



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de las propiedades
reológicas de la pintura
encáustica**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Jorge Antonio Arróyave García de la Cadena

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Roberto Zenit Camacho



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, porque he tenido la dicha de sentir su cariño todos estos años.

A mis padres, por todo el amor que me han brindado, por desarrollar en mí este gusto por el arte, la cultura y la ciencia, por todos los valores que me inculcaron y porque no ha habido día que no sienta su apoyo.

A Luis, porque sin importar las circunstancias, siempre será mi compañero de vida.

A mis abuelos, porque he tenido la fortuna de tenerlos conmigo en todo momento, por todas las enseñanzas y por consentirme como lo hacen.

A Jesús y Carlos, con quienes he compartido toda la vida, porque siempre los consideraré como mis hermanos.

A Santi, Rafa y Candice, por ser mi inspiración día con día y por todas las aventuras. ¡Mahalo!

A Alexa, Frida, Gaby y Dani, por su gran amistad, aceptación y cariño, porque el tiempo pasa y ustedes permanecen.

A Julieta y Alam, porque si pienso en mi tiempo en la Facultad de Ingeniería, su apoyo es lo primero que viene a mi mente. Por las risas y el cariño.

Reconocimientos

Agradezco al Dr. Roberto Zenit por todo el apoyo brindado durante la realización de este gran proyecto, por la paciencia durante mi estancia, pero principalmente, por dejarme ser parte de este increíble proyecto, de nombre Ciencia y Arte, que crea un puente entre mis dos grandes pasiones y cuyo único propósito es encontrar el arte en la ciencia y la ciencia del arte.

A Sandra Zetina, por transmitir su conocimiento y pasión por el arte, porque su curiosidad dio vida a este estudio de la encáustica.

Un agradecimiento al Instituto de Investigaciones en Materiales por el espacio que nos da a los estudiantes para desarrollarnos en la investigación, al proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM (IN108016), ACT-FONCA (04S.04.IN.ACT.038.18) porque su apoyo facilitó la realización de este trabajo.

De igual forma, gracias al proyecto PAPIIT (IN402417), La superficie y el color: Estudios interdisciplinarios sobre los materiales de pintura del arte moderno mexicano del Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM, por iniciar este gran proyecto.

Gracias a Bernardo Palacios Muñoz, porque sin su gran ingenio otra cosa sería de este trabajo y a la Dra. Elsa de la Calleja Mora y Q.F.B. Eriseth Reyes Morales por su apoyo en la caracterización de las mezclas experimentales.

Pero principalmente agradezco a mi familia, porque gracias a su entrañable apoyo logré la creación de este gran trabajo.

Resumen

El presente trabajo es un estudio de las propiedades de la encáustica, haciendo uso de la mecánica de fluidos. La encáustica es la técnica de pintura que empleó Diego Rivera en los inicios del movimiento del muralismo mexicano. El objetivo del trabajo es entender la razón de la complejidad de la técnica, a través de la variación de los parámetros que afectan la aplicación de la misma. Para la realización de la investigación fue necesario realizar una amplia investigación sobre los materiales y la experiencia de artistas para entender el fenómeno. Una vez entendiendo esto, fue posible diseñar un experimento que permite realizar de forma controlada la acción de pintar con encáustica. Modificando distintas variables como la temperatura y concentración de pigmentos, se obtuvieron distintos resultados que permitieron, con la ayuda de un análisis adimensional, encontrar una relación entre las variables para predecir la geometría de los trazos según las condiciones de aplicación. Con la ayuda de los resultados del trabajo, se pretende entender de mejor manera la técnica, para explicar algunos aspectos de la técnica de Diego y para que nuevos artistas puedan dominar y utilizarla, reduciendo el tiempo de pruebas empíricas.

Índice general

1. La encáustica	1
1.1. La encáustica como origen del arte	1
1.2. Dr. Atl y los <i>Atlcolors</i>	2
1.3. Diego Rivera y la encáustica	3
1.4. <i>La Creación</i>	4
2. La ciencia de la encáustica	13
2.1. Mecánica de fluidos	13
2.1.1. Los fluidos	13
2.1.2. La viscosidad y el flujo	13
2.1.3. Reología	16
2.1.4. Viscoelasticidad	17
2.1.5. Modelos reológicos	17
2.1.6. Análisis dimensional	19
2.2. Materiales	19
2.2.1. Cera de abeja	19
2.2.2. Resina copal	21
2.2.3. Resina elemí	22
2.2.4. Aceite de alhucema	23
2.2.5. <i>White Spirit</i>	23
2.2.6. Pigmentos	24
2.2.6.1. Blanco de Zinc	25
2.2.6.2. Azul ultramar	25
2.2.6.3. Rojo óxido de hierro	25
2.2.6.4. Negro de humo	26
2.3. Motivación: arte y ciencia	26
3. Diseño experimental	27
3.1. Mezcla experimental	27
3.1.1. Materiales empleados	27
3.1.2. Método de preparación	28
3.2. Caracterización de la mezcla	29
3.2.1. Calorimetría	29

ÍNDICE GENERAL

3.2.2. Reometría	30
3.3. Análisis de la técnica	30
3.4. Experimento de Barrido	32
3.4.1. Control de temperatura	32
3.4.2. Sistema de deformación	32
3.4.3. Control de velocidad	33
3.4.4. Sistema fotográfico	33
3.4.5. Disposición general	33
3.4.6. Metodología experimental	34
3.5. Mezclas Experimentales	35
3.6. Experimentación realizada	36
4. Resultados	39
4.1. Calorimetrías	39
4.1.1. Interpretación de resultados	40
4.2. Prueba de flujo para mezclas con diferentes pigmentos	40
4.2.1. Interpretación de resultados	41
4.3. Prueba de flujo para mezclas con mismo pigmento	44
4.3.1. Interpretación de resultados	44
4.4. Experimento de barrido	47
4.4.1. Serie 1: Velocidad y cambio de forma	47
4.4.1.1. Interpretación de resultados	48
4.4.2. Serie 2: Temperatura y cambio de forma	52
4.4.2.1. Interpretación de resultados	54
4.4.3. Serie 3: Concentración y cambio de forma	56
4.4.3.1. Interpretación de resultados	56
4.4.4. Serie 4: Altura de espátula y cambio de forma	58
4.4.4.1. Interpretación de resultados	59
5. Adimensionalización del fenómeno	61
5.1. Análisis adimensional	61
5.2. Número de Reynolds	62
5.2.1. Interpretación de resultados	64
5.3. Factor de embarrado	64
5.3.1. Interpretación de resultados	66
6. Conclusiones	67
Bibliografía	69

La encáustica

La encáustica es una de las técnicas de pintura más antiguas de la historia. De difícil manejo, solo unos cuantos artistas lograron dominar la técnica y plasmar obras de arte que se preservan hasta épocas contemporáneas. El presente capítulo es una breve reseña de la encáustica, su relevancia en la historia del arte y el uso dado por Diego Rivera a la misma para iniciar el movimiento del muralismo mexicano.

1.1. La encáustica como origen del arte

Desde el principio, el hombre ha buscado la forma de explicar el universo a través de tres distintos lenguajes: la ciencia, el arte y la religión. Mientras la ciencia se enfocó en la naturaleza y la religión en lo espiritual, el centro de estudio del arte fue el hombre. A través de la estética, el hombre buscó comunicar ideas y pensamientos y con el uso de distintos materiales, fue capaz de hacerlo. La encáustica, del griego *enkaustikos* que puede interpretarse como “grabar al fuego” (aunque mucho debate filológico ha surgido alrededor de esta palabra), es una técnica de pintura desarrollada por los griegos y cuya característica principal es el uso de cera como aglutinante de los pigmentos para poder pintar. La encáustica es considerada una de las técnicas de pintura más antiguas. Los griegos utilizaban la encáustica para pintar murales y esculturas e impermeabilizar barcos. Las obras de arte en encáustica más antiguas que se tienen, son retratos coptos encontrados en la región de *Al-Fayyum*, Egipto. A pesar de tener más de 2000 años de antigüedad, la mayoría de los retratos se encuentran en las colecciones de los más importantes museos del mundo, presentando un buen estado de conservación como se muestra en la Figura 1.1. La técnica también se utilizó en Roma y en el siglo I d.C. Plinio el Viejo escribe que la técnica era utilizada desde los más antiguos maestros griegos para realizar retratos y murales y adornar los templos [1].

Más tarde, la técnica se iría perdiendo hasta ser retomada por Diderot y el Conde Caylus en la Ilustración. Muchas interpretaciones de textos antiguos fueron hechas en el siglo XVIII, causando conocimiento dudoso y erróneo sobre los métodos de la técnica; inclusive surgió la leyenda que relaciona la encáustica con *La Última Cena* de Leonardo da Vinci, aunque actualmente, es bien sabido que fue ejecutado al temple [2]. En el prólogo de *Sobre la Encáustica y el Fresco*, una serie de notas de una conferencia dada por Diego Rivera sobre su trabajo, Salvador Elizondo da la siguiente descripción sobre la encáustica:

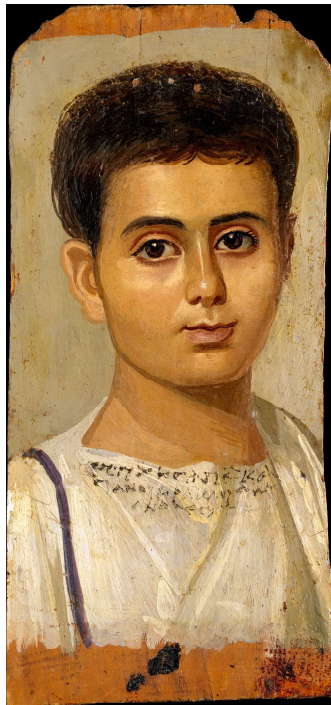


Figura 1.1: Retrato de momia de Eutiques, 100-150 a.C. Se observa que la pieza presenta un excelente estado de conservación. Tomado de [4]

La encáustica, como su nombre lo indica, es el trabajo “en caliente”. Sus materiales son de naturaleza fusible y opaca semejante a la del lacre común. Su vehículo es una emulsión de cera virgen y esencia de alhucema que mezclada con los pigmentos se aplica fundida. Mientras no fragua admite modelado, insistencia o pequeños pen-timenti. Muchos pintores que han empleado esta técnica (Leonardo ente otros, con poco éxito) la recuerdan por su gran dificultad y peligro no menos que por el grato olor que despide su ejecución [3].

1.2. Dr. Atl y los Atlcolors

La técnica de la encáustica estuvo en desuso por mucho tiempo y aunque muchos artistas experimentaron con la misma, no fue sino hasta principios de siglo XIX que la técnica volvió a tener relevancia, especialmente en el arte francés con artistas como Eugene Delacroix. En México, Gerardo Murillo (1875-1964), mejor conocido como Dr. Atl, inició la producción de barras de color que trataban de recuperar la técnica de la encáustica de una forma moderna y de fácil aplicación, antes de la Revolución Mexicana. En su afán por encontrar nuevas técnicas de pintura, experimentó con la cera de abeja y logró crear una mezcla de cera y resinas para crear una serie de crayones que posteriormente se les llamaría los *atlcolors*. Dr Atl utilizaría los crayones en su producción artística, un ejemplo se muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2: *La Nube*, óleo y *atcolor* sobre tela. Dr. Atl se caracterizó por plasmar el paisaje mexicano con únicos y vívidos colores, [5]

La historia de los *atcolors* es incierta y durante su vida, Dr. Atl modificaría las mezclas de sus *atcolors* y sus crayones no se denominarían así hasta mucho tiempo después. La primera fórmula de la que se tiene registro data de 1902, cuando Atl se encontraba estudiando en Roma. Los *atcolors* se compondrían de cera de abeja, resina copal, trementina y aceite de linaza. Con sus crayones creó una producción artística que sería exhibida en París y sería elogiado por la crítica debido a la importancia de su técnica [6]. En 1919, en una exhibición en Los Ángeles, bautiza a sus crayones como los *atcolors*. Dr. Atl regresa a México para instruir a las nuevas generaciones de artistas en las técnicas innovadoras que había aprendido en Europa; entre los estudiantes que se inspiraron en las propuestas de Dr. Atl se encontraba Diego Rivera [7].

Tiempo después, Diego Rivera afirmaría que él también se interesó en la cera de abeja y se atribuiría la invención de los crayones mientras se encontraba estudiando en la Escuela Nacional de Bellas Artes de San Carlos, junto con sus colegas Francisco de la Torre y Alberto Garduño. No sería la primera ni la última vez que Diego Rivera inventaría historias para atribuirse habilidades artísticas durante su carrera [8].

1.3. Diego Rivera y la encáustica

Diego Rivera se empezó a interesar por la técnica de la encáustica en 1905 ya que quería recrear la técnica de Raffaelli de colores al óleo sólidos. Rivera se embarcó en un viaje a Europa para desarrollarse como artista. Inició su viaje en París y se interesó por la teoría del color; de acuerdo con los experimentos realizados con Dr. Atl, consideraba que la cera aporta luminosidad y permanencia al color. Rivera estudió al pintor francés Delacroix y logró encontrar

1. LA ENCÁUSTICA

la mezcla de la encáustica a través de tratados del siglo XIX. Rivera describe la técnica de Delacroix de la siguiente manera:

Para su encáustica molía los pigmentos con una emulsión hecha de cera (resina elemí) disuelta en esencia de espliego y una solución de copal disuelta en la misma esencia. Molidos los pigmentos, el maestro degradaba los tonos de que disponía mezclándolos con blanco puro, obteniéndose así una escala de siete tonos de cada uno de ellos... [8]

Ya definida la receta, se dedicó a investigar la forma de cauterizar las pinturas para lograr dominar la técnica. Rivera estudió a Plinio el Viejo, Paillot de Montabert y Eugene Delacroix. Estudiando a Plinio descubrió que “los pintores usan para los trabajos finos la antorcha de los orifices y plateros”, es decir, era necesario soplar una flama a la obra [8]. También descubrió que para lograr la cauterización la mezcla debía contener petróleo esencial, una especie de gasolina blanca. Así logró Diego Rivera conquistar la técnica antigua de la encáustica.

1.4. *La Creación*

Después de la Revolución Mexicana, los intelectuales del país identificaron la necesidad de hacer un proyecto cultural para unir al país después de una contienda de más de 7 años. Fue José Vasconcelos, secretario de educación pública, comisionó en 1921 a Diego Rivera para pintar el anfiteatro Simón Bolívar de la Escuela Nacional Preparatoria, hoy Antiguo Colegio de San Ildefonso, dicho anfiteatro era el recinto académico y cultural más importante de la época [9].

La Creación es considerado el primer mural del movimiento debido a su propuesta vanguardista. Diego Rivera decide pintarlo con la técnica de la encáustica por varias razones: deseaba aplicar la técnica de teoría del color que había aprendido en Europa, aportar características del material harían que el mural no sufriera daños ante las condiciones ambientales y hacer referencia a la antigüedad [2]. La Figura 1.3 muestra una fotografía de la época.

Rivera inició el mural a principios de 1922 y fue inaugurado en marzo de 1923. Rivera planeó de forma muy detallada el mural ya que quería incorporar los elementos arquitectónicos presentes en el recinto al mural. El proceso seguido para la realización del mural fue establecer la composición y trazar el mismo en la pared del anfiteatro, para después ser cincelados los trazos [9]. Enseguida se preparó el muro con una capa de copal caliente mexicano, calentando la superficie y frotando sobre ella. La preparación de la encáustica vino después, de la cual Rivera dice:

Se pintó sobre esta preparación usando los pigmentos molidos con una emulsión de volúmenes iguales de cera disueltos al baño María en esencia de espliego a calidad pastosa, y mezclada a igual volumen y densidad semejante de resina de Elemí, igualmente disuelta en esencia de espliego y copal, disuelto en petróleo esencial a 50 % una y otras resinas. [8].

Rivera afirmó que pintó en caliente y que hizo muy pocos retoques en frío. También aspiraba a recuperar por primera vez la técnica verdadera de la encáustica desde los griegos. Esta fue la primera y última vez que Diego Rivera trabajaría con la encáustica debido a su complejidad.

La Creación, que se muestra en la Figura 1.4, es una composición alegórica con temas mitológicos y religiosos. En lo alto del mural se tiene un cielo y tres manos que bendicen, que representan a la Divina Trinidad. En la parte inferior del mural se encuentran Adán y Eva. A los lados del mural se encuentran las nueve musas griegas, cada una representando a las distintas manifestaciones del arte y las seis virtudes Teologales y Cardinales; y en el cielo la Sabiduría y la Ciencia. Al centro del mural, se encuentra el hombre; la representación del hombre es un autorretrato del mismo Rivera [9].

En la Figura 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9 se observan distintas secciones del mural donde es fácil apreciar distintos acabados y trazos encontrados en el mural.

La Creación marcó el inicio de una serie de murales que serían pintados por los más importantes artistas mexicanos de la época, artistas como José Clemente Orozco y David Alfaro Siqueiros; a este movimiento se le conoce como el del muralismo mexicano. Cada pincelada plasmaría los valores, historia e ideología del país, marcando una nueva etapa de la historia mexicana, etapa encaminada al progreso, la modernidad y la unidad nacional.

1. LA ENCÁUSTICA



Figura 1.3: Diego Rivera pintando *La Creación* ©The Jean Charlot Foundation, Universidad de Hawaii.

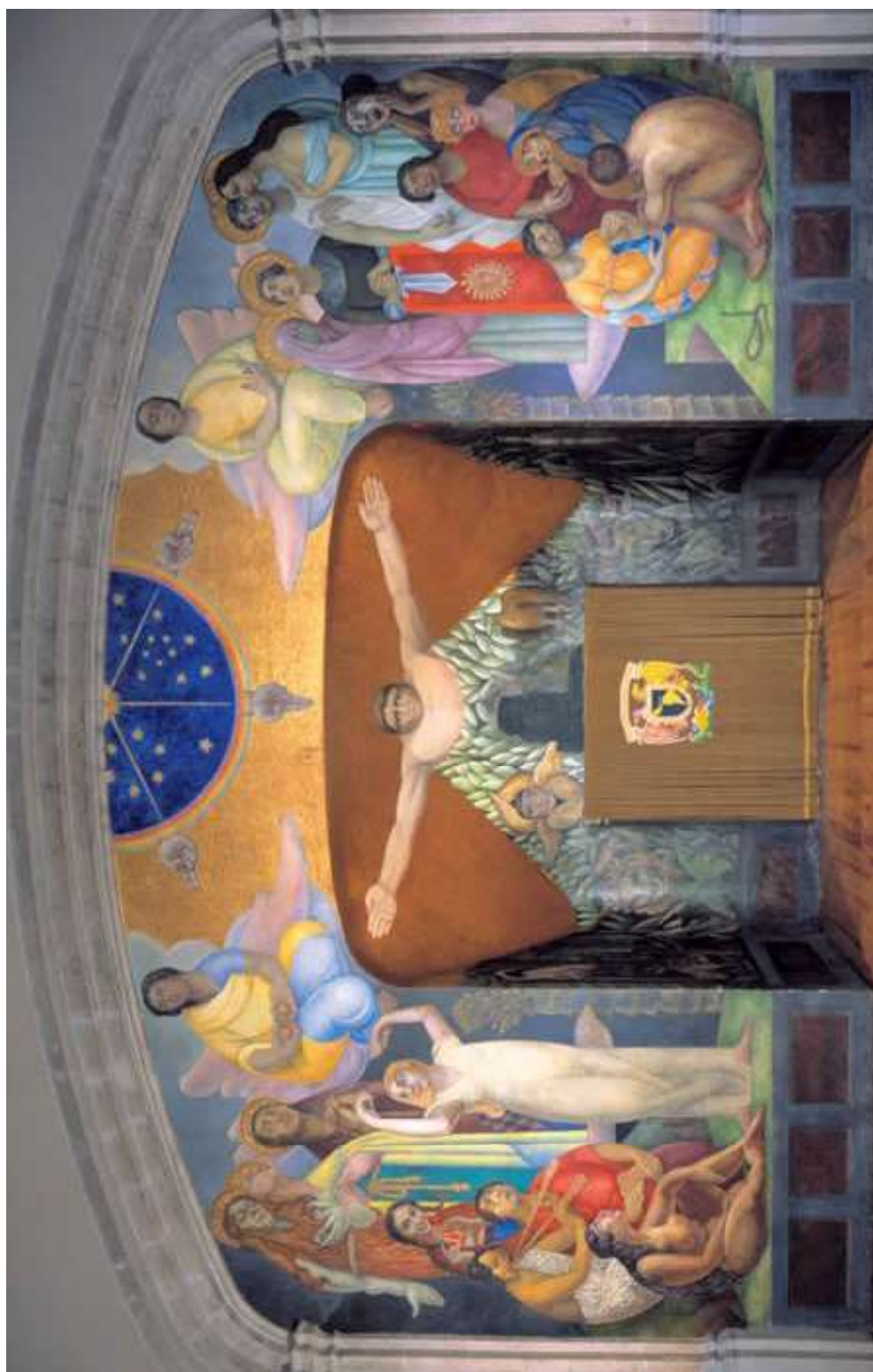


Figura 1.4: *La Creación* ha logrado mantener un alto grado de conservación gracias a los materiales utilizados por Rivera. Tomada de [10].

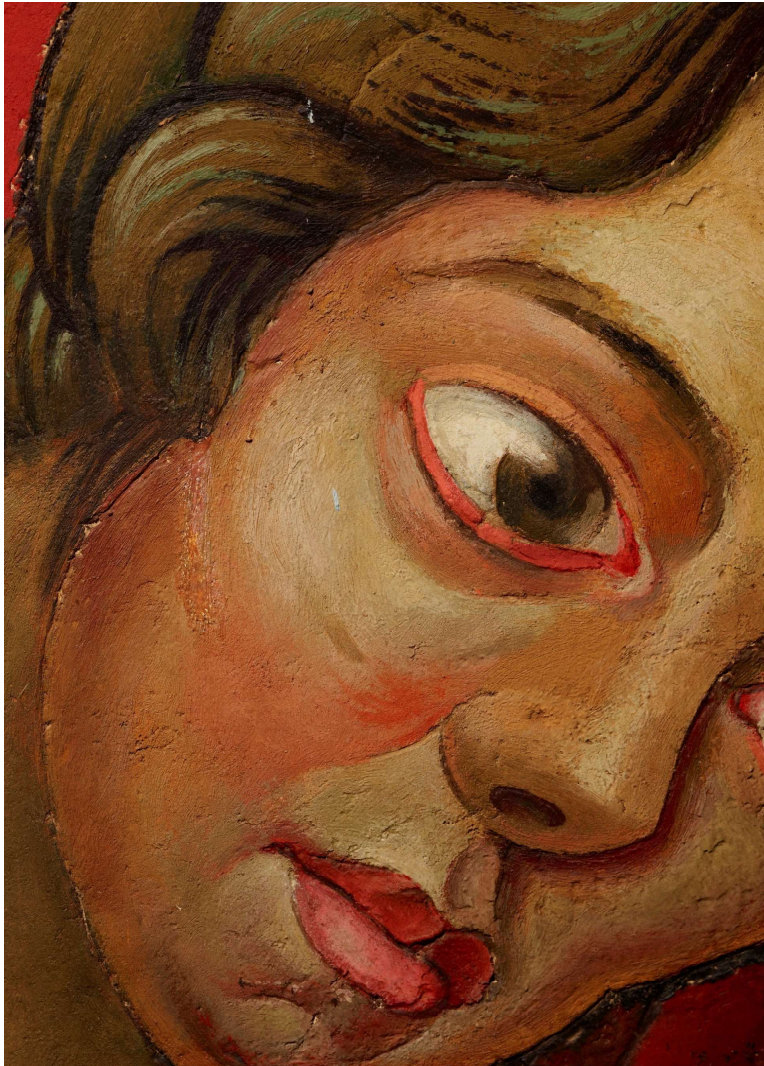


Figura 1.5: Los trazos en encáustica son apreciables a simple vista. En un principio, Diego Rivera cinceló los trazos para tener un mejor control de las formas. Tomado de [9].



