

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **ESTUDIO DE LA COMPATIBILIDAD DE SUSPENSIONES DE ESMALTE PORCELÁNICO CRUDO CON LA SUPERFICIE DE PIEZAS DE ACERO**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

**LILIAN MARISOL IBAZA TAMBI**

[lili\\_thetrioim@hotmail.com](mailto:lili_thetrioim@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. LUIS MERA**

[luis.mera@epn.edu.ec](mailto:luis.mera@epn.edu.ec)

**Quito, febrero 2013**

© Escuela Politécnica Nacional (2013)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Lilian Marisol Ibaza Tambi, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**Lilian Marisol Ibaza Tambi**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Lilian Marisol Ibaza Tambi, bajo mi supervisión.

---

Ing. Luis Mera

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

A

- Dios Por ser mi fortaleza, fuente de vida, esperanza y paciencia. Por guiarme siempre y proveerme de conocimiento y sabiduría ante las adversidades.
- Mi madre Por su amor y apoyo incondicional para sacar adelante a sus hijos tomando el papel de padre, madre y amiga. Mamita en realidad esto no es más que el resultado de todo tu esfuerzo y sacrificio abnegado.
- Mi hermano Santy por las travesuras, alegrías y bulla constante e incansable que me mantuvo despierta en las largas veladas de estudio.
- Mis amigos Gracias Xime S. por tus acertados consejos y amistad sincera. A mi comadre Angelita F. por la confianza, perseverancia y amistad desinteresada. A mis bomberitas Diana P., Cris C., Mary P., Alis D., Vero L., Eve Z. y Vero R., que de algún modo y en algún tiempo siempre estamos pendientes unas de otras. A mis amigos de la poli con quienes día a día fuimos forjando personalidad, conocimientos, alegrías e incluso tristezas: Dany B., Chio C., Pauly V., Magy C., Luis S., Ing. Anita A., Ing. Lucy M. y Señó Sonia A.
- Mi tutor Ing. Luis Mera por su acertada dirección, por compartir sus conocimientos y experiencia científica en un marco de confianza y amistad, fundamental para la culminación de este trabajo.

## DEDICATORIA

*Dios,*

*Mi madre Ede*

*Mi hermano Santy*

*Mi negra NINA*

*Quienes con su amor, paciencia y apoyo incondicional, me guían en el camino de la vida, brindándome felicidad y cariño. LOS AMO Y LOS AMARÉ. SON TODO EN MI VIDA.*

**Marisol I.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1 Aditivos utilizados en la preparación de suspensiones de esmalte porcelánico	1
1.1.1 Suspensión de esmalte porcelánico	1
1.1.2 Propiedades de las suspensiones de esmalte porcelánico	2
1.1.2.1 Homogeneidad	3
1.1.2.2 Estabilidad	3
1.1.2.3 Viscosidad	4
1.1.2.4 Adherencia	6
1.1.3 Aditivos	7
1.1.3.1 Clasificación de los aditivos según su función	8
1.1.3.2 Bentonita	13
1.1.3.3 Carboximetilcelulosa (CMC)	13
1.1.3.4 Cloruro de amonio	15
1.1.3.5 Tripolifosfato de sodio	16
1.2 Reología de suspensiones cerámicas	17
1.2.1 Reología	17
1.2.2 Viscosidad	18
1.2.2.1 Tipos de viscosidad	19
1.2.2.2 Variables que afectan a la viscosidad	20
1.2.3 Fluidos No Newtonianos	22
1.2.3.1 Fluidos independientes del tiempo	22
1.2.3.2 Fluidos dependientes del tiempo	25
1.2.4 Medida de la Viscosidad	26
1.2.4.1 Viscosímetros de orificio o viscosímetros de copa	26
1.2.4.2 Viscosímetros rotacionales	27
1.3 Técnicas industriales de aplicación de esmaltes	28
1.3.1 Por vía húmeda	28
1.3.1.1 Aplicación por inmersión	28
1.3.1.2 Aplicación a cortina	29
1.3.1.3 Aplicación mediante pulverización	30
1.3.2 Por vía seca	32
1.3.2.1 Aplicación de granillas	32
1.3.2.2 Aplicación electrostática	32
<b>2 PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>33</b>
2.1 Materiales y métodos	33
2.1.1 Preparación de las materias primas	33
2.2 Estudio de la influencia de la relación sólido-líquido en la estabilidad de las suspensiones de esmalte porcelánico	36
2.2.1 Preparación de las suspensiones con diferentes relaciones S/L	37

2.2.2	Determinación de la estabilidad de las suspensiones con diferentes relaciones S/L	38
2.3	Estudio del efecto del cloruro de amonio en la viscosidad de las suspensiones	40
2.3.1	Determinación de la viscosidad aparente de las suspensiones	40
2.3.2	Determinación del comportamiento reológico de las suspensiones	43
2.3.3	Determinación de la viscosidad cinemática de las suspensiones	44
2.4	Estudio del efecto de la carboximetilcelulosa en la adherencia del esmalte con la superficie de acero	46
2.4.1	Preparación de la superficie de las piezas de acero	46
2.4.2	Aplicación de la suspensión por aspersión	48
2.4.3	Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de acero	50
2.5	Evaluación de la captación de esmalte sobre piezas de acero	52
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>54</b>
3.1	Estudio de la influencia de la relación sólido – líquido en la estabilidad de las suspensiones de esmalte porcelánico	54
3.1.1	Estabilidad de la suspensión con relación S/L 45:55 (S1)	54
3.1.2	Estabilidad de la suspensión con relación S/L 51:49 (S2)	56
3.1.3	Estabilidad de la suspensión con relación S/L 53:47 (S3)	59
3.1.4	Estabilidad de la suspensión con relación S/L 55:45 (S4)	60
3.1.5	Determinación de la relación S/L para obtener una suspensión con estabilidad mayor que el 80 %	62
3.2	Estudio del efecto del cloruro de amonio en la viscosidad de las suspensiones	63
3.2.1	Viscosidad de las suspensiones con carboximetilcelulosa	63
3.2.2	Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad de las suspensiones con carboximetilcelulosa	65
3.2.2.1	Viscosidad en función de la velocidad de corte	65
3.2.2.2	Torque en función de la velocidad de corte	69
3.2.3	Efecto del tiempo sobre la viscosidad de las suspensiones con carboximetilcelulosa	71
3.2.3.1	Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 10 rpm	71
3.2.3.2	Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 100 rpm	74
3.2.4	Viscosidad de las suspensiones con cloruro de amonio	76
3.2.5	Efecto de la velocidad de corte en las suspensiones con cloruro de amonio	79
3.2.5.1	Viscosidad en función de la velocidad de corte	79
3.2.5.2	Torque en función de la velocidad de corte	82
3.2.6	Efecto del tiempo sobre la viscosidad de las suspensiones con cloruro de amonio	87
3.2.6.1	Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 10 rpm	87
3.2.6.2	Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 100 rpm	91

3.2.7	Influencia del cloruro de amonio en la viscosidad cinemática de las suspensiones	94
3.2.7.1	Viscosidad cinemática de las suspensiones SC1, SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D	94
3.2.7.2	Viscosidad cinemática de las suspensiones SC2, SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D	96
3.3	Estudio del efecto de la carboximetilcelulosa en la adherencia del esmalte con la superficie de acero	97
3.4	Evaluación de la captación del esmalte sobre piezas de acero	100
3.4.1	Captación de las suspensiones SC1, SC2-A y SC2-B	100
3.4.2	Espesor de las capas de esmalte SC1, SC2-A y SC2-B	101
3.4.3	Propiedades superficiales de las placas de acero cubiertas por los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B	102
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>105</b>
4.1	Conclusiones	105
4.2	Recomendaciones	107
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>113</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.1.</b>	Velocidad de deformación de diferentes procesos de conformado cerámico	20
<b>Tabla 2.1.</b>	Propiedades de la bentonita	35
<b>Tabla 2.2.</b>	Propiedades de la carboximetilcelulosa	35
<b>Tabla 2.3.</b>	Propiedades del cloruro de amonio	36
<b>Tabla 2.4.</b>	Propiedades del tripolifosfato de sodio	36
<b>Tabla 2.5.</b>	Rangos de viscosidad de trabajo del viscosímetro digital CANNON	42
<b>Tabla 3.1.</b>	Composición de las suspensiones preparadas	54
<b>Tabla 3.2.</b>	Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S1	55
<b>Tabla 3.3.</b>	Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S2	56
<b>Tabla 3.4.</b>	Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S3	59
<b>Tabla 3.5.</b>	Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S4	60
<b>Tabla 3.6.</b>	Composición de las suspensiones con carboximetilcelulosa, relación S/L 53:47	63
<b>Tabla 3.7.</b>	Viscosidad de las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4	64
<b>Tabla 3.8.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con la velocidad de corte	65
<b>Tabla 3.9.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4 con la velocidad de corte	67
<b>Tabla 3.10.</b>	Variación del torque de las suspensiones SC1 y SC2 con la velocidad de corte	69
<b>Tabla 3.11.</b>	Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC1 y SC2	70
<b>Tabla 3.12.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm	72
<b>Tabla 3.13.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm	74
<b>Tabla 3.14.</b>	Composición de las suspensiones con cloruro de amonio, relación S/L 53:47	76
<b>Tabla 3.15.</b>	Viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D	76
<b>Tabla 3.16.</b>	Viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D	78
<b>Tabla 3.17.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con la velocidad de corte	79

<b>Tabla 3.18.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con la velocidad de corte	81
<b>Tabla 3.19.</b>	Variación del torque de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con la velocidad de corte	82
<b>Tabla 3.20.</b>	Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D	84
<b>Tabla 3.21.</b>	Variación del torque de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con la velocidad de corte	85
<b>Tabla 3.22.</b>	Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D	86
<b>Tabla 3.23.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm	87
<b>Tabla 3.24.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm	89
<b>Tabla 3.25.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm	91
<b>Tabla 3.26.</b>	Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm	93
<b>Tabla 3.27.</b>	Efecto del cloruro de amonio en la viscosidad cinemática de la suspensión SC1	95
<b>Tabla 3.28.</b>	Efecto del cloruro de amonio en la viscosidad cinemática de la suspensión SC2	96
<b>Tabla 3.29.</b>	Efecto de la carboximetilcelulosa en la adherencia entre el esmalte y la superficie de acero	97
<b>Tabla 3.30.</b>	Placas de acero esmaltadas con las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4 sometidas al ensayo de adherencia	99
<b>Tabla 3.31.</b>	Captación de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B en función del número de aplicaciones	100
<b>Tabla 3.32.</b>	Espesor de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B en función del número de aplicaciones	102
<b>Tabla 3.33.</b>	Placas de acero cubiertas con cuatro capas con los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B	103
<b>Tabla AII.1.</b>	Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S1 con relación S/L 45:55	118
<b>Tabla AII.2.</b>	Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S2 con relación S/L 51:49	118
<b>Tabla AII.3.</b>	Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S3 con relación S/L 53:47	119

<b>Tabla AII.4.</b>	Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S4 con relación S/L 55:45	119
<b>Tabla AIII.1.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1 (0,05 % CMC)	120
<b>Tabla AIII.2.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2 (0,10 % CMC)	120
<b>Tabla AIII.3.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC3 (0,15 % CMC)	121
<b>Tabla AIII.4.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC4 (0,30 % CMC)	121
<b>Tabla AIII.5.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1 (0,05 % CMC)	122
<b>Tabla AIII.6.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2 (0,10 % CMC)	123
<b>Tabla AIV.1.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-A (0,05 % CMC; 0,1 % NH <sub>4</sub> Cl)	124
<b>Tabla AIV.2.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-B (0,05 % CMC; 0,2 % NH <sub>4</sub> Cl)	124
<b>Tabla AIV.3.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-C (0,05 % CMC; 0,3 % NH <sub>4</sub> Cl)	125
<b>Tabla AIV.4.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-D (0,05 % CMC; 0,5 % NH <sub>4</sub> Cl)	125
<b>Tabla AIV.5.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-A (0,10 % CMC; 0,1 % NH <sub>4</sub> Cl)	126
<b>Tabla AIV.6.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-B (0,10 % CMC; 0,2 % NH <sub>4</sub> Cl)	126
<b>Tabla AIV.7.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-C (0,10 % CMC; 0,3 % NH <sub>4</sub> Cl)	127
<b>Tabla AIV.8.</b>	Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-D (0,10 % CMC; 0,5 % NH <sub>4</sub> Cl)	127
<b>Tabla AIV.9.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-A (0,05 % CMC; 0,1 % NH <sub>4</sub> Cl)	128

