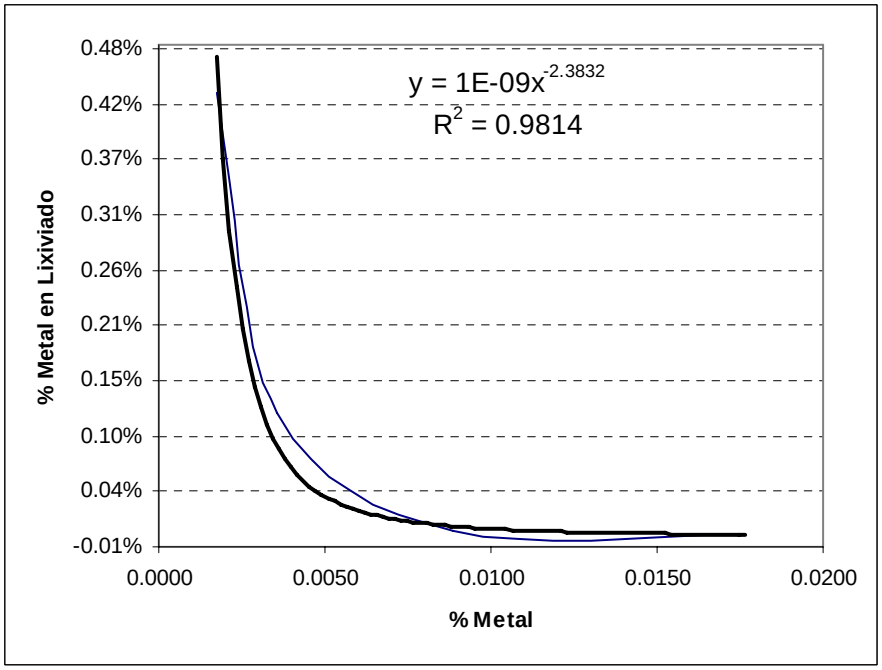


Figura 6.27. Porcentaje de metal inicial vs. Metal en el lixiviado.

6.9.3. Retención en Matriz de Níquel

El comportamiento del níquel es similar a cadmio, ya que se aprecia una mayor retención al tener menor concentración de metal, así mismo, los porcentajes de retención son altos pues su magnitud va desde 98.8 a 99.2 para las concentraciones altas y menores, respectivamente. En la gráfica 6.28 se presentan los valores de retención para facilitar su comprensión.

Tabla 6.33. *Porcentaje de metal contenido en probeta, Níquel.*

Muestra (g)	Níquel			
204	1.00%	3.00%	5.00%	10.00%
Metal (g)	0.4556	1.3669	2.2781	4.5562
Metal (%)	0.0022	0.0067	0.0112	0.0223
ppm	0.1900	0.7324	1.2747	2.6126

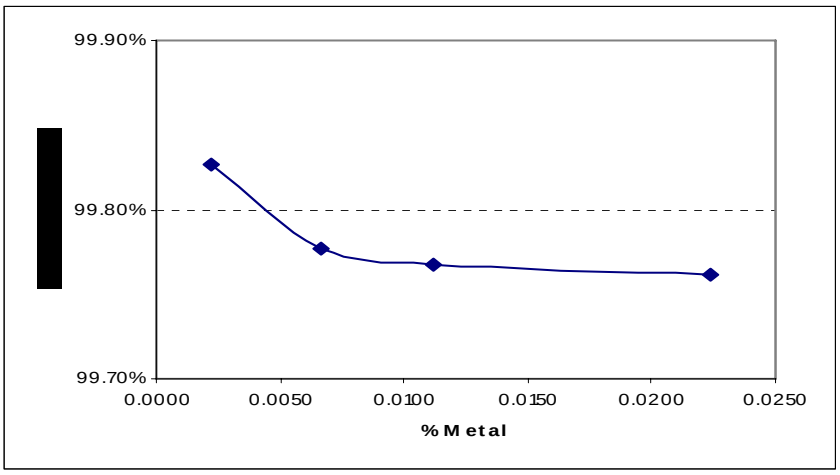


Figura 6.28. Porcentaje de metal agregado vs. metal retenido.

