5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Vidrio sin contenido metálico

El proceso de vitrificación requirió una serie de experimentos piloto para corroborar que la composición de la mezcla a fundir fuera la adecuada. Los primeros experimentos que se hicieron, eran muestras que contenían una cantidad muy alta de arena sílice, con los materiales establecidos en la tabla 4.1, lo cual indicó que esa composición no permitía la vitrificación de la mezcla a 1250ºC que era la temperatura establecida por la literatura. Las pruebas hechas a 1000ºC únicamente endurecían las muestras de arena y lograban fundir empleando temperaturas mucho más altas que las proporcionadas por la flama de gas natural, utilizando acetileno, lo cual se observa en las figuras 4.1 y 4.2.

Debido a esto se hicieron pruebas cambiando la composición de los componentes en la mezcla, buscando una composición adecuada que ya hubiera dado resultados satisfactorios. Según el trabajo de tesis de Iván Martínez, las composiciones adecuadas eran las establecidas en la tabla 4.2, por lo que se procedió a elaborar las muestras siguiendo el apartado 4.2.1. Se eliminó una de las composiciones empleadas por el anterior debido a que en la mufla, existía una carencia de oxígeno lo que daba a las muestras un color totalmente gris y los experimentos con un 45% de fundente no daban buenos resultados. Como se puede notar en la tabla ya mencionada solo se trabajó con la composición de 35 y 40%, esperando resultados más favorables.

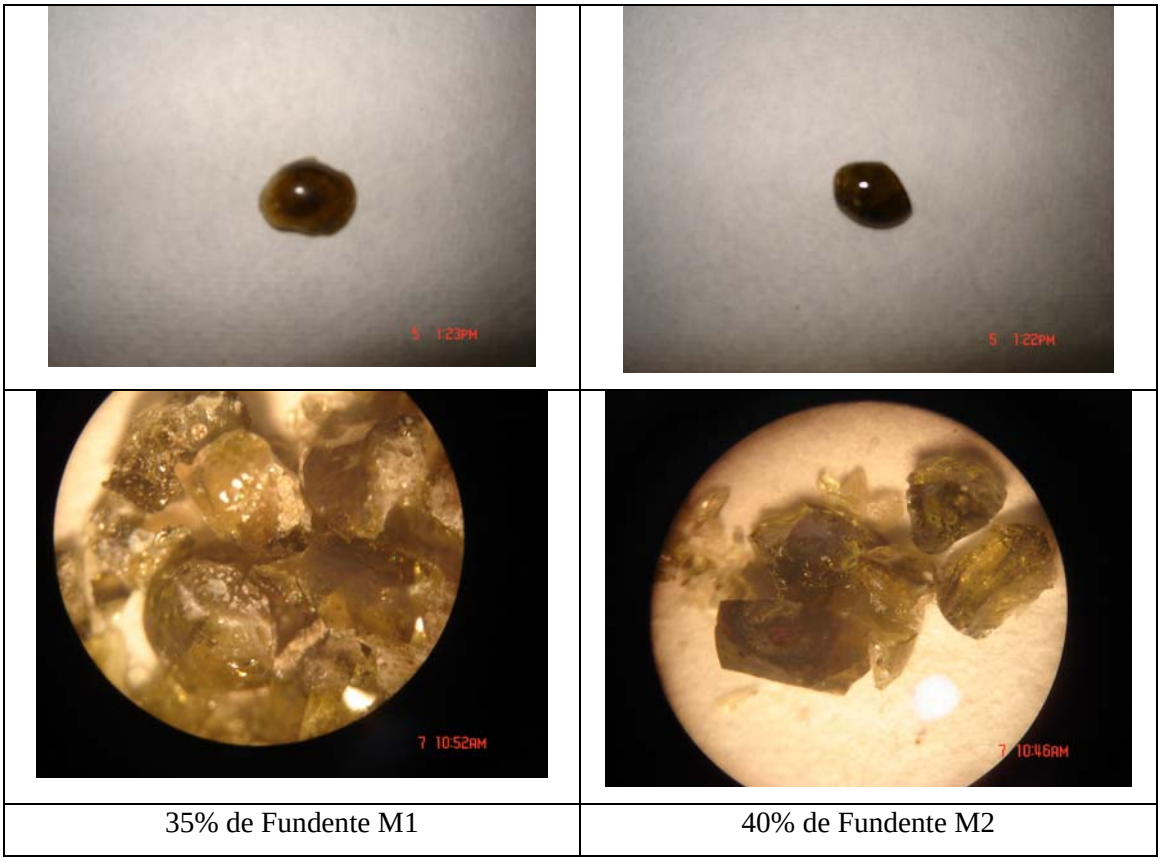
Como siguiente paso se procedió a optimizar el método de elaboración de vidrio buscando métodos que permitieran la menor pérdida de muestra; el primero fue el que proponía utilizar la pastilladora, en el apartado 4.2.3, cuyos resultados fueron satisfactorios en cuanto a fundición pero implicaban ciertos inconvenientes como lo era la fuerza de más de una persona al desmontar el prensado de las pastillas, la poca disponibilidad del dispositivo debido a que se encuentra en otra universidad, y, como la prensa sólo permitía hacer pastillas de dos en dos, tampoco se contaba con el tiempo suficiente para hacer las pastillas de todos los metales.

Es por esto que se pensó en utilizar el método explicado en el apartado 4.2.4, que implica la manufactura de las pastillas en la mufla. Este funcionó, aunque uno de los inconvenientes presentados era que la manufactura de las pastillas de un metal tomaba prácticamente un día completo. De cualquier forma, en lugar de fabricar varias pastillas pequeñas provenientes de la pastilladora, podía fabricarse una sola, un poco más grande para cada metal, reduciendo el

esfuerzo y los problemas planteados antes, como la disponibilidad del equipo, ya que aquí en la universidad se cuenta con varios hornos.

Ya seleccionado el método adecuado, se procedió a hacer las primeras pruebas piloto de las mezclas de vidrio sin metal, que dieron resultados por fin satisfactorios; esto se muestra en la figura 5.1, fotografías tomadas: a la gota de vidrio en tamaño real y a la muestra molida con un aumento 20 X 3, que son los aumentos del microscopio y de la cámara digital utilizados para las mezclas M1 (35% de fundente) y M2 (40% de fundente).

Se puede observar un vidrio con apariencia cristalina y frágil, como es el caso de un vidrio común y corriente, con excepción de cierta coloración verdosa que este adquirió posiblemente por contaminación de alguna impureza presente en el lugar de fundición o por la presencia de alguna sustancia o componente en la flama directa.



35% de Fundente M1	40% de Fundente M2

Fig. 5. 1 Fotografías tamaño real y 60X de mezclas al 35 y 40% de fundente sin contenido metálico

El resultado del experimento con base a las composiciones establecidas en la tabla 4.2 es un vidrio ligero, frágil y con una tonalidad verde botella que según la tesis previa (Martínez, I. y Lara, R. 2006) no era notoria, de hecho había sido transparente. La apariencia de las gotas de

hace notar un vidrio transparente en la superficie y opaco en el centro, más oscuro para la mezcla 2 (con mayor porcentaje de fundente) que para la uno. En algunas partes se observó un poco poroso y en otras casi liso, esto independientemente del componente metálico del mismo.

A las condiciones ya mencionadas el tiempo de elaboración de vidrio mediante el método de flama directa con gas natural fue, primero, de 5 horas en la mufla para lograr la solidificación del mismo y luego del enfriamiento de las muestras, de 10 a 20 minutos para lograr la fundición homogénea y completa de la muestra. Haciendo una contabilidad del tiempo requerido por la mufla y el necesario para realizar la fundición con flama directa, se logra una mejora reduciendo el tiempo casi por 4 horas.

5.2 Mezclas con metales de estudio

Una vez lograda la fundición del vidrio, se procedió a fundir las mezclas haciendo pruebas poco a poco con la incorporación de los metales variando la composición de la mezcla de modo que aún a pesar de incorporar el 1, 3 y 5% del determinado metal se siguiera respetando la proporción de las otras sustancias por sí solas lograban la vitrificación.

En esta sección se analizarán las fotos tomadas con microscopio estereoscópico a las muestras de vidrio formadas luego de utilizar la mufla para formar la pastilla y el quemador. No hay un criterio que pueda permita diferenciar con exactitud la apariencia de cada una de las muestras de vidrio debido al tamaño tan pequeño de las mismas y la semejanza de las mismas a pesar de tener distinta composición; si se apreciaron ciertas peculiaridades en el proceso de fundición de algunos metales y en las fotos de microscopio de la muestra ya molida pero la característica más notable se refiere a la variación en color.

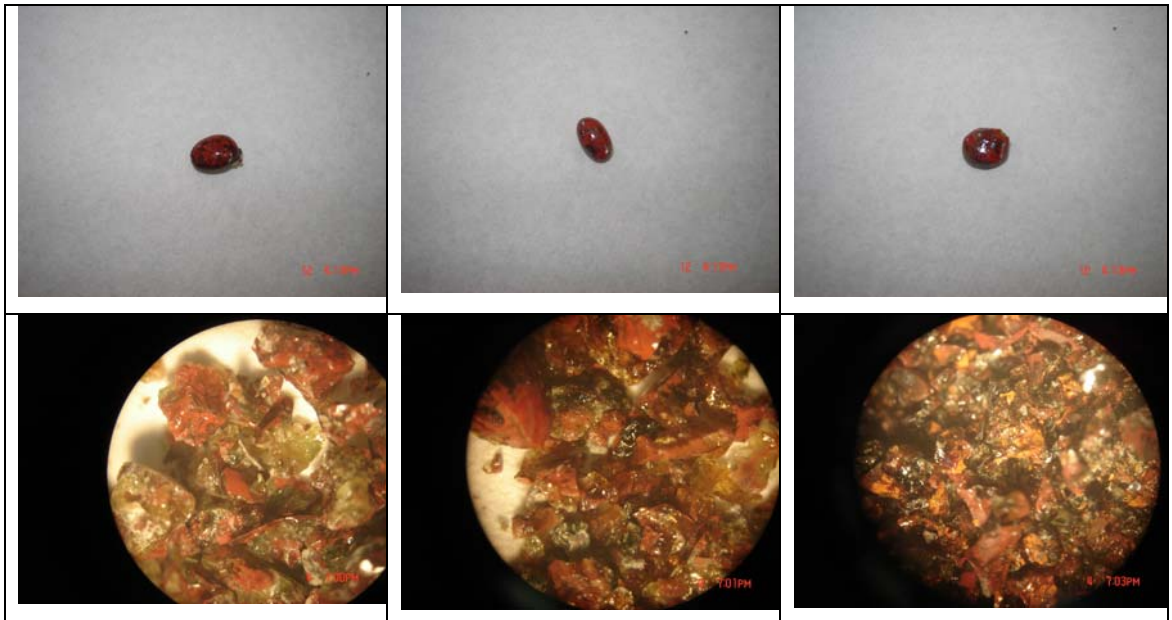
Los metales que en mufla (Martínez, I. y Lara, R. 2006) hicieron un vidrio transparente (vidrio sin metal, con plomo, cadmio y zinc) formaron con el uso de la flama directa un vidrio verde, en el caso del vidrio café rojizo (fierro) se formó un vidrio negro, y en el caso del vidrio azul (cobre) en mufla, se logró un vidrio rojo metálico mediante el uso de la flama directa. En el caso del trabajo de tesis enfocado a la vitrificación fijación de contaminantes metálicos (Sosa, J. y Lara, R. 2004), sólo coincide un experimento, el de plomo, ya que los demás metales de estudio son diferentes a los de este trabajo; la coloración que se obtuvo para el metal ya mencionado, fue transparente de cualquier forma. A continuación se muestran las tablas con las fotografías tamaño real y en microscopio de cada una de las muestras fundidas, dando una descripción y comparación con respecto al aumento de concentración en las mismas.

5.2.1 Vidrio con cobre

En el caso de este metal se puede observar que con respecto a la concentración, entre mayor es ésta, el color del vidrio es mucho más oscuro en el centro, presentando incluso pequeñas pero numerosas coloraciones rojas oscuras, casi negras; además, presentando una aureola color rojo alrededor de la gota de vidrio, debido a las reacciones de oxidación de los carbonatos y de la misma sal durante la fundición de las muestras.

Para el caso de 1% de Cobre en M1, al 35% de fundente (Bicarbonato de Sodio), el color rojo es prácticamente solo en la superficie de la gota formada; para 3% se observa un color más homogéneo incluso en el centro de la muestra, siendo en la muestra de mayor concentración (5%) el color más rojo pero a la vez presentando partes oscuras de un tono negro metálico en casi toda la muestra.