<b>Tabla AIV.10.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-B (0,05 % CMC; 0,2 % NH <sub>4</sub> Cl)	129
<b>Tabla AIV.11.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-C (0,05 % CMC; 0,3 % NH <sub>4</sub> Cl)	130
<b>Tabla AIV.12.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-D (0,05 % CMC; 0,5 % NH <sub>4</sub> Cl)	131
<b>Tabla AIV.13.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-A (0,10 % CMC; 0,1 % NH <sub>4</sub> Cl)	132
<b>Tabla AIV.14.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-B (0,10 % CMC; 0,2 % NH <sub>4</sub> Cl)	133
<b>Tabla AIV.15.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-C (0,10 % CMC; 0,3 % NH <sub>4</sub> Cl)	134
<b>Tabla AIV.16.</b>	Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-D (0,10 % CMC; 0,5 % NH <sub>4</sub> Cl)	135
<b>Tabla AV.1.</b>	Datos registrados para la determinación de la influencia de la carboximetilcelulosa en la adherencia del esmalte con la superficie de acero	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla AVI.1.</b>	Datos registrados de pesos de esmalte captados en cada aplicación de las suspensiones SC1, SC2-A Y SC2-B	140
<b>Tabla AVI.2.</b>	Datos registrados de espesores del esmalte en cada aplicación de las suspensiones SC1, SC2-A Y SC2-B	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.1.</b>	Repulsión electrostática e impedimento estérico de los defloculantes	10
<b>Figura 1.2.</b>	Efecto asociativo de los dispersantes polipolares	11
<b>Figura 1.3.</b>	Estructura de la carboximetilcelulosa	13
<b>Figura 1.4.</b>	Diagrama de un fluido sometido a esfuerzo cortante	18
<b>Figura 1.5.</b>	Curvas de flujo de fluidos independientes del tiempo	24
<b>Figura 1.6.</b>	Curvas de viscosidad de fluidos independientes del tiempo	24
<b>Figura 1.7.</b>	Curvas de flujo de fluidos dependientes del tiempo	26
<b>Figura 1.8.</b>	Viscosímetro de copa Ford	27
<b>Figura 1.9.</b>	Esquema del viscosímetro con cilindros concéntricos	28
<b>Figura 1.10.</b>	Esmaltado a cortina mediante sistema campana	29
<b>Figura 1.11.</b>	Esmaltado a cortina mediante sistema vela	30
<b>Figura 1.12.</b>	Esmaltado mediante pulverización a disco	31
<b>Figura 2.1.</b>	Fotografía de la columna de sedimentación de vidrio	40
<b>Figura 2.2.</b>	Viscosímetro digital CANNON	42
<b>Figura 2.3.</b>	Fotografía del viscosímetro Saybolt	46
<b>Figura 2.4.</b>	Esquema de un soporte para esmaltado de placas de 3x3 cm	49
<b>Figura 2.5.</b>	Fotografía del compresor de aire marca TRUPER	50
<b>Figura 2.6.</b>	Fotografía del equipo para ensayo de adherencia	51
<b>Figura 2.7.</b>	Fotografía del soporte de madera para esmaltado de placas de 6x6 cm	52
<b>Figura 2.8.</b>	Micrómetro inglés digital de profundidad, marca CRAFTSMAN	53
<b>Figura 3.1.</b>	Curva de sedimentación de la suspensión S1 (S/L=45:55)	55
<b>Figura 3.2.</b>	Curva de sedimentación de la suspensión S2 (S/L=51:49)	57
<b>Figura 3.3.</b>	Comparación de las curva de sedimentación de las suspensión S1 y S2	58
<b>Figura 3.4.</b>	Curva de sedimentación de la suspensión S3 (S/L=53:47)	59
<b>Figura 3.5.</b>	Curva de sedimentación de la suspensión S4 (S/L=55:45)	61
<b>Figura 3.6.</b>	Estabilidad de las suspensiones en función de la relación sólido-líquido	62
<b>Figura 3.7.</b>	Curvas de viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2	66
<b>Figura 3.8.</b>	Curvas de viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4	68

<b>Figura 3.9.</b>	Curvas de flujo de las suspensiones SC1 y SC2	70
<b>Figura 3.10.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1 y SC2 a velocidad de corte de 10 rpm	73
<b>Figura 3.11.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1 y SC2 a velocidad de corte de 100 rpm	75
<b>Figura 3.12.</b>	Curvas de viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D	80
<b>Figura 3.13.</b>	Curvas de viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D	81
<b>Figura 3.14.</b>	Curvas de flujo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D	83
<b>Figura 3.15.</b>	Curvas de flujo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D	85
<b>Figura 3.16.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D a velocidad de corte 10 rpm	88
<b>Figura 3.17.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D a velocidad de corte 10 rpm	90
<b>Figura 3.18.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D a velocidad de corte 100 rpm	92
<b>Figura 3.19.</b>	Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D a velocidad de corte de 100 rpm	93

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b>	
Dosificación de las materias primas para la preparación de la suspensión de esmalte porcelánico	114
<b>ANEXO II</b>	
Determinación de la concentración de sólidos en las suspensiones a diferentes intervalos de tiempo	116
<b>ANEXO III</b>	
Propiedades reológicas de las suspensiones con carboximetilcelulosa	120
<b>ANEXO IV</b>	
Propiedades reológicas de las suspensiones con cloruro de amonio	124
<b>ANEXO V</b>	
Determinación de la adherencia entre el esmalte crudo y la superficie de acero	136
<b>ANEXO VI</b>	
Determinación de la captación y el espesor del esmalte sobre las piezas de acero	139

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad el estudio de la compatibilidad de suspensiones de esmalte porcelánico en crudo con la superficie de piezas de acero para su aplicación por aspersion.

Para ello se tomó como punto de partida la suspensión cuya composición es 3,0 % de bentonita y 0,5 % de tripolifosfato de sodio, se realizó el estudio de la estabilidad, adherencia, viscosidad y comportamiento reológico de las suspensiones porcelánicas ante la influencia de los aditivos carboximetilcelulosa y cloruro de amonio.

Se evaluó la estabilidad de la suspensión con diferentes relaciones sólido - líquido a través de ensayos de sedimentación y se determinó que la suspensión porcelánica con relación sólido-líquido 53:47 permite obtener una estabilidad mayor al 80 % en 5 h.

Se estudió el efecto del cloruro de amonio y de la carboximetilcelulosa en diferentes concentraciones sobre las propiedades reológicas de la suspensión mediante la viscosimetría rotacional y se concluyó que la suspensión porcelánica SC2-B con 0,1 % de carboximetilcelulosa y 0,2 % de cloruro de amonio presenta una viscosidad de 292 mPa·s, que su comportamiento es pseudoplástico e independiente del tiempo y por tanto, se considera adecuada para su aplicación por aspersion.

Se prepararon suspensiones con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa y se analizó su efecto sobre la adherencia entre el esmalte porcelánico en crudo y la superficie de acero, para lo cual se sometieron las placas esmaltadas a ensayos de fricción. De los resultados obtenidos se concluyó que a partir de 0,1 % de carboximetilcelulosa se obtiene una adherencia mayor que 70 %.

La captación de  $7,55 \text{ g/dm}^2$  y el espesor de capa igual a  $0,72 \text{ mm}$ , obtenidos a partir del esmalte citado permitieron determinar la necesidad de aplicar cuatro capas de esmalte para alcanzar superficies lisas, con recubrimiento total y sin presencia de fallas.

## INTRODUCCIÓN

Los esmaltes porcelánicos de primera capa en crudo son ampliamente utilizados en la industria de electrodomésticos, debido a que garantizan la adherencia con las piezas metálicas, sirven como recubrimiento para evitar la inmediata corrosión de las piezas, facilitan su manipulación y transporte previos a la aplicación del esmalte de segunda capa (Zambrano, 2006, p. 38).

Las suspensiones de esmalte porcelánico deben poseer adecuadas propiedades de homogeneidad, estabilidad, viscosidad y adherencia, debido a que influyen de manera directa en varias etapas de la producción y en el producto terminado. Por lo tanto, para adecuar dichas propiedades a las necesidades requeridas se utilizan diferentes aditivos (Calvo, 2010, p. 97).

En suspensiones de esmaltes porcelánicos de primera capa es común el uso de aditivos tales como: tripolifosfato de sodio debido a su efecto defloculante, bentonita ya que actúa como plastificante, carboximetilcelulosa como ligante y agente reológico, y cloruro de amonio para adecuar la viscosidad de la suspensión (Andreola, Pozzi y Romagnoli, 1999, p. 209; Vielhaber, 2002, p. 18).

En general, el método utilizado para la aplicación de los esmaltes porcelánicos en suspensión es mediante la técnica de aspersion, debido a que es un método versátil, permite esmaltar piezas de diferentes formas y tamaños y representa menores costos de producción en comparación con otros métodos desarrollados en la actualidad como son: aspersion electrostática, aspersion sin aire, entre otros (Dupont, 2010, sección Aspersion con aire párr. 13).

El método de aplicación por aspersion requiere que las suspensiones porcelánicas presenten propiedades reológicas adecuadas y constantes en el tiempo porque definen las condiciones de esmaltado. Por lo tanto, se deben ajustar para prevenir la aparición de fallas superficiales como burbujas, grumos y pinchados que deterioran la calidad del producto esmaltado (Espinoza, García y Acosta, 2006, p. 27).

Por lo expuesto, en el presente proyecto se buscó adecuar las propiedades de estabilidad, adherencia y viscosidad de las suspensiones de esmalte porcelánico para su aplicación por aspersion sobre piezas de acero.

# **1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## **1.1 ADITIVOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE SUSPENSIONES DE ESMALTE PORCELÁNICO**

La técnica de aplicación de esmalte sobre superficies metálicas mediante aspersion o inmersión, indica la necesidad de preparar una suspensión acuosa que se adhiera sobre la pieza tanto en el estado húmedo como en seco.

### **1.1.1 SUSPENSIÓN DE ESMALTE PORCELÁNICO**

Un esmalte porcelánico en suspensión tiene concentración de sólidos en el rango de 65 a 70 % en peso, constituido por material vítreo entre 90 y 98 %, el resto se completa con materiales arcillosos y otros aditivos (Andreola et al., 1999, p. 209).

Los esmaltes porcelánicos en suspensión son depositados sobre un soporte que puede ser cerámico, de vidrio o metálico, y son tratados térmicamente a elevadas temperaturas para obtener un recubrimiento vítreo o vitrocristalino (Gómez, Bou, Moreno, Cook y Galindo, 2009, p. 45).

Existen varios criterios para clasificar los esmaltes, entre los que se encuentran (Kirk y Othmer, 1962, p. 39).

- De acuerdo con la función que cumplen, existe un esmalte tipo capa base o en crudo. Se aplica directamente sobre el soporte y debe asegurar la adherencia con la superficie de acero, sobre éste, se aplica el esmalte de recubrimiento.
- Según la composición química, hay un esmalte aplúmbico, es decir, libre de óxido de plomo.
- Acorde con el método de aplicación, existe un esmalte para aplicación por vía húmeda mediante la técnica por aspersion.

Los esmaltes porcelánicos crudos son utilizados en la industria de electrodomésticos, especialmente en la cubierta de interiores de refrigeradores, hornos de cocinas y hornos microondas, interior de puertas, cubas de lavadoras y paneles de construcción (ArcelorMittal, 2008, p. 25).

Las numerosas ventajas al aplicar el esmalte porcelánico crudo en la industria de electrodomésticos se describen a continuación (Zambrano, 1996, p. 39):

- El esmalte capa base garantiza la adherencia con las piezas metálicas.
- Evita la corrosión inmediata de las superficies metálicas sometidas al proceso de limpieza mecánica, decapado y secado.
- Transfiere resistencia ante los ácidos y gases nocivos que abundan en la atmósfera de la industria, debido al proceso de decapado.
- Presentan resistencia a rayaduras y defectos de despostillado en aristas, radios o soldaduras externas, sufridas durante el proceso de manipulación, transporte y almacenamiento.
- Permite detectar y corregir defectos de despostillado, ampollas, burbujas o espesor inadecuado. Una vez detectados los problemas se puede retirar el esmalte y volver a recubrir las piezas, y así evitar problemas de rechazo.

### **1.1.2 PROPIEDADES DE LAS SUSPENSIONES DE ESMALTE PORCELÁNICO**

Una suspensión de esmalte porcelánico es un conjunto de partículas que interaccionan entre sí, el control de las fuerzas de interacción desarrolladas es indispensable para mejorar las propiedades y el comportamiento de la suspensión.

Una suspensión de esmalte porcelánico aceptable debe poseer las siguientes cualidades:

### 1.1.2.1 Homogeneidad

Con el fin de obtener suspensiones con mayor pureza y homogeneidad es necesario mejorar la calidad de las materias primas y controlar los parámetros fisicoquímicos en cada etapa del proceso. Otros factores que determinan la homogeneidad de las suspensiones son la forma y el tamaño de las partículas, las propiedades superficiales y las distintas fuerzas de interacción entre las partículas. Estos aspectos son los principales factores a tratar para reducir la presencia de defectos en las piezas esmaltadas (Moreno, 2005, p. 167).

### 1.1.2.2 Estabilidad

El mayor problema de una suspensión es mantener las partículas dispersas en el medio, debido a la tendencia a unirse y formar flóculos y aglomerados. Dicha tendencia se debe a fuerzas de atracción denominadas de London - Van Der Waals que se originan por la formación de dipolos instantáneos, entre las cargas electrónicas de las partículas en suspensión (Moreno, 2000, p. 603).

Las suspensiones floculadas presentan una alta velocidad de sedimentación por lo tanto, su estabilidad es baja. Para determinar la estabilidad de las partículas en suspensión, se deben conocer los factores físicos que afectan la velocidad de sedimentación como son: el tamaño de las partículas, la densidad y la viscosidad del medio de suspensión. (Arranz y Forner, 2007, sección Ley de Stokes, párr. 1).