Tabla 6.34. *Metal agregado, contenido en lixiviado y retenido.*

Níquel		1.00%	3.00%	5.00%	10.00%
Metal inicial	g/muestra	0.1117	0.3350	0.5584	1.1167
Lixiviado	mg/l	0.0095	0.0366	0.0637	0.1306
Soln. Ext.	ml/m	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
Muestra	g/m	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Peso	probeta	204.0000	204.0000	204.0000	204.0000
Llx		0.0002	0.0007	0.0013	0.0027
Lixiviado	(%)	0.02%	0.07%	0.13%	0.27%
Ret		0.1115	0.3343	0.5571	1.1140
Ret	(%)	99.83%	99.78%	99.77%	99.76%

El ajuste de la regresión para los valores de porcentaje de metal en lixiviado presenta un comportamiento perfecto ya que es igual a uno, lo que quiere decir que el

porcentaje de retención fue muy cercano a uno, lo que hace que la gráfica presente este comportamiento.

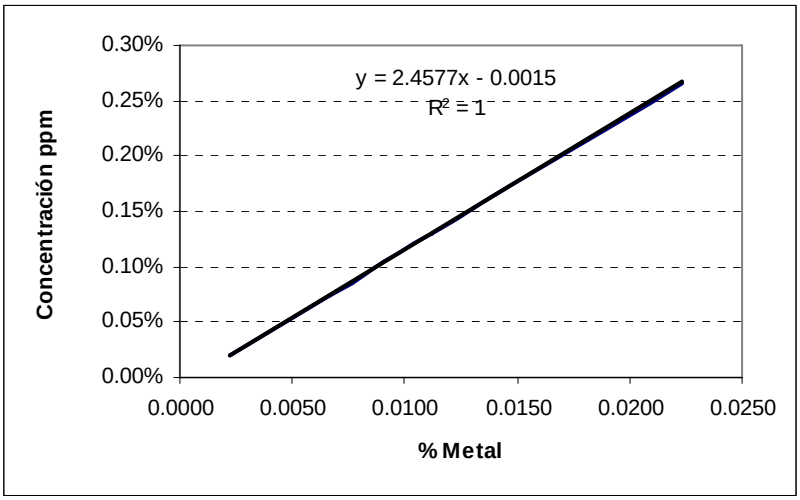


Figura 6.29. Porcentaje de metal inicial vs. Metal en el lixiviado.

6.9.4. Retención en Matriz de Plomo

Tabla 6.35. *Porcentaje de metal contenido en probeta, Cadmio.*

Muestra (g)	Óxido de Plomo			
204	0.25%	0.75%	1.25%	1.75%
Metal (g)	0.4623	1.3869	2.3116	3.2362
Metal (%)	0.0023	0.0068	0.0113	0.0159
Ppm	0.0042	0.0105	0.0169	0.0233

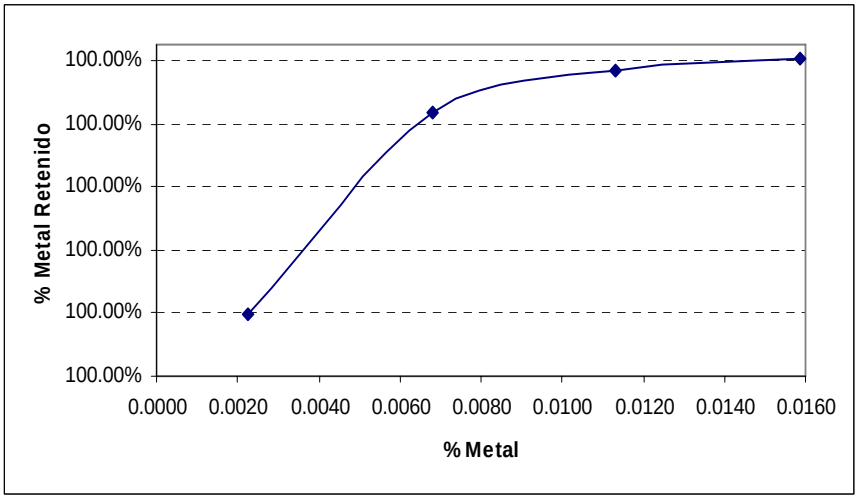


Figura 6.30. Porcentaje de metal agregado vs. metal retenido.