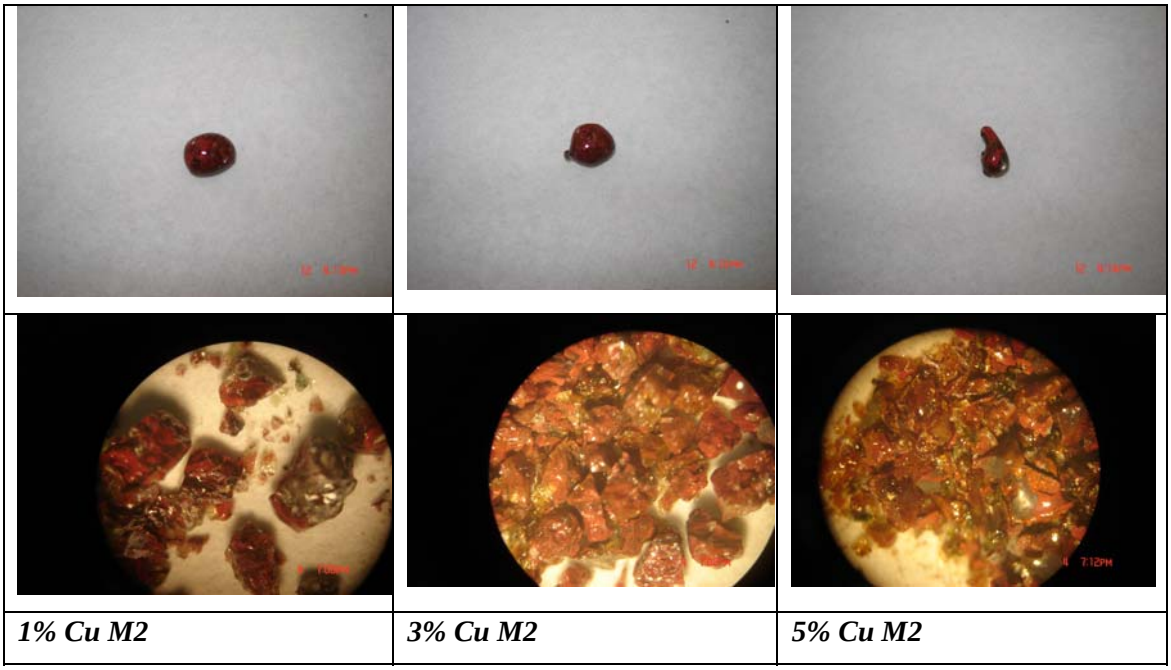
Como ya se mencionó, hubo un cambio de color con respecto a las muestras logradas con el uso de la mufla, en trabajos de tesis anteriores. Se esperaba un tono de vidrio azul, logrando con el uso de la flama directa un color rojo ladrillo intenso. Las gotas formadas fueron más o menos de tamaño homogéneo y fue el vidrio más noble en cuanto a fundición, moldeo y desprendimiento del adoquín.



1% Cu M1	***3% Cu M1***	***5% Cu M1***

Fig. 5. 2 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con cobre al 1, 3, y 5% de metal y 35% de fundente

En el caso del vidrio al 40% de fundente, M2, con sulfato de cobre al 1%, 3% y 5%, se puede observar un vidrio más oscuro aún en la gota con la menor concentración de metal, esto con respecto a la mezcla 1 mostrada anteriormente. El color rojo observado en las fotos de las muestras molidas (microscopio) es más claro que en las muestras de M1, pero se nota mucho más homogéneo y con menor cantidad de trazas oscuras como en el caso del vidrio con menos fundente.

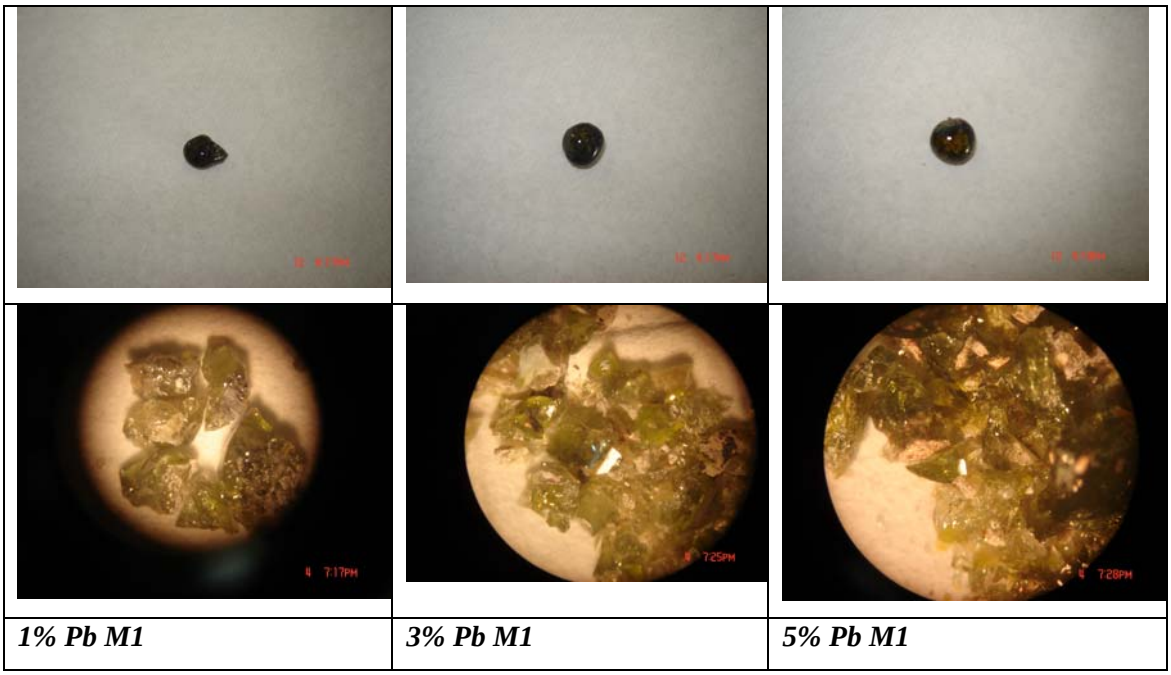


1% Cu M2	***3% Cu M2***	***5% Cu M2***

Fig. 5. 3 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con cobre al 1, 3, y 5% de metal y 40% de fundente

5.2.2 Vidrio al plomo

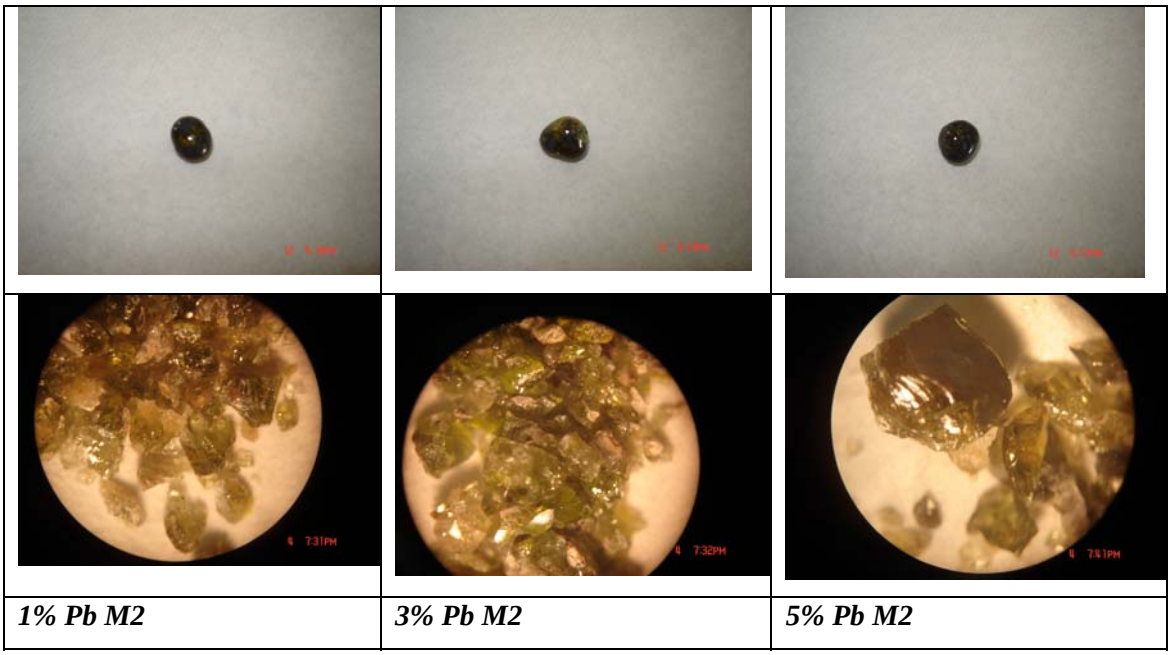
En la elaboración del vidrio con plomo se tuvo una fusión más rápida, adquiriendo un color verde botella muy transparente con respecto a los otros metales. Su constitución se nota más fina, lo que le dio una mayor fragilidad, ligereza y suavidad al tacto. Se puede observar también que las pastillas fundidas formaron gotas de vidrio más regulares y más livianas en comparación con el resto de los metales aunque mostraron una mayor resistencia a ser despegadas del adoquín en donde se fundieron, lo cual se puede observar en las fotografías mostradas en las figuras 5.4 y 5.5.



1% Pb M1	***3% Pb M1***	***5% Pb M1***

Fig. 5. 4 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con plomo al 1, 3, y 5% de metal y 35% de fundente

La apariencia de este vidrio no tiene variaciones muy perceptibles en color con respecto al aumento en concentración, pero en relación a la cantidad de fundente, se observa un color más oscuro en el vidrio M2, que tiene un mayor contenido del mismo.



1% Pb M2	***3% Pb M2***	***5% Pb M2***

. Fig. 5. 5 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con plomo al 1, 3, y 5% de metal y 40% de fundente

Otra característica más o menos perceptible es que el vidrio formado por la mezcla con mayor fundente es un poco más opaco que el de menor aunque son más brillosos que el resto de los metales que debían formar vidrio transparente como en el caso del zinc y del cadmio que se mostrarán y comentarán posteriormente.

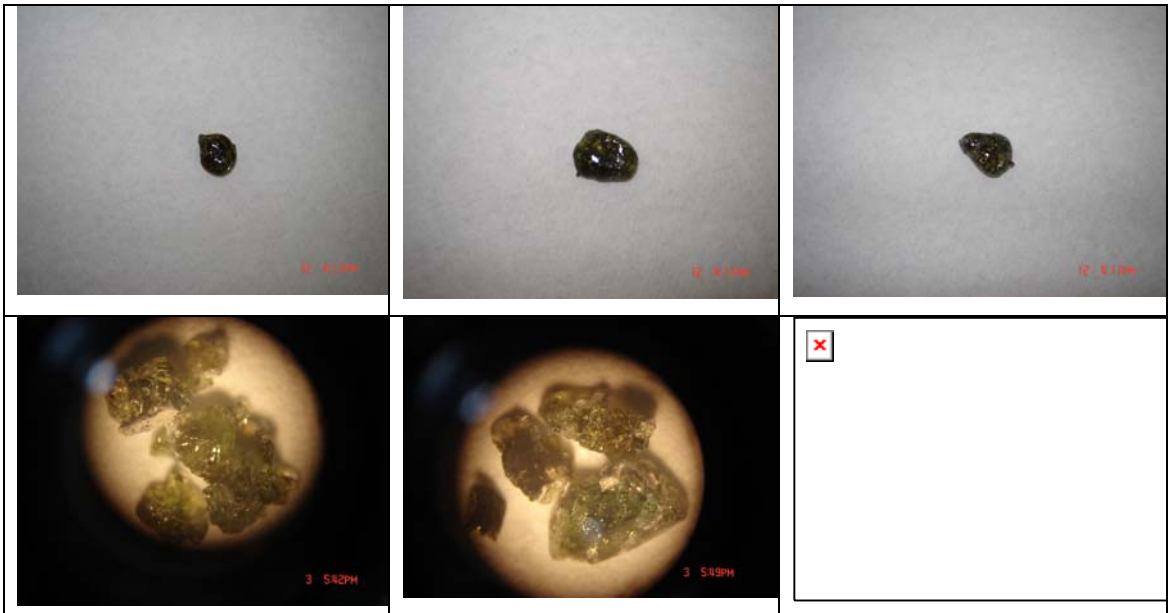
5.2.3 Vidrio con zinc

En el caso del vidrio con zinc, se pudo observar una fusión de la muestra lenta; es un vidrio más opaco que en el caso del plomo pero de cualquier forma se ve transparente y brilloso. Las muestras M1 son más claras que M2 pero el vidrio se percibe más poroso y más oscuro que en el caso de los otros vidrios verdes.

Este vidrio fue arenoso, sencillo de moler (ya que se desmoronaba rápidamente), y retuvo más partículas sólidas del adoquín que cualquier otro; en la gota se ve oscuro pero en las fotos de microscopio sí se puede percibir heterogéneo.