Dichos factores se relacionan mediante la Ley de Stokes que se presenta en la ecuación 1.1

$$v = \frac{2r^2g(\rho_1 - \rho_2)}{9\eta} \quad [1.1]$$

Donde:

v: velocidad de sedimentación

r : radio de las partículas

g: gravedad

$\rho_1$ : densidad de la fase dispersa

$\rho_2$ : densidad del medio de dispersión

$\eta$ : viscosidad del medio

Es posible disminuir la velocidad de sedimentación si se varía el tamaño de partícula o la viscosidad del medio (Arranz y Forner, 2007, sección Ley de Stokes, párr. 1)

Otra forma de evitar la sedimentación de la suspensión es prevenir la floculación a través de sustancias como: tensoactivos, dispersantes o defloculantes y coloides protectores; Moreno, 2005, p. 160).

Dichos compuestos operan través de dos mecanismos: desarrollan fuerzas de repulsión electrostáticas que dominan a las fuerzas de atracción, o logran la estabilización polimérica con la ayuda de una molécula de elevado peso molecular (Moreno, 2005, p. 173).

### **1.1.2.3 Viscosidad**

La viscosidad es una de las propiedades que más condicionan el comportamiento de las suspensiones de esmalte porcelánico; debido al carácter no newtoniano que presentan estos fluidos, la viscosidad varía con la velocidad de deformación y con el esfuerzo cortante aplicado en cada instante (Gómez et al., 2009, p.45).

La viscosidad de la suspensión influye directamente en el diseño y la selección de equipos de bombeo para su transporte, almacenamiento y aplicación; por ello, deben presentar comportamiento pseudoplástico y viscosidad aparente por debajo de 2 000 mPa·s a velocidades de corte entre 10 y 100 rpm (Gutiérrez, Sánchez y Moreno, 2000, p. 105; Uniovi, 2006, p. 45).

En procesos de aplicación por vía húmeda, la viscosidad está relacionada con la aparición de defectos superficiales en el producto final tales como grumos, burbujas, huecos, grietas entre otros (Espinoza et al., 2006, p. 27).

Es común el uso de reguladores de la consistencia para modificar la viscosidad de la suspensión, entre los cuales se pueden mencionar el cloruro de amonio, carbonato de amonio, carbonato de sodio, aluminatos o ácido clorhídrico (Vielhaber, 2002, p. 18).

**Concentración de la fase dispersa:** si la viscosidad de la fase dispersa cambia con la presencia de aditivos o con la temperatura, entonces, varía también la suspensión también varía. Por ejemplo, se puede aumentar la viscosidad del agua a 20 °C a partir de las sales sódicas: 10,5 % de hidróxido, 21 % de fosfato y 19 % de cloruro. Del mismo modo, es posible disminuir la viscosidad del agua con la simple adición de sales de potasio y amonio a bajas concentraciones (García, 2008, p. 2).

**Fracción de sólidos:** se define como la relación entre el volumen de la fase dispersa y el volumen total de la dispersión, expresado en porcentaje o fracción. En ausencia de interacciones fisicoquímicas, se concluye que, mientras el sistema es más concentrado mayor es su viscosidad (Moreno, 2005, p. 247).

**Tamaño de partícula:** la viscosidad de suspensiones diluidas es independiente del tamaño de partícula hasta una fracción de sólidos de 0,4. En suspensiones concentradas, el tamaño de partícula es importante debido a las fuerzas hidrodinámicas y Brownianas, y de cuan rígidas o deformables son las partículas (Moreno, 2005, p. 248).

Estos parámetros se pueden relacionar a través del número adimensional de Peclet (Pe), el cual se define a través de la ecuación 1.2 (Moreno, 2005, p. 251)

$$Pe = \frac{\eta_c \cdot d^3}{k \cdot T} \quad [1.2]$$

Donde:

$\eta_c$ : viscosidad de la fase continua

$d$  : tamaño de partícula

$k$  : constante de Boltzman

$T$  : temperatura absoluta

**Forma de la partícula:** a medida que la partícula se desvía de la forma esférica la viscosidad de la suspensión aumenta (Moreno, 2005, p. 255).

**Distribución de tamaños de partícula:** las partículas más pequeñas se acomodan entre los intersticios de las más grandes, reduciéndose las interacciones y por ende la viscosidad. Si la cantidad de partículas grandes es mayor que las pequeñas entonces la viscosidad disminuye (Moreno, 2005, p. 254).

#### 1.1.2.4 Adherencia

Un factor importante que impide la compatibilidad esmalte-sustrato es la presencia de impurezas como grasas, aceites u óxidos. En estas condiciones la adherencia se reduce a la mitad; por tanto, antes de iniciar cualquier proceso de aplicación es indispensable someter a las piezas de acero a un proceso de desengrasado, limpieza mecánica y decapado para activar su superficie. (ArcelorMittal, 2008, p.16).

Existen cuatro teorías expuestas sobre la adherencia entre el esmalte y el sustrato, y éstas son:

**Teoría mecánica:** la adherencia se debe a la penetración de esmalte en las irregularidades de la superficie del sustrato. Cuanto mayor sea la rugosidad del sustrato mayor será la adherencia.

También se considera que al eliminar los contaminantes de la superficie se refuerzan los enlaces químicos entre el esmalte y el sustrato, y se incrementa la superficie de contacto del sustrato (Von y Boxall, 1976, p. 44).

**Teoría de adsorción:** se fundamenta en la existencia de fuerzas en la superficie debidas tanto a enlaces químicos como a fuerzas de atracción entre las moléculas, denominadas fuerzas de Van Der Waals, responsables del fenómeno de adherencia esmalte – soporte pero en menor proporción con las de tipo enlace. Por ello es necesario trabajar con una superficie metálica limpia y libre de impurezas (Von y Boxall, 1976, p. 45).

**Teoría electrostática:** la adherencia entre el recubrimiento y el soporte se da debido a fuerzas de atracción electrostáticas asociadas a cargas opuestas en las superficies de las partículas (Von y Boxall, 1976, p. 45).

**Teoría de difusión:** atribuye la adhesión a la difusión intermolecular entre capas, y se fundamenta en el concepto de solubilidad (Von y Boxall, 1976, p. 46).

### 1.1.3 ADITIVOS

Los aditivos son sustancias que añadidas en pequeñas cantidades tienen un efecto muy importante en las propiedades físicas y químicas del producto. La elección de cada uno de ellos tiene como objeto mejorar o modificar las propiedades de la suspensión, para lograr la estabilidad durante el almacenamiento, crear las condiciones adecuadas para el secado y aportar características concretas al esmalte antes y después de su aplicación (Calvo, 2010, p. 97).

Los factores a tener en cuenta al momento de introducir los aditivos son costo global que representa dentro de la formulación y el cumplimiento con requerimientos técnicos y estéticos del producto final así como durante el procesamiento.

Para la selección de los aditivos idóneos y su concentración óptima, no sólo requiere estimaciones teóricas sino también la confirmación experimental, porque puede existir interacción con los otros componentes que produzca sinergia o inhibición (Maestro, 2002, p. 53).

### **1.1.3.1 Clasificación de los aditivos según su función**

Los aditivos se suelen clasificar según su función específica. Los aditivos más frecuentes para suspensiones de esmalte porcelánico en crudo son:

#### **Espesantes, agentes reológicos y antisedimentantes**

La suspensión debe ser estable, de modo que durante el almacenamiento no sedimente y forme en los fondos una pasta difícil de homogeneizar. Debe poseer fluidez al momento de su aplicación, e inmediatamente presentar un comportamiento más viscoso para evitar el escurrimiento. Para transferir estas características es común el uso de aditivos con carácter espesante, antisedimentante que tienen un efecto directo sobre la viscosidad y la reología de la suspensión (Calvo, 2010, p. 111).

**Espesantes:** generalmente se usan espesantes celulósicos. Reaccionan con el agua formando puentes de hidrógeno lo cual incrementa la viscosidad y conforma un sistema newtoniano. Las más comunes en el mercado son la hidroxietilcelulosa, la carboximetilcelulosa y la metilcelulosa (Calvo, 2010, p. 113).

**Antisedimentantes y agentes reológicos:** son sustancias que en reposo forman una estructura estable, la que se destruye si se aplica una fuerza externa provocando la disminución de la viscosidad; cuando cesa dicha fuerza se forma nuevamente y ayuda a evitar la sedimentación.

Como ejemplo de este tipo de sustancias se tiene la bentonita, sus partículas forman una estructura denominada “castillo de naipes” a causa de fuerzas de repulsión electrostática y de Van der Waals (Calvo, 2010, p.115).

Si se observa sedimentación en el esmalte es conveniente incorporar entre 0,3 a 0,6 % del suspensivo “P”, 0,1 a 0,5 % de carboximetilcelulosa (CMC), 1,5 a 2,0 % de bentonita.

Estos aditivos transfieren al sistema un comportamiento tixotrópico y pseudoplástico en el caso de la CMC; sin embargo, no conviene exceder las proporciones sugeridas sobre todo de la CMC, dado que dará el efecto negativos como floculación o aumento excesivo de la viscosidad (Vicentiz, 2007, p. 10).

### **Agentes plastificantes**

Sus partículas cargadas superficialmente ejercen interacciones fuertes entre el medio acuoso y el material en suspensión reduciendo la movilidad del medio y consecuentemente la sedimentación. Dicho de otro modo dificultan la caída de las partículas por que existen en suspensión otras partículas que lo impiden (Andreola et al., 1999, p. 210).

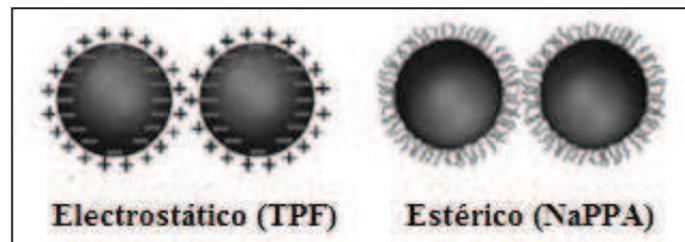
Los plastificantes también modifican las propiedades de flujo de los esmaltes, dan mayor elasticidad al recubrimiento. Se usan para facilitar el desplazamiento, la aplicación y el nivelado de la capa de esmalte sobre el soporte (Giudice y Pereyra, 2009, p. 22).

El uso de determinados plastificantes tiende a aumentar la viscosidad y, para conservarla, es necesario incrementar la cantidad de defloculante. Además, si se excede su concentración, cambia la densidad de la suspensión o puede variar el tiempo de secado. Existe gran variedad de plastificantes, entre los más utilizados se encuentran los aluminosilicatos naturales o sintéticos, arcillas blancas, caolines y bentonitas (Arranz y Forner, 2007, sección Utilización de plastificantes, párr. 2).

## Defloculantes

Son compuestos que evitan la sedimentación de la suspensión, operan con diferentes mecanismos en función del principio activo y de la naturaleza química, se adsorben sobre la superficie de las partículas y generan fuerzas de repulsión por impedimento estéricos, aumentan el potencial z por la adición de polielectrolitos dando origen a repulsiones electrostáticas, alteran el pH de la suspensión con el fin de incrementar la repulsión entre partículas y evitar la formación de cúmulos precursores de la sedimentación (Andreola et al., 1999, p. 212; Arranz y Forner, 2007, sección Ley de Stokes, párr. 5).

Entre los defloculantes más usados se tiene carbonato de calcio, el metasilicato de sodio, el tripolifosfato de sodio (TPF) y el poliacrilato de sodio (NaPPA), cuyos mecanismos de acción se observan en la Figura 1.1 (Andreola et al., 1999, p. 210).



**Figura 1.1.** Repulsión electrostática e impedimento estérico de los defloculantes  
(Gómez et al., 2009, p. 46)

## Ligantes

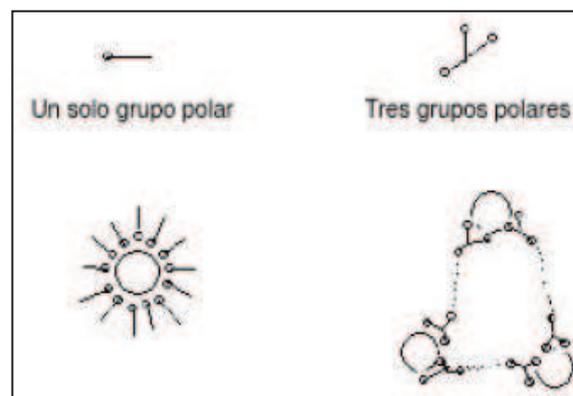
Son materiales formadores de películas, unen las partículas del esmalte al soporte metálico luego del proceso de secado. Junto con los materiales arcillosos, mejoran la plasticidad y la adhesión del esmalte evitando su desprendimiento durante la manipulación de las piezas esmaltadas (Giudice y Pereyra, 2009, p. 22).

Ejemplos de ligantes usados en el sector de los esmaltes son: la carboximetilcelulosa de gran pureza, dextrina, alginato, alcohol polivinílico,

polietilenglicol (Andreola et al., 1999, p. 210; Hellerstein, Bender, Hadley y Hohman, 1998, p. 84.16).