Tabla 6.36. Metal agregado, contenido en lixiviado y retenido.

Plomo		0.25%	0.75%	1.25%	1.75%
Metal inicial	g/muestra	0.1133	0.3399	0.5666	0.7932
Lixiviado	mg/l	0.0002	0.0005	0.0008	0.0012
Soln. Ext.	ml/m	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
Muestra	g/m	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Peso	probeta	204.0000	204.0000	204.0000	204.0000
Llx		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Lixiviado	(%)	0.0004%	0.0011%	0.0017%	0.0024%
Ret		0.1133	0.3399	0.5665	0.7932
Ret	(%)	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

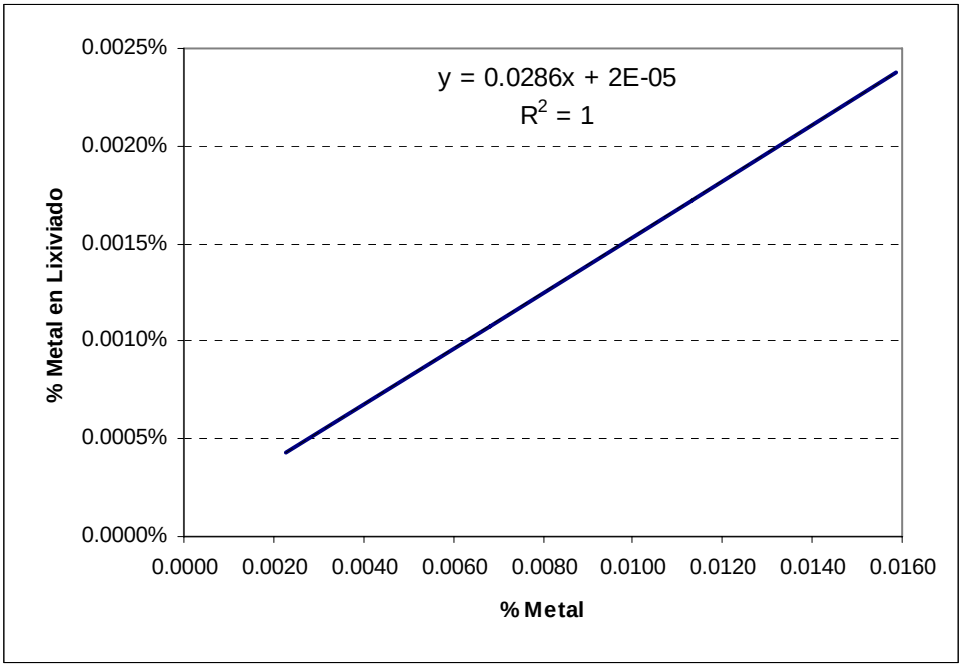


Figura 6.31. Porcentaje de metal inicial vs. Metal en el lixiviado.

La regresión que se hizo para este metal, resulta favorable, el valor del coeficiente de referencia es de uno, así que se tiene concentraciones de plomo muy bajas en el lixiviado y altas incorporadas en la composición de la probeta.

6.10. Cemento Puzolánico vs. Cemento Portland

Anterior a este trabajo de tesis hay un trabajo previo, en el cuál se utilizaron tres de los cuatro metales que fueron utilizados en esta tesis (Cromo, Níquel y Plomo), con la variación de que en esa investigación, el tipo de cemento variaba (cemento Portland). Uno de los objetivos de este trabajo es hacer la comparación con la tesis anterior para observar el comportamiento de los metales al variar el tipo de cemento.

En la investigación anterior se utilizaron los materiales a las proporciones adecuadas para alcanzar una resistencia de 300 Kg_f/cm^2, sin embargo el propósito no se logró con ninguno de los metales, ya que como se observa en la tabla 6.31, ninguna de las probetas alcanzó el objetivo.