Figura 1.6: Sin importar la complejidad de la técnica, Rivera fue capaz de realizar una obra detallada. Tomado de [9].

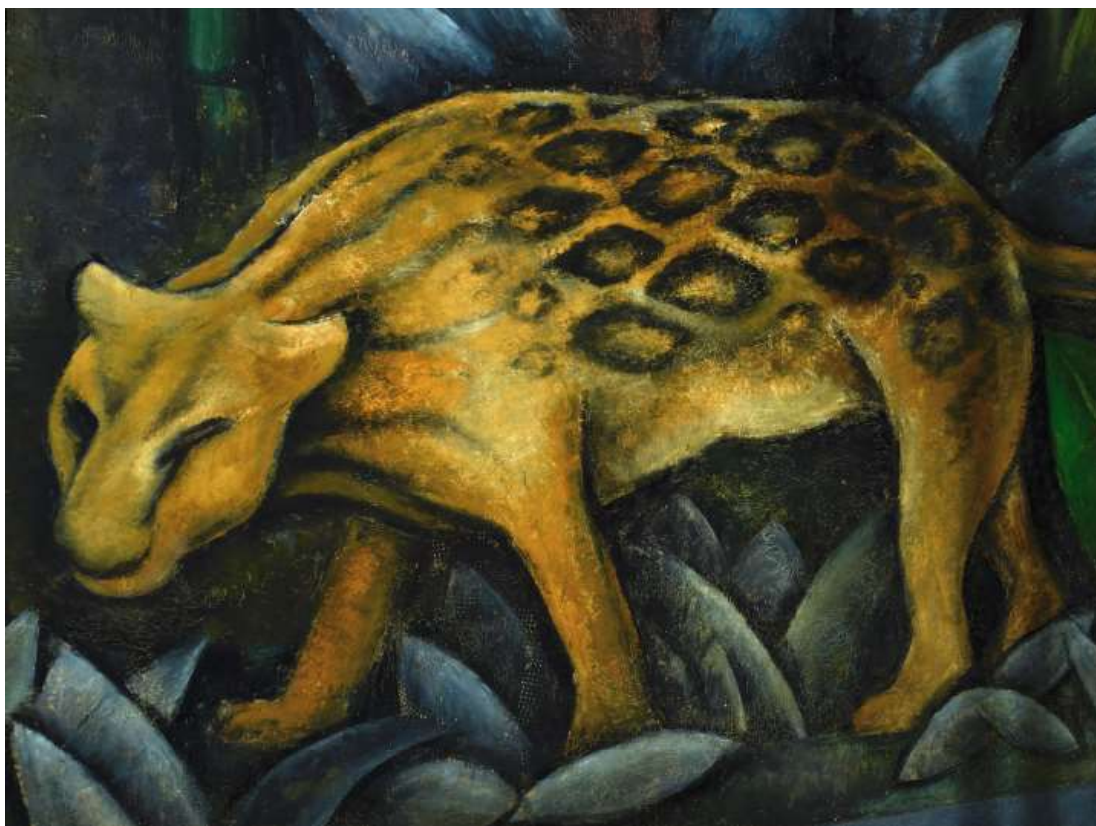


Figura 1.7: Un proceso muy importante al trabajar con encáustica es la cauterización. En las manchas del jaguar, se aprecia el efecto de la cauterización con soplete. Tomado de [9].



Figura 1.8: La imagen representa una sección del manto de la Prudencia. Es posible identificar las distintas texturas y trazos para los distintos pigmentos. Tomado de [9].

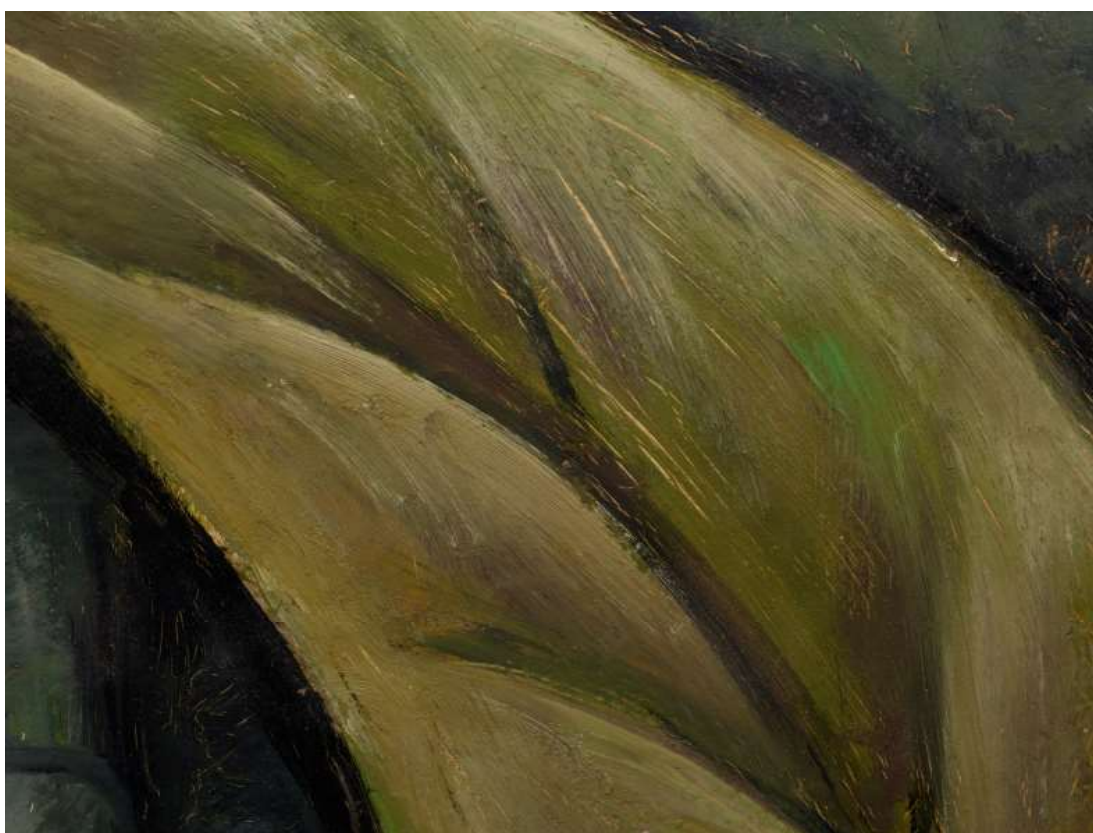


Figura 1.9: Ciertos detalles del mural, fueron realizados con un pincel, como se identifica en los detalles de esta hoja. Tomado de [9].

La ciencia de la encáustica

La encáustica, desde un punto de vista de mecánica de fluidos, tiene un comportamiento viscoso particular, debido a esto, es una técnica de pintura compleja que requiere años de práctica para su dominio. En este capítulo se explican los conceptos fundamentales que existen detrás de la técnica de pintura de la encáustica, haciendo énfasis en la mecánica de fluidos y la reología. De igual forma, se presenta una breve recopilación las propiedades físicas y químicas de los materiales que se utilizan en la técnica.

2.1. Mecánica de fluidos

2.1.1. Los fluidos

Los fluidos son sustancias que se deforman de manera continua ante fuerzas externas que actúan sobre ellas. Debido a esta característica se ajustan las leyes de la mecánica clásica para ser capaces de describir su comportamiento; a esta rama de la física se le denomina mecánica de fluidos. Los fluidos se pueden clasificar en líquidos y gases. La principal diferencia entre estos es la compresibilidad, mientras que los líquidos son elementos poco compresibles, los gases son altamente compresibles. Otra clasificación de los fluidos es de acuerdo a su comportamiento viscoso; la viscosidad es la propiedad de los fluidos a oponerse al flujo [11]. Tanto la compresibilidad como la viscosidad son de alta importancia para la mecánica de fluidos; sin embargo, para relevancia de este trabajo, se tratará únicamente a la viscosidad.

2.1.2. La viscosidad y el flujo

Cuando se habla de materiales sólidos que se deforman, la propiedad que nos interesa es la rigidez, ya que es la relación entre el esfuerzo del sólido ante la sollicitación y la deformación que este presenta, tanto para esfuerzos normales como cortantes (para esfuerzos cortantes se utilizan los conceptos de módulo de rigidez al corte y deformación cortante). La rigidez nos dice cuanto se va a deformar un sólido ante una determinada fuerza aplicada. El concepto análogo para los fluidos es la viscosidad.

Como se mencionó en la sección pasada, los flujos tienden a deformarse de manera continua bajo la acción de un esfuerzo cortante, haciendo que la deformación no sea un valor

2. LA CIENCIA DE LA ENCÁUSTICA

invariante, sino que será una tasa de deformación cortante que se puede entender como la cantidad de deformación cortante que sufre el fluido en el tiempo. La viscosidad es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación cortante que sufre el fluido, es decir, la viscosidad determina, para un determinado esfuerzo, cuanto va a deformarse el fluido en el tiempo o dicho de forma coloquial, cuanto va a fluir el mismo. Es por eso que se puede definir a la viscosidad como la propiedad de los fluidos que se opone al flujo. La unidad de viscosidad en el sistema internacional (SI) es el pascal por segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) que equivale a 10 poise (p), unidad que sigue siendo utilizada ampliamente.

El primero en interesarse en la viscosidad y a quien se debe su definición fue Sir. Isaac Newton. Se supone que un fluido se encuentra confinado entre dos placas paralelas con área (A) y separación entre ellas determinada (y). Se aplica un fuerza, a la placa superior, en dirección paralela a las placas, generando un esfuerzo cortante ($\tau = \frac{F}{A}$) causando que el fluido adquiera un perfil de velocidades horizontal que varía de forma vertical como se muestra en la Figura 2.1.

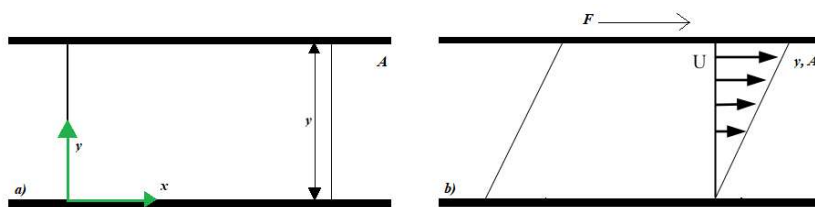


Figura 2.1: Ley de Newton ejemplificada a través de un flujo cortante simple. a) Antes de aplicar tensión cortante, b) Instante de tiempo después de aplicar tensión cortante.

Sir. Isaac Newton encontró que la relación entre el cambio vertical de velocidades y el esfuerzo cortante es proporcional a una propiedad de los fluidos que denominó viscosidad. A esta relación se le conoce como ley de viscosidad de Newton y cuya es:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dy} \quad (2.1)$$

A los fluidos que cumplen con la ley de viscosidad de Newton se les conoce como fluidos newtonianos. Estos fluidos tienen un comportamiento ideal ya que la relación entre la tasa de deformación cortante y el esfuerzo cortante es lineal. En la Figura 2.2 se muestran distintas curvas de fluidos newtonianos. La curva de flujo de un fluido newtoniano siempre será una línea recta que pasa por el origen. Para determinar la viscosidad de un fluido newtoniano solo es necesario conocer un punto de la curva de flujo de este.

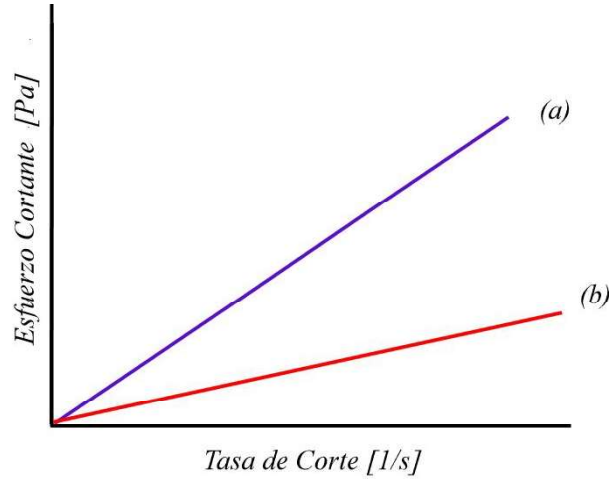


Figura 2.2: Curva de viscosidad para dos fluidos newtonianos distintos. El fluido (a) presenta una mayor viscosidad que el fluido (b).

Aunque la ley de viscosidad de Newton dio una primera aproximación sobre el comportamiento de los fluidos, no describe el flujo de los mismos. No es hasta 200 años después de las publicaciones de Newton que Navier y Stokes publican una serie de ecuaciones que relacionan la presión, temperatura, velocidad y densidad de un fluido en movimiento. Las ecuaciones fueron desarrolladas de manera independiente por el inglés G.G. Stokes y el francés M. Navier [12]. El aporte de Navier y Stokes es la adición de los efectos viscosos a las ecuaciones de Euler.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales no lineales que gobiernan el movimiento de los fluidos. Derivan de la ley de conservación de momentum lineal en términos de las propiedades de los fluidos y las relaciones entre las fuerzas de cuerpo y las de superficie del fluido. La ecuación vectorial que representa a las ecuaciones de Navier-Stokes es:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{f} - \nabla P + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.2)$$

donde ρ es la densidad del fluido, P es la presión, μ es la viscosidad, λ es el segundo coeficiente de viscosidad, \vec{v} la velocidad del flujo y \vec{f} las fuerzas gravitacionales. Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden, en teoría, resolverse para cualquier problema de flujo con el uso de las ecuaciones de continuidad de masa y energía para fluidos; sin embargo, no es posible resolver dicho sistema de ecuaciones de forma analítica. Algunas soluciones exactas pueden obtenerse para flujos específicos, simplificando los términos no lineales de la ecuación obteniendo una solución exacta [13]. Por ejemplo, para flujos incompresibles, se puede considerar que el término $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ se elimina, teniendo así:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{f} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.3)$$

2.1.3. Reología

La reología es la parte de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar la deformación y flujo de la materia [14]. Aunque la reología se dedica a estudiar las propiedades de flujo de fluidos tanto newtonianos como no newtonianos, el mayor campo de estudio de la reología abarca a los fluidos no newtonianos debido a la alta complejidad y diversidad en su comportamiento, comparada con el comportamiento lineal de los fluidos newtonianos. En la actualidad, la reología ha cobrado gran importancia ya que muchos fluidos utilizados en la industria (resinas, lubricantes, aceites) son de carácter no newtoniano, por lo que es necesario conocer sus propiedades reológicas para su correcto uso [12].

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no cumplen con la ley de viscosidad de Newton, es decir, son aquellos fluidos cuya viscosidad cambia según la tasa de corte que está actuando sobre ellos (dilatantes o espesantes). Existen otros fluidos que cambian su viscosidad con el tiempo ante una tasa de corte constante (reopécticos o tixotrópicos). De igual forma, tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos, la viscosidad puede cambiar según la temperatura [14].

Un fluido dilatante o espesante es aquel cuya viscosidad aumenta conforme aumenta la tasa de corte, suspensiones como agua y maicena presentan este comportamiento. Un fluido adelgazante disminuye su viscosidad conforme aumenta la tasa de corte, las pinturas y la encáustica presentan este comportamiento. En la Figura 2.3 se presenta la gráfica de viscosidad contra tasa de corte de un fluido espesante, adelgazante y newtoniano.

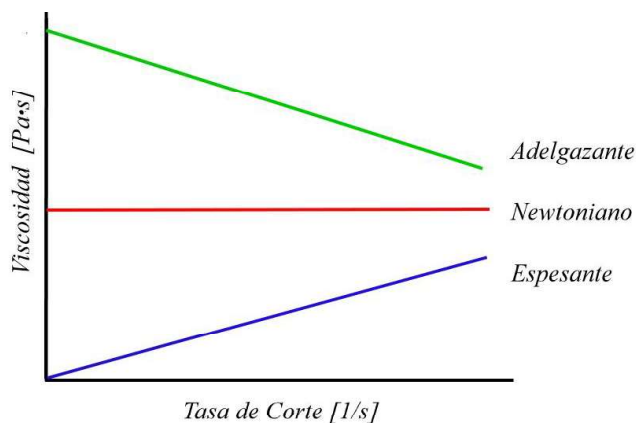


Figura 2.3: Curva de viscosidad de distintos fluidos.

Con respecto a la temperatura, es común que las curvas de viscosidad para líquidos newtonianos o no newtonianos disminuyan su magnitud conforme aumenta la temperatura, es decir, la viscosidad de los líquidos disminuya conforme aumenta la temperatura. Para gases ocurre lo contrario, cuando se tiene un aumento de temperatura, también se tiene un aumento en la viscosidad [15]. Existen modelos matemáticos que dan una aproximación de las curvas de viscosidad de distintos fluidos según la temperatura, sin embargo, no se abordan en este trabajo.

2.1.4. Viscoelasticidad

En la actualidad, la gran complejidad de los fluidos industriales nos hace asumir que su comportamiento es tanto el de un sólido como un líquido, presentando propiedades elásticas y viscosas. Cuando se habla de propiedades viscosas, se hace referencia a deformaciones irreversibles que aumentan con el paso del tiempo; las propiedades elásticas refieren deformaciones reversibles. Según las condiciones a las que es sometido un material, será el comportamiento que presente el mismo; para procesos con deformaciones rápidas, los materiales presentarán un comportamiento elástico, mientras que para procesos lentos se habla de comportamiento viscoso. En tasas intermedias de deformación se tiene una combinación de ambas.

Cuando a un líquido newtoniano se le adiciona pigmento, este empezará interactuar de forma física y química con el líquido, causando que cambie de tener un comportamiento newtoniano o no newtoniano a viscoelástico [14]. La encáustica es una mezcla de ceras con pigmentos, por lo que es pertinente considerar el comportamiento de la encáustica como viscoelástico al analizarla.

2.1.5. Modelos reológicos

La reología, a través de la experimentación y análisis, ha desarrollado modelos matemáticos que asemejen el comportamiento viscoso de un fluido ante la tasa de corte. El modelo de Ostwald o ley de potencia es un modelo reológico que relaciona la viscosidad y la tasa de corte para fluidos newtonianos, espesantes y adelgazantes a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2.4)$$

donde $\dot{\gamma}$ representa a la tasa de corte y m y n son propiedades del fluido denominadas índice de consistencia y de comportamiento, respectivamente. Cuando $n < 1$ se habla de un fluido adelgazante, $n = 1$ es un fluido newtoniano y $n > 1$ es un fluido espesante [16]. Este modelo es de suma utilidad si se trabaja con datos experimentales, ya que es posible ajustar las curvas de viscosidad experimentales por medio de un ajuste potencial para conocer los índices de consistencia y de comportamiento y tener el modelo matemático que determina a dicho fluido. Para lograr este ajuste es necesario tener la viscosidad y la tasa de corte en escala logarítmica y ajustar la curva en la sección lineal, como se muestra en la Figura 2.4.

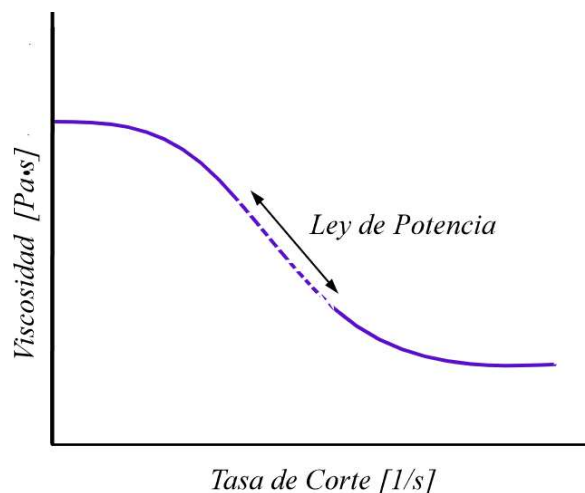


Figura 2.4: Zona de ajuste potencial. Los ejes deben de estar en escala logarítmica para apreciar la zona de ajuste.

Con respecto a las propiedades viscoelásticas, diversos estudios sobre el tema se han realizado, derivando en modelos que describen el comportamiento, siendo el modelo de Maxwell y el de Kelvin (o Voigt) los más sencillos. Los modelos antes mencionados se les denominan mecánicos ya que utilizan un resorte para describir el comportamiento elástico y un amortiguador para el comportamiento viscoso. El modelo de Kelvin consiste en un resorte conectado en paralelo con un amortiguador mientras que en el de Maxwell presentan una conexión en serie [14]. En la Figura 2.5 se observa la conexión de cada modelo y la gráfica de deformación contra tiempo ante una sollicitación constante en determinado tiempo.

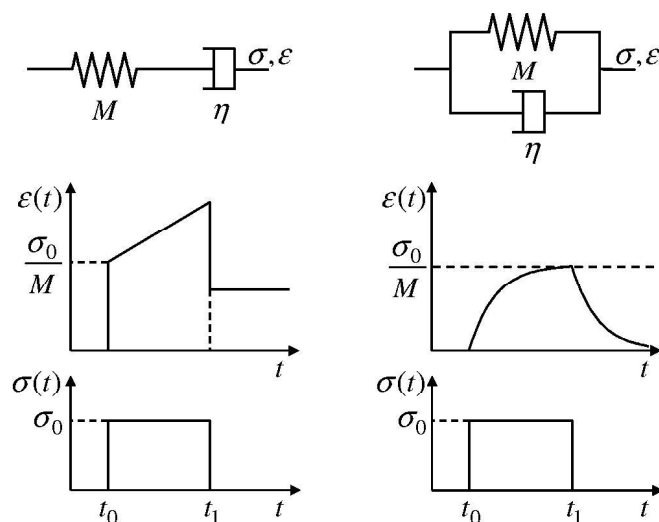


Figura 2.5: Representación y curvas de deformación y esfuerzo contra tiempo de modelos viscoelásticos mecánicos. a)Maxwell. b)Kelvin. Tomado de [17].