### Agentes dispersantes

Sirven para estabilizar el sistema y mantener las partículas de la suspensión separadas de modo permanente, son moléculas polares, preferentemente con dos o tres grupos polares, pueden ser lineales o ramificados. En los grupos polares libres se forman puentes de hidrógeno que crean una estructura que separa las partículas. El mecanismo de actuación es evitar la formación de agregados y conglomerados que se forman por la presencia de fuerzas de Van der Waals como se observa en la Figura 1.2 (Calvo, 2010, p. 101).



**Figura 1.2.** Efecto asociativo de los dispersantes polipolares  
(Calvo, 2010, p. 103)

Entre los dispersantes de bajo peso molecular se pueden mencionar el poliacrilato de sodio y el hexametáfosfato de sodio, cuya acción es cargar negativamente las partículas generando una repulsión electrostática entre ellas (Calvo, 2010, p. 102).

### Agentes humectantes

Son productos tensoactivos, es decir, que en su cadena tienen un extremo hidrofílico y otro hidrofóbico. Al añadir a la suspensión reducen la tensión superficial del líquido, humectan los sólidos por acción del líquido entre las

partículas, evacúan el aire ocluido y facilitan la dispersión de la suspensión. Como ejemplo, se pueden mencionar algunos ésteres fosfóricos y sales de ácidos carboxílicos (Calvo, 2010, p.102).

### **Reductores de dureza del agua**

Debido a que en las suspensiones el material dispersante es agua, la presencia de los cationes divalentes  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  producen la insolubilidad de los tensoactivos y con ellos la inestabilidad del sistema. Para evitar dicho problema se utiliza agua destilada. Sin embargo, en la industria esto no es económicamente viable, consecuentemente es recomendable el uso de polifosfatos como el hexametáfosfato sódico cuyo nombre comercial es Calgón N (Calvo, 2010, p. 98).

### **Bactericidas**

Los esmalte porcelánicos contienen diferentes aditivos espesantes, defloculantes o tensoactivos de carácter orgánico, es decir, son excelentes medios de cultivos para la proliferación de hongos y bacterias que con el tiempo causan la descomposición y alteración de la viscosidad de la suspensión. Para controlar dichos efectos es aconsejable añadir  $2 \text{ cm}^3$  de formol por litro de suspensión; sin embargo, debido a su toxicidad se lo ha sustituido por conservantes sintéticos derivados de la tiazolinona (Calvo, 2010, p. 121).

### **Otros aditivos**

El azúcar y el cloruro de sodio (sal común) también tienen propiedades suspensivas y adhesivas. La sal en concentración del 0,4 % acelera la pérdida de humedad superficial del esmalte, propiedad útil cuando se aplica varias capas sobre el soporte o en líneas automáticas de esmaltado (Vicentiz, 2007, p. 12).

A continuación se describen los aditivos utilizados en la presente investigación, y las propiedades que transfieren a la suspensión de esmalte porcelánico.

### 1.1.3.2 Bentonita

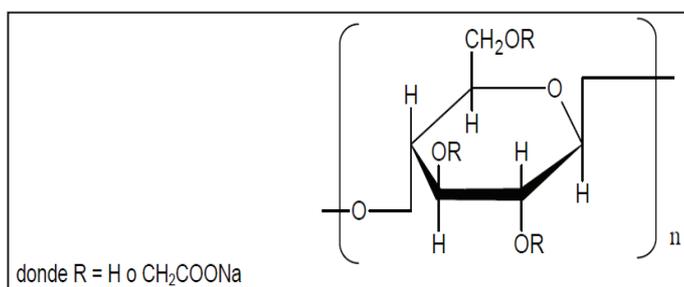
Es una variedad de arcilla coloidal, compuesta por minerales del grupo de las esmectitas, su fórmula teórica es  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 9H_2O$ . Son muy plásticas, tiene la propiedad de hincharse con el agua y aumentar su volumen cinco veces o más, su tamaño de partícula es muy fino (menor a  $2 \mu m$ ), lo cual permite su empleo en suspensiones con gran eficiencia (Vicentiz, 2007, p. 10).

### Funciones en la suspensión de esmalte porcelánico

La bentonita transfiere plasticidad y evita la sedimentación, es utilizada en pequeñas proporciones del 1 al 3 % (Andreola et al., 1999, p. 209; Sanches, 1997, p. 38).

### 1.1.3.3 Carboximetilcelulosa (CMC)

Es un polímero aniónico derivado de la celulosa, soluble en agua, principal éter de celulosa. Es producido industrialmente en grandes cantidades debido a sus propiedades tales como: carácter hidrofílico, alta viscosidad en soluciones diluidas, adhesivo, espesante, formador de películas, coloide protector y agente retenedor de agua (Barba, 2002, p. 319). Su estructura química se puede observar en la Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Estructura de la carboximetilcelulosa (Rowe, Sheskey y Quinn., 2009, p. 118)

## Propiedades de la carboximetilcelulosa

**Grado de sustitución (DS):** es el número promedio de grupos hidroxilo sustituidos por unidad de anhidroglucosa. Cada unidad tiene tres grupos hidroxilos disponibles para un DS máximo de tres. La función de actuar como espesante y controlador del comportamiento reológico depende del DS. Propiedades como estabilidad térmica, estabilidad coloidal y actividad superficial dependen de la naturaleza del sustituyente (Benyounes y Benmounah, 2012, p.1790).

**Solubilidad:** generalmente soluciones a DS bajo de 0,2, son insolubles en agua; a un DS de 0,5 presentan solubilidad parcial y con DS mayor o igual a 0,7 son completamente solubles. La CMC es considerada como un polielectrolito, una vez disueltas las moléculas de carboximetilcelulosa se separan en el catión  $\text{Na}^+$  y en el anión polimérico (Benyounes y Benmounah, 2012, p. 1794; Barba, 2002, p.51).

**Viscosidad:** esta propiedad es función del pH, su máximo valor se obtiene entre 7 y 9; bajo 4 la carboximetilcelulosa se transforma en ácido carboximetilcelulósico, el cual es insoluble y flocula dando viscosidades superiores, por encima de 10. La alcalinidad provoca una pequeña degradación de la CMC disminuyendo la viscosidad notablemente (Aqualon, 2008, p. 20).

La mayoría de soluciones de carboximetilcelulosa son pseudoplásticas, a menudo presentan comportamiento tixotrópico, soluciones con DS altos son menos tixotrópicas (Barba, 2002, p. 51).

**Compatibilidad:** la CMC es compatible con sales inorgánicas dependiendo de la capacidad del catión añadido para formar una sal soluble de carboximetilcelulosa. En general, cationes monovalentes interactúan con la carboximetilcelulosa y forman sales solubles, cationes divalentes no forman geles y disminuyen la viscosidad. Los cationes trivalentes forman precipitados insolubles. El efecto de las sales en la solución depende del tipo y concentración de la sal, del pH de la

solución, del grado de sustitución de la CMC, y de la forma como se pongan en contacto la sal y la CMC (Aqualon, 2008, p. 22).

### **Funciones en la suspensión de esmalte porcelánico**

Es un dispersante al interaccionar con las partículas en suspensión a través de estabilización estérica. Se utiliza como material ligante, aumenta la cohesión interna de la capa de esmalte y su unión al soporte, aumentando su resistencia mecánica y evitando problemas de retiro. Puede formar películas resistentes a muchos disolventes y a las grasas; sin embargo, es sensible al agua, lo cual se puede mitigar mediante su reticulación con el uso de cloruro de amonio, que actúa como catalizador (Espinoza et al., 2006, p. 27; Calvo, 2010, p. 115).

La adición de CMC a la suspensión determina que su comportamiento reológico sea altamente pseudoplástico y a concentraciones de 0,4 % sea ligeramente tixotrópico. La cantidad de CMC puede variar entre 0,1 y 0,5 % según las necesidades. A concentraciones menores que 0,1 % desarrolla una acción defloculante (Andreola et al., 1999, p. 112; Vicentiz, 2007, p.12).

#### **1.1.3.4 Cloruro de amonio**

Este compuesto, al disolverse en agua se disocia completamente para formar el catión  $\text{NH}_4^+$  y el ión  $\text{Cl}^-$ , como se muestra a continuación:



El ión  $\text{Cl}^-$ , por ser la base conjugada de un ácido fuerte, no tiene afinidad por el  $\text{H}^+$ , y no se hidroliza. En cambio, el ión  $\text{NH}_4^+$  es el ácido conjugado débil y se ioniza como sigue:



Esta ecuación indica que la solución tendrá exceso de iones hidroxilo; por lo tanto, su pH disminuye (menor que 7), es decir se produce una solución ácida (Chang y College, 2002, p. 630).

### **Funciones en la suspensión de esmalte porcelánico**

La fluidez del esmalte a ser aplicado por vía húmeda se regula a través de distintas sales, entre las cuales el cloruro de amonio es útil para esmaltes porcelánicos, con la ventaja de que se evapora sin dejar residuo después del proceso de cocción (Vielhaber, 2002, p. 18).

Este compuesto, conocido como “rompedor de estructura”, a bajas concentraciones es capaz de disminuir la viscosidad de las suspensiones mientras que a altas concentraciones ocurre el efecto contrario (García, 2008, p. 2).

#### **1.1.3.5 Tripolifosfato de sodio**

Es un polifosfato lineal, su estructura cristalina en polvo o gránulo es de color blanco y su fórmula química es  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ . Es altamente soluble en agua, al disolverse se desprenden los iones sodio y queda el anión tripolifosfato en solución, responsable de transferir al sistema diferentes propiedades y promoviendo su uso en múltiples aplicaciones (Tripoliven, 2009, p. 1).

### **Funciones en la suspensión de esmalte porcelánico**

En las suspensiones de esmaltes es recomendable su uso en cantidades menores que el 1 %. Regula los efectos de floculación y determina una mayor fluidez al disminuir la viscosidad sin variar la cantidad de sólidos. Además opera como dispersante y fluidificante al aumentar el potencial z. (Andreola et al., 1999, p. 212; Espinoza et al., 2006, p. 29).

## 1.2 REOLOGÍA DE SUSPENSIONES CERÁMICAS

La reología permite caracterizar las suspensiones de esmalte porcelánico, porque influye en el manejo, almacenamiento, aplicación del esmalte y en la obtención de recubrimientos uniformes. Por ello, es frecuente el uso de aditivos como defloculantes, ligantes y agentes de suspensión para adecuar su comportamiento (Moreno, 2005, p. 16).

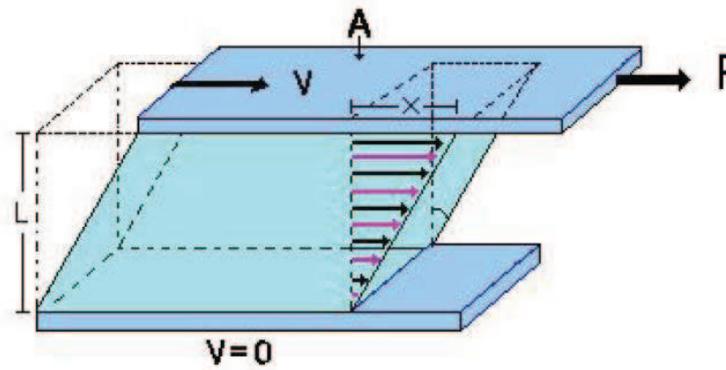
Cuando el esmalte se encuentra en reposo, la suspensión no debe sedimentar, el momento de su aplicación debe fluir y su viscosidad incrementar para evitar el escurrimiento y favorecer el nivelado; es decir, el esmalte debe presentar cierta tixotropía. Si la aplicación es por aspersion, se somete al esmalte a una velocidad de deformación máxima y su viscosidad debe ser mínima para evitar el uso de presiones altas. Por lo tanto, debe presentar cierta pseudoplasticidad (Maestro, 2002, p. 57).

### 1.2.1 REOLOGÍA

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia ante la influencia de una fuerza externa. Idealmente, la materia se puede clasificar en sólidos y fluidos (Moreno, 2005, p. 17).

Un fluido es toda sustancia capaz de fluir, se deforma de manera instantánea y continua al ser sometida a una fuerza o esfuerzo cortante. Sin importar cuán pequeño éste sea, el fluido seguirá deformándose mientras no cese el esfuerzo aplicado (Giles, 1994, p. 1).

Para describir el modelo de flujo de un fluido se considera una porción de fluido, ubicado entre dos placas planas paralelas suficientemente grandes separadas una distancia  $L$ . La placa superior se mueve a una velocidad constante  $V$  sometida a la acción de una fuerza  $F$ , de acuerdo con la Figura 1.4 (Ibarz y Barbosa, 2003, p. 53).



**Figura 1.4.** Diagrama de un fluido sometido a esfuerzo cortante  
(Méndez, Pérez y Paniagua, 2010, p. 238)

La fuerza  $F$  por unidad de área  $A$  que se requiere para que el fluido se mueva se denomina **esfuerzo cortante** ( $\tau$ ) y se define según la ecuación 1.5.

$$\tau = \frac{F}{A} ; \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = [\text{Pa}] \quad [1.5]$$

El esfuerzo cortante causa el desplazamiento del fluido obteniéndose variación de la velocidad de modo que en la placa superior la velocidad es máxima, y decrece hasta la placa inferior donde la velocidad es cero. Dicho gradiente de velocidad se denomina **velocidad de deformación** ( $\dot{\gamma}$ ) y se describe según la ecuación 1.6.