Tabla 6.37. *Resistencias registradas para Cemento Portland.*

Metal	Concentración (%)	Resistencia Esperada (kg_f/cm^2)	Resistencia Obtenida (kg_f/cm^2)	Porcentaje obtenido (%)
Cromo	0.520012	300	80.0000	26.67%
Cromo	1.560036	300	70.0000	23.33%
Cromo	2.60006	300	25.0000	8.33%
Cromo	5.20012	300	0.0000	0.00%
Níquel	0.246992	300	150.0000	50.00%
Níquel	0.740976	300	125.0000	41.67%
Níquel	1.23496	300	110.0000	36.67%
Níquel	2.4699201	300	80.0000	26.67%
Plomo	0.5461999	300	185.0000	61.67%
Plomo	1.6385996	300	175.0000	58.33%
Plomo	2.7309994	300	140.0000	46.67%
Plomo	5.4619988	300	105.0000	35.00%

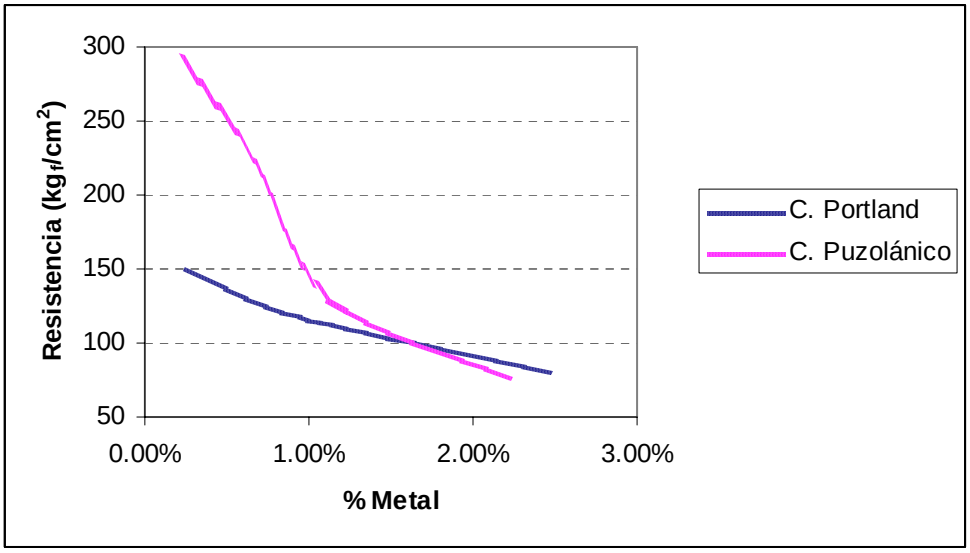


Figura 6.32. Comportamiento de Níquel con diferente tipo de cemento.

Al ver gráficamente el comportamiento de Níquel con dos tipos de cemento, se refleja que el mejor rendimiento se inclina hacia el uso del cemento Puzolánico. Así mismo, con la tabla 6.37 se observa que la eficiencia de el uso del cemento portland no es lo que se esperaba, pues la resistencia está muy por debajo de lo planeado, mientras que las obtenidas con cemento portland alcanza valores que están a la par de la de las probetas testigo.

Tabla 6.38. Comparación de retención con cemento Portland y Puzolánico.

Níquel		1.00%	3.00%	5.00%	10.00%
Portland	Ret (%)	98.01%	97.29%	95.97%	95.46%
Puzolánico	Ret (%)	99.83%	99.78%	99.77%	99.76%