2.1.6. Análisis dimensional

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones de Navier-Stokes son imposibles de resolver de forma analítica para todos los fluidos, se puede utilizar el análisis adimensional como método para reducir la complejidad de un sistema físico a partir de analizar las variables (dimensiones) que interactúan en un determinado problema para encontrar relaciones entre las mismas y obtener soluciones cuantitativas. El análisis adimensional es una herramienta muy utilizada ya que es sencillo de refutar mediante la experimentación. Muchos grandes científicos han realizado estudios que han terminado en el establecimiento de números adimensionales que aplican para una gran variedad de problemas de áreas como la mecánica de fluidos y la transferencia de calor.

El análisis adimensional se basa en el Teorema Pi de Buckingham, el cual establece que en una ecuación que modela un sistema físico, la relación entre las magnitudes físicas se puede obtener a través de una ecuación que tendrá $n-k$ grupos adimensionales, donde n es el número de variables en el sistema y k el número de variables con función dimensión independiente [18].

Entre los números adimensionales utilizados están el número de Reynolds, Ohnesorge, Bingham entre otros. En este trabajo el número adimensional utilizado es el número de Reynolds (Re). Osborne Reynolds estableció que el cambio en la naturaleza de un flujo se debe a la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, relacionando 4 variables del flujo: una longitud característica (h), la velocidad del flujo (U), la densidad (ρ) y la viscosidad (μ). La siguiente ecuación establece esta relación.

$$Re = \frac{hV\rho}{\mu} = \frac{hV}{\nu} \quad (2.5)$$

2.2. Materiales

En este trabajo se estudian las propiedades de la encáustica utilizada por Diego Rivera en *La Creación*. Los materiales para dicha técnica son cera de abeja, resina copal y elemí, *white spirit* y aceite esencial de alhucema; adicionalmente se agregan pigmentos para obtener distintos colores de mezcla. Las propiedades físicas y químicas de cada material se presentan en el presente apartado.

2.2.1. Cera de abeja

La cera de abeja es una cera natural de origen animal que es producida por distintas especies de abeja. Es una secreción digestiva que se produce en glándulas especiales localizadas en la parte inferior del abdomen de la abeja. Es producida alrededor del mundo en zonas tropicales y subtropicales, siendo los principales productores India, Etiopía y Argentina. Ha sido utilizado para diversos propósitos desde los egipcios y hasta la actualidad en la producción de velas o cosméticos, como medio para pintar, sellador y lubricación [19].

La cera de abeja es un sólido plástico con densidad aproximada de 0.97 g/cm^3 que puede presentar tonalidades que van desde el blanco-amarillo hasta al marrón y cuya coloración se

2. LA CIENCIA DE LA ENCÁUSTICA

ve afectada por tratamientos térmicos o químicos. Presenta un punto de fusión entre 61 y 65 °C. La dureza de la cera de abeja, aunque variable, tiene un valor promedio de 15 en escala ASTM-D5 (prueba de penetración para materiales bituminosos). La cera de abeja es altamente sensible a cambios de temperatura, cambiando sus propiedades a altas temperaturas. Cuando la cera de abeja es calentada a más de 140 °C y por más de 30 minutos, la dureza de la cera aumenta debido a la evaporación del agua presente. De igual forma, el tiempo modifica la estructura cristalina de la cera, pudiendo aumentar su dureza entre un 61 y 74 %. Las propiedades ópticas también se ven modificadas. A temperaturas mayores a 60 °C, la cera presenta un efecto de descoloración. Reológicamente, la cera de abeja presenta una viscosidad entre 10 y 12 cP a 60 °C, siendo muy dependiente de la temperatura, disminuyendo su viscosidad a 3 cP, aproximadamente, a 100 °C [20]. En la Figura 2.6 se puede observar el comportamiento de la viscosidad de la cera de abeja ante la temperatura.

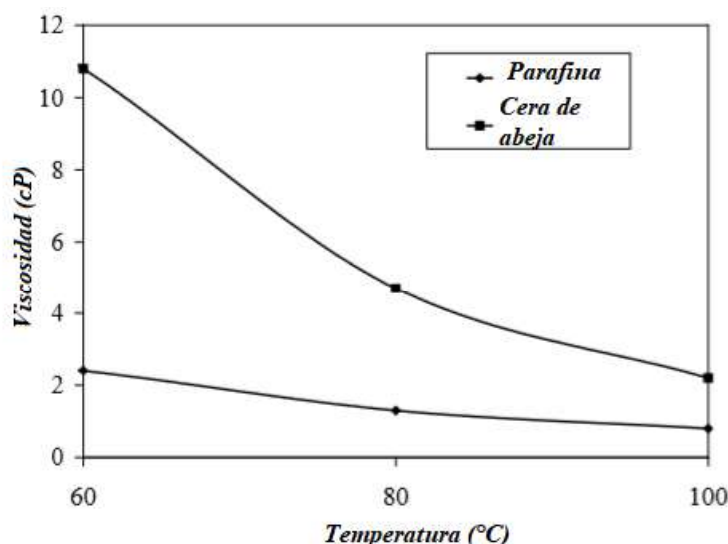


Figura 2.6: Viscosidad de la cera de abeja comparada con la de la parafina a distintas temperaturas. Tomado de [20].

Químicamente, es una mezcla compleja de compuestos químicos que presenta variabilidad según la especie de abeja y factores ambientales como temperatura y humedad. Tiene más de 300 diferentes sustancias, aunque en su mayoría son ésteres de ácidos grasos y alcoholes. Además, contiene pequeñas cantidades de diversos carbohidratos, ácidos y otros. Es un sólido insoluble en agua y resistente a los ácidos. Es soluble en solventes orgánicos como éter, benceno y cloroformo; sin embargo es poco soluble a temperaturas por debajo de la de fusión [21].

En [22] se hace un estudio sobre el efecto del punto de fusión, dureza y microestructura que tienen ciertos aditivos sobre la cera de abeja. Los investigadores descubrieron que el punto de fusión disminuye conforme aumenta la concentración de glicéridos. Con respecto a la dureza, se descubrió que la cera de abeja presenta zonas de alta concentración de monoglicérol, en donde la dureza es mínima y conforme se aleja de esta concentración, la dureza aumenta; esto

se debe a una saturación en la red cristalina. De igual forma, se ve que, sin importar los aditivos, la dureza de la cera se modifica con el tiempo, aunque esto varía según el aditivo. Por último, la microestructura cambia con cada aditivo. La importancia de este descubrimiento es que se menciona que las propiedades reológicas de la cera de abeja se deben a la red cristalina, por lo que la viscosidad cambia según los aditivos, sin embargo, no se hacen los estudios reológicos pertinentes para conocer el efecto específico.

2.2.2. Resina copal

La palabra Copal deriva del Náhuatl *copalli* que significa resina o incienso. Hace referencia a un grupo de resinas que se extraen de distintos tipos de árboles de las zonas tropicales y subtropicales. Es una oleoresina que entran en la categoría de resinas duras. En México, las principales zonas de extracción es la Península de Yucatán, Veracruz y Tabasco; 12 especies del género *Bursera* se utilizan para la extracción del copal en México. El principal uso que se le da al copal en la actualidad es como barniz y transporte de pintura, aunque históricamente se ha utilizado en alta medida como auxiliar medicinal, adhesivo y para producción de artesanías [23].

El copal es una mezcla compleja de oleo-gomo-resinas cuyos colores que van de tonalidades del blanco al amarillo, dependiendo de la zona geográfica de la extracción. Es una resina con una dureza de 2 a 3 en la escala de dureza de Mohs. Presenta una densidad y punto de fusión que varía entre 1.04 y 1.13 g/cm^3 y 250 y 325 °C respectivamente [24]. La resina copal no ha sido caracterizada reológicamente debido a su alto punto de fusión y poca homogeneidad térmica, teniendo diferencia de temperaturas significativa entre capas, causando que las capas externas se quemen y el núcleo sea un semisólido.

La composición química del copal es muy compleja debido a la variabilidad de los componentes y hasta ahora se desconoce en su totalidad [23]. Los copales se forman por una fracción oleo (grasas) que se compone de mono- y sesquiterpenoides, una fracción goma que se compone de polisacáridos y una fracción resina compuesta por triterpenoides [25]. Entre los constituyentes químicos identificados se tiene ácido copálico (48-50 %), ácido copalólico (22-23 %), ácido copálmico (5-6 %) y distintos aceites esenciales (2-3 %) [26]. Es soluble en compuestos orgánicos como el etanol, el cloroformo y los terpenos (como los aceites esenciales) e insoluble en agua. De igual forma, al ser una mezcla, presenta distintos tipos de impurezas como minerales, insectos y ramas.

A pesar de que las muestras de copal presentan alta variabilidad debido a factores ambientales, el perfil cromatográfico del copal es muy claro y sin importar la especie de extracción, el perfil se puede identificar, como se observa en la Figura 2.7.

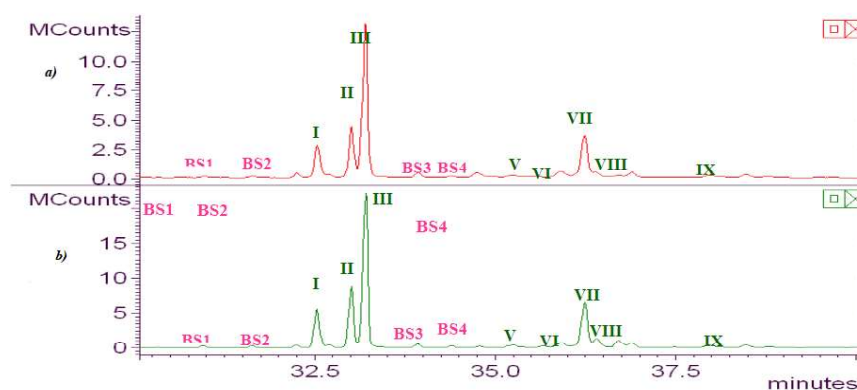


Figura 2.7: Cromatografía de copal de la especie: a) *B. Bipinnata* b) *B. Stenophylla*. Tomado de [20].

2.2.3. Resina elemí

La palabra elemí deriva de la palabra *alami* cuyo significado es “tanto arriba como abajo”. Hace referencia a un conjunto de oleorresinas suaves que provienen de distintas especies de árboles; en México se extrae de distintas especies del género *Amyris* principalmente en la península de Yucatán. Las principales zonas de extracción son las islas Filipinas, México, el este de India y Brasil. Históricamente, el elemí ha sido uno de los principales productos de exportación de las islas Filipinas, es particularmente deseado, por el aceite esencial que se puede obtener al destilarlo, para producir cosméticos y medicamentos [27].

La resina elemí, al igual que otras resinas naturales, es una mezcla compleja de compuestos orgánicos. Es una resina aromática blanda que puede tener tonalidades que van del blanco o amarillo al café. La densidad del elemí varía entre 1.018 y 1.083 g/cm^3 , aunque es un valor muy variable según la cantidad de porción amorfa y aceite esencial que la muestra presente. La dureza de la resina elemí es baja comparada con el del resto de resinas naturales, siendo capaz de ser cortado con un cuchillo de acero, de forma similar a un jabón. El punto de fusión está entre los 77 y 121 °C [24].

Químicamente, se sabe que se compone de una fracción oleo de sesquiterpenoides y una fracción resina que se compone de triterpenoides. Individualmente, consiste en aceite esencial de elemí (20-30 %), alcoholes (20-25 %), resina (30-35 %), ácido elemico (5-6 %), otros ácidos (8-10 %) otras sustancias (1 %). Es una sustancia soluble en compuestos orgánicos como etanol, éter o cloroformo e insoluble en agua y destilados de petróleo. Presenta impurezas como rocas, ramas e insectos.

Aunque el elemí no ha sido caracterizado reológicamente, es posible aproximar tanto su comportamiento, como el del copal con otras resinas naturales que sí han logrado ser caracterizadas. En [28], se estudia una resina de una especie llamada *Commiphora Africana*, destacando que dicha especie es de la misma familia que las especies que se utilizan para la producción del copal en México. Los investigadores aislaron la fracción goma de la resina y estudiaron la viscosidad de la resina a diferentes concentraciones. En la Figura 2.8 se observa que la resina

tiene un comportamiento adelgazante y que a mayor concentración de fracción goma, ante una misma tasa de corte, es mayor el esfuerzo cortante, por lo que la viscosidad es mayor a mayores concentraciones de fracción goma.

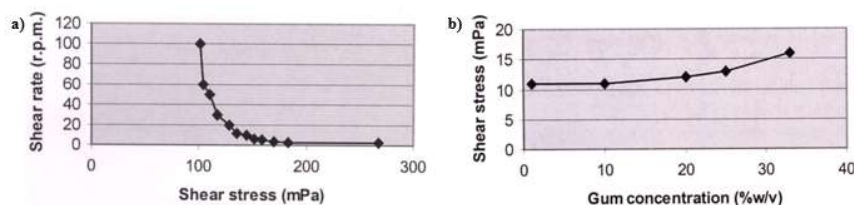


Figura 2.8: Caracterización reológica de la resina de la especie *Commiphora Africana*, a)Relación esfuerzo cortante - tasa de corte, b)Relación esfuerzo cortante - concentración goma [28].

2.2.4. Aceite de alhucema

La alhucema es una especie de planta del género *Lavándula*, también conocida como lavanda. Es una especie nativa de la zona mediterránea al sur de Europa, siendo los principales países de producción Francia, España e Italia. Es un producto muy utilizado en la industria de los cosméticos por su particular aroma y sus propiedades auxiliares para la salud.

El aceite de alhucema es un líquido transparente cuya densidad es de 0.89 g/cm^3 . La temperatura de evaporación es de $204 \text{ }^\circ\text{C}$, sin embargo su punto de inflamabilidad, a condiciones de presión adecuadas, es de $71 \text{ }^\circ\text{C}$. Químicamente, está compuesto por acetato de linalilo (47.56 %), linalool (28.06 %), acetato de lavandulil (4.34 %), alfa-terpinol (3.75 %), acetato de geranil (1.94 %), oxido de cariofileno (1.38 %) y otros componentes en menor cantidad a 1 % (12.97 %). Debido a su alto contenido etílico, es utilizado como disolvente para sustancias tanto polares como no polares [29].

2.2.5. White Spirit

El white spirit o mineral spirit, también llamado gasolina blanca en español, es un derivado del petróleo que se utiliza como disolvente orgánico, siendo el disolvente más utilizado a nivel mundial en la producción de elementos para pintar como lacas, aerosoles, pinturas y barnices. Otros usos que se le da son como limpiador de materiales de pintura como pinceles y espátulas y como lubricante.

El white spirit es un líquido incoloro de aroma característico. Existen tres tipos de white spirit según su método de producción. En este trabajo se darán las propiedades del white spirit tipo 2 de grado regular. Tiene un punto de ebullición entre 145 a $174 \text{ }^\circ\text{C}$ y un punto de inflamabilidad entre 31 y $54 \text{ }^\circ\text{C}$. Su densidad es de 0.78 g/cm^3 . Tiene una viscosidad entre 0.74 y 1.65 cps [30].

Como se mencionó anteriormente, se tienen tres tipos de white spirit que se refieren al grado de tratamientos a los que se le ha sometido. El tipo 1 solo presenta hidrodesulfuración, el tipo 2 (utilizado en este trabajo) presenta una extracción con solvente y el tipo 3 una hidrogenación.

De igual forma, cada tipo presenta tres tipos de grado (bajo, regular, alto) según el tipo de petróleo utilizado y las condiciones de destilación. Es una mezcla de carbohidratos saturados alifáticos y alicíclicos $C_7 - C_{12}$ (80 %) y carbohidratos aromáticos $C_7 - C_{12}$ (20 %). Es una mezcla insoluble en agua clasificado como irritante pero poco tóxico.

2.2.6. Pigmentos

Los pigmentos son sustancias que se agregan a soluciones para dar color y cuyo fin es pintar, aunque existen pigmentos que se utilizan para dar propiedades anticorrosivas o magnéticas a las soluciones. En el mundo moderno, los pigmentos son sustancias que consisten en partículas de carácter insoluble en el sistema de aplicación; de igual forma existen los tintes cuyo propósito es el mismo, pero se diferencian de los pigmentos porque son líquidos solubles en el sistema de aplicación. Entre las industrias que utilizan pigmentos están la automotriz, aeronáutica, cosméticos, plásticos, pinturas y materiales de construcción. Los pigmentos se clasifican según su composición química y con respecto a las propiedades que adquieren los sistemas donde se agregan. Se puede clasificar a los pigmentos como orgánicos e inorgánicos, a su vez se pueden subclassificar según composición química o su procedencia. En [31] se presenta toda la información pertinente a pigmentos inorgánicos. En la Figura 2.9 se muestran los pigmentos utilizados en este estudio.

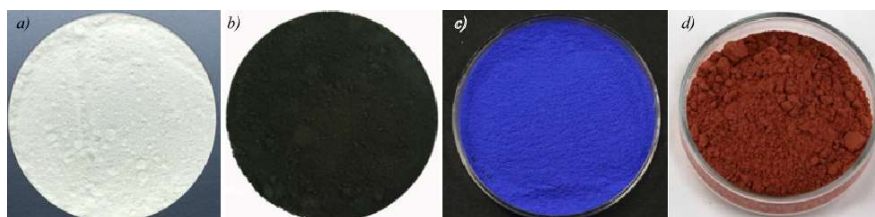


Figura 2.9: Pigmentos utilizados en la investigación: a) blanco de zinc, b) azul ultramar c) rojo óxido de hierro d) negro de humo. Tomado de [32]

En la sección 2.1.4 se mencionó que los pigmentos pueden modificar el comportamiento viscoso de los líquidos. En [33] se estudió la influencia del tipo y concentración de pigmento en las propiedades físicas de adhesivos de poliuretano. Se trabajó con blanco de titanio, blanco de zinc y litopón. Reológicamente, el adhesivo sin pigmento presentaba un comportamiento newtoniano, sin embargo, cuando se adicionan los pigmentos, se vuelve un fluido adelgazante. De igual forma la viscosidad aumenta conforme aumenta la concentración de pigmento, pudiendo aumentar el valor de la viscosidad dinámica hasta 8 veces. La Figura 2.10 muestra los resultados obtenidos en el estudio. Los investigadores concluyen que la viscosidad se modifica por interacción química entre el pigmento y la base o interacción física debido a la morfología del pigmento; sin embargo, no tienen suficientes resultados para identificar el factor de mayor influencia.

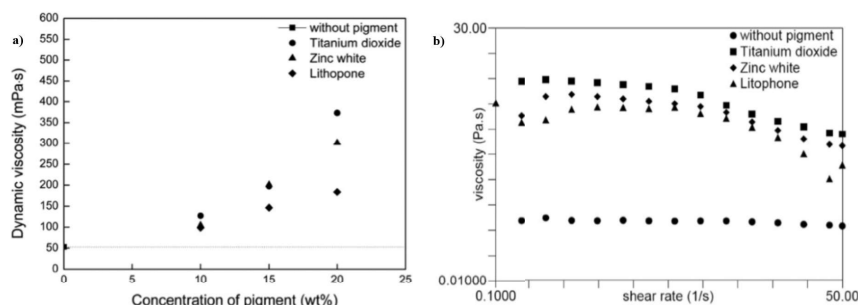


Figura 2.10: Influencia de pigmentos en las propiedades reológicas de un adhesivo de poliuretano, a) Relación viscosidad - concentración de pigmento, b) Relación viscosidad - tasa de corte [33]

2.2.6.1. Blanco de Zinc

El pigmento Blanco de Zinc es un pigmento blanco sintético cuya composición química es de óxido de zinc (ZnO) que se produce a partir de la combustión de zinc en forma metálica. Aunque de forma natural el óxido de zinc está presente como cincita, la cual cristaliza de forma hexagonal, este mineral no es la materia prima de este pigmento. El blanco de zinc es un polvo puro blanco cuyas propiedades ópticas cambian según la temperatura ya sea en polvo o solución. Arriba de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ adquiere un color amarillento, pero es un proceso reversible. La morfología del óxido de zinc cambia según el proceso de producción del pigmento. Si se utiliza un proceso térmico, presenta partículas granulares con un rango de tamaño de 0.1 a 0.5 μm y partículas aciculares de tamaño de 0.5 a 10 μm . Mientras que los procesos químicos producen partículas amorfas con tamaño de hasta 50 μm .

2.2.6.2. Azul ultramar

El pigmento azul ultramar es un pigmento azul sintético cuya composición química presenta sodio-aluminio-sulfo-silicatos y cuya fórmula química es $Na_6Al_6Si_6O_2(NaS_n)$ donde n puede ser 2, 3 o 4. Para producir el pigmento se hace una mezcla con kaolinita, feldespato, carbonato de sodio y carbono, la cual se calienta, oxida y purifica para obtener el pigmento. El pigmento azul ultramar presenta partículas con diferentes formas y tamaños de partícula que van desde 50 a 500 nm.

2.2.6.3. Rojo óxido de hierro

El pigmento rojo óxido de hierro es un pigmento rojo natural cuya composición química es de óxido de hierro (Fe_2O_3). Es uno de los pigmentos inorgánicos más antiguos, su utilización data de los egipcios. El pigmento se obtiene de la hematita. Para lograr obtener el pigmento, la hematita se lava, seca y se pulveriza en un molino de bolas. El pigmento también se puede obtener de forma artificial por medio de métodos termoquímicos como precipitación, termo descomposición y deshidrogenación. La morfología del pigmento rojo óxido de hierro tiende a

ser esférica con partícula de tamaño hasta de $0.1 \mu\text{m}$. Aunque el tamaño de las partículas puede variar según el proceso de manufactura, el tamaño comercial y deseado es el antes indicado debido a la relación costo beneficio.

2.2.6.4. Negro de humo

El pigmento negro de humo es un pigmento negro natural cuya composición es carbón en un estado casi puro (C). Al igual que el óxido de hierro, el carbón es uno de los pigmentos más antiguos utilizados por el hombre. El pigmento presenta contaminantes por hidrógenos, oxígenos, nitrógenos y azufres enlazados, sin embargo, son en pequeño porcentaje, por lo que se considera que el pigmento es puro. En la actualidad, el pigmento se obtiene por medio de una descomposición térmica oxidativa de hulla (principalmente), gas natural, aceite mineral y otros. El pigmento negro de humo tiende a tener una morfología esférica de tamaños que se concentran entre 5 y 500 nm. Aunque las partículas tienen forma uniforme, su arreglo es amorfo en unas zonas y cristalina en otras. Las zonas cristalinas presentan estructuras hexagonales similares a la del grafito. En el trabajo se utiliza pigmento Negro de Marfil, el cual es un tipo de pigmento negro, similar al negro de humo, que se obtiene a partir de la combustión de huesos de animal.