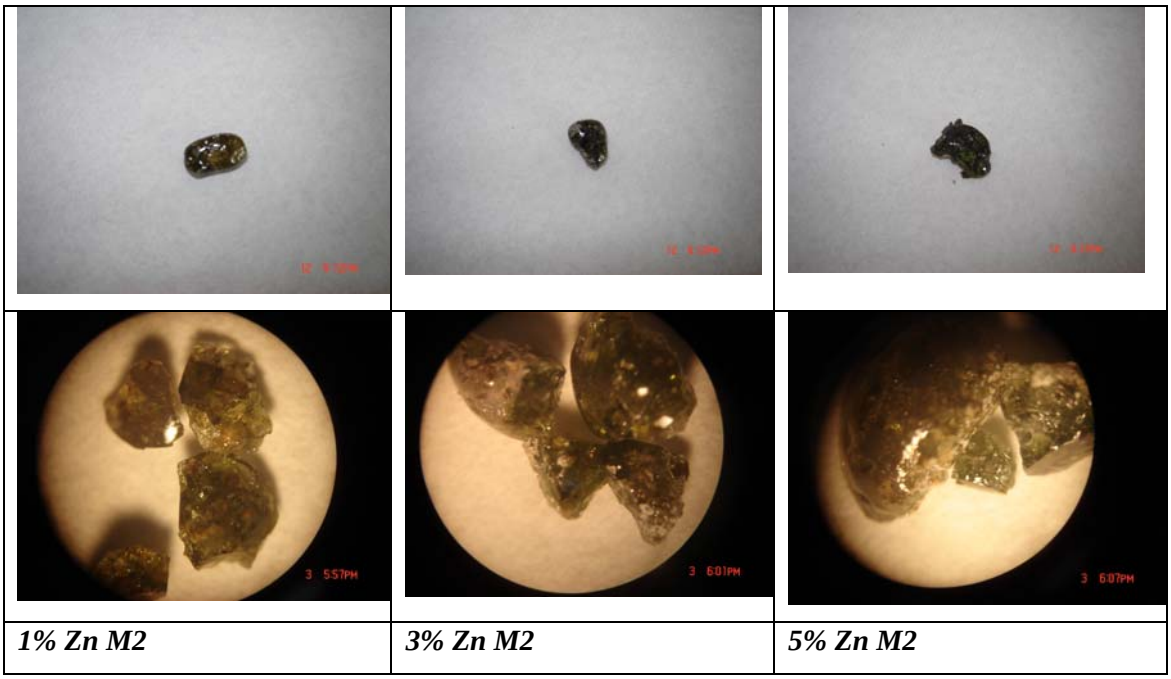
Como en el caso del plomo, mostró resistencia a ser despegado luego de haber terminado su fundición, pero contrario al caso anterior en el que sí se podía desprender completa la gota de vidrio, el vidrio con zinc se desprendía a pedazos, por lo que se tuvo que fundir varias veces de manera que se pudiera formar una muestra completa y se pudieran hacer las mediciones pertinentes después de formada (peso, volumen, densidad).

No hay estudios previos hechos a este metal, pero debido a su coloración después de fundido se puede asumir que el color que se lograría con la mufla sería transparente.



1% Zn M1	***3% Zn M1***	***5% Zn M1***

Fig. 5. 6 Fotografías tamaño real y 60 X de vidrio con zinc al 1, 3, y 5% de metal y 35% de fundente

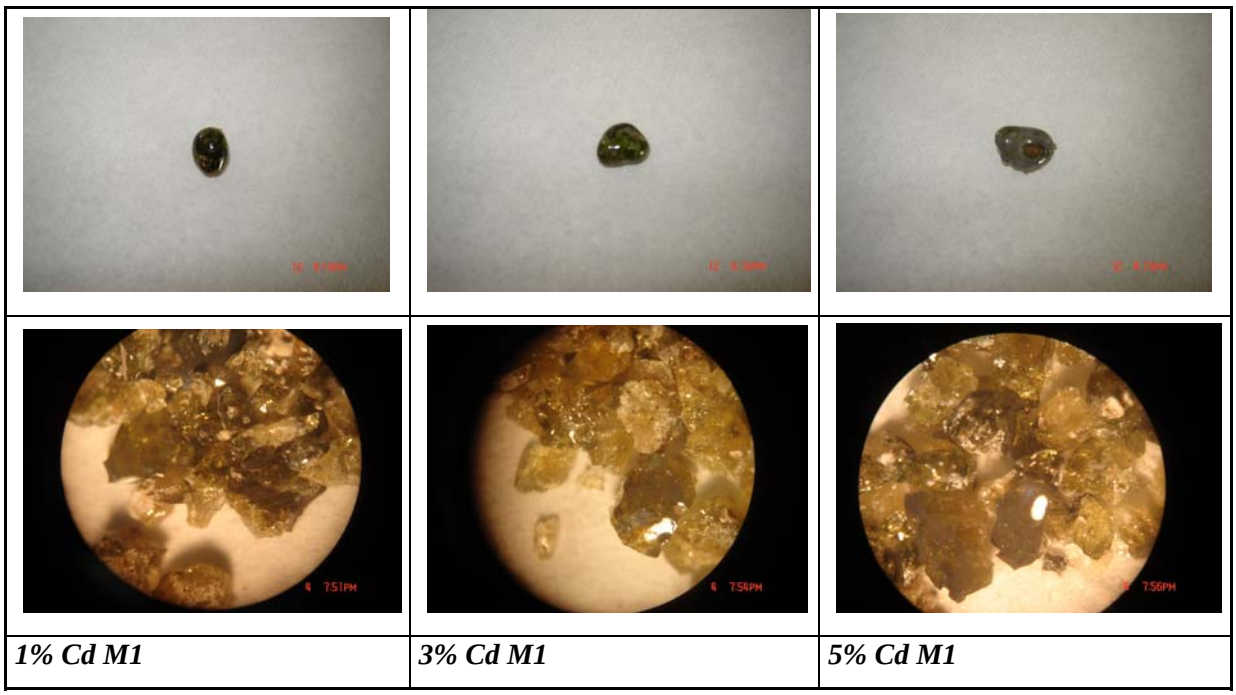


1% Zn M2	***3% Zn M2***	***5% Zn M2***

Fig. 5. 7 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con zinc al 1, 3, y 5% de metal y 40% de fundente

5.2.4 Vidrio con cadmio

Este vidrio adquirió una tonalidad verde amarillento. Tiene una apariencia brillante y cristalina pero tampoco se observa muy homogéneo como en el caso del vidrio con plomo o del cobre. La forma de las gotas formadas al fundir las tabletas de arena es deforme y como observación en el proceso de elaboración de este tipo de vidrio es que la fusión de sus muestras fue la más lenta de todos los metales.



1% Cd M1	***3% Cd M1***	***5% Cd M1***

Fig. 5. 8 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con cadmio al 1, 3, y 5% de metal y 35% de fundente

Otra característica del vidrio con Sulfato de Cadmio es que como en el caso del cobre, se observan ciertas partes oscuras en las mezclas al 5% poco más en M2 que en M1, manchas gris opaco, lo cual puede representar una de las pocas características apreciables a simple vista en el vidrio. Estas muestras se tuvieron que fundir varias veces debido a que se fragmentaba cuando se intentaba despegar del adoquín donde se efectuaba la vitrificación, por lo mismo las muestras fueron pequeñas y se tuvo una pérdida de muestra considerable.

Finalmente, al momento de realizar la fusión de la mezcla se observó que la flama dejaba trazas amarillas en el adoquín en forma de aureola, esto probablemente debido a las reacciones de oxidación de la sal del metal o a la interacción entre reacción de gasificación de los carbonatos con la sal de cadmio.

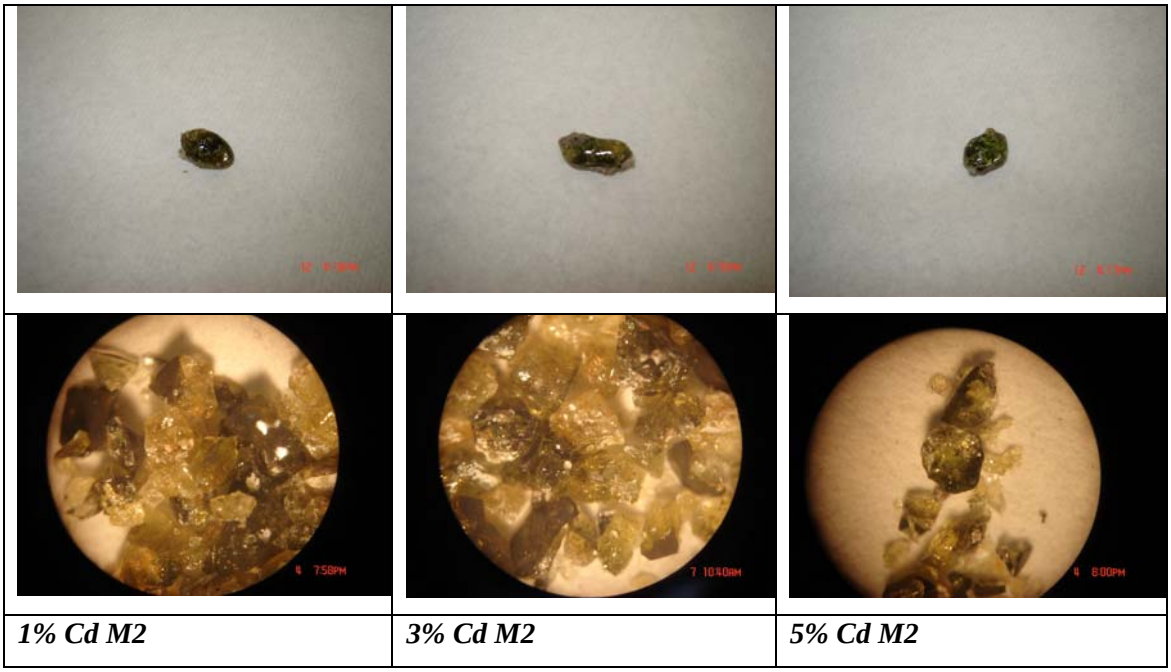
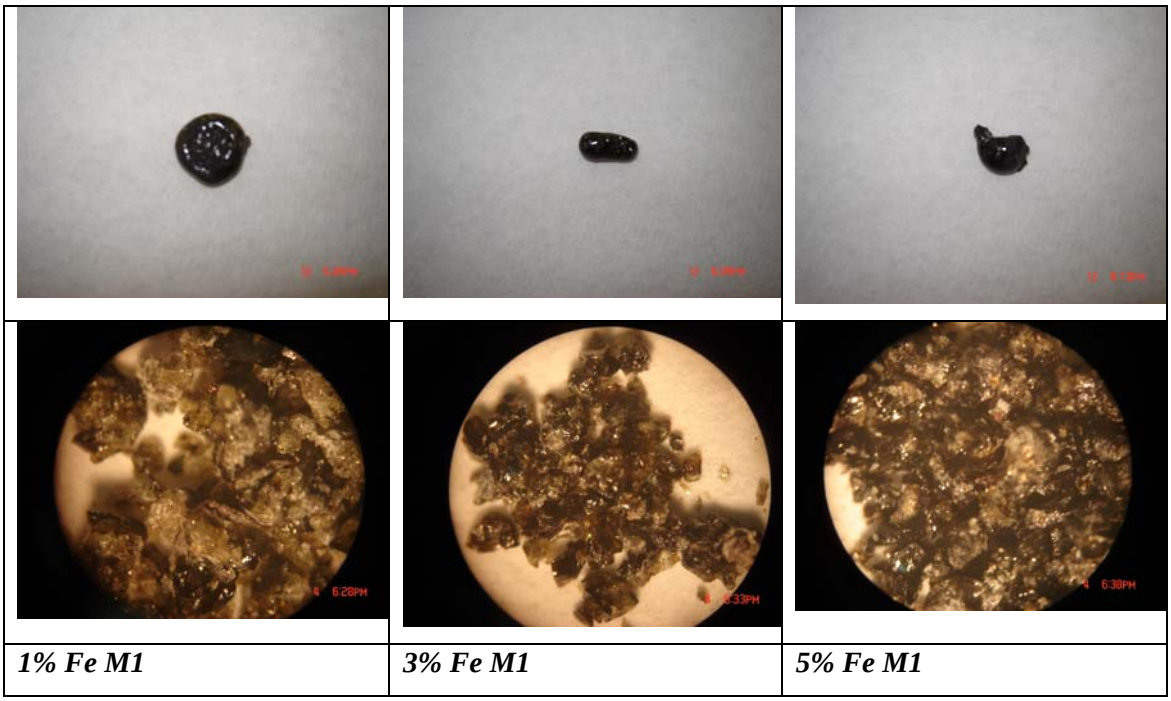


Fig. 5. 9 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con cadmio al 1, 3, y 5% de metal y 40% de fundente