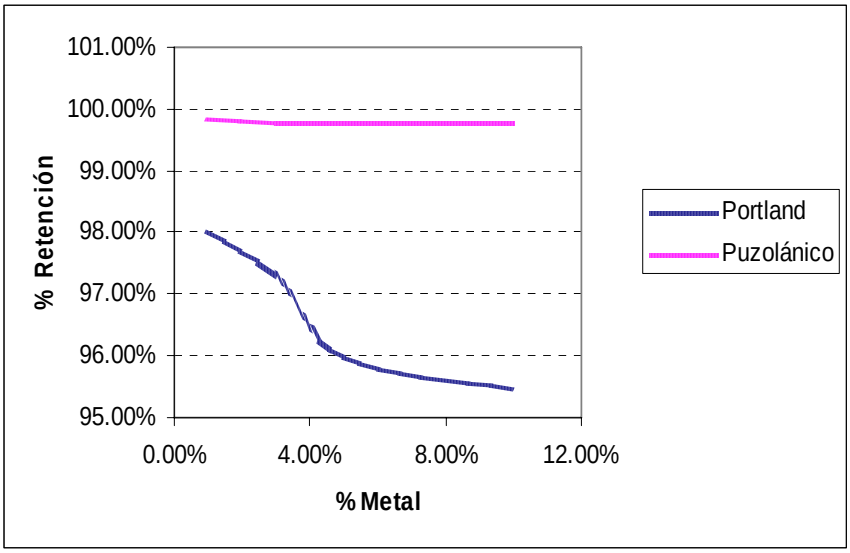


Figura 6.33. Comparación de resistencias obtenidas para Níquel.

Al comparar la retención de metal dentro de la matriz de concreto con ambos tipos de cemento (Portland y Puzolánico), se tiene nuevamente que los mejores resultados se presentan con el uso del cemento Puzolánico que aunque no es mucha la diferencia de porcentaje se ve beneficiada la matriz que se realizó con cemento Puzolánico.

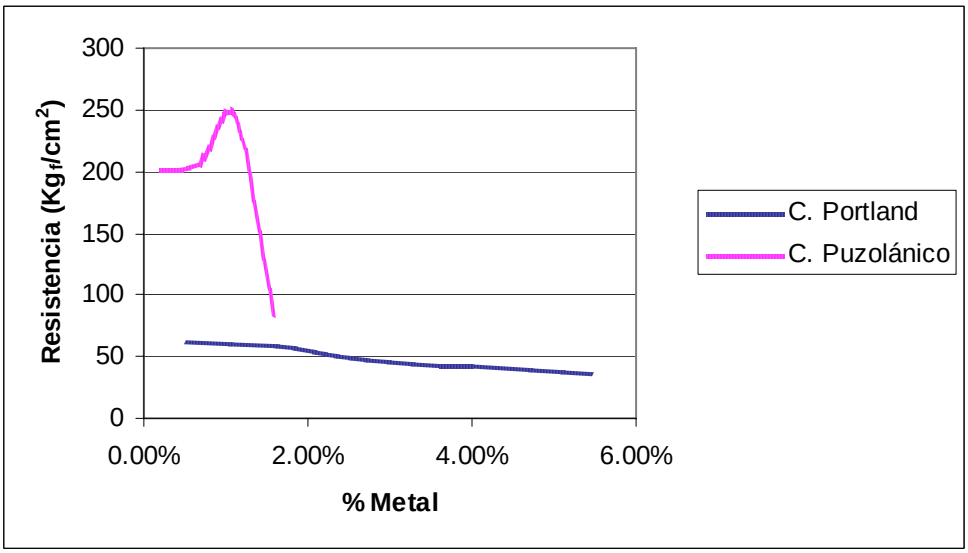


Figura 6.34. Comportamiento de Plomo con diferente tipo de cemento.

Al observar la gráfica 6.34, se aprecia que el uso del cemento puzolánico presenta resistencias mayores.