2.3. Motivación: arte y ciencia

Diego Rivera es el máximo expositor del muralismo mexicano, es el pintor mexicano más destacado y su obra es parte importante del patrimonio cultural del país. *La Creación* es el primer mural del movimiento del muralismo mexicano, el cual fue pintado con la técnica de encáustica. El mural no solo es parte importante del patrimonio artístico nacional, sino que, al estar plasmado en el Antiguo Colegio de San Idelfonso, forma parte del patrimonio cultural universitario. El presente trabajo se piensa como un auxiliar en materia de historia de arte, generando conocimiento sobre las técnicas y materiales empleados por Diego Rivera y otros pintores, relacionados con la encáustica. Con esta investigación, se pretende de igual manera ayuda a desarrollar procedimientos, con sustento científico, de restauración para curar obras de la forma más homóloga a las técnicas de Diego Rivera. Por último, se busca explicar el comportamiento de la encáustica para que estudiantes de artes plásticas o artistas, puedan entender de mejor manera la técnica, para ser capaces de dominarla y ajustarla a su estética. Cabe señalar que los resultados del trabajo pueden servir para aproximar el comportamiento reológico de resinas industriales con pigmentos, como lo son barnices o resinas del ámbito aeroespacial.

El arte y la ciencia pueden, en principio, considerarse disciplinas contrarias; la ciencia se sustenta en hechos y datos mientras que el arte en sensaciones y sentimientos, pero es posible relacionar ambas disciplinas para tener un mejor entendimiento del ser humano y la naturaleza. La mecánica de fluidos busca resolver la ecuación de Navier-Stokes para describir las propiedades de cualquier flujo; un artista resuelve la ecuación de Navier-Stokes, de forma experimental o práctica, para ser capaz de generar trazos, es decir, debe mover su pincel a cierta velocidad para vencer las fuerzas viscosas y las externas para generar una deformación en la pintura (en este caso encáustica) y lograr un trazo específico.

Diseño experimental

Los artistas pueden variar los materiales y métodos de preparación y aplicación de encáustica según sus necesidades, habilidades o gustos estéticos. Sin embargo, en este trabajo, los materiales y métodos de preparación se basan en aquellos utilizados por Diego Rivera para pintar el mural de *La Creación*. Aunque muchos de los secretos de Diego Rivera se perdieron, se recreó la mezcla de la forma más fiel posible, con el uso de sus notas sobre la encáustica y utilizando materiales naturales mexicanos. Para ser capaces de caracterizar el trazo, es necesario caracterizar las propiedades térmicas y reológicas de la mezcla.

En este capítulo se describen los materiales y procedimiento para la preparación de las muestras experimentales; el equipo y parámetros utilizados para caracterizar reológica y térmicamente las muestras; y el dispositivo creado para caracterizar los trazos de encáustica.

3.1. Mezcla experimental

3.1.1. Materiales empleados

Para la preparación de las mezclas experimentales se utilizaron materiales de origen natural, por lo que las propiedades físicas y químicas pueden variar de lote a lote por factores ambientales como lluvia y temperatura. Para eliminar este factor de variabilidad, cada material fue adquirido con un mismo proveedor, haciéndose una compra de volumen suficiente para la realización de la experimentación, asegurando la pertenencia del material a un único lote, teniendo así la mayor constancia de propiedades por material. En la Tabla 3.1 se muestran los materiales utilizados y el proveedor.

Material	Proveedor
Cera de abeja amarilla	Casa Serra Sucesores, S.A. de C.V.
Copal en pencas	Casa Serra Sucesores, S.A. de C.V.
Resina elemí	Santiago Arte S.A. de C.V.
Solvente Atl Spirit	Lumen, S.A. de C.V.
Esencia de Alhucema	Farmacia Paris, S.A. de C.V.

Tabla 3.1: Materiales empleados y proveedores.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los pigmentos utilizados son de la marca Kremer adquiridos en Santiago Arte. Se eligió la marca Kremer ya que sus métodos de producción de pigmentos se asemejan a aquellos utilizados en tiempos de Diego Rivera. En la Tabla 3.2 se muestra el nombre del pigmento y su número de referencia de Kremer.

Pigmento	Número de Referencia
Blanco de zinc	46300
Negro de marfil	47200
Rojo óxido de hierro	48120
Azul ultramar	45010

Tabla 3.2: Códigos de Kremer para identificación de pigmentos utilizados en el presente trabajo.

3.1.2. Método de preparación

La encáustica es un conjunto de mezclas orgánicas químicamente complejas debido a la alta cantidad de compuestos químicos presentes en los mismos. Debido a esto, el método de preparación es de suma importancia para lograr resultados que permitan entender los factores que afectan las propiedades reológicas de la misma. El método de preparación se obtuvo de [8]; en la Tabla 3.3, se muestran los porcentajes en volumen de los componentes de la mezcla.

Material	% v/v
Cera de abeja amarilla	25
Copal en pencas	25
Resina elemí	25
<i>White Spirit</i>	12.5
Esencia de Alhucema	12.5

Tabla 3.3: Composición en volumen de las mezclas de encáustica sin pigmento.

A continuación, se muestran los pasos para la preparación de la mezcla experimental base de encáustica.

1. Se coloca un volumen de resina copal y un volumen de resina elemí a baño María.
2. Una vez que se tienen las resinas como materiales semisólidos, se coloca el recipiente directamente a la parrilla a una temperatura de 150 °C.
3. Cuando el material se ha fundido, se filtra con el uso de una malla para eliminar impurezas sólidas como rocas o ramas.
4. Se agrega medio volumen de *White Spirit* a la resina copal filtrada y en estado líquido.
5. Se agrega medio volumen de esencia de alhucema a la resina elemí filtrada y en estado líquido.

6. Se colocan las mezclas anteriores junto con un volumen de cera de abeja a baño María.
7. Una vez fundido el volumen de cera de abeja, se agrega medio volumen de esencia de alhucema al mismo.
8. En estado líquido, se combinan todas las mezclas anteriores.
9. Se agrega medio volumen de *White Spirit* y se revuelve para obtener una mezcla homogénea.
10. Se deja solidificar la mezcla a temperatura ambiente.

El resultado de la metodología anterior es un sólido plástico amarillo y traslúcido, el cual se denomina en este trabajo como *encáustica cruda*. Si se quiere agregar pigmentos a la encáustica cruda, se le deben sumar los siguientes pasos a la metodología anterior.

11. Se coloca la mezcla de encáustica cruda a baño María.
12. Una vez fundida la mezcla se agrega 1g de pigmento por cada 20ml de mezcla.
13. Se agita la mezcla para repartir el pigmento por toda la mezcla.
14. A temperatura ambiente, se deja solidificar la mezcla con pigmentos.

3.2. Caracterización de la mezcla

Las muestras experimentales fueron caracterizadas reológicamente, térmicamente y se realizó una caracterización de la forma del trazo. Los resultados de la encáustica cruda son el punto de comparación para el resto de los experimentos. Las distintas caracterizaciones realizadas a la mezcla cruda y las mezclas con pigmentos se hicieron con el mismo equipo, parámetros y procedimientos.

3.2.1. Calorimetría

Inicialmente, se hace una caracterización del punto de fusión de la mezcla de encáustica, determinando el rango de temperaturas donde ocurre la transición de sólido a líquido para establecer temperaturas adecuadas para la medición de las propiedades viscosas de las mezclas. En la Tabla 3.4 se muestran las características del calorímetro y parámetros utilizados para las calorimetrías.

Marca	TA Instruments
Modelo	DSC Q2000
Rango de Temperatura	0 – 140 °C
Rampa de Calentamiento	10 °C/min
Gas de purga	Nitrógeno

Tabla 3.4: Especificaciones del calorímetro y parámetros de las calorimetrías.

3.2.2. Reometría

Se realizó una prueba de flujo a todas las mezclas a tres temperaturas distintas. Una prueba de flujo nos dice la relación que existe entre la viscosidad y la tasa de corte. Las tres temperaturas se eligieron según los resultados de la calorimetría; en la transición de sólido a líquido, punto de fusión (fin del periodo de transición) y superior al punto de fusión. En la Tabla 3.5 se muestran las características del reómetro y parámetros utilizados para las pruebas de flujo.

Marca	TA Instruments
Modelo	DHR 3
Rango de Frecuencias	0 – 400 Hz
Geometría	Discos paralelos planos
Dimensiones	50 mm

Tabla 3.5: Especificaciones del reómetro y parámetros de las pruebas de flujo.

Una vez teniendo las curvas experimentales, se realiza un ajuste para obtener el modelo matemático que relaciona la viscosidad y la tasa de corte. El modelo utilizado es el de Ostwald (ley de potencia) debido a la naturaleza adelgazante de las mezclas. Se realizan tres ajustes por cada color, correspondientes a cada temperatura.

3.3. Análisis de la técnica

A través de experiencias personales tanto de artistas como del mismo Diego Rivera, obtenidas de [8], es posible determinar los parámetros físicos que se ven involucrados durante la acción de pintar con encáustica. La Figura 3.1 representa el fenómeno de aplicación de encáustica.

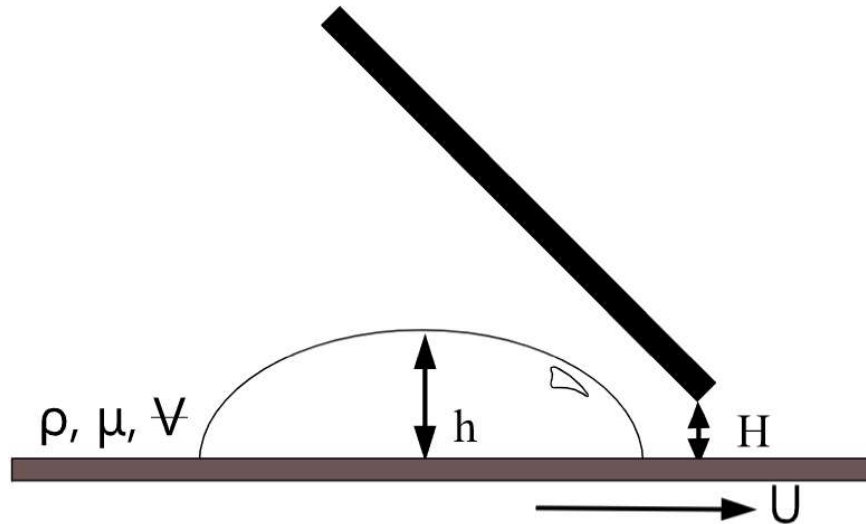


Figura 3.1: Diagrama de aplicación de la encáustica. La placa inferior se mueve a una velocidad constante U

Con base en el diagrama, se determinan los parámetros que relacionan la aplicación de la encáustica, resumiéndose en la Tabla 3.6.

Parámetro	Unidad	Definición	Función dimensión
U	m/s	Velocidad de arrastre	L/T
H	m	Altura de la espátula	L
V	m^3	Volumen de la gota	L^3
θ	$^\circ$	Ángulo de la espátula	1
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Densidad de la mezcla	M/L^3
μ	$Pa \cdot s$	Viscosidad de la mezcla	M/TL

Tabla 3.6: Parámetros físicos involucrados al pintar con encáustica.

Además, se sabe que el volumen es una función del área de la sección transversal de la gota y la altura de la misma. Dichos parámetros se definen en la Tabla 3.7.

Parámetro	Unidad	Definición	Función dimensión
h	m	Altura de la gota	L
A_o	m^2	Área transversal de la gota	L^2

Tabla 3.7: Parámetros físicos involucrados al pintar con encáustica. El volumen es función de la altura y área transversal de la gota de mezcla.

3.4. Experimento de Barrido

Para ser capaces de caracterizar los trazos con encáustica e identificar los efectos de los pigmentos al momento de aplicarla, es necesario recrear la técnica de los pintores de forma controlada para cuantificar la deformación del material. Un pintor utiliza una espátula para colocar un volumen específico y deformarlo según la geometría que desea plasmar. En este experimento controlado, se desean trazos rectos para identificar si cada pigmento genera trazos distintos y si es posible relacionar los trazos con distintos parámetros adimensionales.

El arreglo experimental diseñado, deforma una gota de encáustica por medio del movimiento (relativo) constante de una espátula, a una determinada altura. La metodología de la aplicación de las gotas de encáustica permite colocar un volumen determinado, sin embargo, cada color tiene una morfología de gota única, por lo que es necesario cuantificar la forma antes y después de la deformación. Se realizan las mediciones de forma a través de un análisis computacional de fotografías antes y después de la deformación.

Es de suma importancia para el experimento, controlar la temperatura de los fluidos al ser deformado. La viscosidad se modifica con la temperatura por lo que es necesario que la placa y la gota tengan la misma temperatura para poder describir los trazos a una temperatura específica. La placa del arreglo experimental tiene una temperatura controlada a través de una corriente eléctrica.

3.4.1. Control de temperatura

Para lograr trabajar con una temperatura específica y garantizar la misma curva de viscosidad a lo largo del experimento, se tiene una placa con un circuito impreso para transformar la energía de la corriente eléctrica que circula por el circuito en calor, por medio de efecto Joule. El circuito es alimentado por una fuente cuya capacidad es de hasta 25 V y 5 A. Esta placa está unida a una placa de aluminio, por medio de tornillos y tuercas; la placa de aluminio es donde se llevará a cabo la aplicación de la encáustica. Se eligió el aluminio por su conductividad térmica. Se recalca que la encáustica no presenta interacción química con el aluminio y debido a que la placa está pulida, no presenta tampoco interacción física. Las mediciones de la temperatura de la placa se hicieron con el uso de un termómetro laser digital infrarrojo mientras que el control del baño María se hizo con el uso de un termómetro de bulbo de mercurio.

3.4.2. Sistema de deformación

La generación de la deformación se logra a través de una espátula y la placa de aluminio; en la Figura 3.3 se observa la vista lateral de la configuración del experimento, donde es claro la disposición de la espátula con la placa. La espátula es una pieza rectangular de acrílico con dos rieles donde se introducen dos tornillos; la misma se coloca en un perfil de aluminio que tiene, de igual manera, dos rieles, pero en dirección perpendicular a los de la espátula, en donde entran los mismos dos tornillos. Una vez ensamblada la espátula con el perfil, se colocan tuercas en los tornillos para ajustar la espátula, utilizando los rieles de la espátula y del perfil para modificar la posición vertical y horizontal de la espátula. Cuando la gota entra en contacto

con la espátula, por medio del movimiento de la placa, la gota se deformará una determinada distancia según la diferencia de alturas entre la gota y la espátula. La altura de la espátula se controla por medio de un calibrador, el cual es una pieza de tamaño conocido que se coloca debajo de la espátula para garantizar que se tiene la espátula a la altura deseada.

3.4.3. Control de velocidad

El movimiento se genera con el uso de un motor a pasos que es controlado por un Driver TB6600. Se utiliza un motor a pasos por su control sencillo, su precisión en el arranque, comparada con otros motores y su amplia variedad de velocidades. El motor se alimenta por medio de una fuente independiente de 5 V y 1 A, mientras que el Driver, además de la fuente, utiliza un generador de señales para controlar la frecuencia del motor de pasos y por ende, la velocidad.

La conversión del movimiento rotacional del motor a un movimiento lineal se hace por medio de un husillo de bolas, el cual se encuentra conectado al motor a pasos y a la placa de aluminio. El tornillo del husillo se instaló a lo largo del eje central de la placa de aluminio. De manera auxiliar, se tienen dos rieles fijos, con una pieza que se desplaza libremente conectada a la placa, para tener estabilidad en el movimiento.

Como ya se mencionó, la velocidad angular del motor a pasos se controla a través de la frecuencia del generador de ondas. Para las velocidades lineales del husillo, se toman las mediciones de manera visual y con ayuda de videos. Aunque existe la forma analítica de calcular la velocidad lineal a través de la velocidad angular y el paso del tornillo sin fin, se hace de forma experimental por el peso de la placa y el periodo de transición al inicio del movimiento del motor.

3.4.4. Sistema fotográfico

Para el análisis del cambio de forma, se tomaron fotografías antes y después de la deformación con el uso de una cámara Canon EOS 60D y un lente de marco Rokinon de 100[mm]. Con la ayuda de un tripie, se posiciona la cámara de forma perpendicular sobre la placa a una altura y posición determinada; es importante que la cámara no cambia de posición a lo largo de los experimentos, aunque sí se deben hacer ajustes menores en el enfoque según los colores, para así tener la misma escala en todas las fotografías. Al inicio de la experimentación, se toma una fotografía de una pieza con dimensiones conocidas para ser capaces de convertir los pixeles a unidades de longitud.

3.4.5. Disposición general

En la Figura 3.2 se muestra la proyección isométrica del arreglo experimental y en la Figura 3.3 la vista lateral del mismo.

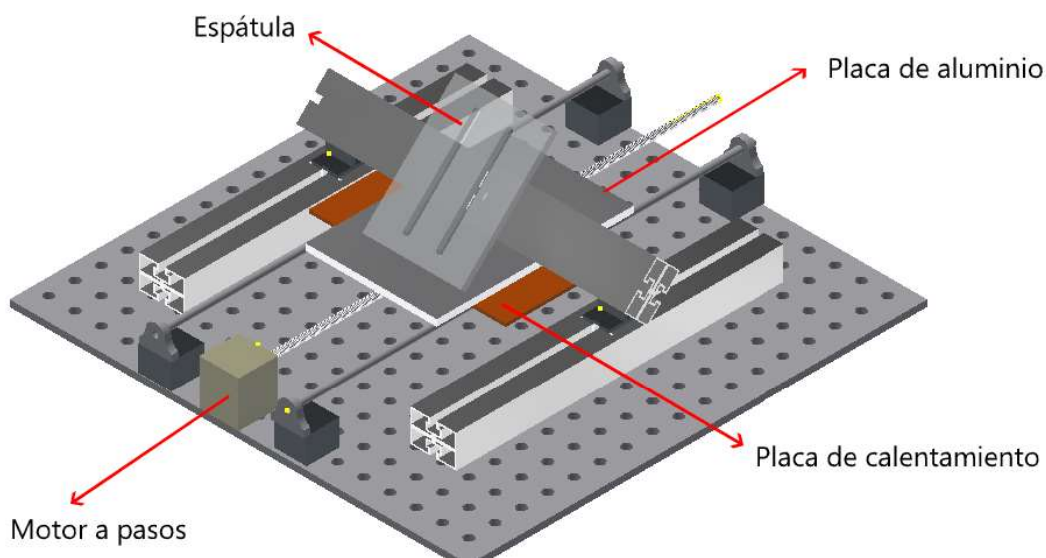


Figura 3.2: Disposición del dispositivo para caracterización de trazos

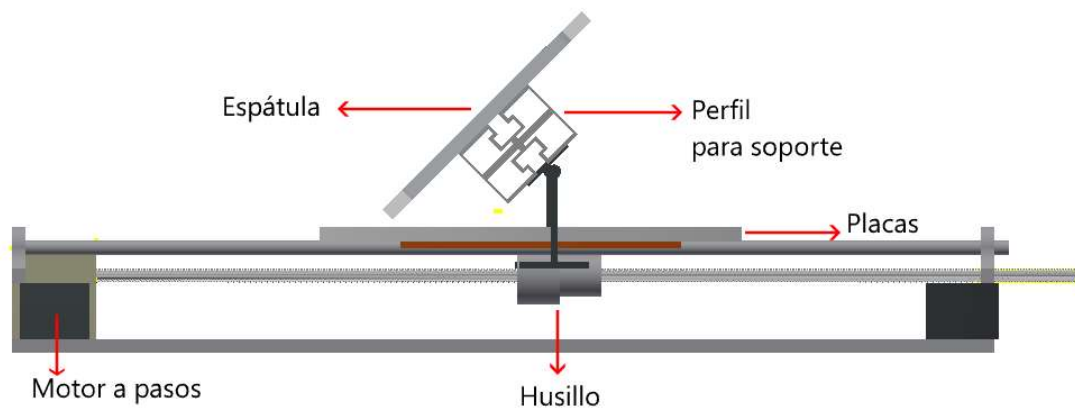


Figura 3.3: Vista lateral del dispositivo para caracterización de trazos

3.4.6. Metodología experimental

Teniendo las mezclas de encáustica preparadas, tanto cruda como pigmentada, se procede a colocar la misma en un baño María a la temperatura de trabajo; el control de la temperatura se hace con el uso de un termómetro de bulbo de mercurio. La fuente de la placa se enciende y se colca el voltaje para tener la temperatura de trabajo; el control de la temperatura se hace con el uso de termómetro infrarrojo digital. Una vez que se tienen las mezclas y la placa a

la temperatura de trabajo, se coloca un volumen específico de encáustica, con el uso de una micropipeta, al centro de la placa. Se debe esperar 5 minutos antes de iniciar la deformación, para alcanzar la homogeneidad térmica. Transcurridos los 5 minutos, se toma una fotografía de la gota. La espátula se ajusta al menos a 5 cm de la gota, para alcanzar una velocidad constante al momento del contacto con la espátula. Una vez configurada la frecuencia del motor, se acciona el dispositivo. Por último, se toma una fotografía de la deformación y se limpia el dispositivo para el siguiente experimento.

Cabe resaltar que al calentar la mezcla para fundirla se pierde menos del 0.05 % de la masa total. Esta pérdida de masa se debe a la evaporación del *white spirit* y del aceite de alhucema. Debido a que la evaporación es mínima, se considera que las propiedades se mantienen constantes sin importar los recalentamientos.

3.5. Mezclas Experimentales

Se trabajó con 8 mezclas experimentales; la relación entre nombre y cantidad de pigmento se establece en la Tabla 3.8. Todas las mezclas se hacen con encáustica base (o cruda) y se adicionan los pigmentos.

Nombre	Pigmento	%masa de pigmento
Cruda	Sin pigmento	0
Blanco	Blanco de zinc	21.89
Blanco 5	Blanco de zinc	5.45
Blanco 10	Blanco de zinc	10.95
Blanco 55	Blanco de zinc	54.73
Azul	Azul ultramar	21.89
Rojo	Rojo óxido de hierro	21.89
Negro	Negro de humo	21.89

Tabla 3.8: Parámetros físicos involucrados al pintar con encáustica. El volumen es función de la altura y área transversal de la gota de mezcla.

La densidad de las mezclas experimentales se observa en la Tabla 3.9.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Mezcla	Densidad [$\frac{Kg}{m^3}$]
Cruda	913.5
Blanca 5	1198
Blanca 10	1238
Blanca	1317
Blanca 54	1439
Azul	1070.7
Rojo	1123.5
Negro	1132.1

Tabla 3.9: Densidad de las mezclas experimentales. Se considera que la densidad de la encáustica no cambia con la temperatura.

3.6. Experimentación realizada

Se hicieron 4 series de experimentos modificando las siguientes variables: velocidad (U), temperatura (T), concentración de pigmento ($\%m$) y altura de la espátula (H). Adicionalmente, en cada serie se utilizaron distintas mezclas experimentales. En la Tabla 3.10, 3.11, 3.11 y 3.13 se observan las series de experimentos y los valores para cada parámetro.

	Velocidad [mm/s]	Altura espátula [mm]	Temperatura [°C]	Mezclas experimentales
1	5			
2	10			
3	15			
4	20	0.5	60	Cruda, Blanco, Azul, Rojo
5	25			Negro,
6	30			

Tabla 3.10: Serie 1: Variación de velocidad para distintas mezclas con altura de espátula y temperatura constante.