5.2.5 Vidrio con fierro

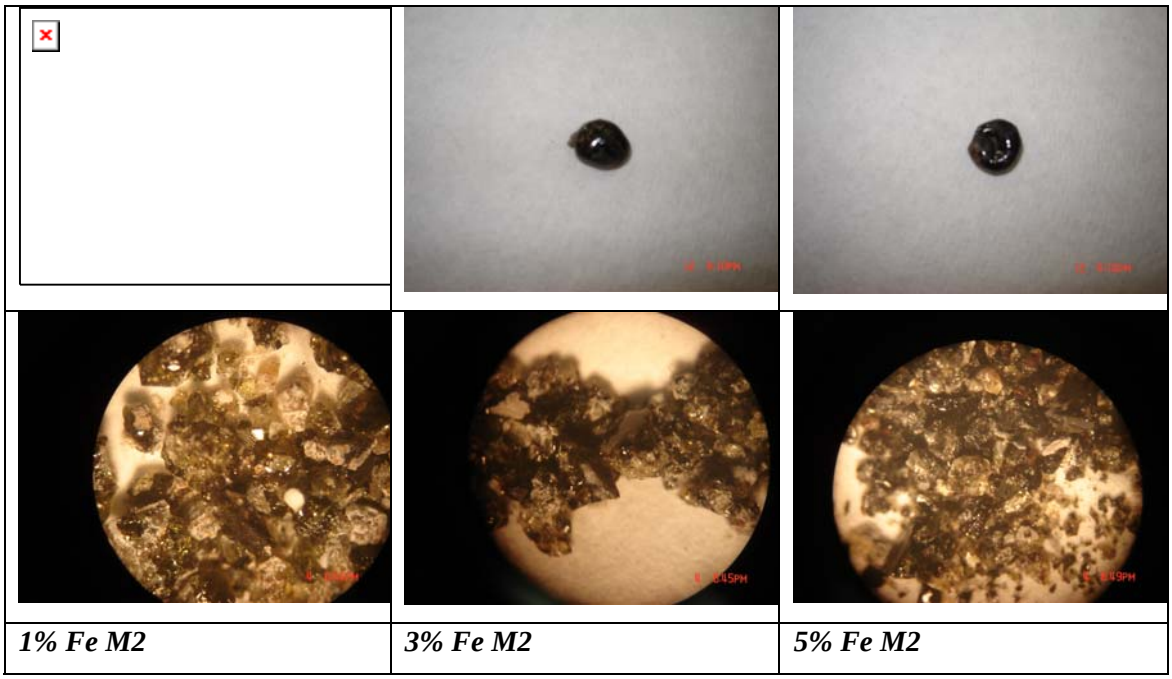
Para el caso del vidrio con fierro se obtuvo un vidrio color negro intenso, pero no metálico como en el caso del cobre, se nota más bien transparente y brillante. Las gotas formadas fueron otra vez deformes y para el caso de las concentraciones más bajas (1% M1 y 1% M2) se observó que las gotas no se redujeron mucho en volumen como en el caso de las concentraciones más altas.



1% Fe M1	***3% Fe M1***	***5% Fe M1***

Fig. 5. 10 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con fierro al 1, 3, y 5% de metal y 35% de fundente

Otra observación de este tipo de vidrio es que al momento de moler en el mortero para hacer las pruebas de lixiviación se observaron partículas de tamaño más homogéneo probablemente debido a su consistencia porosa. El color del vidrio se hizo mas intenso y oscuro conforme iba aumentando la concentración del metal en la muestra, esto se puede observar en el caso de las muestras con las concentraciones más altas de M1 y M2.



1% Fe M2	***3% Fe M2***	***5% Fe M2***

Fig. 5. 11 Fotografías tamaño real y 60X de vidrio con fierro al 1, 3, y 5% de metal y 40% de fundente

5.3 Pérdida de peso

Como se deseaba hacer un análisis de pérdida de peso contra pérdida de volumen, se realizaron una serie de cálculos que permitirían realizar esta comparación, pero debido a que la pérdida de peso en la muestra era relativa, se comparó contra la pérdida de peso teórica (PPT), análisis que paso por paso se describe en el apartado 4.2.11.b.

La razón de tomar en cuenta sólo la PPT es debido a que al inicio, se tiene un gramo exacto de la muestra en el crisol, pero al momento de sacar la muestra solidificada para poder fundirla, parte de la muestra se quedaba pegada, entonces ya no se comienza con 1g de muestra para fundir. Luego, al ser quemada, a pesar de realizar el proceso lo más cuidadosamente posible, parte de la gota de vidrio permanece pegada en el adoquín, lo que implica otra pérdida más, por lo que no se podía contabilizar estrictamente todas.

La pérdida de peso teórica implica tomar en cuenta las reacciones de pérdida por gasificación de carbonatos y óxidos, pero a su vez, contar las pérdidas por humedad (PH) que sufre cada uno de los componentes de la mezcla, ya que se decidió trabajar en base húmeda, es decir, ninguna de las sales ni de las arenas fue secada antes de meter a la mufla para fundir posteriormente a flama directa. De acuerdo a la determinación de humedad efectuada en trabajos de tesis anteriores (Martínez, I. y Lara, R., 2006), las PPH utilizadas para los cálculos que se realizaron se mencionan a continuación en la tabla 5.1 y se utilizaron para los cálculos realizados más adelante:

Tabla 5.1 Porcentaje de humedad de los materiales utilizados en las mezclas para la fundición de vidrio.

Material	**Humedad de materias primas (%)**
Arena Sílice	0.25
Bicarbonato de Sodio	16.48
Hidróxido de Calcio	0.16
Arcilla	0.36
Sulfato de Cadmio	0.05
Acetato de Plomo	5.75
Sulfato de Cobre	16.15
Sulfato Ferroso	21.66
Óxido de Zinc	5.00

Para poder contabilizar la PPT en el proceso de vitrificación por flama directa, se establecieron las reacciones de oxidación de carbonatos, hidróxidos y sales de metal empleadas

en este. Se hace la suposición de que el óxido de zinc no sufre ningún tipo de cambio debido a su estado inicial (no existe ninguna oxidación) al igual que el arena sílice y la arcilla. Las reacciones para el bicarbonato y para el hidróxido de calcio se pueden observar en las ecuaciones 4.3 y 4.4.

En cuanto a las sales, se tiene que considerar el contenido de humedad intrínseca que de por sí viene con ellas, así como la pureza en la que se encuentran a pesar de ser grado reactivo. Las reacciones que toman en cuenta la hidratación inicial, se enumeran de la ecuación 4.5 a la 4.8. Las reacciones de oxidación que sufren las sales conllevan una liberación de vapores de distintos gases que hace que la pérdida de peso sea mayor al añadir la sal.

La tabla 5.2 detalla los porcentajes de las pérdidas de peso del vidrio con cobre. La pérdida de peso teórica engloba las pérdidas por gasificación y por humedad por lo que estos porcentajes también aparecen en la tabla. Para este metal se observa que las pérdidas de peso se incrementan conforme aumenta la concentración del metal y son mayores también con respecto a la adición de fundente.

Tabla 5.2. Porcentaje de pérdidas de peso por gasificación, por humedad y total teóricas para Cobre

	1% M1	**3% M1**	**5% M1**	**1% M2**	**3% M2**	**5% M2**
PPG	10.524	14.776	19.099	11.674	15.873	20.136
PPH	6.333	7.136	7.938	7.115	7.854	8.592
PPT	16.191	20.858	25.521	17.959	22.481	27.000

En el caso de la tabla 5.3 el incremento del porcentaje de pérdida de peso tiene la misma tendencia que para el metal anterior, solo que los porcentajes son mucho menores, siendo, para el plomo los máximos porcentajes de pérdida los mínimos para el cobre. El aumento con respecto a fundente es de nuevo notorio.

Tabla 5.3 Porcentaje de pérdidas de peso por gasificación, por humedad y total teóricas para Plomo

	1% M1	**3% M1**	**5% M1**	**1% M2**	**3% M2**	**5% M2**
PPG	8.638	9.065	9.491	9.792	10.179	10.565
PPH	5.929	5.922	5.915	6.728	6.691	6.655
PPT	14.055	14.450	14.845	15.861	16.189	16.517

En el caso de zinc podemos observar, de la tabla 5.4, que de hecho las pérdidas van en decremento, lo cual se debe en gran medida a que no hay pérdidas de peso en cuanto a la sal porque no sufre ninguna reacción, solo se toman en cuenta las pérdidas por humedad y gasificación del carbonato y el hidróxido.

Tabla 5.4 Porcentaje de pérdidas de peso por gasificación, por humedad y total teóricas para Zinc

	1% M1	3% M1	5% M1	1% M2	3% M2	5% M2
PPG	8.319	8.107	7.896	9.477	9.234	8.991
PPH	5.920	5.897	5.874	6.724	6.681	6.637
PPT	13.747	13.527	13.306	15.564	15.298	15.032

De nuevo aquí, para la tabla 5.5 y para la 5.6 podemos notar la misma tendencia creciente que tienen el cobre y el plomo, un poco más disparada para el cadmio que para los demás metales. Se puede notar que para el caso del cadmio hay un decrecimiento y de nuevo un incremento en la curva, aunque sigue existiendo la tendencia de que a mayor cantidad de fundente existe una mayor pérdida de peso teórica. En este caso los porcentajes van de 3 a 26% para M1 y de 4 a 21% para M2, entre los cuales existe una gran diferencia que no lleva mucha tendencia en cuanto al aumento en concentración del metal en la muestra.

Tabla 5.5 Porcentaje de pérdidas de peso por gasificación, por humedad y total teóricas para Cadmio

	1% M1	3% M1	5% M1	1% M2	3% M2	5% M2
PPG	11.439	17.391	23.243	12.552	18.371	24.078
PPH	5.528	4.721	3.913	6.286	5.367	4.447
PPT	16.335	21.291	26.247	18.049	22.752	27.455

Para el fierro existe una tendencia similar en cuanto a que hay una baja en las concentraciones e inmediatamente un incremento, con perdidas desde 6 hasta 30% para M1 y de 7 al 31% para M2.

Tabla 5.6 Porcentaje de pérdidas de peso por gasificación, por humedad y total teóricas para Fierro

	1% M1	3% M1	5% M1	1% M2	3% M2	5% M2
PPG	11.170	16.802	22.629	12.318	17.889	23.644
PPH	6.7149	8.279	9.844	7.488	8.972	10.455
PPT	17.135	23.690	30.246	18.884	25.256	31.628

La tendencia de la pérdida de peso a aumentar conforme se incrementa la cantidad de solvente suena coherente debido a que existe una mayor cantidad de oxígeno en las muestras, que representa una mayor evaporación o gasificación y por lo mismo un menor peso al término de la fundición del vidrio.

Las figuras 5.12 y 5.13 muestran las gráficas correspondientes a las pérdidas de peso agrupadas de acuerdo a la cantidad de fundente en las mismas, es decir, una para todos los porcentajes de los metales problema al 35% de fundente y otra para los mismos porcentajes de los mismos metales pero para una mezcla base de 40% de fundente.

Es de notar que hay una mayor pérdida de peso conforme aumenta la cantidad de metal en la muestra, pero en el caso del zinc esta predisposición se rompe, debido a que como no hay reacción de oxidación involucrada, sólo puede haber cierta pérdida de peso debido a las pérdidas por gasificación y a las pérdidas por humedad debido al contenido de agua que las sales absorben del ambiente, además del agua intrínseca que ya poseen en su estructura molecular. El metal con menor pérdida de peso es el plomo, lo cual se puede corroborar al notar que las líneas para el zinc y para éste están casi pegadas y por debajo de los otros metales.

Las pérdidas de peso observadas en las gráficas son meramente teóricas, por lo que era de esperar no ver ningún tipo de desviación y por el contrario, se puede observar tendencias lineales en prácticamente todos los metales.