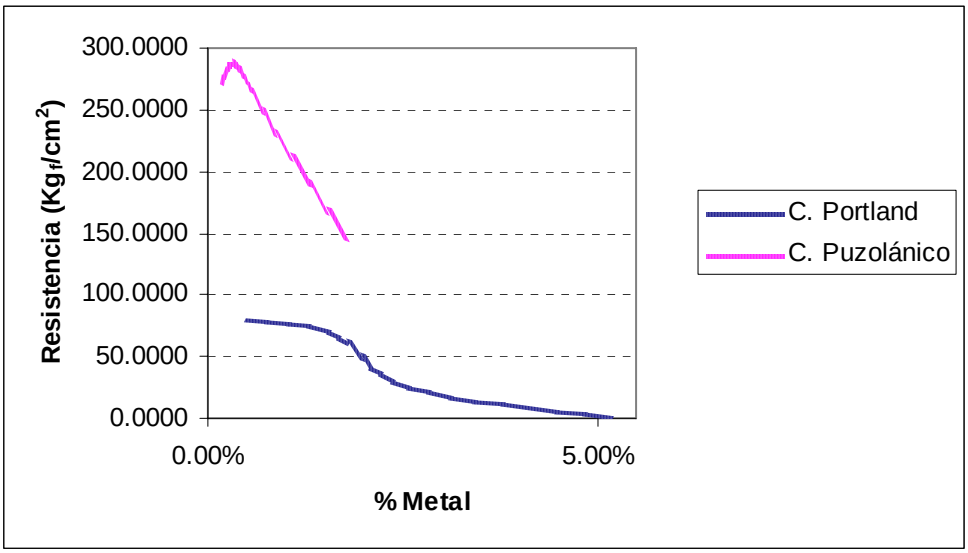


Figura 6.35. Comportamiento de Cromo con diferente tipo de cemento.

Para la comparación de Cromo, se presenta que con cemento puzolánico se tienen mejores resistencias que con cemento portland, aunque en los dos casos se observa una disminución de resistencia conforme aumenta la concentración, el cemento puzolánico alcanza mayores valores de resistencia. Cabe mencionar que con cemento portland se utilizó sal de cromo hexavalente, mientras que con cemento puzolánico se hizo una reducción de esta sal para obtener una sal de Cromo+3, por lo que, es mejor el uso de Cromo +3 que hexavalente.

6.11 Agua residual utilizable

Al tener los resultados de absorción atómica y el límite de concentración para que un desecho no se considere peligroso, se hizo un análisis del tipo de aguas que pueden ser utilizadas para este estudio.

Tabla 6.39. *Porcentaje de metal a utilizar, Cadmio.*

Muestra (g)	Sulfato de Cadmio	
204	0.37%	
Cemento	37.23	18.25%
Arena	65.80	32.26%
Grava	79.08	38.77%
Agua	21.13	10.36%
Sal	0.75	0.37%
Metal	0.33	0.16%

Con la ecuación de la recta se predijeron los valores donde se intersectan las lineas de concentración del metal y la regresión, con ello se hizo un nuevo cálculo para la proporción de materiales, con el porcentaje de metal, posteriormente se calculó la concentración máxima de metal en el agua, con ayuda de las tablas del Apéndice A se puede saber que industria desecha esa agua.

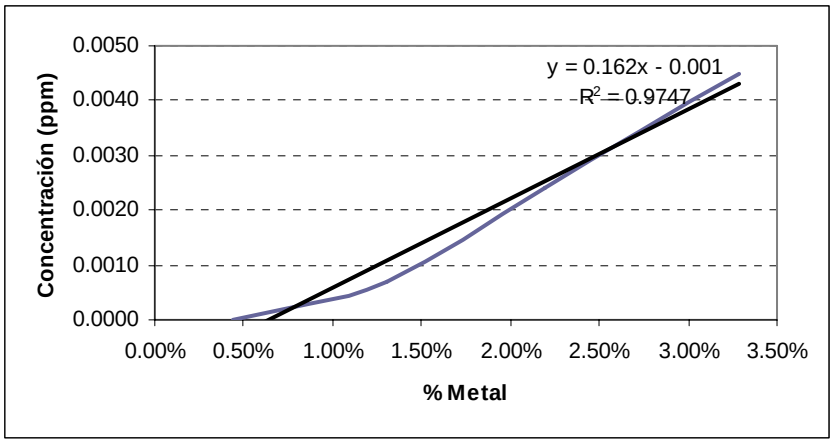


Figura 6.36. Análisis para Cadmio.

Tabla 6.40. *Concentración máxima de Cadmio.*

Sulfato de Cadmio	
L/probeta	0.02
mg metal/probeta	330.48
mg metal/L	15640.68

En la tabla 6.40, se reporta la concentración máxima a la cual se puede contener el metal para ser utilizado y tratado mediante esta técnica.

El mismo procedimiento se hizo para todos los metales analizados en este trabajo.