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dL} ; [\text{s}^{-1}] \quad [1.6]$$

## 1.2.2 VISCOSIDAD

La viscosidad es aquella propiedad que determina la resistencia que presenta un fluido a ser deformado por una fuerza cortante (Giles, 1994, p. 4).

Newton describe matemáticamente el comportamiento de un fluido ideal mediante la ecuación 1.7, la cual expresa que el esfuerzo cortante es proporcional a la velocidad de deformación y la constante de proporcionalidad,  $\mu$ , es la viscosidad.

En este sentido, se pueden distinguir dos tipos de fluidos, newtonianos y no newtonianos según cumplan o no con la Ley de Newton (Ibarz y Barbosa, 2003, p. 94).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad [1.7]$$

### 1.2.2.1 Tipos de viscosidad

#### Viscosidad aparente ( $\eta$ )

Se define como la razón entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ , como se muestra en la ecuación 1.8. Para fluidos no newtonianos su comportamiento es no lineal. La unidad en el SI es el [Pa·s]; sin embargo, es común expresarla en Poises [P] y su equivalencia es [1 mPa·s=1 cP] (Giles, 1994, p. 5).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} ; [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad [1.8]$$

#### Viscosidad absoluta o dinámica ( $\mu$ )

Representa la resistencia a fluir. En este caso la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es lineal como se muestra en la ecuación 1.9. Los fluidos que siguen esta relación se llaman fluidos newtonianos (Giles, 1994, p. 5).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} ; [\text{Pa}\cdot\text{s}] \cdot [\text{s}^{-1}] \quad [1.9]$$

#### Viscosidad cinemática ( $\nu$ )

Se define como la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido como se puede observar en la ecuación 1.10. En los manuales sus unidades vienen dadas en Stokes  $\left[ \text{St} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right]$  (Giles, 1994, p. 5).

$$v = \frac{\mu}{\rho} ; \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad [1.10]$$

### 1.2.2.2 Variables que afectan a la viscosidad

#### Efecto de la velocidad de deformación

Desde un punto de vista reológico, la velocidad de deformación afecta la viscosidad de un fluido, excepto si se trata de una sustancia newtoniana, para la cual existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante  $\tau$  aplicado y la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ , donde su viscosidad  $\mu$  es constante. Todo fluido que se desvíe de dicho comportamiento es un fluido no newtoniano, y entonces la viscosidad no es un coeficiente sino una función de la velocidad de deformación. Debido a que la mayor parte de fluidos son no newtonianos, es importante evaluar la velocidad de deformación a la que se someten en determinados procesos (Moreno, 2005, p. 36).

En la Tabla 1.1 se pueden observar valores típicos de velocidad de deformación para distintos procesos con suspensión cerámica.

**Tabla 1.1.** Velocidad de deformación de diferentes procesos de conformado cerámico

Proceso	Velocidad de deformación (s-1)
Atomizado, impresión, cepillado	103-104
Moldeo por inyección	102-104
Extrusión	102-103
Mezclado, agitación y bombeo	101-103
Colaje en cinta, inmersión	101 – 102
Moldeo por inyección a baja presión	101-102
Filtración	< 101

(Moreno, 2005, p. 36)

### **Efecto de la temperatura**

Para líquidos newtonianos, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura. Esto debido a que se incrementa la distancia entre las moléculas y disminuye la interacción entre ellas (Chhabra y Richardson, 1999, p. 263).

La variación de viscosidad con la temperatura se puede evaluar a través de la ecuación de Arrhenius, que se expresa a continuación:

$$\eta = A \cdot e^{-B/T} \quad [1.11]$$

Donde:

$\eta$ : viscosidad aparente

A, B: constantes del líquido

T: temperatura absoluta

En suspensiones cerámicas, el efecto de la temperatura es más importante pues también actúan otros fenómenos, como la posible evaporación de agua (lo cual varía la relación sólido – líquido), o variaciones en las fuerzas de interacción (Moreno, 2005, p. 37).

### **Efecto de la presión**

En general la viscosidad de los líquidos no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de presión; sin embargo, en procesos industriales que se realizan a alta presión, es importante considerar su efecto para saber las condiciones reales a las que está sometido el sistema. Por ejemplo, en el caso de la tecnología cerámica, el moldeo por inyección se realiza a una presión de 50 MPa (Moreno, 2005, p. 38).

### 1.2.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Son todos los fluidos que se alejan del comportamiento newtoniano, el esfuerzo cortante no es proporcional a la velocidad de deformación, la viscosidad varía con la velocidad de deformación aplicada (Chhabra y Richardson, 1999, p. 5).

El modelo generalmente utilizado para determinar su comportamiento es el de la Ley de Potencia o Modelo de Ostwald-de Waele, expresado según la ecuación 1.12.

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad [1.12]$$

Donde

$\tau$ : esfuerzo cortante (Pa)

$k$ : índice de consistencia ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-n}$ )

$\dot{\gamma}$ : viscosidad aparente ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

$n$ : índice de fluidez

Cuando  $n < 1$ , este modelo corresponde a fluidos pseudoplásticos. Si  $n > 1$  se refiere a fluidos dilatantes y  $n = 1$  se trata de fluidos newtonianos (Chhabra y Richardson, 1999, p. 10).

Los fluidos no newtonianos se pueden subdividir en fluidos independientes y dependientes del tiempo de aplicación del esfuerzo cortante.

#### 1.2.3.1 Fluidos independientes del tiempo

##### Fluidos pseudoplásticos

La viscosidad disminuye conforma incrementa la velocidad de deformación. A velocidades bajas presenta un comportamiento no newtoniano, mientras que a

velocidades de deformación altas las moléculas orientan su dirección de modo que el comportamiento mejora y se vuelve newtoniano. (Chhabra y Richardson, 1999, p. 6).

Este comportamiento es común en pinturas, soluciones poliméricas y suspensiones cerámicas; es útil en las diferentes etapas del proceso, debido a que en reposo presenta viscosidades altas previniendo la sedimentación, durante el bombeo, transporte por tuberías y aplicación, la viscosidad disminuye, facilitando el flujo (Giudice y Pereyra, 2009, p. 209; Moreno, 2005, p. 43).

### **Fluidos dilatantes**

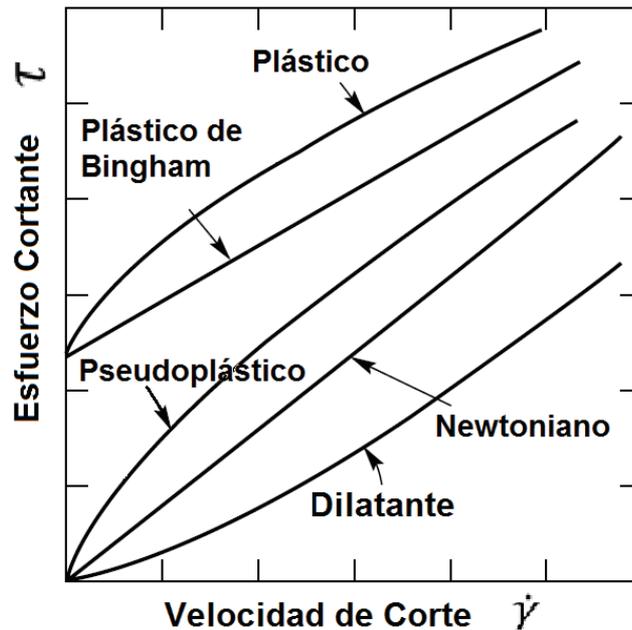
En estos fluidos la viscosidad aumenta con la velocidad de corte aplicada. Al aplicar el esfuerzo cortante se incrementa la distancia entre las partículas, y el fluido no es capaz de moverse a la misma velocidad que las partículas dándose el incremento de la viscosidad (Chhabra y Richardson, 1999, p. 14).

Ejemplo de este tipo de fluidos son las barbotinas, suspensiones concentradas empleadas en cerámica tradicional cuyo comportamiento se debe a las interacciones entre partículas en suspensión. Cuando se encuentra en reposo las fuerzas de interacción dominan la estructura de la suspensión, pero al incrementar la velocidad de deformación, las fuerzas viscosas aumentan hasta llegar a ser mayores que las fuerzas de repulsión (Maestro, 2002, p. 57).

### **Fluidos plásticos**

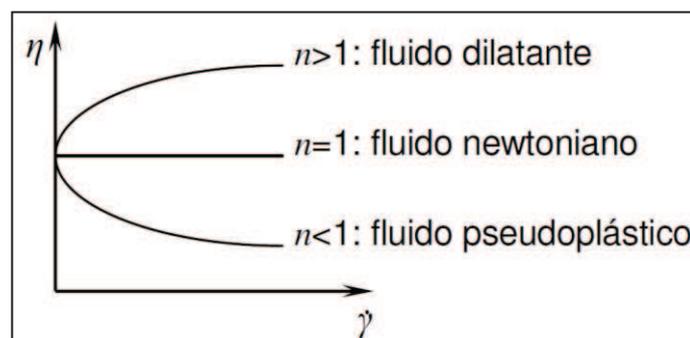
Este tipo de fluidos en un principio se comportan como sólidos y para que fluyan se aplica un esfuerzo cortante inicial  $\tau_o$  (esfuerzo umbral) y, a partir de este valor, fluyen y se comportan como fluidos newtonianos. Ejemplos típicos de este tipo de fluidos son pastas cerámicas, emulsiones, productos alimenticios como la mayonesa, la sangre y lodos de perforación (Moreno, 2005, p.75).

Gráficamente se puede representar el comportamiento reológico de los fluidos a partir de curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación, denominada Curvas de Flujo. En la Figura 1.5 se pueden observar las curvas de flujo típicas de los fluidos independientes del tiempo.



**Figura 1.5.** Curvas de flujo de fluidos independientes del tiempo  
(Chhabra y Richardson, 1999, p. 7)

También es posible representar gráficamente la viscosidad en función de la velocidad de deformación, dichas curvas se denominan Curvas de viscosidad. En la Figura 1.6 se muestran las curvas características de los fluidos independientes del tiempo.



**Figura 1.6.** Curvas de viscosidad de fluidos independientes del tiempo  
(Moreno, 2005, p. 40)

### 1.2.3.2 Fluidos dependientes del tiempo

#### Fluidos tixotrópicos

En estos fluidos la viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, luego de un reposo prolongado el fluido tiende a recuperar su viscosidad inicial (Chhabra y Richardson, 1999, p. 16).

En las suspensiones cerámicas, es preferido este comportamiento por su beneficio en varias etapas del proceso, ya sea durante el bombeo, la transferencia por circuitos y tuberías. Permite nivelar las películas adecuadamente y a su vez alcanzar elevados espesores sin escurrimiento (Giudice y Pereyra, 2009, p. 210).

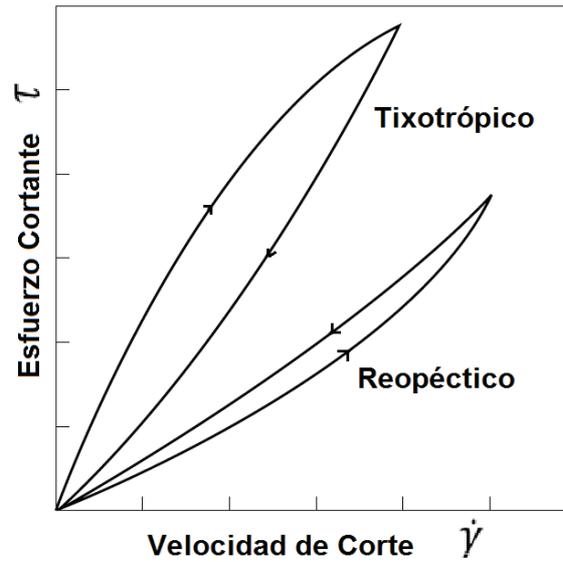
Experimentalmente es difícil diferenciar entre un fluido pseudoplástico y un tixotrópico ya que los efectos combinados de esfuerzo cortante y tiempo pueden superponerse durante una medida, considerando además que la mayoría de los fluidos tixotrópicos son pseudoplásticos (Moreno, 2005, p. 55).

#### Fluidos reopécticos

Poseen un comportamiento opuesto al tixotrópico, la viscosidad incrementa con el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante.

Es posible determinar la tixotropía o reopexia de un fluido de una manera sencilla: se incrementa la velocidad de corte hasta un valor máximo y luego se disminuye hasta el reposo, al obtener la curva de flujo del fluido se observa el fenómeno de histéresis que es diferente para cada fluido (Chhabra y Richardson, 1999, p. 16).

En la Figura 1.7 se pueden observar las curvas características de los fluidos dependientes del tiempo.



**Figura 1.7.** Curvas de flujo de fluidos dependientes del tiempo  
(Chhabra y Richardson, 1999, p. 17)

## 1.2.4 MEDIDA DE LA VISCOSIDAD

Los instrumentos ampliamente usados en la medida de la viscosidad son viscosímetros de orificio o viscosímetros de copa, y viscosímetros rotacionales (Moreno, 2005, p. 125).