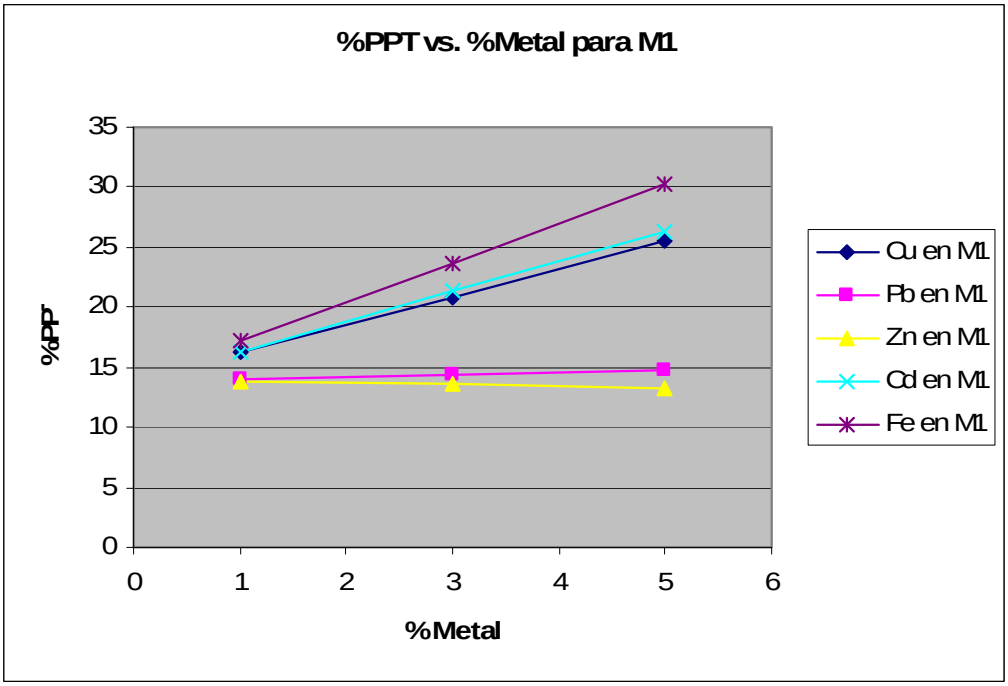


Fig. 5.12 Porcentaje de Pérdida de Peso Teórica para cobre, plomo, zinc, cadmio y fierro para 35% de fundente

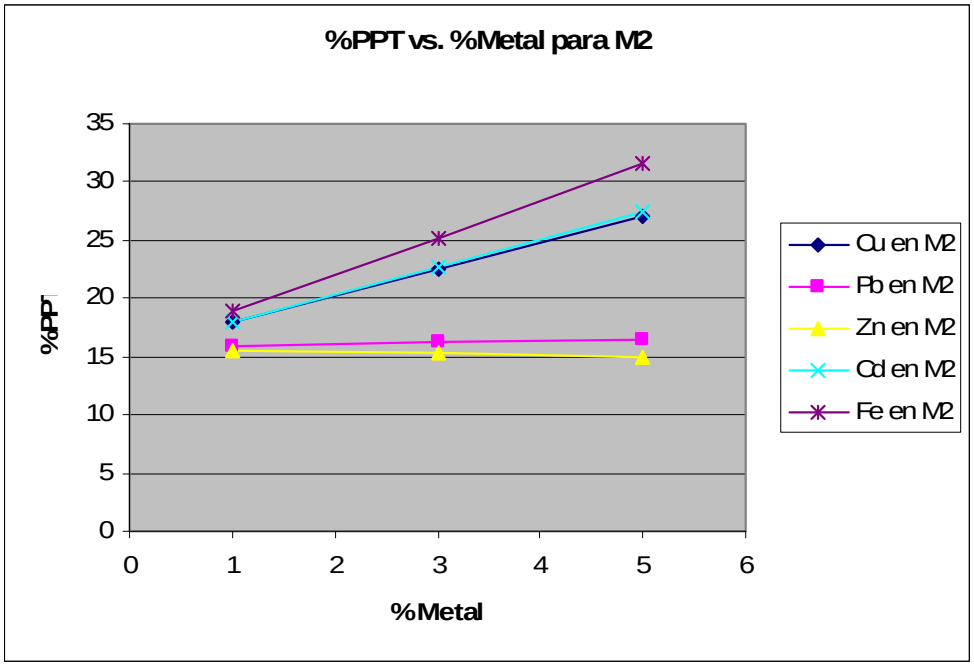


Fig. 5.13 Porcentaje de Pérdida de Peso Teórica para cobre, plomo, zinc, cadmio y fierro para 40% de fundente

5.4 Pérdida de volumen

Este tipo de análisis se llevó a cabo porque las pastillas formadas por la solidificación de la mezcla se reducían considerablemente al fundirlas. Se utilizaron los métodos descritos en el apartado 4.2.11 y la medición que aquí se muestra es la fracción de pérdida de volumen de cada uno de los metales con sus respectivas tablas de valores. Las tendencias de la pérdida de volumen se pueden observar en la figura 5.16 para M1 y en la 5.17 para M2. Las tablas con los valores correspondientes para las fracciones de pérdida de volumen de cada metal se encuentran a continuación.

5.4.1 Cobre

Para el caso del cobre es notorio que hay una tendencia aleatoria en la fracción de pérdida de volumen, primero aumenta y luego disminuye, independientemente del porcentaje de fundente en la mezcla, lo que puede observarse en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Fracciones de pérdida volumen de cobre al 35 y 40% de fundente

% Metal	%PV en M1	%PV en M2
1	0.825	0.844
3	0.849	0.799
5	0.808	0.756

La fracción de volumen tiene una tendencia un poco inconsistente con respecto a M1, pero en el caso de M2 la disposición de las curvas se ve estable y tiende a disminuir. En las figuras 5.16 y 5.17 se observan las mismas tendencias que para las tablas anteriores, además de que se puede ver claramente el máximo que se presenta en la mezcla con el 35% de fundente, línea en azul para este metal.

5.4.2 Plomo

En la tabla 5.8 y en las figuras 5.16 y 5.17, observamos el mismo comportamiento de las muestras de cobre con respecto a volumen. Las muestras con distinta cantidad de fundente tienen comportamientos similares, tal vez debido a que el plomo es el metal, según estudios anteriores, con mayor afinidad a la matriz vítrea que cualquier otro de los estudiados.

.

Tabla 5.8 Fracciones de pérdida de volumen de plomo al 35 y 40% de fundente

% Metal	%PV en M1	%PV en M2
1	0.808	0.816
3	0.780	0.803
5	0.743	0.755

5.4.3 Zinc

Para la tabla 5.9 y las figuras 5.16 y 5.17, vale la pena comentar que las tendencias son exactamente opuestas a las ya vistas para los metales anteriores ya que la fracción de pérdida de volumen tiene comportamientos ascendente y descendente. Para M2 el comportamiento se invierte para las dos fracciones.

Tabla 5.9 Fracciones de pérdida de volumen de zinc al 35 y 40% de fundente

% Metal	%PV en M1	%PV en M2
1	0.81537	0.83950
3	0.82884	0.71375
5	0.80352	0.75464

5.4.4 Cadmio

En el caso del cadmio, en la tabla 5.10 y las figuras 5.16 y 5.17, la fracción de pérdida de volumen para el 35% de fundente (M1) está en incremento mientras que para M2 baja, siguiendo el comportamiento que presentan el cobre y el plomo.

Tabla 5.10 Fracciones de pérdida de volumen de cadmio al 35 y 40% de fundente

% Metal	%PV en M1	%PV en M2
1	0.78491	0.79014
3	0.79847	0.74002
5	0.75966	0.73402

5.4.5 Fierro

Finalmente, para el fierro, la tendencia de la fracción de pérdida volumen aumenta en las muestras al 35% de fundente, pero en el caso de las muestras al 40% de fundente la tendencia es opuesta como en el caso de los primeros dos metales. Esto puede verse más claramente en las figuras 5.16 y 5.17 ya que las dos curvas, tanto para M1 como para M2 van aumentando progresivamente conforme aumenta el porcentaje de metal en la muestra.

Tabla 5.11 Fracciones de pérdida de volumen de fierro al 35 y 40% de fundente

% Metal	%PV en M1	%PV en M2
1	0.798	0.852
3	0.796	0.822
5	0.815	0.825

En la figura 5.16 se pueden observar las tendencias ya mencionadas, en donde para el cobre, zinc, cadmio y plomo las curvas bajando indicando que para el caso de las muestras con 35% de fundente, a mayor porcentaje de metal en las muestras, existe una menor pérdida de volumen. En el caso del plomo se puede observar una tendencia prácticamente lineal, lo que demuestra que el metal presenta un comportamiento muy favorable con esta técnica de vitrificación.

En el caso del fierro, se observa un comportamiento ascendente, lo que hace suponer que el intervalo de trabajo de esta tesis para el fierro no es el óptimo porque la tendencia es opuesta a lo esperado, además de que la dirección que sigue la curva de M2 para el mismo metal es la misma.

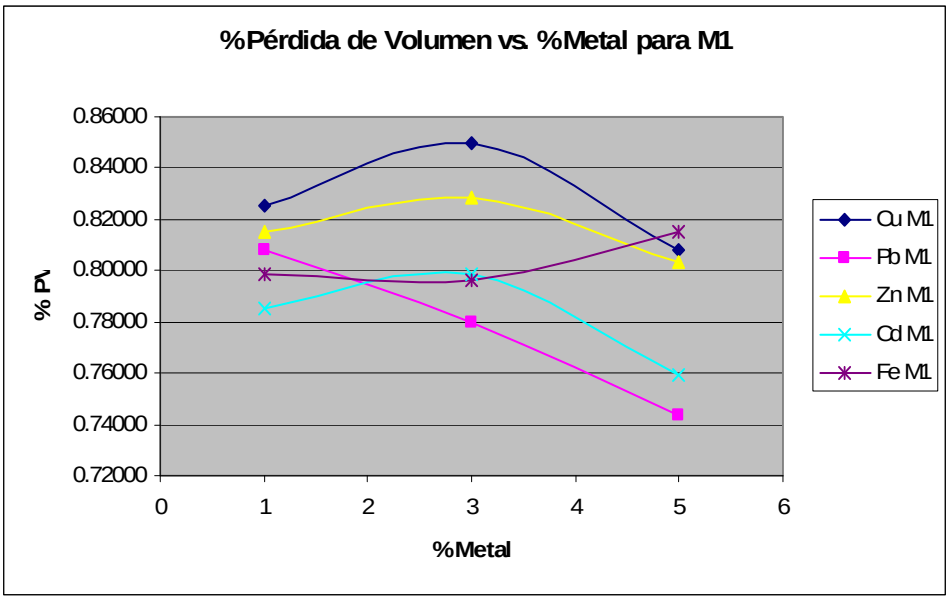


Fig. 5.16 Porcentaje de pérdida de volumen vs. porcentaje de metal para 35% de fundente.

En el caso de la figura 5.17, para el porcentaje de pérdida de volumen en la mezcla 2, también existe una tendencia decreciente, las curvas presentan una especie de mínimos, lo que hace sugerir que se tienen intervalos de composición en los que hay un mínimo de pérdida de volumen pero que si se aumenta el porcentaje de metal en la muestra, se empezará a perder otra vez. El cobre posee una tendencia lineal mientras que el fierro tiene la misma predisposición que para la figura anterior.

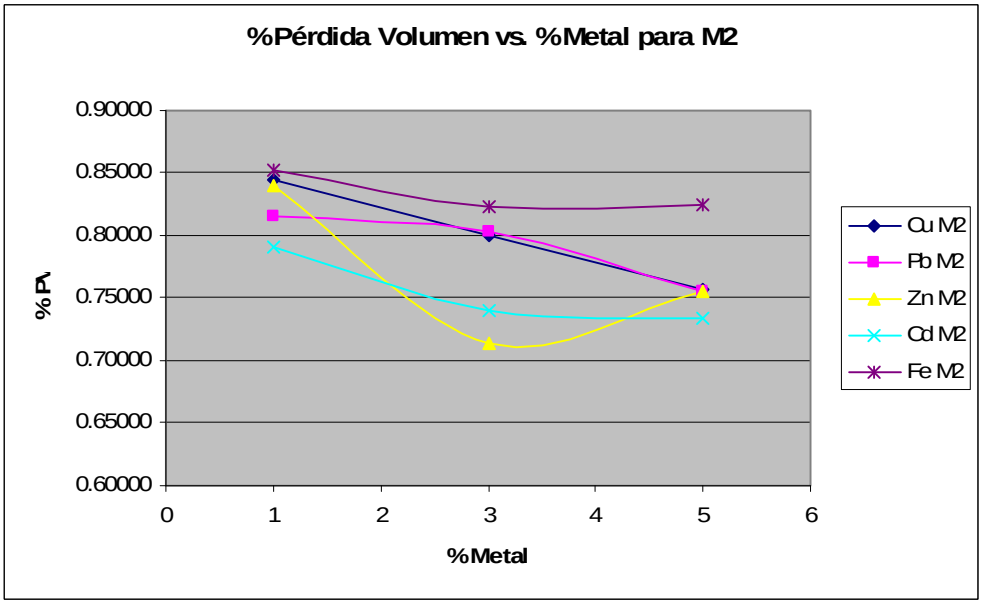


Fig. 5.17 Porcentaje de pérdida de volumen vs. porcentaje de metal para 40% de fundente.

En resumen, un aumento en porcentaje de metal en las muestras implica menos pérdida de volumen en las muestras, encontrándose las anteriores en un intervalo de 70-84% para el caso de la vitrificación con flama directa, obteniendo pérdidas con uso de mufla (Sosa, J. y Lara, R. 2004) del 60-73% y siendo las pérdidas reportadas en la literatura entre 50-75% para un intervalo similar de composiciones. Hay una mayor pérdida de volumen por este método que por el uso de horno porque no se tiene un control muy exacto de las medidas de volumen inicial de la pastilla, pero los porcentajes suenan coherentes tomando en cuenta que las pérdidas experimentales siempre son mayores a las teóricas.