	Temperatura [°C]	Altura espátula [mm]	Velocidad [m/s]	Mezclas experimentales
1	50			Cruda, Blanco,
2	60	0.5	15	Azul, Rojo,
3	80			Negro

Tabla 3.11: Serie 2: Variación de la temperatura para distintas mezclas con velocidad y altura de espátula constante.

	%m	Mezclas experimentales	Temperatura [°C]	Altura Espátula [mm]	Velocidad [mm/s]
1	0	Cruda			
2	5.47	Blanca 5			
3	10.95	Blanca 10	60	0.5	15
4	21.89	Blanca			
5	54.73	Blanca 55			

Tabla 3.12: Serie 3: Variación del porcentaje en masa de pigmento para altura de espátula, velocidad y temperatura constante.

	Altura espátula [mm]	Velocidad [mm/s]	Temperatura [°C]	Mezclas experimentales
1	0.15			
2	0.25			
3	0.33			
4	0.45	15	60	Azul
5	0.5			
6	0.65			
7	0.7			

Tabla 3.13: Serie 4: Variación de la altura de la espátula para velocidad, temperatura y mezcla constante.

De las variables trabajadas en la experimentación, la altura y velocidad modifican al número de Reynolds de forma directa, mientras que la temperatura, el tipo de pigmento y concentración de pigmento afectan al número de Reynolds a través de la viscosidad; estos parámetros afectan la curva de viscosidad de la mezcla experimental base.

Resultados

En este Capítulo se hace la documentación de los resultados experimentales de las calorimetrías, reometrías y pruebas de barrido. Los resultados son acompañados de una interpretación de resultados para explicar el fenómeno, aclarar posibles errores o discrepancias con la teoría. Con ayuda de los resultados, es posible inferir los parámetros cuyo efecto es mayor al momento de aplicar la encáustica o, mejor dicho, pintar con encáustica.

4.1. Calorimetrías

La Figura 4.1 muestra las calorimetrías realizadas a las siguientes muestras experimentales: Cruda, Blanca, Roja, Azul y Negra; la composición de las mezclas se muestra en la Tabla 3.3 y el porcentaje de pigmento en la Tabla 3.8. El propósito de esta prueba es determinar el punto de fusión de la encáustica. Las curvas muestran la relación entre la temperatura a la que se encuentra la muestra y el calor que se suministra al sistema.

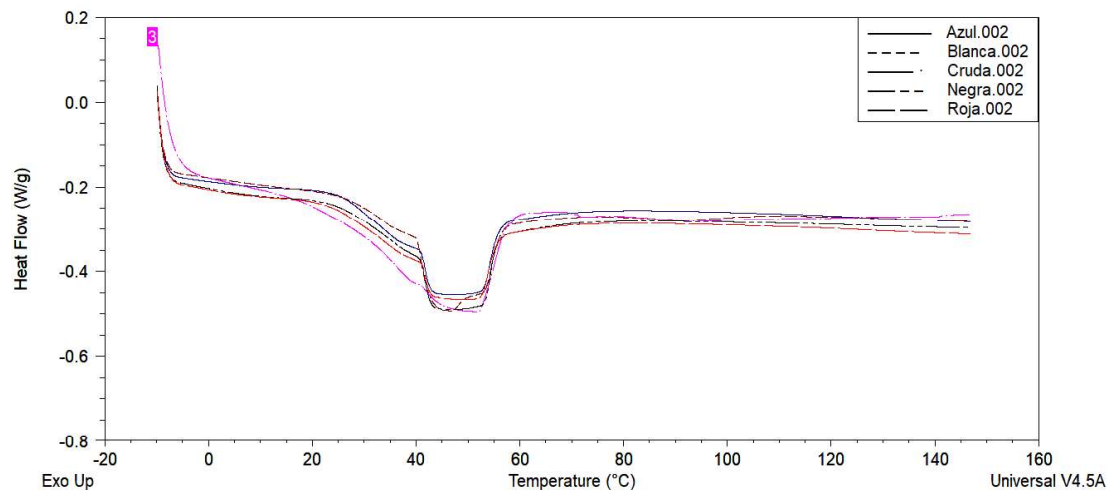


Figura 4.1: Curva calorimétrica de la encáustica tanto cruda como con distintos pigmentos

4. RESULTADOS

4.1.1. Interpretación de resultados

Como es fácil de apreciar, las curvas son muy similares sin importar el tipo de pigmento de la mezcla. De forma generalizada se puede decir que el intervalo de transición inicia a la temperatura de 40 °C y termina a 60 °C. La diferencia en las curvas se puede deber a la interferencia de los pigmentos y otros precipitados en las mezclas.

Para definir los puntos exactos en donde inicia y termina la transición, se utiliza un método gráfico para identificar el punto en el que la curva presenta una pendiente prácticamente vertical. En la Tabla 4.1 se muestran los puntos determinados del inicio y final de la transición sólido a líquido; el punto final se considera el punto de fusión.

Mezcla	Temperatura de inicio [°C]	Temperatura final [°C]
Cruda	40.92	59.79
Blanco	40.10	58.29
Azul	40.90	58.46
Rojo	40.92	57.71
Negro	40.10	58.29

Tabla 4.1: Temperaturas de inicio y fin de la transición de las muestras experimentales

Con base en las pruebas calorimétricas, se afirma que los pigmentos no tienen efecto significativo en la temperatura de fusión de la encáustica cruda. Sucede lo mismo para el calor específico, ya que las curvas son muy similares y la masa utilizada en la prueba es la misma para todos los casos.

4.2. Prueba de flujo para mezclas con diferentes pigmentos

Una prueba de flujo es una prueba reológica que relaciona la viscosidad y la tasa de corte, con el uso de dos placas que se encuentran en contacto con la muestra. Dichas placas rotan generando específica velocidad de corte y miden la oposición de la muestra al corte. Para identificar el efecto de los distintos pigmentos en la encáustica, se realizaron pruebas de flujo a las siguientes mezclas: Cruda, Blanca, Roja, Azul y Negra. Con la información de las calorimetrías, se determinaron 3 temperaturas para realizar dichas pruebas: 50, 60 y 80 °C. La Figura 4.2 muestra las curvas de viscosidad a las 3 temperaturas de trabajo para las mezclas señaladas.

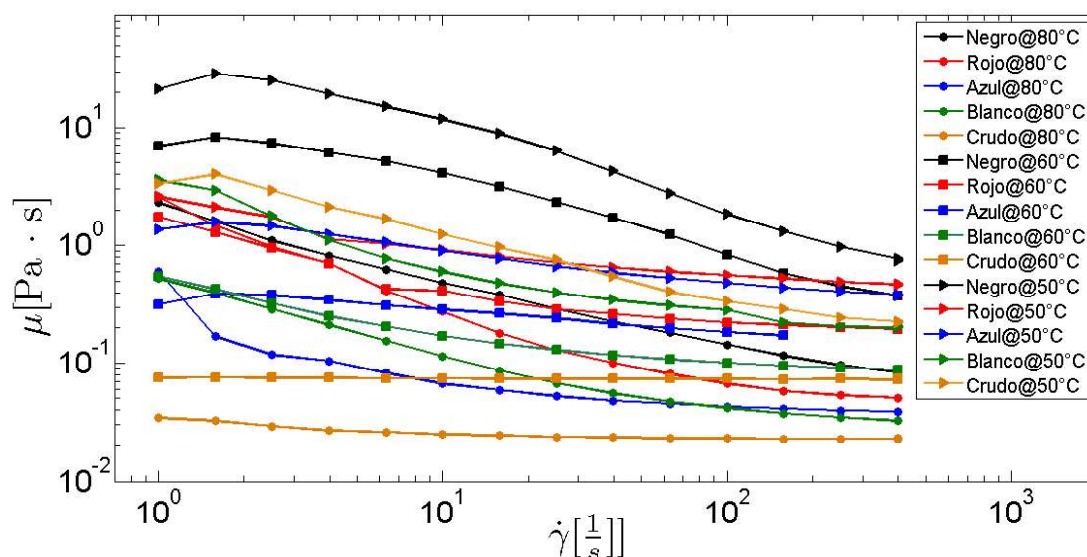


Figura 4.2: Curvas de viscosidad de muestras experimentales con distintos pigmentos a 50, 60 y 80 °C

4.2.1. Interpretación de resultados

Analizando la gráfica, la adición de pigmentos a la mezcla Cruda genera una curva de viscosidad única y superior, en la mayoría de los casos. Cuando se trabaja a 50 °C, el único pigmento que genera una viscosidad superior a la viscosidad de la mezcla cruda es el negro de marfil; el resto de los colores disminuye la viscosidad. Para 60 y 80 °C, la viscosidad de las mezclas con pigmentos es superior a la de la cruda. El pigmento que modifica en mayor medida la viscosidad de las mezclas es el negro de marfil, seguido por el rojo óxido de hierro, azul ultramar y blanco de zinc. Realizando un análisis de forma comparativa entre las figuras, a mayor temperatura se tiene menor viscosidad, lo cual concuerda con la teoría.

Aunque no se puede asegurar la razón por la cual los pigmentos modifican la viscosidad de la encáustica, se sabe que existen dos razones por lo cual puede suceder esto: interacción química entre las moléculas del pigmento y la mezcla; e interacción física de la mezcla y los pigmentos debido a la morfología y tamaño de los últimos. Aunque ninguna inferencia se puede hacer con respecto a la interacción química en este trabajo, se puede hacer con respecto a la interacción física. En [34] se menciona que el pigmento negro de humo es muy susceptible a aumentar la viscosidad de la mezcla a la que es adicionado debido a su tamaño y área superficial. Los resultados de la investigación bibliográfica indican que a mayor concentración y mayor tamaño de partícula se tienen mayores parámetros viscoelásticos y viscosidad dinámica. En el presente trabajo no se hace una caracterización de los pigmentos, sin embargo, en la sección 2.2 se dan los rangos de tamaño de los mismos, y se puede decir que el pigmento negro de marfil tiene el mayor tamaño de partícula, seguido por el rojo óxido de hierro, azul ultramar y blanco de zinc, lo cual concuerda con la disminución en magnitud de las curvas de viscosidad.

De acuerdo a las pruebas de flujo, la encáustica tiene un comportamiento adelgazante. Uti-

4. RESULTADOS

lizando la ley de potencia, se hace un ajuste de las curvas para obtener el modelo reológico de cada mezcla. La siguiente ecuación representa el modelo de ajuste potencial (antes mencionado en la sección 2.15, ecuación 2.4).

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.2, 4.3, 4.4 se observan los índices de consistencia y comportamiento obtenidos para cada mezcla a las 3 diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	50		60		80	
Muestra	m	n	m	n	m	n
Cruda	4.07	0.49	0.08	0.99	0.03	0.95
Blanco	2.76	0.37	0.38	0.69	0.35	0.53
Azul	1.53	0.76	0.45	0.81	0.08	0.86
Rojo	1.35	0.59	1.15	0.59	1.06	0.39
Negro	56.68	0.28	11.37	0.55	1.60	0.5

Tabla 4.2: Índice de consistencia y comportamiento de las mezclas experimentales de encáustica a 50, 60 y 80 °C

Se sabe que el comportamiento adelgazante se puede modelar a través de una función potencial, por lo que es posible normalizar, con la curva de encáustica cruda, las curvas con pigmentos. Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran las curvas normalizadas para las mezclas experimentales a las 3 temperaturas; la viscosidad normalizada se representa como μ^* .

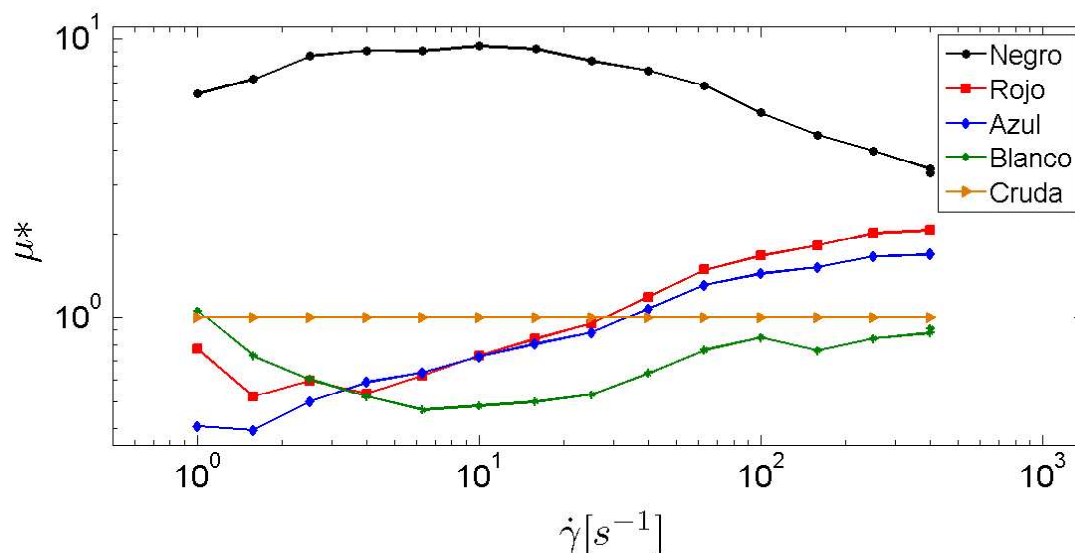


Figura 4.3: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales a 50 °C.

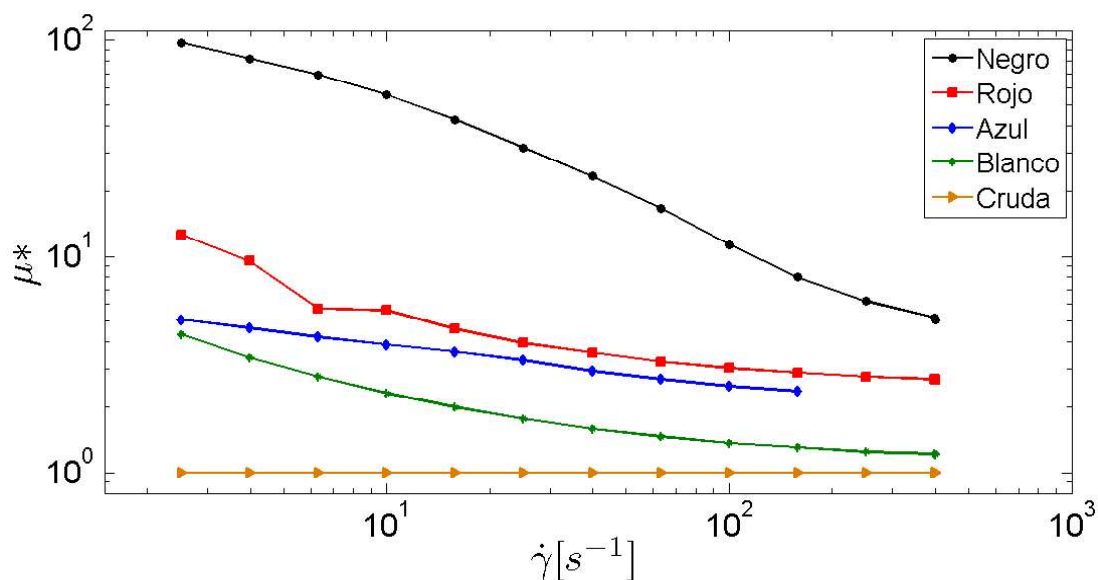


Figura 4.4: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales a 60 °C

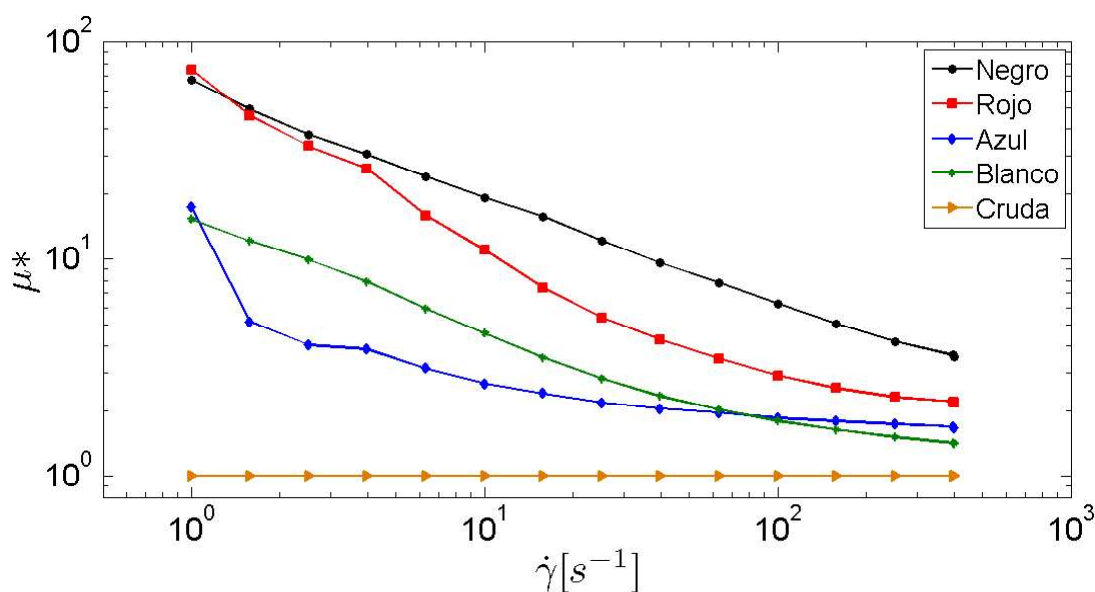


Figura 4.5: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales a 80 °C

Recordando que el modelo potencial establece la relación entre la tasa de corte y la viscosidad a través de la ecuación 2.4, si el comportamiento adelgazante fuera el mismo en todos los casos, al normalizar las curvas con pigmentos con la curva cruda se deberían obtener rectas horizontales, ya que la tasa de corte se simplificaría en la unidad y solo quedaría el índice de consistencia como constante. Claramente esto no sucede así, por lo que los pigmentos no

4. RESULTADOS

solo tienden a aumentar la viscosidad de la encáustica cruda, sino que también modifican el comportamiento adelgazante. Esto se puede corroborar con los índices de comportamiento; si el índice fuera el mismo para todos los casos, simplificándose entonces la tasa de corte.

Se hace una observación particular a la Figura 4.3, ya que las curvas no son consistentes con el resto de las curvas normalizadas, esto puede deberse a que a 50 °C el material aún no es un líquido en su totalidad, por lo que las pruebas de flujo, debido a las características del reómetro, presentan errores.

4.3. Prueba de flujo para mezclas con mismo pigmento

Para identificar el efecto de la concentración de pigmento, se agregó blanco de zinc en distintas proporciones en masa. Las pruebas de flujo se hicieron con los mismos parámetros que las pruebas anteriores, a las 3 mismas temperaturas. La Figuras 4.6 muestra las curvas obtenidas.

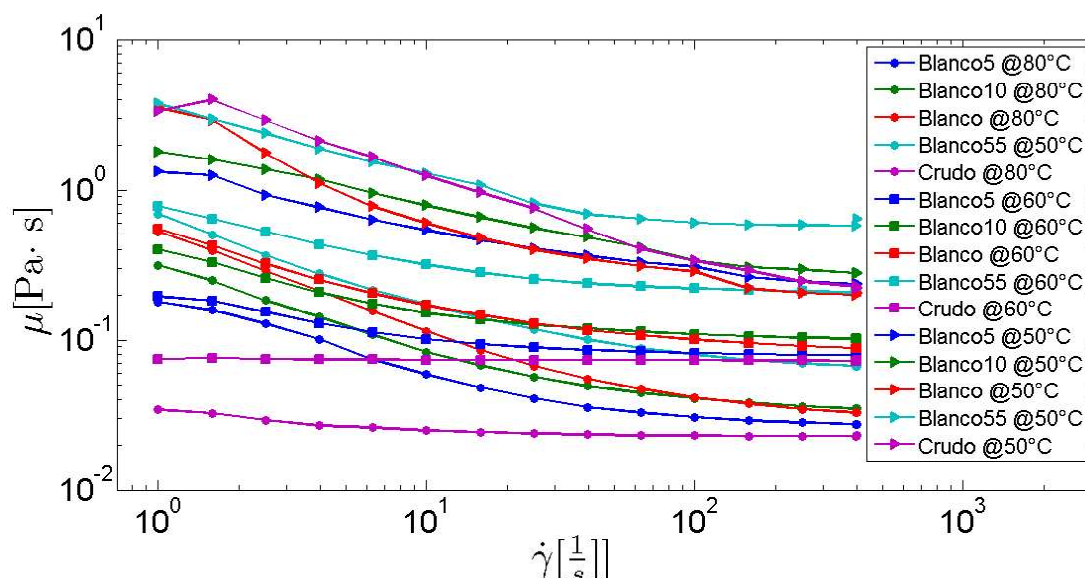


Figura 4.6: Curvas de viscosidad de muestras experimentales con mismo pigmento a distintas concentraciones a 50, 60 y 80°C

4.3.1. Interpretación de resultados

Analizando las curvas de forma individual, el aumento en concentración de pigmento aumenta la viscosidad de las mezclas, siendo congruente con lo establecido en [33]. Para 50 °C, la viscosidad de las mezclas con pigmentos es menor a la mezcla cruda. Aunque se determinó que la transición de líquido a sólido es prácticamente el mismo para todas las mezclas experimentales, la diferencia en las curvas puede significar que las mezclas con pigmento blanco de zinc se transforman en líquido a menor temperatura que la encáustica cruda, teniendo menor viscosidad que una mezcla sólido-líquido a 50 °C.

4.3 Prueba de flujo para mezclas con mismo pigmento

Como ya se había mencionado, la encáustica tiene un comportamiento adelgazante, el cual se mantiene sin importar la concentración de pigmento. En la Tabla 4.5, 4.6 y 4.7 se observan los índices de consistencia y comportamiento obtenidos para cada mezcla a las tres diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	50		60		80	
Muestra	m	n	m	n	m	n
Cruda	4.07	0.49	0.08	0.99	0.03	0.95
Blanco 5	1.11	0.70	0.19	0.76	0.18	0.55
Blanco 10	1.78	0.66	0.37	0.63	0.29	0.51
Blanco	2.76	0.37	0.38	0.69	0.35	0.53
Blanco 55	.46	0.59	0.72	0.68	0.57	0.53

Tabla 4.3: Índice de consistencia y comportamiento de la encáustica con mismo tipo de pigmento a 50, 60 y 80 °C

Como se hizo anteriormente, se normalizan las curvas de viscosidad con la curva de viscosidad de la mezcla cruda. En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran las curvas normalizadas.

El propósito de esta normalización es identificar si el comportamiento adelgazante se ve afectado con la concentración de pigmento. Se puede observar que las curvas en la Figura 4.8 y 4.9, aunque no completamente, tienden a ser paralelas, es decir, no es posible apreciar distintos comportamientos adelgazantes que las curvas sin normalizar presentan. Esto nos indica que la concentración de pigmento solo desplaza de manera vertical las curvas de viscosidad, mientras que el comportamiento adelgazante se ve afectado por interacción química o morfología de los pigmentos.