Tabla 641. *Proporción de materiales con máxima concentración de Cromo+3.*

Muestra (g)	Cromo +3	
204	0.35%	
Cemento	37.24	18.25%
Arena	65.82	32.26%
Grava	79.10	38.78%
Agua	21.13	10.36%
Sal	0.70	0.35%
Metal	0.25	0.12%

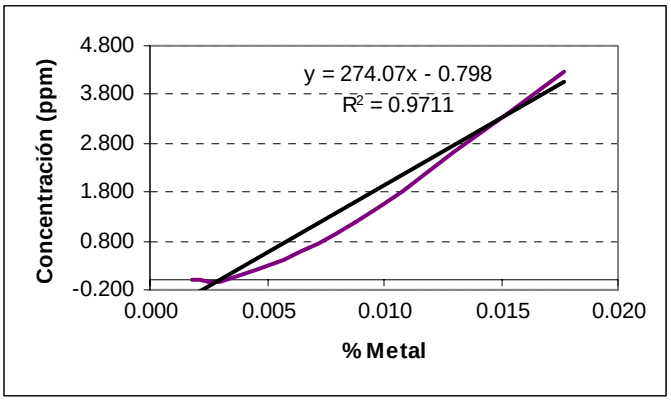


Figura 6.37. Análisis para Cromo.

Teniendo la ecuación que permite obtener el valor del metal y así corregir las proporciones de los demás materiales, se hace el cálculo adecuado para tener la concentración máxima en el agua de metal.

Tabla 6.42. *Concentración máxima de Cromo.*

Cromo +3	
L/probeta	0.021134753
mg metal/probeta	248.5345526
Mg metal/L	11759.52

En la tabla 6.42, se presenta la concentración máxima del metal a utilizar, en este caso Cromo +3, con este resultado y consultando las tablas del Reporte *de "Control de Contaminación de por Metales de Aguas Residuales de la industria de Acabado Metálico"*, se observa que el agua que se puede utilizar es de:

Tabla 6.43.*Agua que se puede utilizar.*

Empresa	Metal (mg/L)
Pasivazo de cítrico	4.50
Enjuague de Cr final	71.26
Enjuague de Cr	300
Enjuague de BPA	6
Enjuague de Cr (media manual)	450

Para plomo se hizo el mismo procedimiento, a continuación se presentan los resultados que se obtuvieron de los cálculos pertinentes:

Tabla 6.44. Porcentaje de metal a utilizar, Plomo.

Muestra (g)	Óxido de Plomo	
204	3.93%	
Cemento	35.90	17.60%
Arena	**63.450926**	**31.10%**
Grava	76.26	37.38%
Agua	20.37	9.99%
Sal	8.02	3.93%
Metal	7.27	3.56%

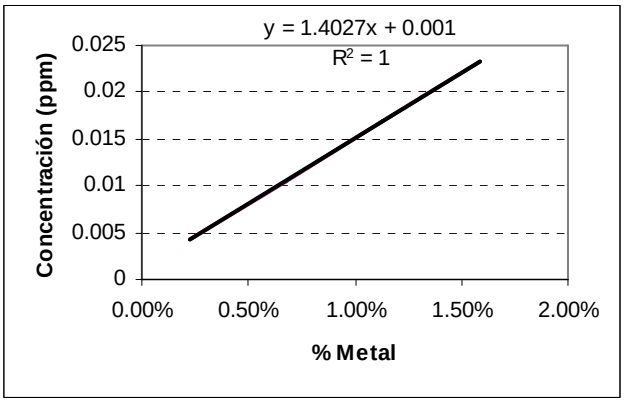


Figura 6.38. Análisis para Plomo.

Con el análisis de los resultados de la Tabla 6.44 y la figura 6.38 se ha obtenido la tabla 6.45, donde se registra la concentración máxima de plomo en el agua, con ello se tiene que el agua que puede ser utilizada es la proveniente de empresas que tienen en la descarga valores de concentración menores a la obtenida en la tabla 6.45.

Tabla 6.45. Concentración máxima de Plomo.

Óxido de Plomo	
L/probeta	0.020
mg metal/probeta	7270.15
mg metal/L	356832.15

Tabla 6.45. Concentración máxima de Plomo.

Empresa	Metal (mg/L)
Pasivazo Cítrico	2.42
Enjuague Ni Satinado	0.63
Ni- Brillado papelera	2.13
Recuperación de CR	8.28
Enjuague ácido (media manual)	0.24
Enjuague Cr	0.10
Enjuague Cu alcalino (Pequeña)	0.19
Enjuague baño salino	0.87
Baño Cu ácido	4.26