5.5 Densidades experimentales

Por otro lado, los valores de masa y volumen finales sirvieron para sacar densidades experimentales y comparar con las reportadas en la literatura. La densidad del vidrio reportada en la literatura está alrededor de los 2500kg/m^3, aunque esto no quiere decir que las densidades obtenidas deben ser todas de este valor puesto que se está incorporando la sal de diversos metales que cuentan por si mismos con una densidad y peso característicos.

A continuación se muestran las tablas de densidades experimentales para cada metal y las gráficas comparativas para el 35 y el 40% de fundente. Se puede apreciar que se obtuvieron valores bastante reales que permiten corroborar que el vidrio formado por esta técnica tiene las características de densidad comparables con un vidrio común y corriente.

5.5.1 Densidad de vidrio con cobre

Para el caso del vidrio con cobre tenemos que la densidad tiene un comportamiento variable para M1 pero para M2 es claro que esta tiende a bajar conforme aumenta la concentración de cobre en la matriz vítrea. Lo anterior se puede observar en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Densidades experimentales de vidrio con cobre

Muestra	ρ (kg/m^3)
1% M1	2039.34
3% M1	2409.86
5% M1	2139.02
1% M2	2247.92
3% M2	2170.52
5% M2	1649.77

5.5.2 Densidad de vidrio con plomo

En este caso, la tendencia de las densidades es parecida a la que presenta el vidrio con cobre; nada concluyente con respecto a M1 pero en M2 si es apreciable una disminución notoria de los valores de densidad de vidrio, que se puede observar en la tabla 5.13.

Tabla 5.13 Densidades experimentales de vidrio con plomo

Muestra	ρ (kg/m^3)
1% M1	2048.34
3% M1	2340.63
5% M1	2258.29
1% M2	2318.84
3% M2	2256.17
5% M2	1391.37

5.5.3 Densidad de vidrio con zinc

De nuevo, la dirección que toman las curvas de las muestras con zinc es la misma tendencia que para los metales anteriores, esto puede verse en la tabla 5.154, lo cual indica que no hay fallas en el método, sino tal vez un comportamiento similar de las muestras en la concentración de 3 de todos los metales en el vidrio.

Tabla 5. 14 Densidades experimentales de vidrio con zinc

Muestra	ρ (kg/m^3)
1% M1	2055.67
3% M1	2365.89
5% M1	2299.10
1% M2	2327.02
3% M2	1628.68
5% M2	1416.12

5.5.4 Densidad de vidrio con cadmio

El comportamiento de este vidrio es igual que para el caso de los metales anteriores, lo cual puede apreciarse en las figuras 5.23 y 5.24 en donde es notoria la tendencia similar de todas las muestras de todos los metales con excepción del fierro, que tiene el sentido opuesto en M1 aunque para M2, sigue el que tienen cadmio y zinc. La tabla 5.15 permite notar este comportamiento.

Tabla 5.15 Densidades experimentales de vidrio con cadmio

Muestra	ρ (kg/m^3)
1% M1	1927.06
3% M1	2247.91
5% M1	1806.94
1% M2	2360.16
3% M2	1771.53
5% M2	1745.89

5.5.5 Densidad de vidrio con fierro

Este metal tiene un sentido opuesto en M1 con respecto a los metales anteriores, aunque para M2, sí es similar. De cualquier forma, solo este metal y el plomo conservan la misma tendencia para los dos tipos de mezcla ya que todos los demás tienden a cambiarla de acuerdo al porcentaje de fundente a la que se encuentren. Esto puede verse claramente en las figuras 5.18 y 5.19 y en la tabla 5.16

Tabla 5.16 Densidades experimentales de vidrio con fierro

Muestra	ρ (kg/m^3)
1% M1	2245.62
3% M1	2127.49
5% M1	2329.77
1% M2	2683.31
3% M2	2059.93
5% M2	2051.14

Las gráficas posteriores indican comportamientos más o menos recurrentes para todos los metales en cuanto a cantidad de fundente en la mezcla, independientemente del porcentaje de metal al que se encuentren las mezclas.

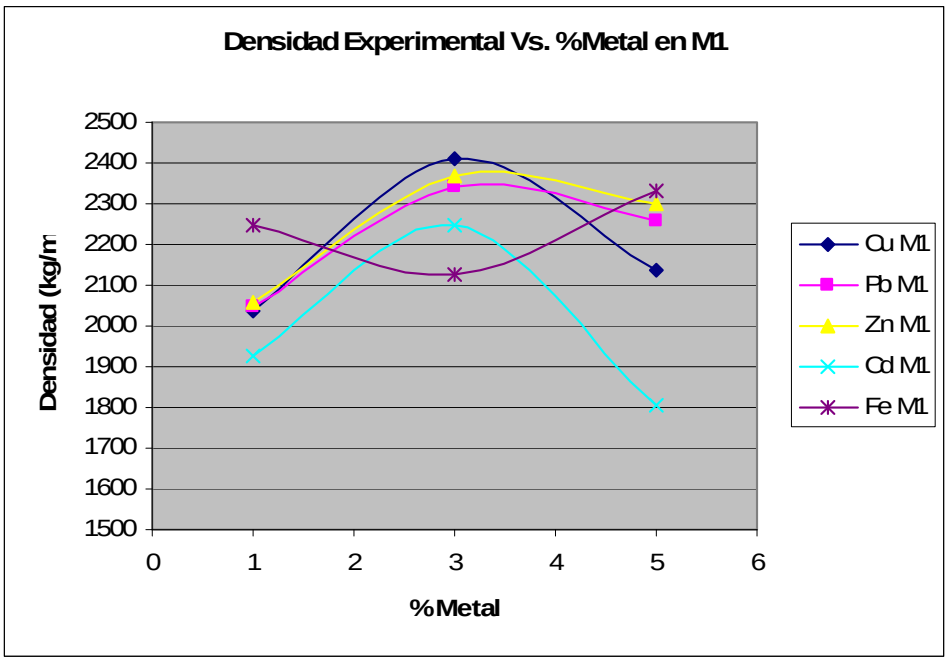


Fig. 5.18 Densidad experimental (kg/m^3) vs. % metal en M1

Para el caso de M1, para más de la mitad de los metales existe una tendencia ligeramente positiva, por ende, el vidrio más concentrado tiene una mayor densidad, mientras que para M2, en la figura 5.19, esta orientación cambia totalmente, lo cual permite determinar que para mezclas con un mayor fundente la densidad de las muestras va bajando, probablemente a que las muestras se van haciendo paulatinamente más porosas y por lo mismo más ligeras.

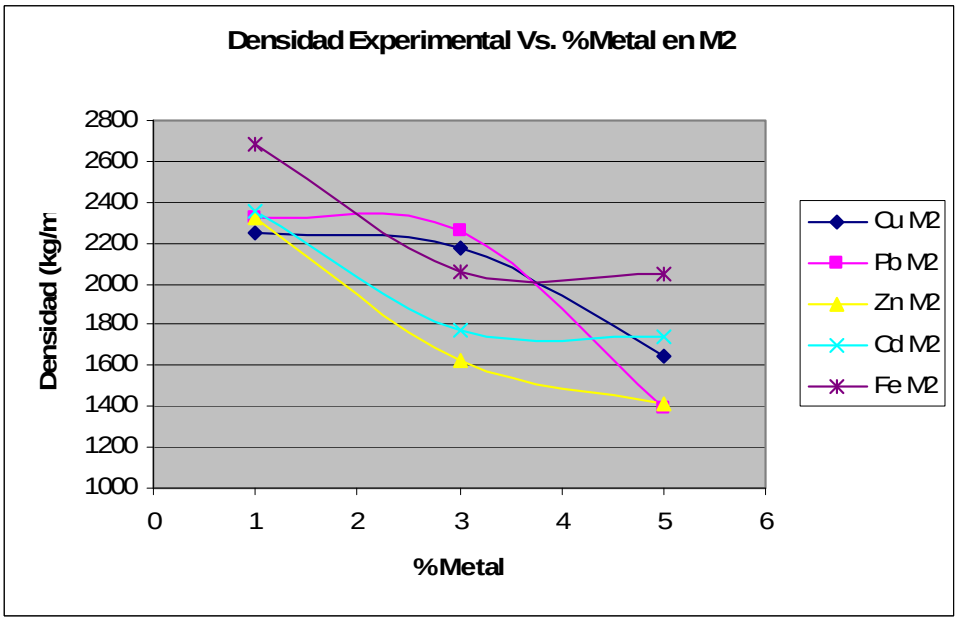


Fig. 5.19 Densidad experimental (kg/m^3) vs. % metal en M2

5.6 Análisis de Absorción Atómica

Se realizaron los análisis pertinentes a los extractos obtenidos mediante la prueba PECT para sacar las concentraciones correspondientes a las absorbancias registradas por el equipo de absorción atómica. Primero se fijó una curva de calibración (Anexo1) midiendo las absorbancias de los estándares de 1, 2, 3, 4 y 5ppm para de esta forma poder regresionar las gráficas obtenidas y encontrar una correlación adecuada para obtener las concentraciones de los metales en los extractos lixiviados de las muestras vitrificadas y comparar con respecto a la normativa.

Los resultados de estos cálculos se muestran en las siguientes tablas así como también las gráficas correspondientes a las muestras a 35 y 40% de fundente.

5.6.1 Cobre

En el caso de este metal, se puede observar que la tendencia más notoria con respecto al aumento de porcentaje del metal en la muestra es que la concentración aumenta. Esta es considerada la tendencia correcta debido a que si el volumen y la masa de un sólido disminuye existe una mayor cantidad de metal en el miso, que es el caso de estas muestras, y según las tesis previas, en la vitrificación realizada para este metal en la mufla, la tendencia de concentración en cuanto a la muestra con 35% de fundente concuerda con la obtenida por flama directa, pero en el caso de M2, con un 40% de fundente, la tendencia es exactamente la opuesta.

En el estudio previo (Martínez, I. y Lara, R., 2006), las gráficas y tablas muestran un comportamiento similar, con valores que aumentan y disminuyen debido a que se cuentan con más porcentajes de metal (7.5% y 8%) que los manejados aquí; debido a esto, el concluyó que trabajar a porcentajes mayores que el 5% daban valores de concentración más dispersos con un mayor error por lo que los valores obtenidos corroboran la información obtenida por el anterior y paralelamente acortan el rango de estudio.

En la tabla 5.17 podemos observar que para M1 las dos concentraciones sobrepasan la norma (NOM-053-SEMARNAT-1993) que estipula 5ppm como la concentración máxima de metal en residuos para no considerarlos peligrosos, y en M2 solo el 1% de metal satisface la norma ya mencionada ya que el 3% presenta una concentración ligeramente mayor.

Tabla 5.17 Concentraciones calculadas para cobre

% Metal	Concentración (ppm)
1% M1	5.779
5% M1	10.406
1% M2	4.077
3% M2	5.330
5% M2	8.020

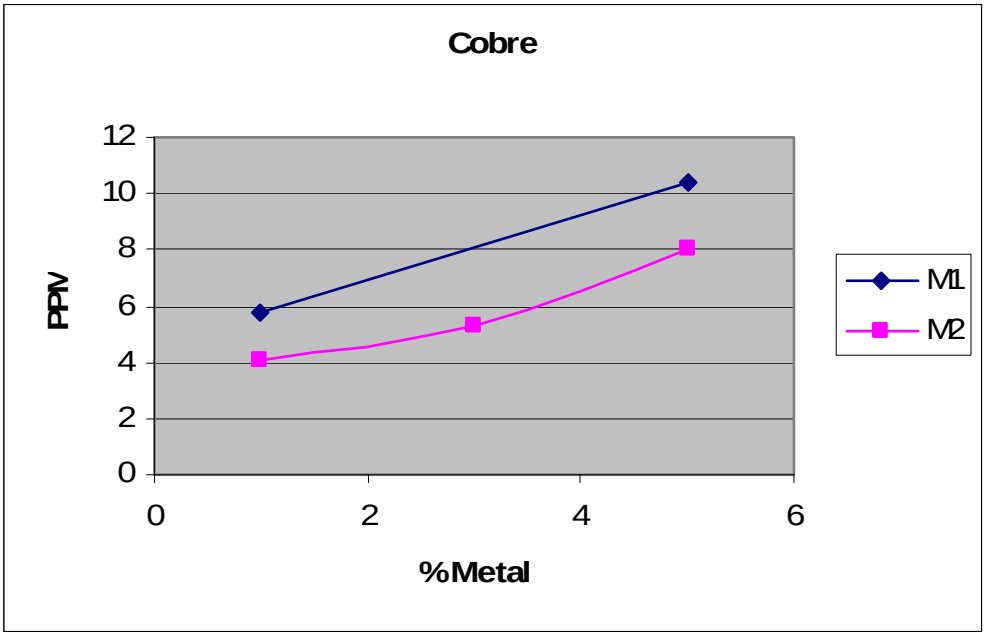


Fig.5.20 Concentración (mg/L) vs. % de metal en cobre

5.6.2 Plomo

En el caso de este metal, la tendencia de la gráfica 5.21 muestra, que igual que en el caso del cobre, la concentración del metal en el lixiviado aumenta conforme aumenta el porcentaje de metal en la misma, pero las concentraciones reportadas en la tabla 5.18 son mucho más bajas que las reportadas en los lixiviados del metal anterior, lo cual solo deja fuera las concentraciones correspondientes para el 5% de M1 y M2 del rango aceptado por la norma.