4. RESULTADOS

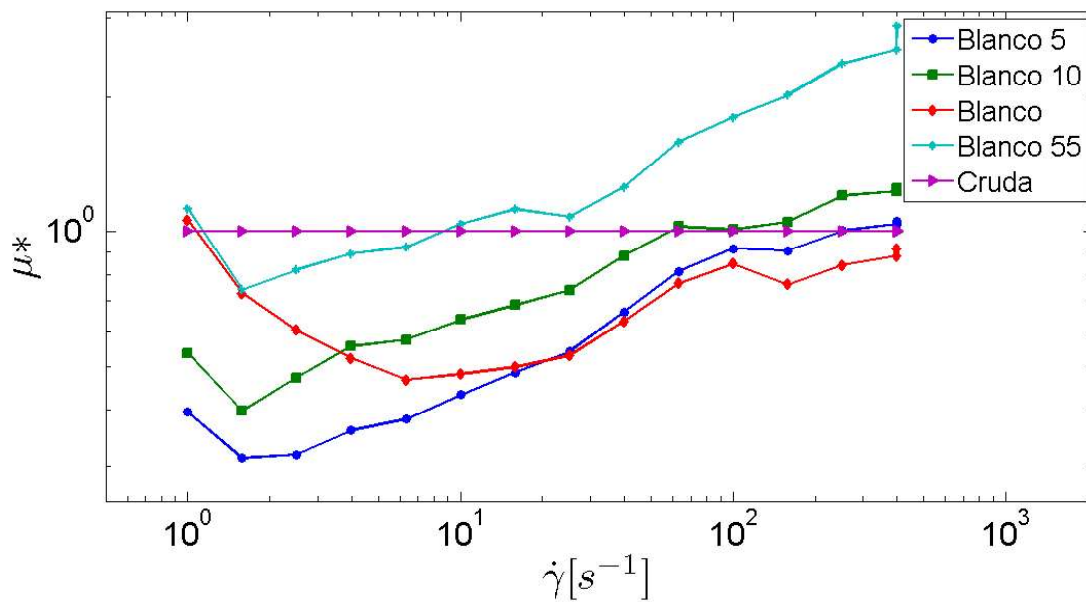


Figura 4.7: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales con mismo tipo de pigmento a distintas concentraciones a 50 °C

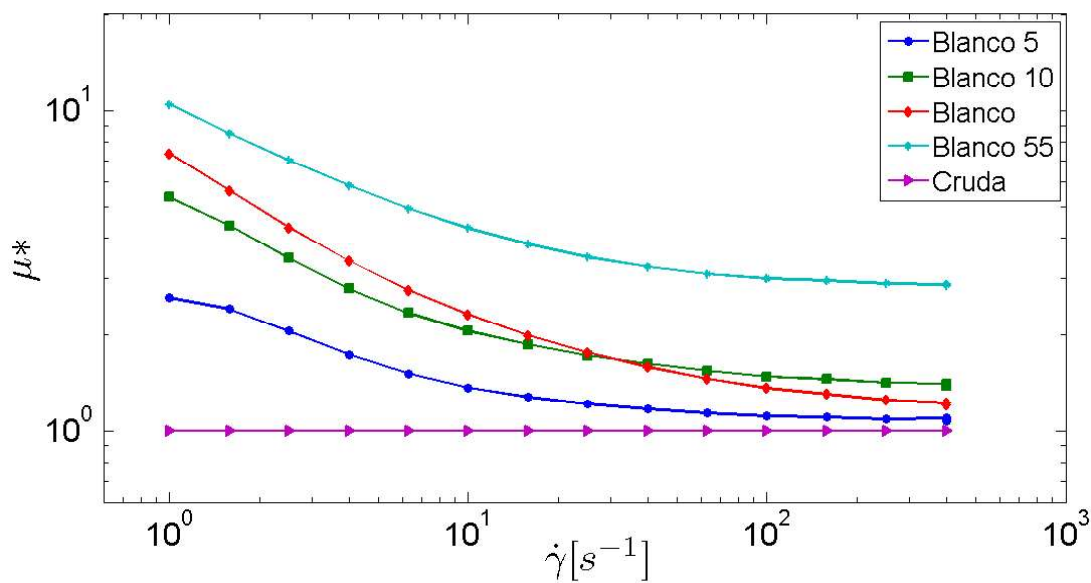


Figura 4.8: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales con mismo tipo de pigmentos a distintas concentraciones a 60 °C

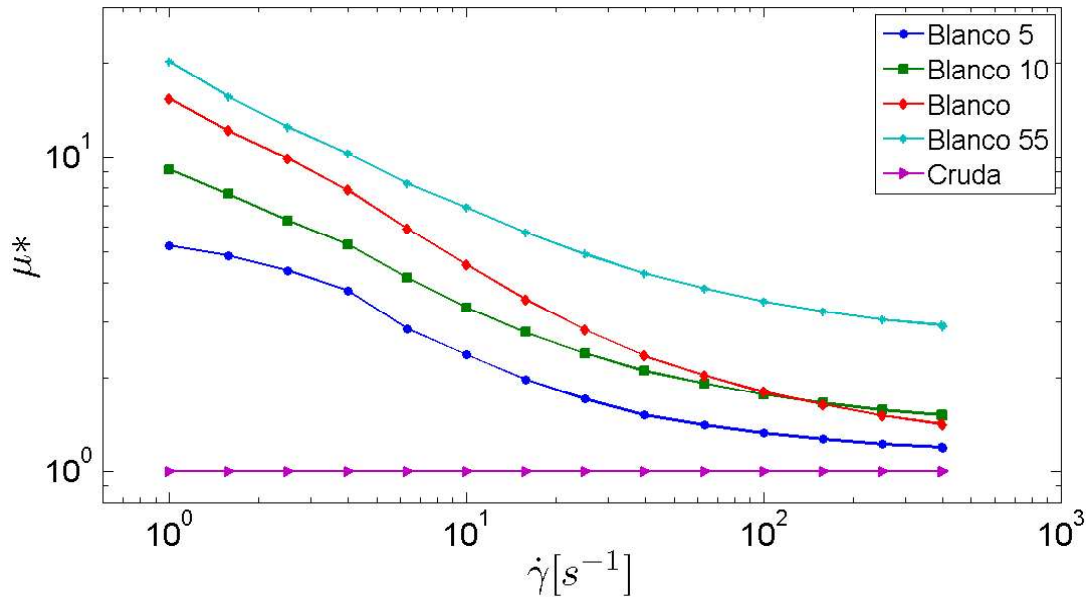


Figura 4.9: Curvas de viscosidad normalizada (μ^*) de muestras experimentales con mismo tipo de pigmento a distintas concentraciones 80 °C

4.4. Experimento de barrido

Para ser capaces de medir el cambio de forma durante la aplicación de la encáustica, se utiliza el experimento de barrido para controlar las variables involucradas durante la acción de pintar con encáustica. En la Figura 4.10 se muestra la secuencia temporal del experimento de barrido.

4.4.1. Serie 1: Velocidad y cambio de forma

La encáustica es un fluido adelgazante, por lo que la velocidad de corte afecta la viscosidad. La teoría establece que a mayor velocidad de corte menor viscosidad, entonces se espera que, a mayores velocidades de la espátula, la encáustica sea más sencillo de deformar en dirección del corte y los trazos sean más largos ya que la velocidad afecta de forma directa a la tasa de corte.

La Figura 4.11 y 4.12 muestran las gráficas que relacionan la velocidad con el largo y área del trazo. En ambos casos, se sustrae la longitud y área inicial de la gota para conocer el cambio de forma neto que genera el trazo. Los resultados se grafican en dispersión debido a la alta variabilidad de los mismos.

4. RESULTADOS



Figura 4.10: Secuencia temporal del experimento de barrido. Conforme la espátula cambia de posición y entra en contacto con la gota de encáustica, esta se deforma para adquirir la altura de la espátula. Es importante identificar que parte de la masa de la gota queda adherida a la espátula.

4.4.1.1. Interpretación de resultados

Analizando la Figura 4.15 se identifica que, para todas las mezclas, a mayores velocidades se tienen trazos de mayor longitud debido a que la viscosidad es menor, cumpliéndose la hipótesis antes mencionada. Las mezclas Azul y Negro se comportan de manera similar, a pesar de que la viscosidad de la mezcla Negra es superior. Se podría suponer que los trazos de mezcla negra deben ser de menor longitud, sin embargo, como se verá más adelante, las gotas de cada mezcla no presentan la misma altura, por lo que la tasa de corte es distinta para cada mezcla, sin importar que la velocidad de la espátula sea la misma para todas. Para las mezclas Blanca y Cruda, se tiene un comportamiento similar para velocidades superiores a 0.02 m/s, siendo los trazos de mezcla cruda más largos que aquellos de la blanca. La mezcla Roja presenta una alta variabilidad, debido a que la mezcla presenta muchos precipitados sólidos, los cuales quedan atrapados en la espátula.

Con respecto al cambio de área, el comportamiento es similar; las mezclas negro y azul y blanco y cruda tienen un comportamiento similar respectivamente; el rojo vuelve a presentar alta variabilidad. Se puede observar que a velocidades menores 20 mm/s, el cambio de área tiene un comportamiento constante, mientras que a velocidades iguales o superiores a 20 mm/s se tienen trazos mayores en área conforme aumenta la velocidad.

Las gráficas incluyen una curva de cambio geométrico en la que se idealiza que la pintura presenta la misma viscosidad a distintas velocidades y cuya deformación solo se ve afectada por el cambio de altura del volumen inicial según la altura de la espátula. Para esta curva se considera que las gotas y los trazos son prismas; el área transversal de la gota es un círculo con diámetro L_i y el área transversal del trazo es un rectángulo con ancho igual a L_i y largo igual a L_f . Se tiene el siguiente procedimiento:

$$\begin{aligned} V_i &= A_i \cdot h = \pi \cdot L_i^2 \cdot h/4 \\ L_i &= \sqrt{(4 \cdot V_i)/(\pi \cdot h)} \\ V_f &= A_f \cdot H = L_i \cdot L_f \cdot H \\ L_f &= \frac{V_f}{L_i \cdot H} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot V_i}{\pi \cdot h}}}{L_i \cdot H} \end{aligned}$$

$$L_f - L_i = \sqrt{\frac{4 \cdot V_i}{\pi \cdot h}} \cdot \left(\frac{1}{L_i \cdot H} - 1 \right) \quad (4.2)$$

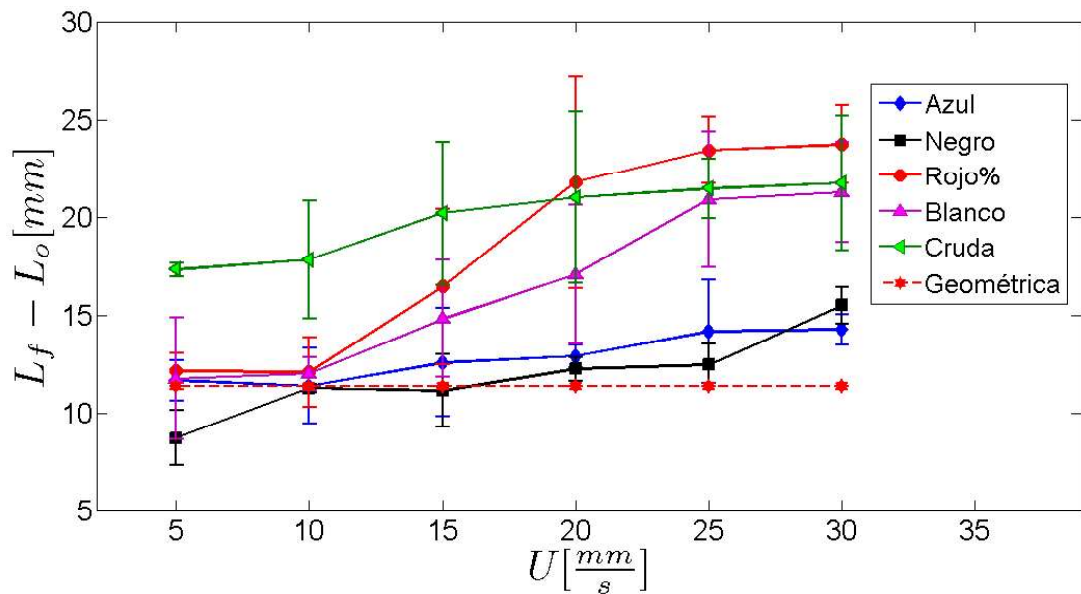


Figura 4.11: Cambio de longitud contra velocidad de la espátula. La temperatura y altura de la espátula se mantienen constante

4. RESULTADOS

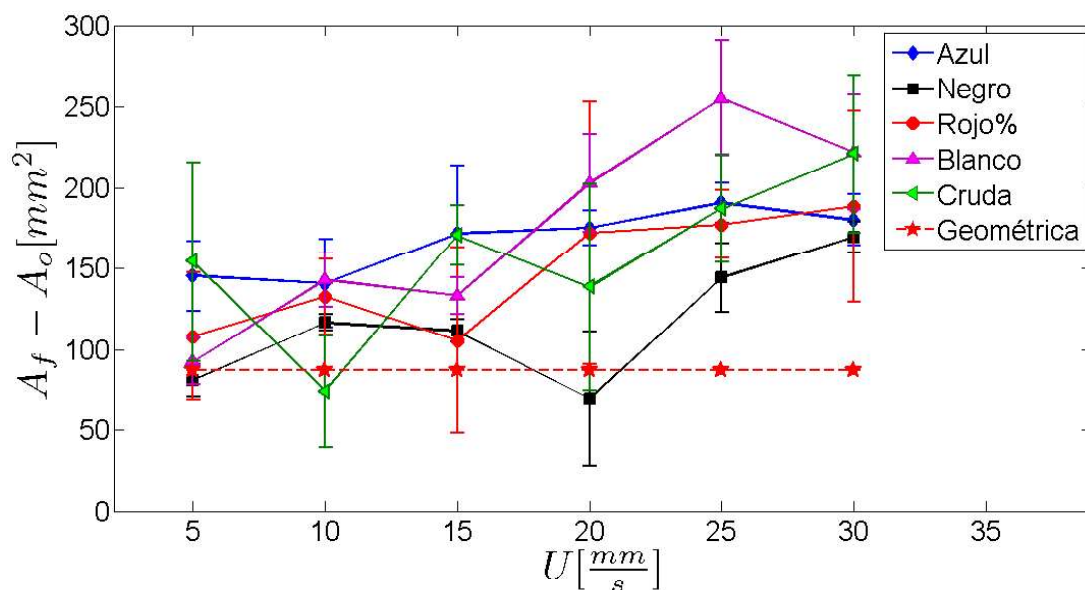


Figura 4.12: Cambio de área contra velocidad de la espátula. La temperatura y altura de la espátula se mantienen constante

Las Figuras 4.13 y 4.14 se presentan para ejemplificar una muestra de resultados, para todas las muestras, a dos velocidades diferentes. Comparando las Figuras 4.13 y 4.14 es sencillo identificar que a velocidades pequeñas los trazos tienden a ser en forma de gota o con terminación en punta, mientras que a mayores velocidades se tienen trazos rectos con terminaciones redondas. La geometría de los trazos se modifica de forma progresiva conforme aumenta la velocidad. También es claro que los trazos son mayores a los idealizados tanto en área como en longitud.

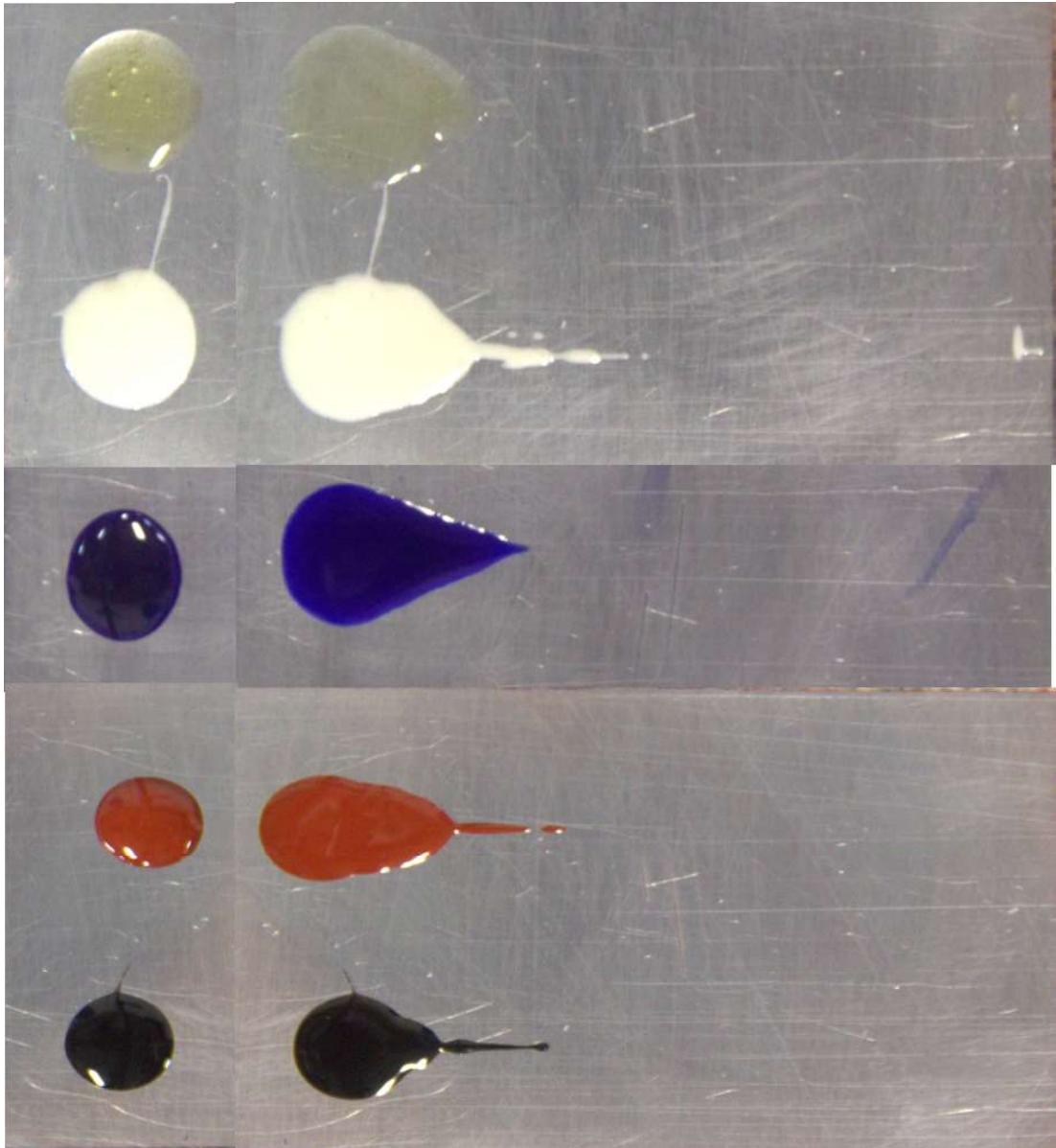


Figura 4.13: Trazos experimentales para una velocidad de 5m/s, 60 °C y altura de espátula de 0.5 mm para: a) Cruda, b) Blanco, c) Azul, d) Rojo, e) Negro

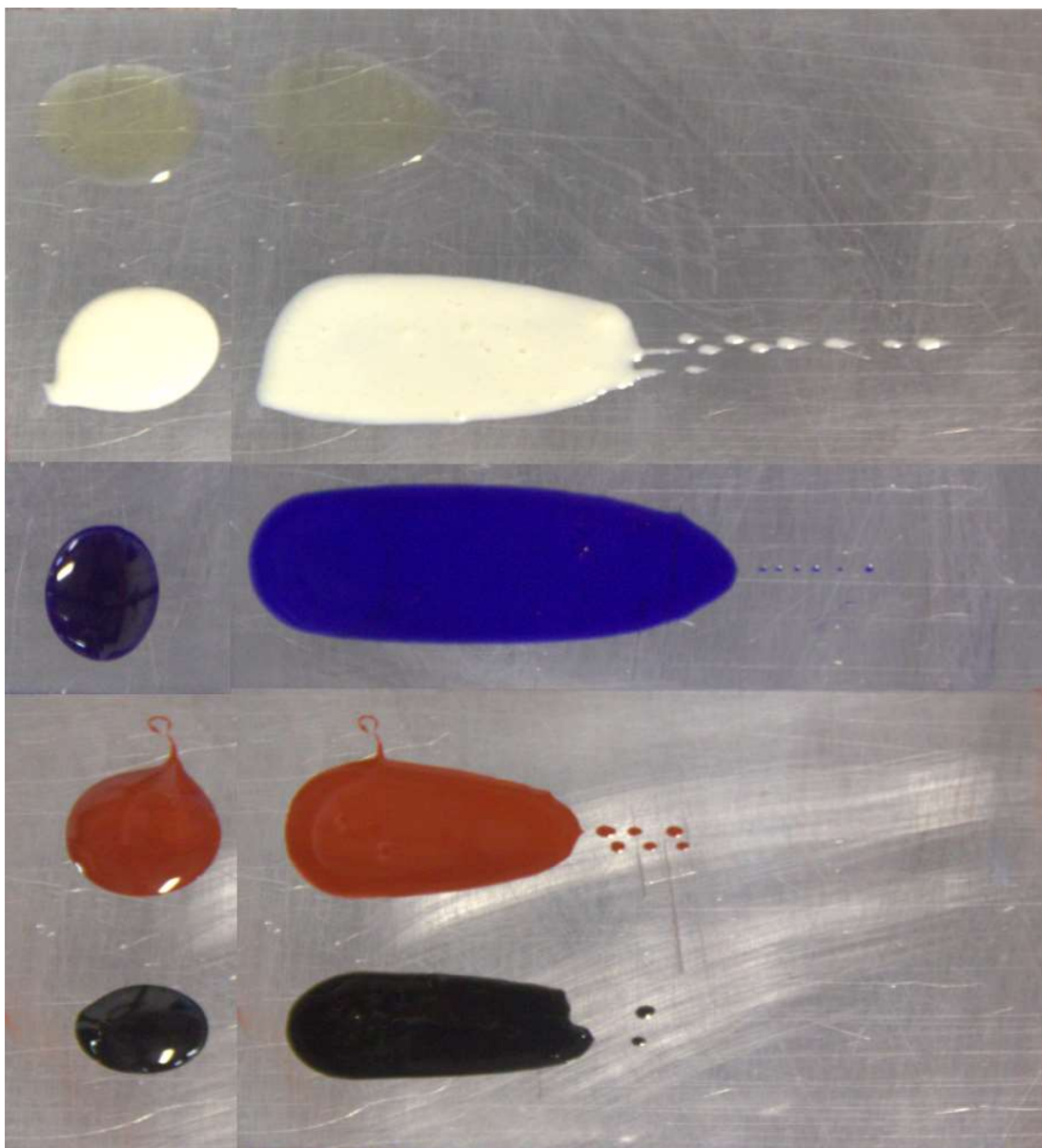


Figura 4.14: Trazos experimentales para una velocidad de 30 m/s, 60 °C y altura de espátula de 0.5 mm para: a) Cruda, b) Blanco, c) Azul, d) Rojo, e) Negro

4.4.2. Serie 2: Temperatura y cambio de forma

Las reometrías indican que a mayor temperatura se tiene menor viscosidad, por lo que los trazos deben ser más largos, sin embargo, la altura inicial de la gota se ve modificada de igual forma por la temperatura.