### 1.2.4.1 Viscosímetros de orificio o viscosímetros de copa

Los viscosímetros de orificio poseen capilares muy cortos, incluso algunos se reducen a un simple orificio ubicado en el fondo de la copa. En estos instrumentos se carga el fluido a ensayar y se mide el tiempo que toma el material para fluir a través de un orificio de diámetro estandarizado. El tiempo resultante se reporta como la viscosidad del fluido en segundos. Desde el punto de vista reológico, la medición obtenida no está basada en la definición fundamental de viscosidad, los resultados obtenidos son de referencia y no se utilizan para fluidos no newtonianos. Ejemplo de estos equipos son los viscosímetros Engler, Saybolt o Redwood y la copa Ford, el modelo de éste último se puede observar en la Figura 1.8 (Moreno, 2005, p. 133).



**Figura 1.8.** Viscosímetro de copa Ford  
(Maincer, 2012)

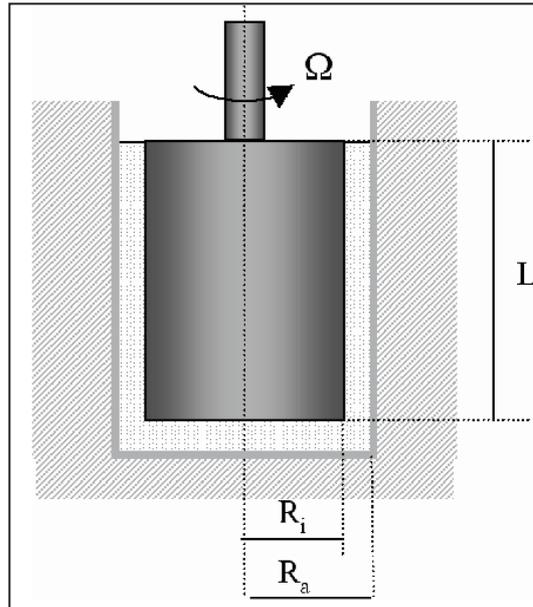
#### 1.2.4.2 Viscosímetros rotacionales

Los viscosímetros rotacionales son usados en la caracterización de fluidos no newtonianos. Utilizan el movimiento giratorio de un rotor para conseguir un flujo de cizalla simple.

Constan de dos partes entre las cuales se coloca el fluido de ensayo, dichas partes pueden entre los más utilizados se puede mencionar viscosímetro de cilindros concéntricos, cono y plato y el de placas paralelas (Chhabra y Richardson, 1999, p. 42).

##### **Viscosímetro con cilindros concéntricos**

Constan de dos cilindros concéntricos, un exterior fijo y otro interior que rota a velocidad angular  $\Omega$ , el fluido se coloca entre los cilindros. El movimiento de uno de los cilindros generara un perfil de velocidad del fluido situado en el espacio anular. Para determinar la viscosidad del fluido se mide el esfuerzo necesario para producir determinada velocidad angular. Se asume que el flujo es estacionario, isoterma y laminar (Moreno, 2005, p. 146). En la Figura 1.9 se muestra el sistema de cilindros concéntricos



**Figura 1.9.** Esquema del viscosímetro con cilindros concéntricos  
(Moreno, 2005, p. 147)

### 1.3 TÉCNICAS INDUSTRIALES DE APLICACIÓN DE ESMALTES

Las diferentes técnicas de esmaltado de mayor aplicación en el sector de los esmaltes porcelánicos se clasifican según sean por vía húmeda o por vía seca.

#### 1.3.1 POR VÍA HÚMEDA

##### 1.3.1.1 Aplicación por inmersión

Este método consiste en sumergir la pieza en la suspensión de esmalte hasta que estén completamente cubierta, luego de un tiempo determinado la pieza se extrae a velocidad constante, y se suspende, para escurrir el exceso de esmalte depositado hasta obtener capas uniformes. Esta técnica es útil en piezas con geometría irregular, tales como interiores de hornos (ArcelorMittal, 2008, p. 18).

### 1.3.1.2 Aplicación a cortina

Se aplica el esmalte bajo una cortina de esmalte generada, el espesor depende de la velocidad de paso de la pieza y de las propiedades de la cortina generada por el sistema (ITCCT, 2010, p. 80).

#### Sistema campana

El sistema se compone de un plato de acero inoxidable pulido, una tolva de burbujas para la alimentación del esmalte, una bandeja de recolección y postes de succión. La suspensión es transportada hasta un distribuidor vertical, el caudal baja por acción de la gravedad y se desliza sobre la campana por caída libre, formando una cortina continua (Hohemberger, 2002, p.55).

El inconveniente que presenta este método son las variaciones del caudal, puesto que afectan a la viscosidad y a la densidad del esmalte lo que genera defectos como presencia de burbujas, o depresiones en la superficie esmaltada. Las suspensiones a ser aplicadas deben poseer alto contenido de sólidos, alta viscosidad, estar defloculadas y presentar tixotropía (ITCCT, 2010, p. 80).

En la Figura 1.10 se muestra el sistema de aplicación por cortina tipo campana.



**Figura 1.10.** Esmaltado a cortina mediante sistema campana (ITCCT, 2010, p. 80)

## Sistema vela

En este método, la cortina de esmalte se genera por la presión aplicada con una bomba volumétrica lo cual permite regular el caudal y obtener acabados superficiales de buena calidad, eliminando “olas”, defecto típico en el sistema campana. La desventaja, es un sistema costoso (ITCCT, 2010, p. 80).

En la Figura 1.11 se observa el sistema de esmaltado a cortina tipo vela.



**Figura 1.11.** Esmaltado a cortina mediante sistema vela  
(ITCCT, 2010, p. 81)

### 1.3.1.3 Aplicación mediante pulverización

#### Pulverización con disco

El esmalte se aplica por centrifugación mediante un juego de discos de diferente diámetro que giran a velocidades variables. Los discos giran por la inyección coaxial de la suspensión y la impulsan hacia la periferia liberando pequeñas gotas de esmalte. Las suspensiones a ser aplicadas por este método no deben presentar grumos para evitar obstrucciones, deben tener bajo contenido de sólidos, bajas viscosidades y un comportamiento pseudoplástico (Hohemberger, 2002, p. 51; ITCCT, 2010, p. 81).

En la Figura 1.12 se muestra el sistema de pulverización a disco.



**Figura 1.12.** Esmaltado mediante pulverización a disco  
(ITCCT, 2010, p. 82)

### **Pulverización con aire**

También conocida como aplicación por aspersion, consiste en atomizar o formar pequeñas gotas de esmalte mediante aire comprimido con presión entre 3 y 4,5 bar y proyectar la niebla resultante sobre las piezas a recubrir.

El sistema consta de una pistola de aspersion, compresores de aire y generalmente se realiza dentro de una cabina. La distancia entre la pistola y la superficie debe oscilar entre 15 y 29 cm, la aplicación debe ser siempre perpendicular (ArcelorMittal, 2008, p. 18).

Es un método versátil, y permite esmaltar piezas de diferentes formas, tamaños y reducir los costos de producción. Se pueden aplicar esmaltes con densidad alta y diferentes viscosidades, sin embargo, presenta altas pérdidas de esmalte, de 25 a 35 % (Dupont, 2010, sección Aspersion con aire párr. 13).

### **Pulverización sin aire “airless”**

Este método utiliza una bomba de alta presión para impulsar el esmalte a través de un orificio a muy alta presión. El sistema consta de un nebulizador air-less, una

bomba tipo volumétrico continuo para generar una presión de 5 a 30 bar, dirigido por un variador de velocidad electrónico. Las ventajas con respecto a la aplicación con aire son: aplicación más rápida, menos pérdida del material, entre 5 y 15 %, menos problemas de formación de gotas o grumos y permite aplicar capas finas y extendidas (Dupon, 2010).

### **Pulverización electrostática**

En este proceso se aplica una diferencia de potencial entre el esmalte, cargado negativamente, y la pieza a esmaltar cargada positivamente. El esmalte es atomizado con aire y las gotas formadas atraviesan un campo eléctrico cargándose negativamente. Inicialmente las capas se forman por atracción entre el esmalte y la pieza hasta alcanzar un equilibrio, luego surge una fuerza de repulsión que sirve para regular el espesor del esmalte.

La fuerte atracción electrostática es beneficiosa para reducir las pérdidas del producto. Esta técnica es útil en el esmaltado de artículos de estructura complicada (ArcelorMittal, 2008, p.18).

## **1.3.2 POR VÍA SECA**

### **1.3.2.1 Aplicación de granillas**

En este método se aplica el esmalte en estado granular, en el mercado se ofrecen tres rangos de tamaño: 0,1-0,3 mm, 0,2-0,6 mm y 0,2-1,2 mm. Los gránulos caen desde una tolva a una cortina homogénea sobre un rodillo que adhiere uniformemente las granillas a las piezas (Hohemberger, 2002, p. 57).

### **1.3.2.2 Aplicación electrostática**

Es una técnica en vía de desarrollo cuya ventaja primordial es la eliminación total del agua en el proceso de esmaltado. El principio de aplicación es idéntico al

proceso en húmedo. Las partículas de esmalte cargadas negativamente se depositan sobre la pieza cargada positivamente. Sin embargo este procedimiento presenta algunos inconvenientes tales como: los tamaños de partícula debe ser extremadamente finos, y se requiere aditivos para lograr que los materiales presenten conductividades muy bajas (ArcelorMittal, 2008, p.19; Hohemberger, 2002, p. 57).

## **2 PARTE EXPERIMENTAL**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo obtener una suspensión de esmalte porcelánico crudo con una estabilidad mayor que el 80 % en alrededor de 5 h, con adherencia y viscosidad adecuada para su aplicación por aspersion sobre piezas de acero.

### **2.1 MATERIALES Y MÉTODOS**

Las suspensiones preparadas y estudiadas están formadas por los siguientes componentes:

- Vidrio de desecho
- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 %, LUBON
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Agua

#### **2.1.1 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS**

##### **Objetivo**

Obtener materias primas con tamaño de partícula malla ASTM 200.

### **Equipos**

- Balanza, OHAUS, 2610 g, 0,5 g
- Estufa, MEMMERT, 200 ° C
- Horno, BLUE M, 1000 °C
- Tamizador Vibratorio, RETSH

### **Materiales**

- Cámara del molino de bolas, 1 L
- Elementos de molienda: bolas de alúmina
- Rodillos Giratorios, NORTON, velocidad de giro 1 772 rpm
- Tamiz malla A.S.T.M. # 200

### **Procedimiento**

#### **a) Preparación del vidrio**

- Se recolectaron botellas de vidrio incoloro y transparente, utilizadas para envasar líquidos.
- Se lavaron con agua y detergente y se retiraron las etiquetas.
- Se trituraron mediante choque térmico, para ello se las calentó en el horno hasta una temperatura máxima de 500 °C durante 15 min y luego se las sometió a enfriamiento brusco con agua a temperatura ambiente.
- Se molió el vidrio triturado a una velocidad de giro de 1772 rpm durante 2 h bajo las siguientes condiciones: se pesaron 250 g de vidrio y 1000 g de bolas de alúmina, se añadieron 500 mL de agua y se colocaron en el molino de bolas.
- La mezcla agua y vidrio molido se colocó en un recipiente y se llevó a la estufa a 110 °C durante 24 h para evaporar el agua.

- Se tamizó la muestra a través de la malla A.S.T.M # 200. Los productos gruesos regresaron al proceso de molienda.

### b) Preparación de la bentonita

La bentonita proporcionada por la Compañía BAKER HUGHES se tamizó a través de malla ASTM 200, en la Tabla 2.1 se muestran sus características.

**Tabla 2.1.** Propiedades de la bentonita

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Sílice cristalina, cuarzo	< 6,0 %
Densidad aparente a 20 °C	2 700,0 kg/m <sup>3</sup>
pH al 10 %	9,5

### c) Preparación de la carboximetilcelulosa

La carboximetilcelulosa marca AMTEX se la tamizó a través de malla ASTM 200. Las características de la carboximetilcelulosa se reportan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Propiedades de la carboximetilcelulosa

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Pureza	99,9 %
Grado de sustitución (D.S)	0,86
Humedad	5,4 %
pH al 1 %, 25 °C	8,5

### d) Preparación del cloruro de amonio

No tuvo una preparación previa; sin embargo, para cada suspensión se disolvió la cantidad requerida de cloruro de amonio en 10 mL de agua para obtener una mezcla completamente homogénea. Las características del cloruro de amonio se reportan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Propiedades del cloruro de amonio

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
NH <sub>4</sub> Cl	≥ 99,5 %
Densidad	600 – 900 kg/m <sup>3</sup>
Humedad	0,5 %
pH (200 g/L, 25 °C)	4,0 - 5,8

### **e) Preparación del tripolifosfato de sodio**

Se tamizó a través de malla ASTM 200 a 60 rpm durante 10 min. Las características tripolifosfato de sodio procedente de la casa comercial TIANYUAN GROUP se muestran en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Propiedades del tripolifosfato de sodio

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	94,2 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	57,2 %
Densidad	800 – 900 kg/m <sup>3</sup>
Pureza	94,0 %
Humedad	5,4 %
pH al 1 %, 25 °C	9,5-9,6

## **2.2 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO EN LA ESTABILIDAD DE LAS SUSPENSIONES DE ESMALTE PORCELÁNICO**

Se realizaron pruebas previas de la estabilidad de la suspensión con la formulación de partida: 3 % de bentonita, 0,5 % de tripolifosfato de sodio y 96,5 % de vidrio con la relación sólido - líquido (S/L) 45/55, a esta suspensión se le asignó la denominación o el nombre S1. El tiempo de estabilidad determinado fue muy bajo por lo que se añadió a la formulación 0,1 % de carboximetilcelulosa,

valor recomendado para evitar fenómenos de sedimentación debido a la acción defloculante de la carboximetilcelulosa (Andreola et al., 1999, p. 212).