Tabla 5. 18 Concentraciones calculadas para plomo

% Metal	Concentración (ppm)
1% M1	1.082
3% M1	4.755
5% M1	9.425
1% M2	1.485
3% M2	4.470
5% M2	12.941

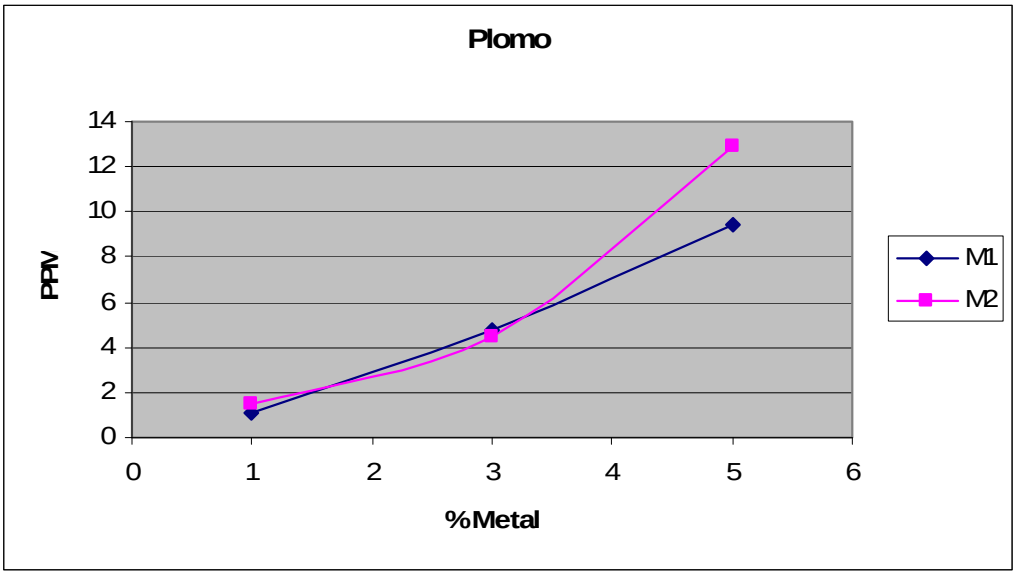


Fig. 5.21 Concentración (mg/L) vs. % de metal en plomo

5.6.3 Zinc

En el caso del zinc, se puede observar que todos los valores calculados para este metal caen por debajo de la estipulación de la norma, lo cual establece que posiblemente este es uno de los metales que arrojan mejores resultados en los lixiviados. La tendencia es de nuevo ascendente, a mayor porcentaje de metal en la muestra hay un aumento en la concentración de metal en el lixiviado.

Tabla 5.19 Concentraciones calculadas para zinc

% Metal	Concentración (ppm)
1% M1	4.75097
3% M1	4.82409
5% M1	4.85747
1% M2	4.71714
3% M2	4.86383
5% M2	4.86383

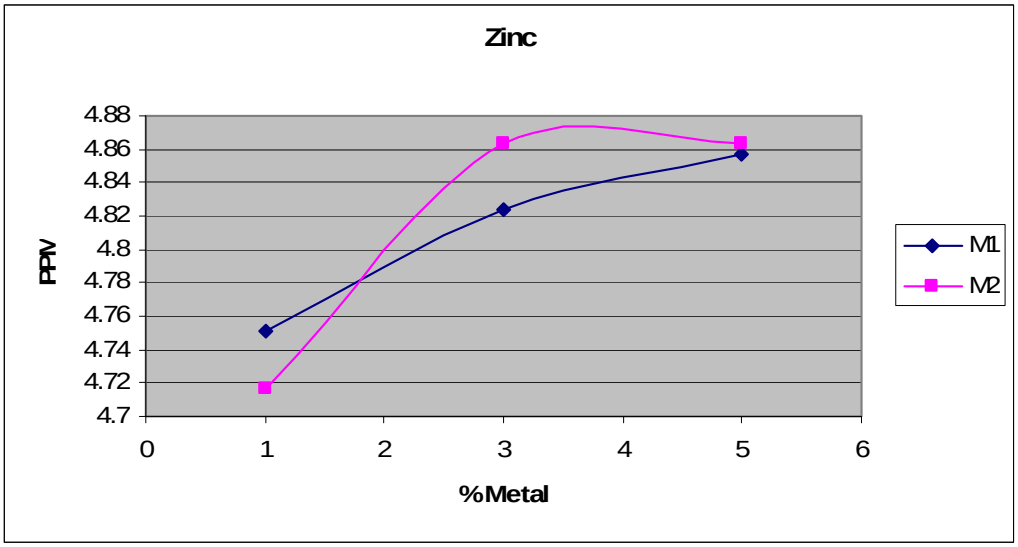


Fig. 5.22 Concentración (mg/L) vs. % de metal en zinc

Según la figura 5.22, confirmando lo establecido por la tabla anterior, las concentraciones mostradas por este metal tienen una tendencia ascendente conforme va aumentando el porcentaje de metal en la muestra.

5.6.4 Cadmio

En el caso del Cadmio, se puede observar que las concentraciones calculadas satisfacen en su mayoría las estipulaciones de la norma, siguiendo una tendencia igual positiva y ascendente conforme aumenta el porcentaje de metal en la muestra. Esta es mucho más sutil y menos marcada que para los otros metales pero de cualquier forma es similar en cuanto a comportamiento.

Sin embargo, como en el caso del cobre ya mencionado, se puede notar la preferencia por M2 al notar que muestra concentraciones más bajas en los extractos que M1. Esto podría denotar

cierta predilección por la composición formada por la mezcla dos con 40% de fundente por sobre un porcentaje más bajo.

Tabla 5.20 Concentraciones calculadas para cadmio

% Metal	Concentración (ppm)
1% M1	4.5553
3% M1	4.5509
5% M1	5.3135
1% M2	4.2912
3% M2	4.6405
5% M2	4.7191

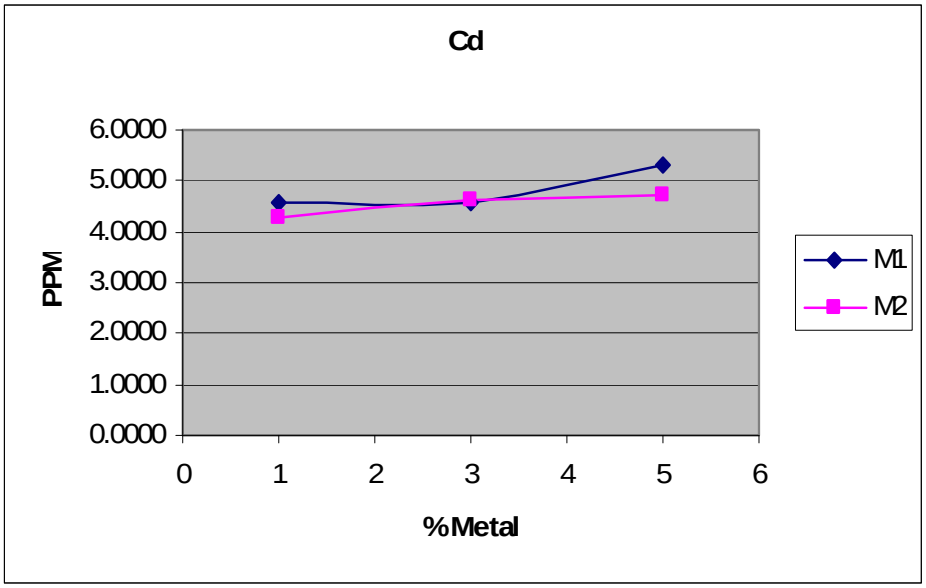


Fig. 5.23 Concentración (mg/L) vs. % de metal en cadmio

5.6.1 Fierro

En el caso del fierro, se puede observar directamente de la tabla que mientras que para el 3% de metal todavía se tienen valores de concentración razonables, para el 5% de concentración de metal los valores se elevan, haciendo interesante el análisis posterior para sacar el porcentaje máximo que concuerde con la norma. Hay de nuevo una tendencia ascendente de M1 y M2, siendo más marcada la primera en la figura 5.24.

Tabla 5.21 Concentraciones calculadas para fierro

% Metal	Concentración (ppm)
1% M1	0.555
3% M1	1.338
5% M1	14.888
1% M2	1.178
3% M2	3.876
5% M2	12.053

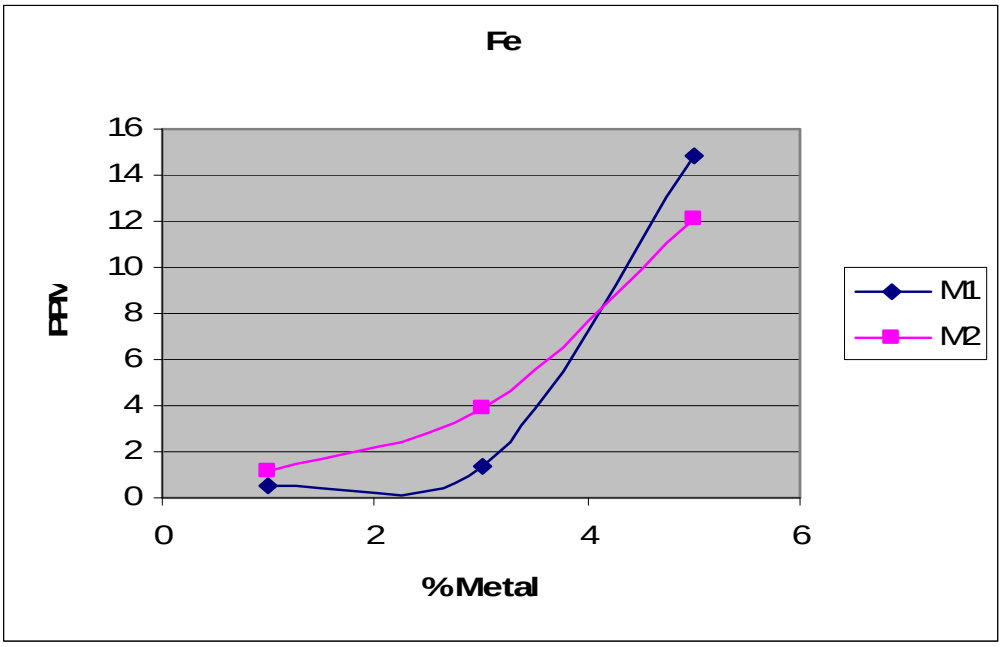


Fig. 5.24 Concentración (mg/L) vs. % de metal en fierro

5.7 Análisis de Retención

Este análisis derivó en una serie de cálculos de ecuaciones descritas en el apartado 4.2.11.b, que arrojan los datos de las tablas siguientes. Los resultados obtenidos son por arriba del 99% de retención para todos los metales lo que establece una buena evaluación del método de flama directa.

De cualquier forma, no es sólo importante que exista una buena retención en la matriz vítrea, sino que para llamar a un residuo no peligroso se deben cumplir con estatutos y normativas que

permitan la utilización de estos en actividades cotidianas, es decir, que le den estabilidad e impidan su lixiviación.

5.7.1 Cobre

Para este metal, se obtienen retenciones de más del 99.5%, solo en el caso del 1% de metal para la mezcla 2 se tiene un valor menor con respecto a los demás porcentajes. De acuerdo a la tendencia de los datos, se nota un aumento de retención mientras la concentración del metal aumenta pero solo en el caso de las mezclas con mayor fundente porque la de el menor tiene un comportamiento decreciente.

Tabla 5.22 Porcentajes de Retención para 35 y 40% de fundente para cobre

% METAL	% Retención
1% M1	99.988
5% M1	99.630
1% M2	99.202
3% M2	99.671
5% M2	99.720

5.7.2 Plomo

En la tabla 5.23 se observan retenciones mayores al 99.5%. En cuanto al aumento de porcentaje de metal en las muestras, se observa comportamiento negativo para ambas muestras, lo cual era esperado ya que en el estudio previo de vitrificación en mufla se tienen tendencias similares. Esto tiene explicación en el hecho de que a una mayor cantidad de metal en la muestra vitrificada existe una menor probabilidad de encapsulamiento y por lo mismo una mayor lixiviación.

Tabla 5.23 Porcentajes de Retención para 35 y 40% de fundente para plomo

% METAL	% Retención
1% M1	99.9980
3% M1	99.9971
5% M1	99.6594
1% M2	99.7347
3% M2	99.7350
5% M2	99.5415

5.7.3 Zinc

Las retenciones de zinc tienen una semejanza con el comportamiento de las mezclas de cobre en el porcentaje de 1% de M2. Las demás muestras tienen buenos porcentajes de retención en general, lo cual se puede notar en la tabla 5.24.