Para analizar el cambio de forma solo se presenta el cambio de longitud, ya que a 50°C, las

muestras son mezclas sólido-líquido y no fluyen sino se arrastra la mezcla y quedan trazos sin concordancia con la teoría. En su lugar, se grafica la altura de las gotas, ya que es un factor que afecta directamente la viscosidad de la mezcla. Las Figuras 4.15 y 4.16 presentan la relación entre temperatura y cambio de largo y altura. Para el cálculo de la altura de la gota se asume como un prisma ya que se conoce el área y volumen de la misma; aunque un casquete esférico modela de mejor manera a la gota, el área transversal no es perfectamente circular, por lo que se opta por la suposición de un prisma.

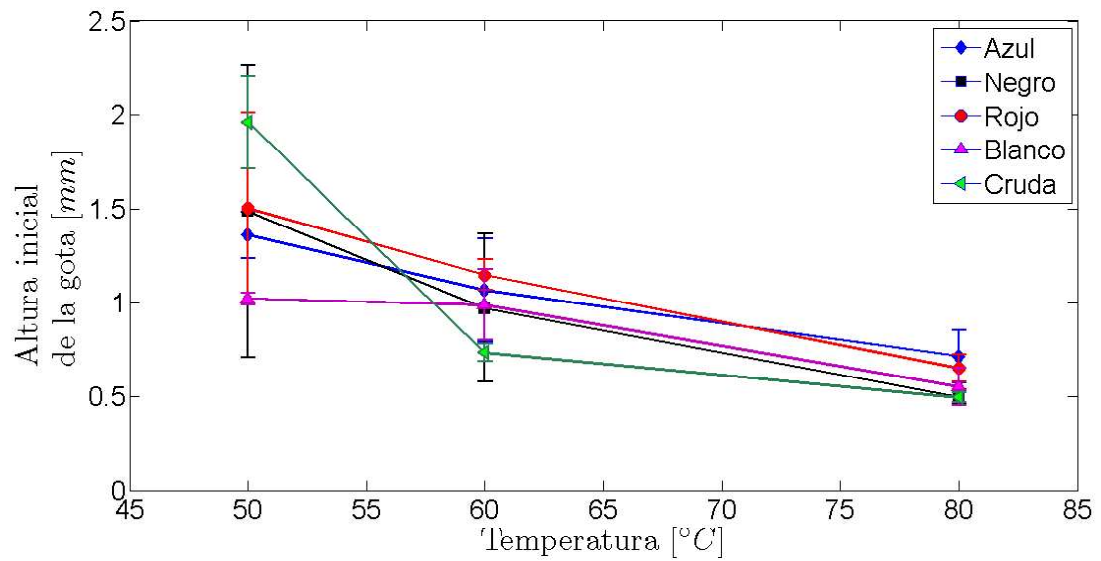


Figura 4.15: Altura inicial de la gota según la temperatura de la misma.

4. RESULTADOS

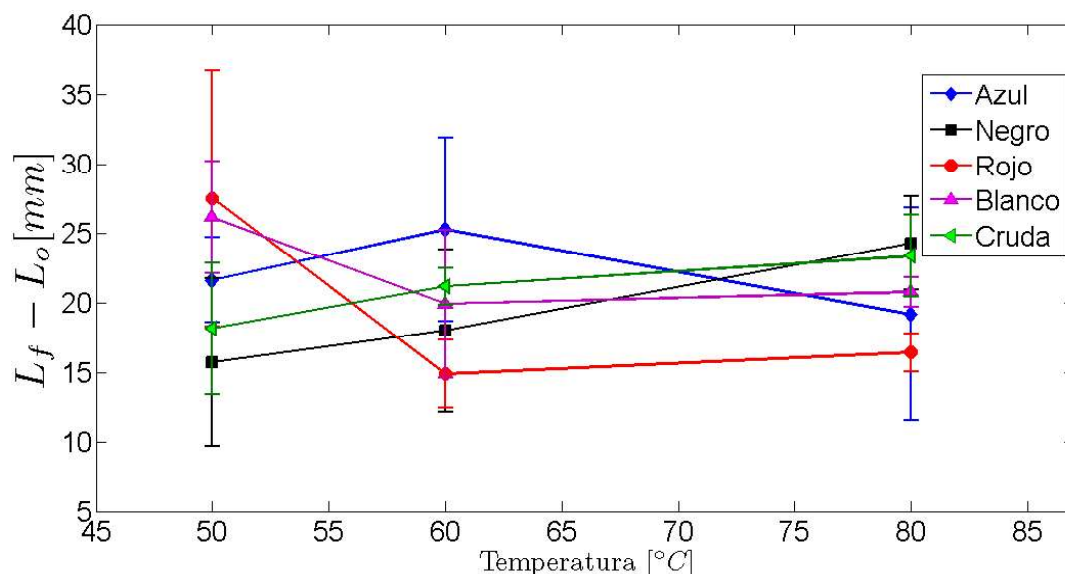


Figura 4.16: Cambio de longitud contra temperatura de la gota. La velocidad y altura de la espátula se mantienen constante siendo 15 m/s y 0.5 mm respectivamente.

4.4.2.1. Interpretación de resultados

La altura de las gotas disminuye conforme aumenta la temperatura en todos los casos. La altura de las gotas, para una misma temperatura, decrece de la siguiente manera: Roja, Azul, Negra y Blanca. La cruda discrepa de este ordenamiento y a 50 °C es la de mayor altura, a 60 °C se coloca entre la Azul y Negra, para ser la de menor altura a 80 °C. También se infiere que, a mayor temperatura, menor variabilidad en la altura de las gotas.

El cambio en longitud de los trazos está relacionado también a la altura de las gotas. Para la mezcla Cruda y Negra, los trazos se hacen más largos conforme aumenta la temperatura, mientras que para la mezcla Blanca y Roja disminuye. Este último comportamiento se debe a que para temperaturas de 50 °C se tienen materiales sólidos que, como se dijo antes, arrastran y no fluyen. La mezcla Azul, aumenta de 50 a 60 °C, pero disminuye a 80 °C. A pesar de que la curva de viscosidad es menor para 80 °C, conforme disminuye la altura de las gotas, la espátula deforma menos material haciendo trazos de menor tamaño.

La Figura 4.17 y 4.18 son una muestra demostrativa de los trazos a tres temperaturas distintas para dos mezclas distintas. Analizando las imágenes a 50 °C, se identifica textura y trazos irregulares ya que se trabaja con una mezcla sólido-líquido y no un fluido. Con respecto a la mezcla Rojo, se aprecia la existencia de precipitados que alargan los trazos. También se tiene que a 80 °C los trazos son más uniformes. Una observación importante es que las gotas presentes al final de los trazos se puedan deber a hilos viscoelásticos generados por la espátula debido a la velocidad de arrastre.



Figura 4.17: Trazos experimentales para la mezcla Negro a una velocidad de 15 m/s, altura de espátula de 0.5 mm para: a) 50 °C, b) 60 °C, c) 80 °C.

4. RESULTADOS



Figura 4.18: Trazos experimentales para la mezcla Rojo a una velocidad de 15 m/s, altura de espátula de 0.5 mm para: a) 50 °C, b) 60 °C, c) 80 °C.

4.4.3. Serie 3: Concentración y cambio de forma

La serie 3 estudia el cambio de los trazos para distintas concentraciones de un mismo pigmento. La concentración del pigmento no modifica significativamente el comportamiento adelgazante del pigmento sino aumenta los valores de la curva, por lo que se espera que a mayores concentraciones se tengan trazos de menor longitud. Se decide trabajar esta serie con pigmento blanco únicamente, debido a que es fácil percibir distintas coloraciones en la mezcla según la concentración, propiedad importante que buscan los artistas. En la Figura 4.19 y 4.20 se observa la relación de la concentración de pigmento y la longitud y área de trazo. Como en las gráficas anteriores, se sustrae la longitud y área inicial.

4.4.3.1. Interpretación de resultados

Los resultados cumplen con la hipótesis planteada, a mayor concentración de pigmento, menor trazo debido a que la mezcla presenta una mayor viscosidad. Se hace notar que la encáustica cruda, aunque presenta menor viscosidad que todas las mezclas Blancas, no presenta los trazos de mayor longitud. La explicación a esto es que la altura de las gotas de encáustica cruda es menor a la altura de las blancas, haciendo que la espátula deforme una menor cantidad de material, teniendo así trazos de menor longitud. Con respecto al área, se observa que conforme aumenta la concentración de pigmento existe mayor variabilidad en los trazos. Esta variabili-

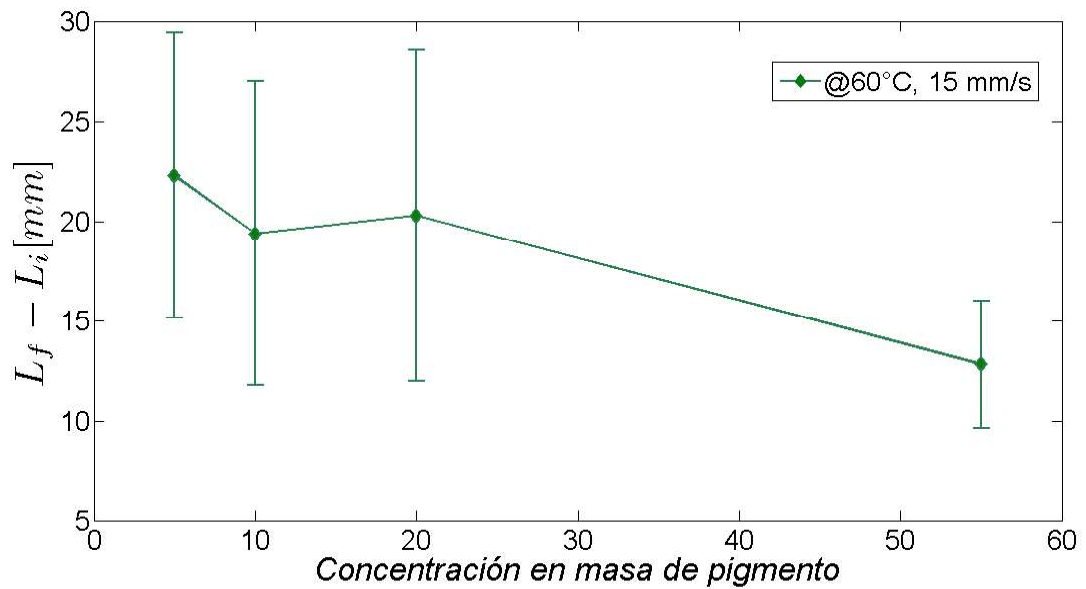


Figura 4.19: Cambio en longitud de trazo según concentración de pigmento blanco de zinc a 60°C, 15 m/s y 0.5 mm de altura de espátula.

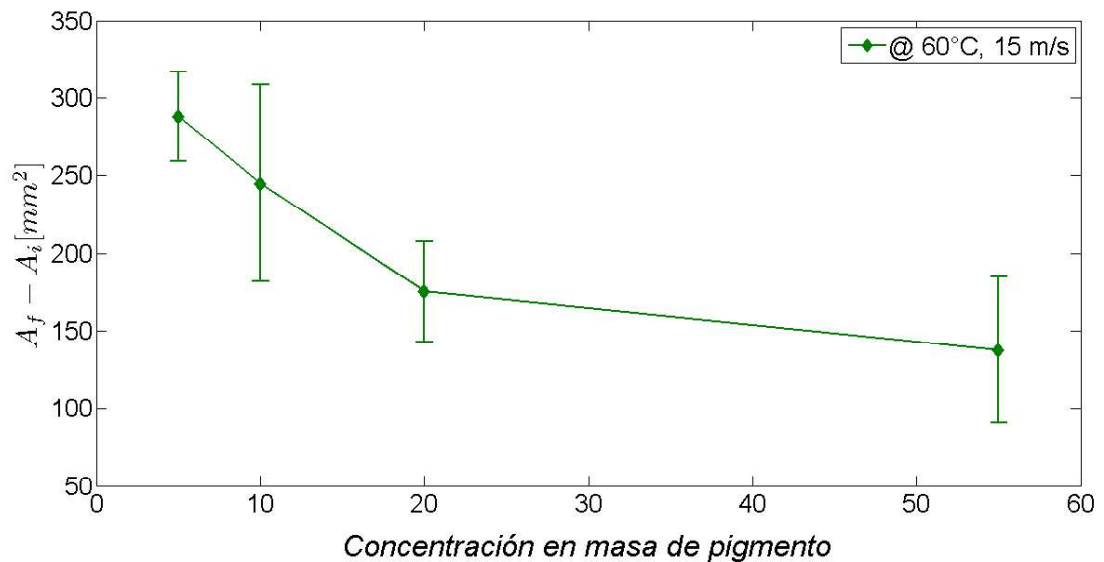


Figura 4.20: Cambio en área de trazo según concentración de pigmento blanco de zinc a 60°C, 15 m/s y 0.5 mm de altura de espátula.

4. RESULTADOS

dad se puede deber a precipitados presentes en la mezcla debido a la saturación por pigmento; es decir, los trazos no son completamente debido a flujo, sino a arrastre de pigmento. A pesar de la variabilidad, es posible identificar que el área de los trazos disminuye conforme aumenta la concentración de pigmento.

4.4.4. Serie 4: Altura de espátula y cambio de forma

La altura de corte es un factor influyente en la viscosidad. El propósito de la serie 4 es cuantificar la influencia de la altura de la espátula en el cambio de forma de la gota de encáustica. En la Figura 4.21 y 4.22 se observan los resultados obtenidos para una serie de alturas respecto al cambio de longitud y área del fenómeno de aplicación de la encáustica. La serie se trabaja exclusivamente con mezcla azul ya que no presenta precipitados que puedan quedar atrapados en la espátula a bajas alturas de la espátula.

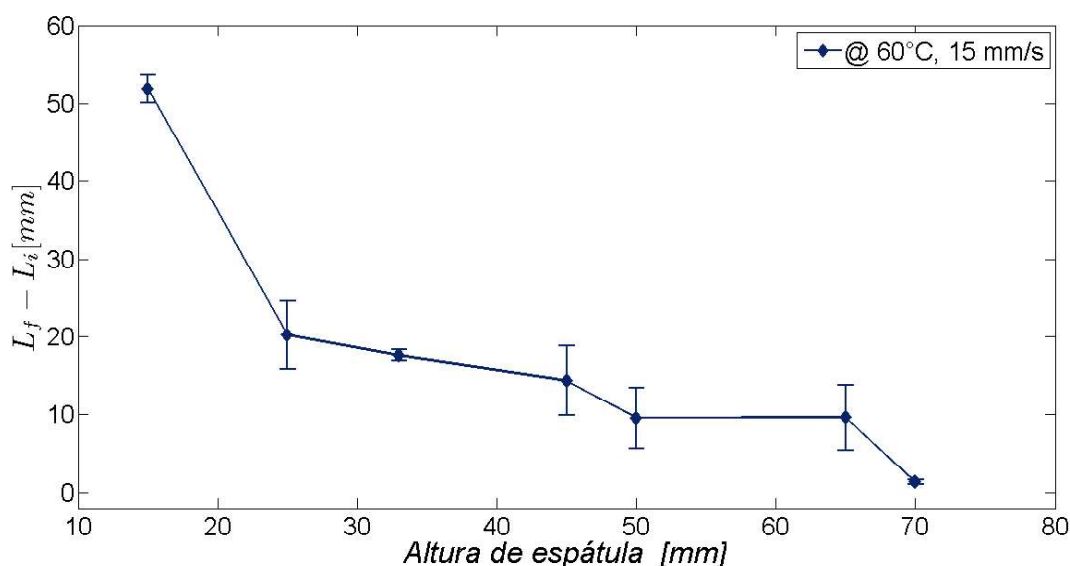


Figura 4.21: Cambio en longitud de trazo según altura de la espátula para mezcla Azul, a 60 °C y 15 m/s.

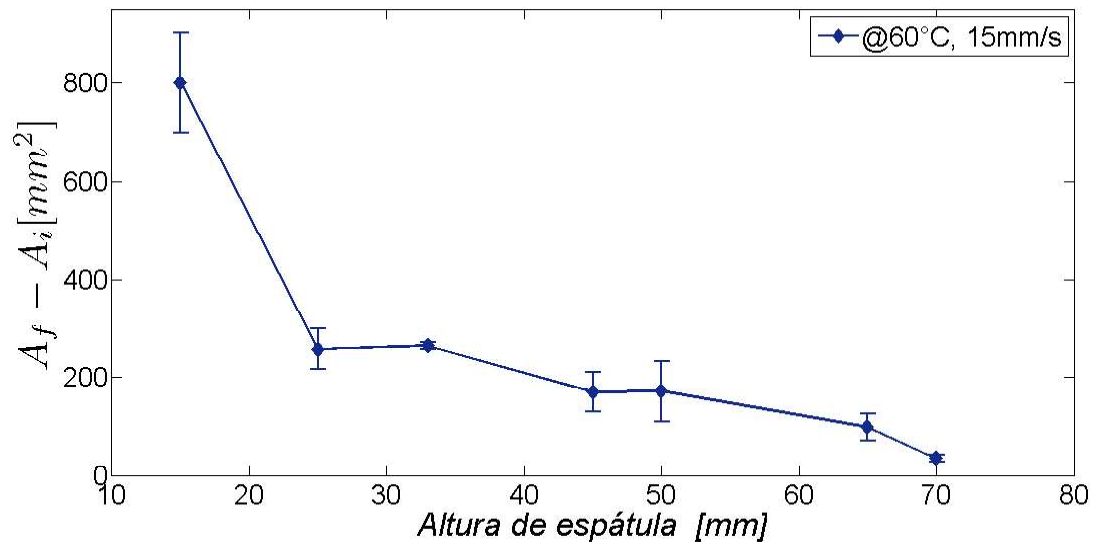


Figura 4.22: Cambio en área de trazo según altura de la espátula para mezcla Azul, a 60°C y 15m/s .

4.4.4.1. Interpretación de resultados

Conforme la altura de la espátula a menor altura respecto a la placa de aluminio, los trazos tienden a ser de mayor longitud y área. La razón de esto es que, para menores alturas de espátula se tiene una tasa de corte mayor y por ende menor viscosidad. Para la altura de la espátula ocurre lo contrario al efecto de la velocidad, ya que la altura afecta inversamente a la viscosidad, mientras que la velocidad la modifica de forma directa. La encáustica con pigmento azul ultramar presenta gotas con una altura promedio de 0.77 [mm] , conforme se aproxima a esta altura, las deformaciones se vuelven menores, esto indica que existe una relación entre la altura de la gota y la altura de la espátula que determina la longitud del trazo. Dado que la serie se hizo con una misma mezcla a una misma temperatura, la variabilidad de las mezclas es consistente para las distintas alturas. Esto puede indicar que para cada color existe una variabilidad única debido a la textura de los trazos, ya que los precipitados afectan el área y longitud de estos; ante una mayor cantidad de precipitados, mayor variabilidad experimental. Más investigación y datos deben ser recabados para confirmar esta hipótesis.

Adimensionalización del fenómeno

En este capítulo se busca encontrar relaciones entre los parámetros de la acción de pintar con encáustica, para generalizar el proceso a través de un análisis adimensional. Los resultados del experimento de barrido, presentados en el capítulo pasado, serán analizados de forma adimensional en el presente capítulo.

5.1. Análisis adimensional

Con base en la Figura 3.1, se conocen los parámetros involucrados en el fenómeno de aplicación de la encáustica. Haciendo uso del método de variables repetidas para conocer los números adimensionales involucrados en el fenómeno, se sabe que la longitud final de la gota depende de los siguientes parámetros:

$$L_f = f(H, \mu, \rho, U, L_o, h) \quad (5.1)$$

Para este caso, el volumen de la gota (V) es función de la longitud inicial y la altura de la gota. De igual forma, se sabe que el cambio de temperatura afecta la viscosidad (μ) y la densidad (ρ); sin embargo, no se consideran en el análisis porque se trabaja a una temperatura constante. Sucede lo mismo para el ángulo de la espátula, se trabaja con un ángulo constante de 45° . Analizando la función dimensión de cada parámetro, se sabe que se tienen seis variables y tres variables con dimensión independiente, haciendo un total de tres números adimensionales. Escogiendo a H , ρ y U como variables repetidas, resultan los siguientes números adimensionales:

$$\Pi = L_f/L_o \quad (5.2)$$

$$\Pi_1 = (U \cdot H \cdot \rho)/\mu \quad (5.3)$$

$$\Pi_2 = H/h \quad (5.4)$$

$$\Pi_3 = L_o/H \quad (5.5)$$

De igual manera, se hace lo mismo para el volumen (V) salvo que en este caso se considera como función del área inicial (A_o) teniéndose así el área como función de los siguientes parámetros:

$$A_f = f(H, \mu, \rho, U, A_o, h) \quad (5.6)$$

5. ADIMENSIONALIZACIÓN DEL FENÓMENO

Mezcla	Altura inicial [mm] a 50 °C	Altura inicial [mm] a 60 °C	Altura inicial [mm] a 80 °C
Cruda	1.96	0.53	0.50
Blanca	0.99	0.79	0.55
Azul	1.36	0.77	0.71
Rojo	1.50	0.83	0.65
Negro	1.49	0.98	0.52

Tabla 5.2: Altura promedio para las gotas de distintas mezclas de encáustica. El valor se supone correcto ya que para el promedio de alturas se considera una forma cilíndrica.

Los grupos adimensionales Π_1 y Π_2 se mantienen constantes, cambiando Π y Π_3 como se indica:

$$\Pi = A_f/A_o \quad (5.7)$$

$$\Pi_3 = A_o/h^2 \quad (5.8)$$

En la Tabla 5.1 se muestra el nombre dado a cada número adimensional y definición utilizado en el análisis del fenómeno de estudio.

Número adimensional	Definición
Factor de alargamiento	L_f/L_o
Reynolds	$(U \cdot H \cdot \rho)/\mu$
Factor de embarrado	H/h
Factor de forma	A_f/A_o

Tabla 5.1: Números adimensionales pertinentes al análisis de resultados del fenómeno de aplicación de encáustica.

Para hacer el cálculo de la viscosidad y poder así calcular el número de Reynolds, se utiliza la ley de potencia, siendo el cálculo del número de Reynolds como se muestra a continuación:

$$Re = \frac{U \cdot H \cdot \rho}{m \cdot \left(\frac{U}{H}\right)^{n-1}} = \frac{U^{2-n} \cdot H^n \cdot \rho}{m} \quad (5.9)$$

Para hacer el análisis dimensional de los resultados son necesarias las propiedades de la mezcla. La densidad de las mismas se puede encontrar en la Tabla 3.9 mientras que los índices de consistencia y comportamiento se pueden encontrar en la Tabla 4.2, 4.3 y 4.4.