Se prepararon las suspensiones S2 con relación S/L 51/49 (1,04/1), S3 con relación S/L 53/47 (1.13/1) y S4 con relación S/L 55/45 (1,22/1). Se evaluó la estabilidad de las suspensiones a través de ensayos de sedimentación, y se determinó el tiempo máximo de estabilidad y la velocidad de sedimentación de cada suspensión.

### **2.2.1 PREPARACIÓN DE LAS SUSPENSIONES CON DIFERENTES RELACIONES S/L**

#### **Objetivo**

Preparar suspensiones de esmalte porcelánico con relaciones S/L: 51:/49, 53/47 y 55/45.

#### **Equipos**

- Balanza analítica, METTLER, 210 g, 0,0001 g
- Rodillos Giratorios, NORTON, velocidad de giro 1 772 rpm

#### **Materiales**

- Recipiente plástico mezclador, 2 L

#### **Reactivos**

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

#### **Procedimiento**

- Se calculó la cantidad de las materias primas con base en 50 g de sólidos totales, según la siguiente dosificación: 3,0 % de bentonita, 0,1 % de carboximetilcelulosa, 0,5 % de tripolifosfato de sodio y 96,4 % de vidrio de desecho. El ejemplo de cálculo de la cantidad de las materias primas se detalla en el Anexo I.
- Se pesaron las materias primas y se colocaron en el recipiente mezclador.
- Se homogeneizó la mezcla sólida con la ayuda de los rodillos giratorios a velocidad de 1 772 rpm durante 15 min.
- Se añadió la cantidad de agua necesaria según la relación S/L de estudio y se mezcló la suspensión durante 20 min.

## **2.2.2 DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON DIFERENTES RELACIONES S/L**

### **Objetivo**

Determinar el tiempo que permanecen estables y la velocidad de sedimentación de las suspensiones con relaciones S/L: 51:49, 53:47 y 55:45.

### **Equipos**

- Balanza analítica, METTLER, 210 g, 0,0001 g
- Estufa, MEMMERT, 200 °C

### **Materiales**

- Columna de sedimentación de vidrio: 45 cm de altura y 1,7 cm de diámetro, con tubo lateral para muestreo a 27 cm desde la parte superior.
- Desecador
- Frascos de vidrio de 10 cm<sup>3</sup>
- Pinza de tres dedos

- Soporte metálico

## **Reactivos**

Suspensión de composición:

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

## **Procedimiento**

- Se instaló la columna de vidrio como se muestra en la Figura 2.1 y se colocaron 80 mL de suspensión.
- Se tomaron muestras de la suspensión anterior de aproximadamente 3 mL en los frascos de vidrio limpios, secos y previamente pesados, a diferentes tiempos.
- Se pesaron las muestras tomadas y se secaron en la estufa a 110 °C durante 12 h y se colocaron en un desecador. Se pesaron.
- Los pesos registrados sirvieron para calcular la concentración de sólidos en la suspensión a diferentes tiempos.
- A partir de las curvas de concentración de sólidos en función del tiempo, se determinaron la velocidad de sedimentación y el tiempo de estabilidad de cada suspensión. Los datos registrados y los ejemplos de cálculo de la velocidad de sedimentación y la estabilidad se muestran en el Anexo II.



**Figura 2.1.** Fotografía de la columna de sedimentación de vidrio

## **2.3 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLORURO DE AMONIO EN LA VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES**

Se prepararon suspensiones de vidrio de desecho, tripolifosfato de sodio, bentonita y agua, con relación S/L 53:47. A las suspensiones preparadas se añadió carboximetilcelulosa para estudiar su efecto espesante (incremento de la viscosidad de la suspensión).

A las suspensiones con carboximetilcelulosa se añadió cloruro de amonio y se evaluó el efecto sobre la viscosidad. Se determinó la viscosidad aparente y el comportamiento reológico a través de la viscosimetría rotacional, y se midió la viscosidad cinemática con el viscosímetro de copa Saybolt.

### **2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE DE LAS SUSPENSIONES**

#### **Objetivo**

Medir la viscosidad aparente de las suspensiones con relación S/L 53:47 a 50 rpm y a temperatura ambiente utilizando el viscosímetro rotacional marca CANNON.

### **Equipos y materiales**

- Viscosímetro digital, CANNON, exactitud  $\pm 1,0$  %
- Vaso de precipitación de 600 mL

### **Reactivos**

Suspensión de composición:

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 %, LUBON
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

### **Procedimiento**

- Se colocaron 500 mL de suspensión en el vaso de precipitación y éste se instaló bajo el viscosímetro de la Figura 2.2.
- Se introdujo el eje en el centro de la muestra de modo que el oleaje que se produzca sea el mismo en todos los puntos alrededor del eje.
- Se encendió el viscosímetro a una velocidad de corte de 50 rpm y se tomó el dato de viscosidad.



**Figura 2.2.** Viscosímetro digital CANNON

El viscosímetro digital marca CANNON, modelo LV 2 020, consta de un cabezal giratorio conectado a un eje que se sumerge en el fluido de estudio. El arrastre producido entre el fluido de estudio y el eje se mide con un transductor giratorio que proporciona una lectura digital en unidades de viscosidad. El intervalo de medición del viscosímetro está determinado por la velocidad de rotación y por el tipo, forma y tamaño del eje (“spindle”).

En la Tabla 2.5 se presentan los rangos de viscosidad de cada eje para cada velocidad de corte.

**Tabla 2.5.** Rangos de viscosidad de trabajo del viscosímetro digital CANNON

EJE	S61	S62	S63	S64
<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>			
10	600	3 000	12 000	60 000
20	300	1 500	6 000	30 000
30	200	1 000	4 000	20 000
50	120	600	2 400	12 000
60	100	500	2 000	10 000
100	60	300	1 200	6 000

(CANNON, 1 998, p. 10)

Para la selección del eje se consideró que, si durante las mediciones de viscosidad, el torque es menor que el 10 % se debe cambiar a un eje con menor intervalo de viscosidad o, si sobrepasa el 100 %, cambiar al eje con mayor intervalo de viscosidad.

### **2.3.2 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS SUSPENSIONES**

#### **Objetivo**

Caracterizar el tipo de fluido al que corresponden las suspensiones con relación S/L 53:47 a partir de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte y con el tiempo.

#### **Equipos y materiales**

- Viscosímetro digital, CANNON, exactitud  $\pm 1,0$  %
- Vaso de precipitación de 600 mL

#### **Reactivos**

Suspensión de composición:

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 %, LUBON
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

#### **Procedimiento**

##### **a) Variación de la viscosidad con la velocidad de corte**

- Se colocaron 500 mL de suspensión en el vaso de precipitación, éste se instaló debajo del viscosímetro de la Figura 2.2, y se dejó reposar la muestra por 3 min.
- Se introdujo el eje en el centro de la muestra de modo que el oleaje que se produzca sea el mismo en todos los puntos alrededor del eje.
- Se encendió el viscosímetro a una velocidad de corte de 10 rpm durante 1 min para obtener una suspensión con flujo continuo.
- Se tomó las medidas de viscosidad a 10 rpm, 20 rpm, 30 rpm, 50 rpm, 60 rpm y 100 rpm.

#### **b) Variación de la viscosidad con el tiempo**

- Se colocaron 500 mL de suspensión en el vaso de precipitación, éste se colocó debajo del viscosímetro y se dejó reposar la muestra por 3 min.
- Se introdujo el eje en el centro de la muestra de modo que el oleaje que se produzca sea el mismo en todos los puntos alrededor del eje.
- Se encendió el viscosímetro a una velocidad de corte de 10 rpm durante 1 min para obtener una suspensión con flujo continuo, luego de este tiempo se registraron los datos de viscosidad cada minuto por un intervalo de tiempo de 15 min. Se siguió igual procedimiento para la velocidad de corte de 100 rpm.

### **2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE LAS SUSPENSIONES**

#### **Objetivo**

Medir la viscosidad cinemática de las suspensiones con relación S/L 53:47 con el viscosímetro de copa Saybolt.

#### **Equipos**

- Viscosímetro Saybolt
- Cronómetro

## **Materiales**

- Copa receptora de vidrio de 60 mL
- Tapón de caucho

## **Reactivos**

Suspensión de composición:

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 %, LUBON
- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

## **Procedimiento**

- Se instaló el equipo como se muestra en la Figura 2.3, de modo que el orificio del viscosímetro Saybolt se encuentre alineado con la copa receptora para evitar problemas de derrames.
- Se colocaron 60 mL de suspensión en el interior del viscosímetro Saybolt, hasta llegar a su borde interno e inmediatamente se retiró el tapón de caucho de la parte inferior del viscosímetro y se puso simultáneamente en marcha el cronómetro.
- Se detuvo el cronómetro cuando el menisco de la suspensión alcanzó la marca de aforo de la copa receptora.
- Se registró el tiempo de flujo y se multiplicó por el factor de conversión para transformar los segundos en viscosidad cinemática.



**Figura 2.3.** Fotografía del viscosímetro Saybolt

## **2.4 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CARBOXIMETILCELULOSA EN LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE DE ACERO**

Con el propósito de determinar la concentración de carboximetilcelulosa que defina la mejor adherencia entre el esmalte crudo y la superficie de acero, se prepararon suspensiones con concentraciones de carboximetilcelulosa entre 0,05 y 0,30 %, se esmaltaron placas de acero de 3x3 cm, y se sometieron a ensayos de fricción y se determinó el porcentaje de esmalte adherido a la superficie metálica. Los procesos mencionados se describen a continuación.

### **2.4.1 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PIEZAS DE ACERO**

#### **Objetivo**

Retirar impurezas, eliminar grasas, óxidos y rugosidades presentes en la superficie de las placas de acero, para incrementar la porosidad superficial y facilitar la adherencia con el esmalte crudo.

#### **Materiales**

- Lija N° 210
- Placas de acero de 3x3 cm
- Papel absorbente
- Fundas ziploc
- Vaso de precipitación
- Cepillo con cerdas de plástico

### **Reactivos**

- 3,5 g de hexametilentetramina
- 100 mL de ácido clorhídrico 0,1N
- Agua destilada
- Detergente

### **Procedimiento**

Las superficies de las placas de acero fueron sometidas a los procesos de limpieza mecánica, decapado y secado, cada uno de los cuales se describen a continuación.

#### **a) Limpieza mecánica**

Se lijaron las placas bajo el chorro de agua.

#### **b) Decapado**

- Se preparó una solución con 3,5 g de hexametilentetramina y 100 mL de ácido clorhídrico 1 N y se aforó a 1 L con agua destilada.
- Se colocaron 20 mL de la solución en un vaso de precipitación y se introdujeron las placas limpias dentro de la solución durante 5 min.
- Se retiraron las placas de la solución y se sumergieron en una solución de agua con detergente durante otros 5 min.

- Se cepillaron y enjuagaron con agua destilada hasta retirar todo resto de detergente y óxido.

### **c) Secado**

Las placas decapadas se secaron con papel absorbente e inmediatamente se guardaron en bolsas de plástico con cierre hermético para evitar su inmediata oxidación.

## **2.4.2 APLICACIÓN DE LA SUSPENSIÓN POR ASPERSIÓN**

### **Objetivo**

Recubrir por aspersión la superficie de las piezas de acero con las suspensiones preparadas.

### **Equipos**

- Compresor de aire, TRUPER, 50 L, 800 kPa
- Estufa, MEMMERT, 200 °C

### **Materiales**

- Pistola para compresor, de baja presión 40 – 50 psi, boquilla de 1,6 mm
- Soporte para esmaltado horizontal, 3,2x3,2x0,2 cm

### **Reactivos**

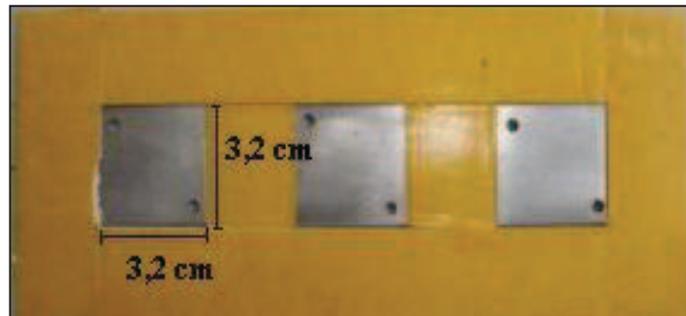
Suspensión de composición:

- Bentonita, 94 %, BAKER HUGHES
- Carboximetilcelulosa, 99,9 %, AMTEX
- Cloruro de amonio, 99,5 %, LUBON

- Tripolifosfato de sodio, 94,2 %, TIANYUAN GROUP
- Vidrio de desecho

### Procedimiento

- Para esmaltar las piezas de forma horizontal y obtener capas de espesor uniforme, se construyó el soporte para esmaltado horizontal de la Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Esquema de un soporte para esmaltado de placas de 3x3 cm

- Se depositaron tres piezas de acero de 3x3 cm en el soporte de la Figura 2.4.
- Se colocaron 50 mL de esmalte en el recipiente de la pistola de aplicación, y se encendió el compresor de la Figura 2.5 hasta alcanzar una presión de 50 psi.
- Se esmaltaron las piezas de acero manteniendo una distancia aproximada de 20 cm, hasta cubrir completamente los 0,2 cm de profundidad del aparato de aplicación.
- Se secaron las placas a temperatura ambiente durante 1 h, luego en la estufa a 110 °C durante 2 h y se ubicaron en un desecador.