Tabla 5.24 Porcentajes de Retención para 35 y 40% de fundente para zinc

% METAL	% Retención
1% M1	99.9914
3% M1	99.9971
5% M1	99.8227
1% M2	99.1615
3% M2	99.7109
5% M2	99.8260

5.7.4 Cadmio

Este metal tiene excelentes retenciones para M1, pero tiene la misma tendencia en M2 que cobre y zinc, con una menor retención para el menor porcentaje de metal. Este comportamiento es extraño y opuesto a lo que se esperaría y una posible explicación es el intervalo de trabajo de los metales.

Tabla 5.25 Porcentajes de Retención para 35 y 40% de fundente para cadmio

% METAL	% Retención
1% M1	99.9924
3% M1	99.9976
5% M1	99.8432
1% M2	99.2963
3% M2	99.7609
5% M2	99.8630

5.7.5 Fierro

Para este último metal, tanto la tabla 5.26 como en la gráfica 5.26 manifiesta comportamientos aleatorios, en el caso de la muestra con menor fundente hay un máximo en los valores de metal establecidos, pero para el caso de M2, la retención disminuye como debería y se esperaría.

Tabla 5.26 Porcentajes de Retención para 35 y 40% de fundente para fierro

% METAL	% Retención
1% M1	99.9988
3% M1	99.9991
5% M1	99.4697
1% M2	99.7560
3% M2	99.7535
5% M2	99.5792

A pesar de posibles errores, en la figura 5.25 se puede observar que los porcentajes de retención disminuyen mientras el porcentaje de metal aumenta en la muestra de vidrio, pero en el caso de las muestras con una mayor cantidad de fundente esta tendencia es totalmente opuesta lo que habla de que existe un comportamiento con máximos y mínimos, es decir, para ciertos metales trabajar con 35% de fundente es mejor que para un 40% pero para otros esto es contrario lo que deja opiniones discutibles y dependientes del metal con el que se quiera trabajar.

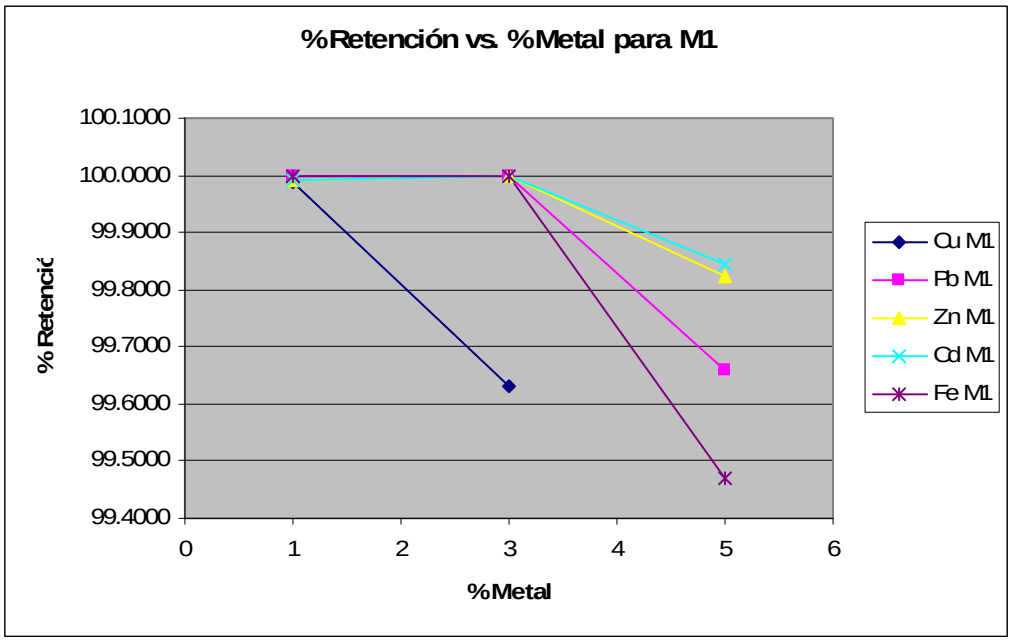


Fig. 5.25 Porcentaje de retención vs. porcentaje de metal en muestras con 35% de fundente

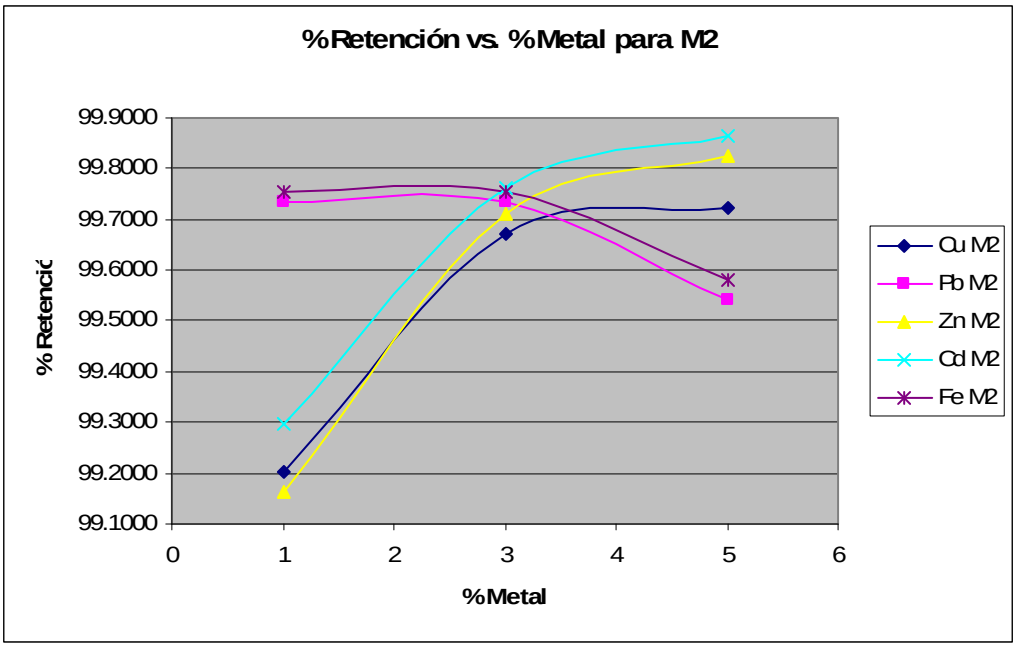


Fig. 5.26 Porcentaje de retención vs. porcentaje de metal en muestras con 40% de fundente

Finalmente, para la tabla 5.27, se agrupan todas y cada una de las tendencias en cuanto a retenciones y porcentajes de metal máximos como resumen a lo ya expuesto y comentado anteriormente. Los mejores porcentajes corresponden al zinc, que en sí no es un metal altamente peligroso, pero seguido por el cadmio, fierro y plomo que sí son metales muy contaminantes y tóxicos. Los menores porcentajes pertenecen al cobre.

Tabla 5.27 Porcentajes de metal y de retención máximos para residuos no peligrosos

	Cobre	Plomo	Zinc	Cadmio	Fierro
% Metal M1	0.326	2.957	10.112	4.021	3.762
% Retención M1	99.90	99.71	98.559	99.94	99.86
% Metal M2	2.178	3.177	8.705	7.201	3.377
% Retención M2	99.53	99.73	98.891	99.55	99.73

5.8 Análisis de peligrosidad

Este análisis se llevó a cabo para determinar a qué porcentaje de metal, los residuos cumplen con la concentración establecida por la norma que los determina no peligrosos y además

cumplen con retenciones adecuadas que permitirían el uso de este tipo de vidrio en la vida diaria sin presentar riesgos para la gente por toxicidad.

5.8.1 Vidrio con cobre

Habiendo analizado la tabla y gráfica para cobre, se realizó un análisis de regresión con la finalidad de saber el porcentaje exacto de metal que haría que se pudiera cumplir la norma, tanto para M1 como para M2, obteniéndose los resultados de la tabla 5.28, que establece un porcentaje extremadamente bajo de metal en las mezclas de 35% de fundente con respecto a la mezcla con 40%, lo cual denota que una mayor concentración en la mezcla de bicarbonato de sodio, es capaz de retener un mayor porcentaje de metal.

Tabla 5.28 Porcentaje de metal necesario para respetar la concentración estipulada por la norma de cobre

	M1	**M2**
%Metal	0.3264	2.1787
Ppm (mg/L)	5.0000	5.0000

Por los valores obtenidos, esta técnica posiblemente no es la mejor opción en cuanto a este metal, la concentración requerida por M1 es muy pequeña, lo cual probablemente indique que tratar de encapsular cobre en una muestra con un porcentaje de 35% de fundente no sea la mejor opción y aunque M2 retiene más metal sigue siendo una cantidad muy baja.

En el caso de la tesis en mufla (Martínez, I. y Lara, R., 2006), las concentraciones obtenidas en el lixiviado para los porcentajes de 3 y 5% son mayores que la norma, lo que muestra mejores resultados que los obtenidos para el vidrio hecho con flama directa.

5.8.2 Vidrio con plomo

De la misma forma que para el cobre, se hizo una regresión a la gráfica anterior para sacar los valores máximos de metal permitidos en una muestra para respetar las especificaciones de concentración de la norma, obteniendo los valores reportados en la tabla 5.29.

Podemos observar que tanto para M1 como para M2, los porcentajes de metal en las muestras de vidrio para esta técnica deben ser máximo del 2 y del 3% respectivamente, que son valores pequeños aunque ligeramente mayores que para el metal anterior.

Tabla 5. 29 Porcentaje de metal necesario para respetar la concentración estipulada por la norma de plomo

	M1	M2
%Metal	2.9579	3.1773
Ppm (mg/L)	5.0000	4.9994

En el caso del vidrio con flama directa, podemos observar en la tabla 5.29 que se tienen porcentajes máximos de 2.9 y 3 para el cumplimiento de la norma, lo que en el caso del vidrio hecho en mufla (Martínez, I. y Lara, R., 2006), todos los porcentajes son menores que la norma, inclusive se afirma que el plomo en el lixiviado no existe.

5.8.3 Vidrio con zinc

Haciendo las regresiones correspondientes a las curvas, se encontraron los porcentajes y concentraciones de la tabla 5.30.

Los valores obtenidos son muy altos con respecto a los metales anteriores, es notable la diferencia de porcentajes máximos para este metal y los anteriores ya que M1 establece un porcentaje de zinc de 10% y M2 de casi el 9% por lo que para este metal el método parece ser adecuado.

Tabla 5.30 Porcentaje de metal necesario para respetar la concentración estipulada por la norma de zinc

	M1	M2
%Metal	10.1128	8.7057
Ppm (mg/L)	5.0000	5.0000

Las concentraciones para este metal no pueden ser comparadas con otros estudios de tesis porque es la primera vez que se realizan estudios de este.

5.8.4 Vidrio con cadmio

Se realizó el análisis de regresión de las dos rectas y se obtuvieron valores concordantes con los del zinc que manejaba concentraciones parecidas, y son los siguientes:

Tabla 5.31 Porcentaje de metal necesario para respetar la concentración estipulada por la norma de cadmio

	M1	M2
%Metal	4.0216	7.2019
Ppm (mg/L)	5.0000	5.0000

En el caso de M1 se observa que el porcentaje máximo es de 4% mientras que en el caso de M2 se tiene un valor más alto por lo que se vuelve a establecer la afirmación anterior que concentraciones más bajas del 40% de fundente no son favorables para este metal.

El vidrio realizado con mufla (Martínez, I. y Lara, R., 2006), demuestra que todos los porcentajes de metal que se estudiaron cumplen con el requerimiento de la norma, lo cual, en el caso del vidrio creado por el método de flama directa, no es igual ya que sólo se cumple en el caso de M2, ya que para M1, solo el 3 y el 5% son menores que la norma.

5.8.5 Vidrio con fierro

Finalmente se realizan las regresiones de M1 y M2 para sacar una correlación adecuada que permita obtener los porcentajes máximos a 5ppm, la tabla 5.32 se muestra a continuación:

Tabla 5.32 Porcentaje de metal necesario para respetar la concentración estipulada por la norma de fierro

	M1	M2
%Metal	3.7627	3.3771
Ppm (mg/L)	5.0001	4.9991

Se pueden observar porcentajes de metal bajos para cumplir con la normativa, esto debido tal vez a la poca afinidad de retención de vidrio por este método con este metal. Un dato interesante es que sólo para este caso los valores de M1 arrojan un mejor resultado que los de la mezcla con mayor fundente; posiblemente esto se deba a que las tendencias de este metal siempre fueron poco convincentes con respecto a las observadas para los demás metales en casi todos los análisis y pruebas.

En el caso de la mufla (Martínez, I. y Lara, R., 2006), los porcentajes de fierro de 1 y 3% cumplen con la norma porque el 5% muestra una concentración en el lixiviado mayor, lo que se confirma con el uso de flama directa que demuestra el mismo resultado.