Para analizar la existencia de una relación entre el número de Reynolds y los parámetros de cambio geométrico establecidos se grafican los resultados de forma adimensional.

5.2. Número de Reynolds

En el Capítulo anterior se establece que a mayor viscosidad se tienen menores trazos; sin embargo, ya que la viscosidad depende de la rapidez de corte ($\dot{\gamma} = U/H$), cada gota presenta

trazos únicos; sin embargo, el Capítulo anterior no mide el factor de cambio de longitud y forma y la existencia de alguna relación entre las curvas para las distintas mezclas. En la Figura 5.1 y 5.2 se observan las curvas de las distintas series que relacionan el factor de alargamiento y factor de forma con el número de Reynolds.

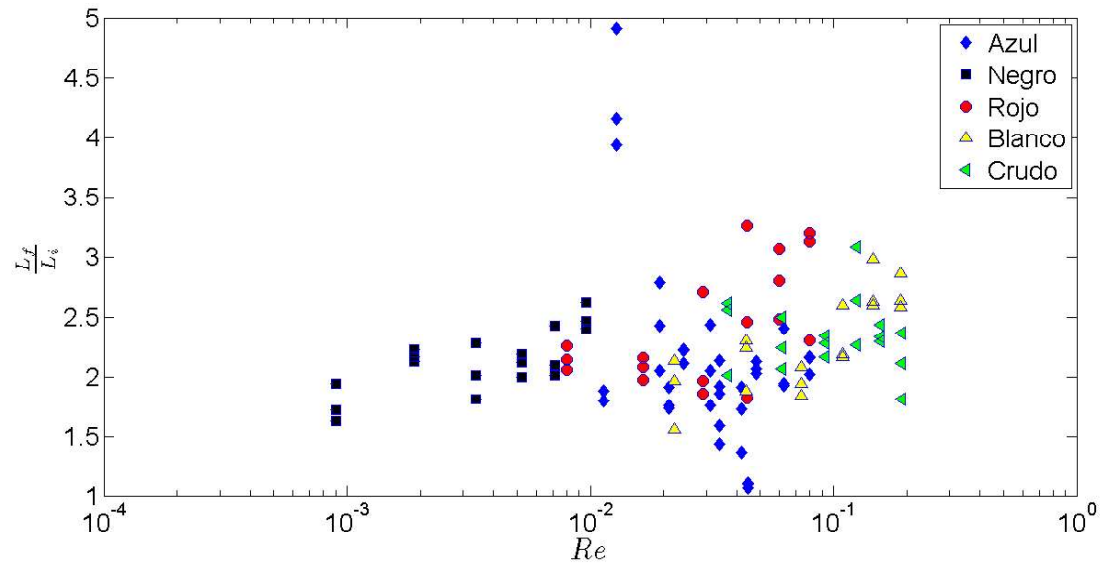


Figura 5.1: Relación adimensional entre el factor de alargamiento con el número de Reynolds para los resultados obtenidos.

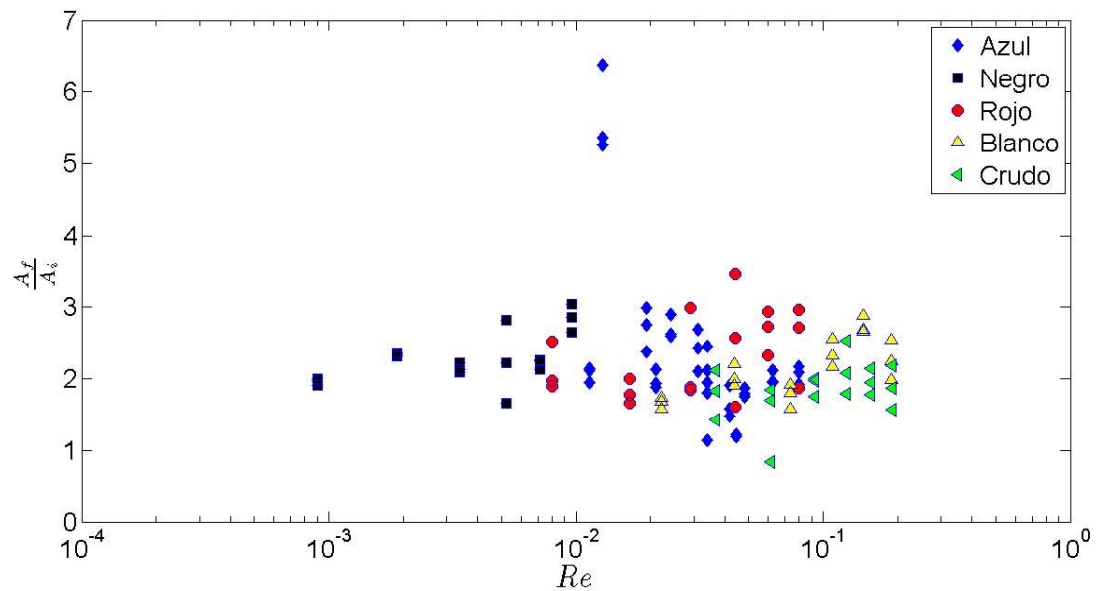


Figura 5.2: Relación adimensional entre el factor de alargamiento con el número de Reynolds para los resultados.

5.2.1. Interpretación de resultados

Aunque es necesaria una mayor muestra experimental para números de Reynolds de mayor magnitud, se aprecia en la Figura 5.1 y 5.2 que las mezclas colapsan en una región constante; los resultados del factor de forma y factor de alargamiento caen en una región entre 1.5 y 2.5 aproximadamente. Los resultados del factor de forma presentan una menor variabilidad, lo que significa que para analizar los trazos de encáustica es mejor utilizar la forma y no la longitud. Con más números de Reynolds, es posible que los datos colapsen en una región aún más acotada y con una experimentación con números de Reynolds de mayor tamaño, es posible que la región no sea constante sino que presente una determinada pendiente.

Analizando ambas gráficas, se observa que algunos trazos azules y rojos distan mucho de la tendencia. Con respecto a los trazos azules, los resultados de la serie 4, presentan errores cuando los trazos se hacen con una altura de espátula menor a 30mm o mayor a 50mm. Para el primer caso, el fenómeno se debe a que los precipitados quedan completamente atrapados entre la placa y la espátula, causando que el trazo no fluya, sino que arrastre, lo que no corresponde con el fenómeno de aplicación considerado en este trabajo. En el segundo caso, no existe suficiente deformación porque no se vence la viscosidad entonces el factor de alargamiento es prácticamente la unidad.

5.3. Factor de embarrado

Cada pigmento causa una altura de gota distinta. El factor de embarrado es una comparación entre la altura de la gota y la altura de la espátula. Entre mayor sea el factor de embarrado, menor es la altura de la gota. Se tiene la hipótesis que a mayor factor de embarrado se van a tener trazos más cortos para una misma velocidad, ya que la superficie libre es menor (superficie del casquete esférico por encima de la altura de la espátula) y se tiene una menor deformación. En la Figura 5.3 y 5.4 se pueden observar las gráficas que relacionan el factor de embarrado con el factor de alargamiento y el factor de forma

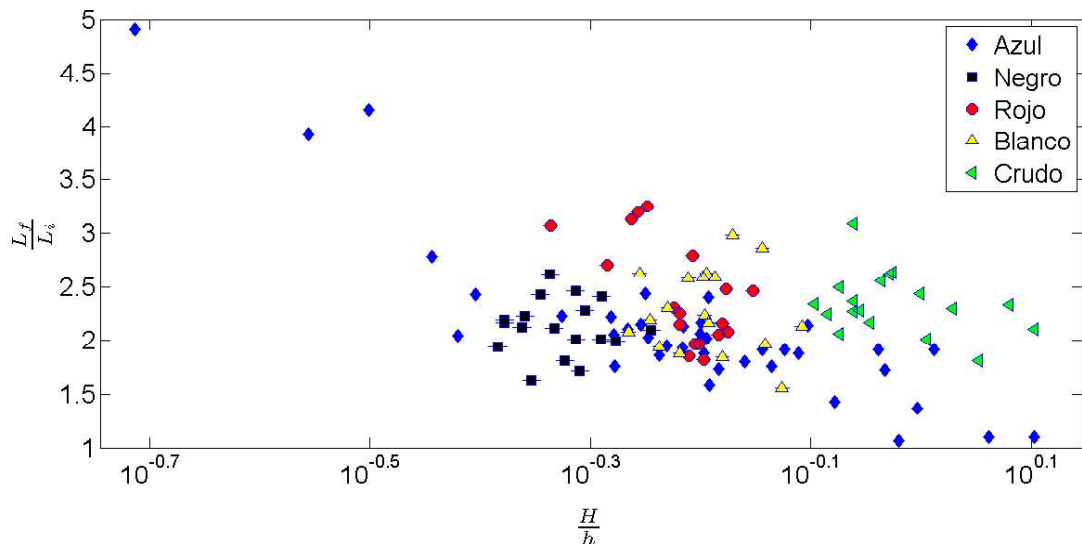


Figura 5.3: Relación adimensional entre el factor de alargamiento y el factor de embarrado. Es posible apreciar que cada tipo de pigmento presenta un factor de embarrado específico, aunque los resultados se empalman debido a similitud en la altura de gota

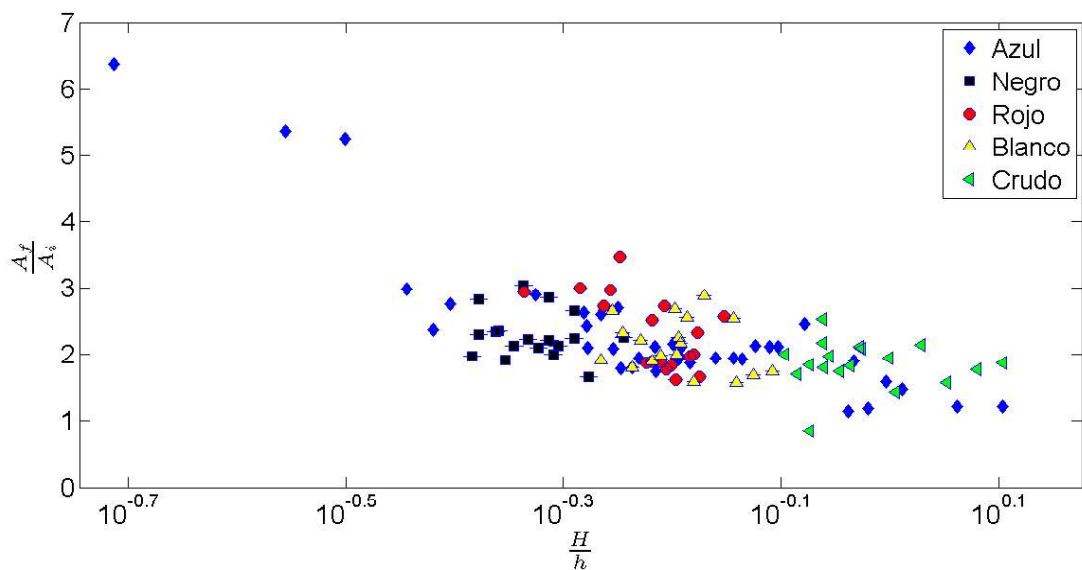


Figura 5.4: Relación adimensional entre el factor de forma y el factor de embarrado. La tendencia presenta una pendiente negativa, lo que indica que a menor factor de embarrado, mayor será el factor de forma.

5.3.1. Interpretación de resultados

Sucede lo mismo para el factor de embarrado que para el número de Reynolds cuando se relaciona con el factor de alargamiento, los resultados caen en una región constante. Se observa que los factores de embarrado se encuentran en un rango aproximado de tamaño igual a 0.1, lo cual tiene sentido, ya que para un mismo tipo de pigmento la gota debería presentar la misma altura; sin embargo, esto no sucede completamente debido a variabilidad experimental. Con una mayor experimentación, se deben obtener curvas verticales por color que nos permitan predecir el cambio de longitud o forma según los parámetros iniciales de altura de la gota, altura de la espátula y longitud inicial de la gota.

Nuevamente, es posible apreciar de mejor manera la tendencia presente en la Figura 5.4. Conforme disminuye el factor de embarrado, mayor área presentan los trazos para condiciones similares de aplicación. Si aumentamos el rango de velocidades o cambiamos la altura de la espátula para un mismo tipo de pigmento, se deberían presentar curvas verticales como se explicó para el caso del factor de alargamiento. Es posible identificar las secciones por color, aunque sigue presentándose la variabilidad experimental.

Conclusiones

La técnica de la encáustica presenta una gran dificultad debido a los materiales que se emplean para su uso ya que cada pigmento exige una condición distinta para obtener trazos similares. En el presente trabajo, se establecieron distintas variables que afectan el comportamiento de las mezclas de encáustica y que presentan un primer acercamiento a la explicación científica de la técnica. Diego Rivera fue capaz de dominar la complejidad de la técnica para aventurarse y usarla en un evento tan importante como el arranque del movimiento del Muralismo Mexicano.

El arreglo experimental utilizado fue exitoso ya que permitió controlar las variables involucradas en el fenómeno de aplicación. Con ayuda del dispositivo diseñado, se pudieron establecer 4 series de experimentos que llevaron a la obtención de resultados y a una generalización a través de un análisis adimensional. Las caracterizaciones realizadas fueron auxiliares para el entendimiento de los resultados del experimento de barrido y para la correcta elección de los parámetros de cada serie. La encáustica es un material cuyas propiedades térmicas no se ven afectadas por la adición de pigmentos, a diferencia de las propiedades reológicas. La encáustica presenta un comportamiento adelgazante que se ve modificado al adicionar pigmentos; es tan significativo el cambio que la viscosidad puede llegar a ser hasta 30 veces más alta y su curva adelgazante se ve modificada. Aunque no se sabe la razón de esto, es claro que la interacción química entre la encáustica y las partículas del pigmento y las interacciones físicas debido a la morfología de los polvos deben explicar el fenómeno. De hecho, es posible afirmar que la concentración de pigmento es relevante, ya que, a mayores concentraciones, se tiene mayor viscosidad y que la concentración no afecta el comportamiento adelgazante de las mezclas.

El instrumento que utilizan los artistas para pintar con encáustica es una espátula que se barre para generar los trazos deseados. La serie 1, analiza la velocidad de la espátula y la geometría de los trazos. Fue posible concluir que la velocidad modifica la tasa de corte y por ende la viscosidad de la mezcla, generando geometrías únicas en cada velocidad. Según la viscosidad de la mezcla, será la longitud de los trazos; entre más viscosa la mezcla, de menor longitud y tamaño el trazo. Sin embargo, se encontraron discrepancias en los resultados ya que el fluido más viscoso no se relacionaba con el trazo más corto, sino que estaban en desorden a pesar de la clara distinción entre viscosidades.

Sobre la serie 2, variación de la temperatura, fue claro que a mayores temperaturas se

6. CONCLUSIONES

tienen menor viscosidad, sin embargo, se presenta la misma discrepancia que en la serie 1 y no hay ordenamiento de longitud de trazos. Es cuando se decide analizar la altura de la gota y se descubre que cada color presenta una altura de gota distinta y para un mismo color se presentan alturas distintas según la temperatura.

La concentración de un mismo pigmento modifica la viscosidad de las mezclas, pero no de manera significativa como es la variación por distintos pigmentos, por lo que en la serie 3 se estudiaron los trazos según la variación de pigmento y los resultados fueron los esperados ya que la altura de la gota casi no varía según la concentración.

Pero para ser capaz de entender el efecto de la altura, se realizó la serie 4 variando la altura de la espátula con una sola mezcla para tener siempre la misma altura de gota. La hipótesis para esta serie se cumple y se establece que entre menor sea la altura de la espátula, mayores serán los trazos porque la tasa de corte aumenta.

El análisis adimensional brindó la herramienta final para entender la importancia de la altura de la gota. Se identificó que el cambio de longitud ($\frac{L_f}{L_i}$) y el cambio de área (A_f/A_i) se relacionan con dos parámetros adimensionales: el número de Reynolds y el factor de embarrado que representa la relación H/h .

Para el número de Reynolds, los resultados experimentales colapsan en una región específica, en la que, para un mismo número de Reynolds, sin importar el tipo de pigmento, el cambio de longitud y forma es constante, lo cual es de utilidad porque permite predecir la longitud o el área final si se conocen las condiciones iniciales del trazo.

El factor de forma se puede relacionar, de igual manera, con los factores de forma y alargamiento. Se propone que ante una mayor experimentación se tendrán curvas verticales por color, siendo que cada tipo de pigmento genera una gota con una altura específica. Con estas curvas es posible determinar una altura de espátula ideal por tipo de pigmento para generar trazos idénticos y cuyos resultados colapsen en una región específica al graficarlos.

El presente trabajo da una primera aproximación al estudio de la encáustica, describiéndose el fenómeno y proponiéndose razones sobre su complejidad. Las mezclas utilizadas son similares a aquellas usadas por Diego Rivera, con los resultados es posible entender porque la utilizó por última vez; la complejidad que la encáustica presenta para el pintor es el cambio de viscosidad según la temperatura, velocidad de corte y pigmento, creando así una sensación única de aplicación. La elección de la encáustica para la realización de un mural hace sentido por las propiedades que ofrecen los materiales ante las adversidades del tiempo y por las propiedades estéticas y ópticas que se pueden obtener. Sin embargo, la alta complejidad reológica y su necesidad de ser trabajado en caliente, impide que el proceso de pintar sea rápido y eficiente y dificulta la creación de trazos específicos y deseados.

Bibliografía

- [1] S. Omarini, *Encausto. Storia, Tecnica e Ricerche*. Italia: Nardini Editore, 2012. 1
- [2] S. Zetina, “Diego rivera’s revival of encaustic: The use of wax in mexican avangarde painting,” *Expression and Sensibility. Art Technological Sources at the Rise of Modernity*, 2018. 1, 4
- [3] S. Elizondo, *Prólogo: Sobre la Encáustica y el Fresco*. México: El Colegio Nacional, 1987. 2
- [4] Desconocido. (100-150 d.C.) Portrait of the boy eutyches. Colección, Museo Metropolitano de Arte de Nueva York. [Online]. Available: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/547951> 2
- [5] G. Murillo. (1931) La nube. Colección, Museo Nacional de Arte. [Online]. Available: <https://twitter.com/munalmx/status/708019661338578944> 3
- [6] R. Barquera, *La energía cósmica de la materia: la tecnología del atlcólor en la sombra del Popocatépetl del Dr. Atl*. México: Tesis de maestría en historia del arte, UNAM, 2016. 3
- [7] S. Zetina, “Atlcolors and encuastic: Dr. atl’s renovation of an ancient medium,” *FUTURAHMA: Materials and Techniques, from Futurism to Classicism (1910-1922). Research, Analysis, New Perspectives.*, 2017. 3
- [8] D. Rivera, *Sobre la Encáustica y el Fresco*. México: El Colegio Nacional, 1987. 3, 4, 28, 30
- [9] S. Zetina, *Pintura mural y vanguardia: La Creación de Diego Rivera*. México: Tesis de doctorado en historia del arte, UNAM, 2019. 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12
- [10] D. Rivera. (1922) La creación. [Online]. Available: http://www.sanildefonso.org.mx/mural_anfiteatro.php?iframe=true 7
- [11] Y. Nakayama and B. R., *Introduction to Fluid Mechanics*. US: Butterworth-Heinemann, 1999. 13

BIBLIOGRAFÍA

- [12] Z. Zotek-Tryznowski, "Rheology of printing inks," Publicado en: *Printing of Polymers*, 2016. 15, 16
- [13] N. Hall. (2015) Navier-stokes equations. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html> 15
- [14] H. Barnes, JH., and W. K, *An Introduction to Rheology*. US: Elsevier, 2001. 16, 17, 18
- [15] L. Landia, A. Akhiezer, and E. Lifshitz, "Chapter xv - viscosity," in *General Physics*. Oxford: Pergamon, 1967, pp. 341 – 366. 16
- [16] A. Björn. and P. Segura. (2012) Rheological characterization. [Online]. Available: http://cdn.intechopen.com/pdfs/31320/InTech-Rheological_characterization.pdf 17
- [17] P. Moczo *et al.* (2014) Rheological models of a continuum. [Online]. Available: <https://www.cambridge.org/core/books/finite-difference-modelling-of-earthquake-motions/rheological-models-of-a-continuum/AF791ED076E82267F7CAE0A4BE0AFE71> 18
- [18] A. Sonin. (2001) The physical basis of dimensional analysis. [Online]. Available: http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/DA_unified.pdf 19
- [19] S. Bogdanov, *Beeswax: Production, Properties, Composition, Control*. Bee Product Science, 2016. 19
- [20] M. Masae *et al.*, "Thermo-physical characterization of paraffin and beeswax on cotton fabric," *Thammasat International Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 4, 2014. 20, 22
- [21] A. Tulloch, "The composition of beeswax and other waxes," *Lipids*, vol. 5, no. 2, p. 247, 1970. 20
- [22] L. Yao and T. Wang, "Textural and physical properties of biorenewable "waxes"; containing partial acylglycerides," *Journal of the American Oil Chemists Society*, vol. 89, no. 1, 2012. 20
- [23] Kremer, "Copal resin," Hoja de Seguridad, 2019. 21
- [24] B. Museum of Fine Arts. (2006) Properties of natural resins. [Online]. Available: http://cameo.mfa.org/images/2/22/Download_file_106.pdf 21, 22
- [25] J. Langenheim, *Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany*. Timber Press, 2003. 21
- [26] G. Günduz, *Chemistry, materials and properties of surface coatings*. DEStech Publications, 2015. 21
- [27] C. Mantell, "The natural hard resins," *The New York Botanical Garden*, 1950. 22
- [28] M. Gundidza *et al.*, "Rheological, moisture and ash content analyses of a gum resin from *Commiphora africana*," *African Journal of Food Science*, vol. 5, no. 4, 2011. 22, 23

- [29] L. Hui. *et al.*, “Chemical composition of lavender essential oil and its antioxidant activity and inhibition against rhinitisrelated bacteria,” *African Journal of Microbiology Research*, vol. 4, no. 4, 2010. 23
- [30] IPCS. (2001) White spirit (stoddard solvent): Health and safety guide. [Online]. Available: <http://www.inchem.org/documents/hsg/hsg/hsg103.htm> 23
- [31] G. Pfaff, *Inorganic Pigment*. US: Walter de Gruyter GmbH and Co, 2017. 24
- [32] Kremer. (2018). [Online]. Available: <http://shop.kremerpigments.com/en/> 24
- [33] A. Wolosiak *et al.*, “The influence of type and concentration of inorganic pigmentos on the polyurethane adhesive properties and adhesion of laminates,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 90, 2019. 24, 25, 44
- [34] A. Kasgoz. *et al.*, “Rheological and electrical properties of carbon black and carbon fiber filled cyclic olefin copolymer composites,” *Composites: Part B*, vol. 62, 2014. 41