**Figura 2.5.** Fotografía del compresor de aire marca TRUPER

### **2.4.3 DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE DE ACERO**

#### **Objetivo**

Determinar la adherencia entre el esmalte y la superficie de acero a través de ensayos de fricción.

#### **Equipos**

- Balanza analítica, METTLER, 210 g, 0,0001 g
- Agitador mecánico con control de velocidad

#### **Materiales**

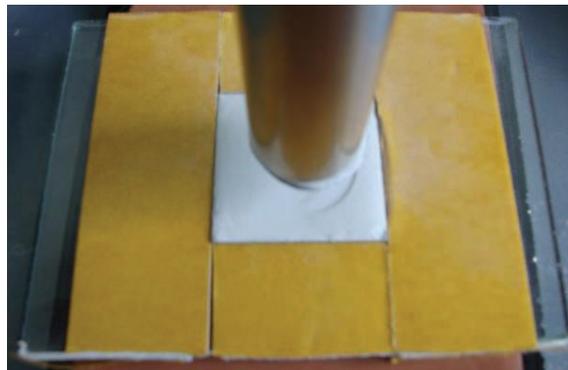
- Placas de acero recubiertas con esmalte
- Cilindro de acero de 1 cm de radio
- Lija N°210

## Procedimiento

Para determinar la adherencia entre el esmalte y el acero se planteó aplicar el método desarrollado en el Laboratorio de Producción de Vidrio de la EPN, que consiste en frotar la superficie de la placa esmaltada con un imán a 65 rpm durante 20 s y determinar la cantidad de esmalte desprendido. Sin embargo, este método no permitió obtener respuestas reproducibles debido a que el imán se quedó adherido con la placa ofreciendo una frotación instantánea o casi nula.

Se planteó un nuevo método que consistió en aplicar una fuerza de fricción sobre las placas esmaltadas a través de un cilindro de acero, en cuyo extremo se adaptó lija N°210 para ejercer un desgaste sobre el esmalte crudo. El procedimiento seguido se describe a continuación:

- Se colocó la pieza de acero esmaltada y previamente pesada en el interior del soporte como se muestra en la Figura 2.6.
- Se acopló el cilindro al eje del agitador y se colocó en contacto con la superficie esmaltada
- Se encendió el motor del agitador y se aplicó la fuerza de fricción en un área aproximada de  $3,1416 \text{ cm}^2$ , durante 2 min a 60 rpm.
- Se retiró el cilindro y el esmalte desprendido y se pesó la placa frotada.
- Se determinó la cantidad de esmalte que quedó adherido en el área ensayada mediante diferencia de pesos. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se encuentran en el Anexo V.



**Figura 2.6.** Fotografía del equipo para ensayo de adherencia

## 2.5 EVALUCIÓN DE LA CAPTACIÓN DE ESMALTE SOBRE PIEZAS DE ACERO

### Objetivo

Determinar la cantidad de sólidos depositados por unidad de superficie de la pieza de acero.

### Equipos y materiales

- Balanza analítica, METTLER, 210 g, 0,0001 g
- Estufa, MEMMERT, 200 °C
- Micrómetro de profundidad, CRAFTMAN, 4 pulg, 0,001 pulg
- Placas de acero de 6x6 cm
- Soporte de madera para esmaltado vertical

### Procedimiento

- Se construyó un soporte de madera de 45 cm de largo, 20 cm de ancho y 30 cm de alto, que se muestra en la Figura 2.7, y se ubicaron placas de acero de forma vertical sujetas muy firmemente en dos extremos.



**Figura 2.7.** Fotografía del soporte de madera para esmaltado de placas de 6x6 cm

- Se colocaron 100 mL de suspensión en el recipiente de la pistola, y se esmaltaron las piezas de acero a una distancia aproximada de 20 cm. Se aplicaron tres pasadas horizontales y tres verticales para cubrir completamente la placa con el esmalte de estudio.
- Se secaron las placas a temperatura ambiente durante 1 h y luego en la estufa a 110 °C durante 2 h.
- Se pesaron las placas y se registraron los datos de esmalte captado.
- Se determinó el espesor de la capa de esmalte aplicada con el micrómetro de profundidad marca CRAFTSMAN que se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Micrómetro inglés digital de profundidad, marca CRAFTSMAN

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN SÓLIDO – LÍQUIDO EN LA ESTABILIDAD DE LAS SUSPENSIONES DE ESMALTE PORCELÁNICO

Se estudió la estabilidad de las suspensiones mediante ensayos de sedimentación realizados en un tubo de vidrio de 47 cm de altura, 1,7 cm de radio, con un tubo lateral a 27 cm del borde superior, por el cual, se tomaron muestras y se determinó la relación S/L a diferentes tiempos, como se indica en la sección 2.2.2.

Se prepararon cuatro suspensiones con diferentes relaciones S/L cuyas composiciones se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Composición de las suspensiones preparadas

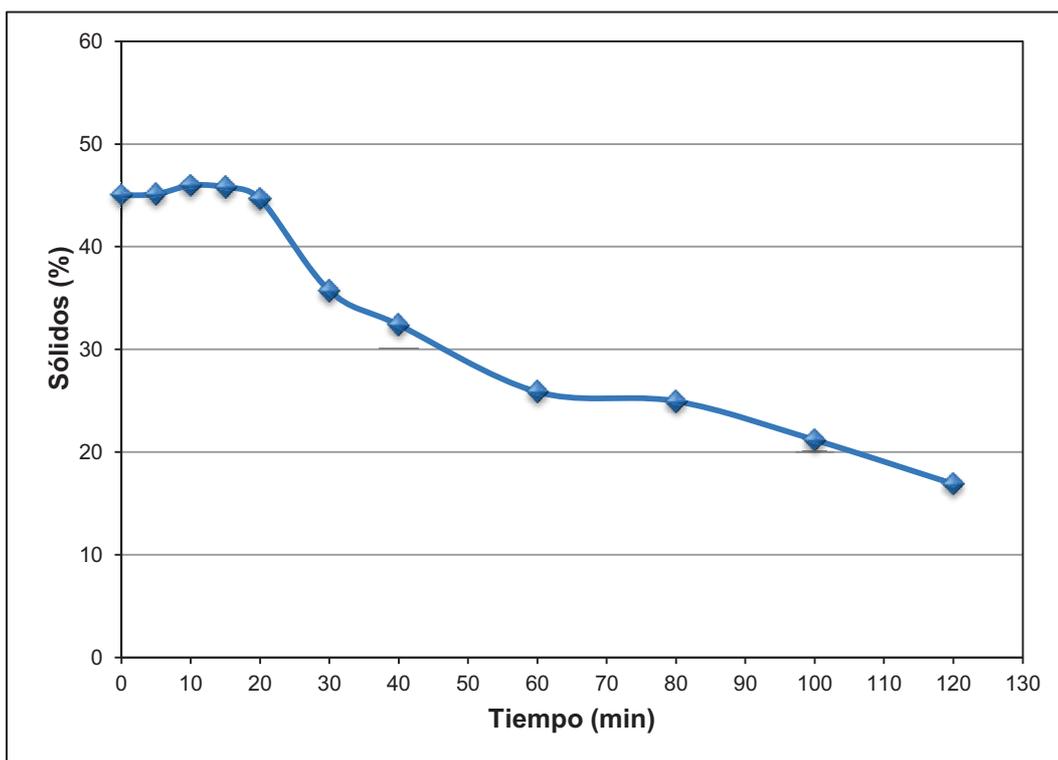
Suspensión	Relación S/L	Bentonita (%)	Tripolifosfato de sodio (%)	Carboximetilcelulosa (%)	Vidrio (%)
S1	45 % - 55 %	3,0	0,5	0,0	96,5
S2	51 % - 49 %	3,0	0,5	0,1	96,4
S3	53 % - 47 %	3,0	0,5	0,1	96,4
S4	55 % - 45 %	3,0	0,5	0,1	96,4

##### 3.1.1 ESTABILIDAD DE LA SUSPENSIÓN CON RELACIÓN S/L 45:55 (S1)

Los resultados del ensayo de sedimentación de la suspensión S1 se muestran en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.1. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se presentan en el Anexo II.

**Tabla 3.2.** Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S1

Tiempo (min)	Concentración de sólidos (%)
0	45,00
5	45,13
10	45,97
15	45,80
20	44,65
30	35,73
40	32,38
60	25,86
80	24,95
100	21,18
120	16,90

**Figura 3.1.** Curva de sedimentación de la suspensión S1 (S/L=45:55)

En la Figura 3.1 se puede observar que la suspensión S1 con relación S/L 45:55 no varió su concentración hasta los 20 min, a partir de este momento empezó a disminuir con una velocidad de sedimentación aproximada de 1,19 % de sólidos/min.

Los resultados logrados con la suspensión S1 indican que la estabilidad se mantiene hasta los 20 min aproximadamente, debido al efecto defloculante del tripolifosfato y al efecto plastificante de la bentonita. Sin embargo, a partir de éste instante ocurrió una caída brusca de la relación S/L, hasta que a los 120 min se obtuvo la relación de 16,9:83,1.

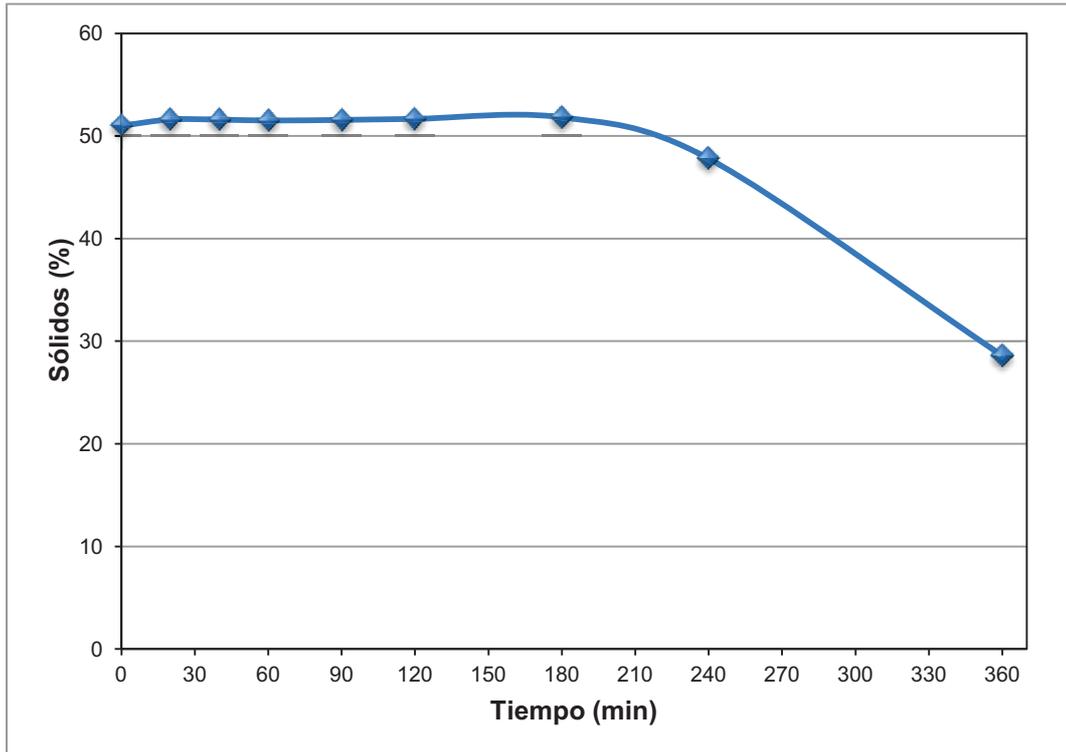
En resumen, la suspensión de partida S1 presentó una baja estabilidad igual a 37,56 % en apenas 120 min. Estos resultados demostraron que, los aditivos utilizados no fueron suficientes como para mantener la estabilidad de la suspensión S1 con relación S/L 45:55, por un mayor tiempo, consecuentemente si se incrementa la concentración de sólidos, la suspensión sedimentará con mayor velocidad. Con base en estos resultados se procedió a añadir a la suspensión S1, 0,1 % de carboximetilcelulosa, valor recomendado por bibliografía para desarrollar una acción defloculante (Andreola et al., 1999, p. 112).

### 3.1.2 ESTABILIDAD DE LA SUSPENSIÓN CON RELACIÓN S/L 51:49 (S2)

En la Tabla 3.3 y en la Figura 3.2 se muestran los resultados del ensayo de sedimentación de la suspensión S2. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se presentan en el Anexo II.

**Tabla 3.3.** Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S2

Tiempo (min)	Concentración de sólidos (%)
0	51,00
20	51,61
40	51,59
60	51,51
90	51,57
120	51,66
180	51,82
240	47,79
360	28,59

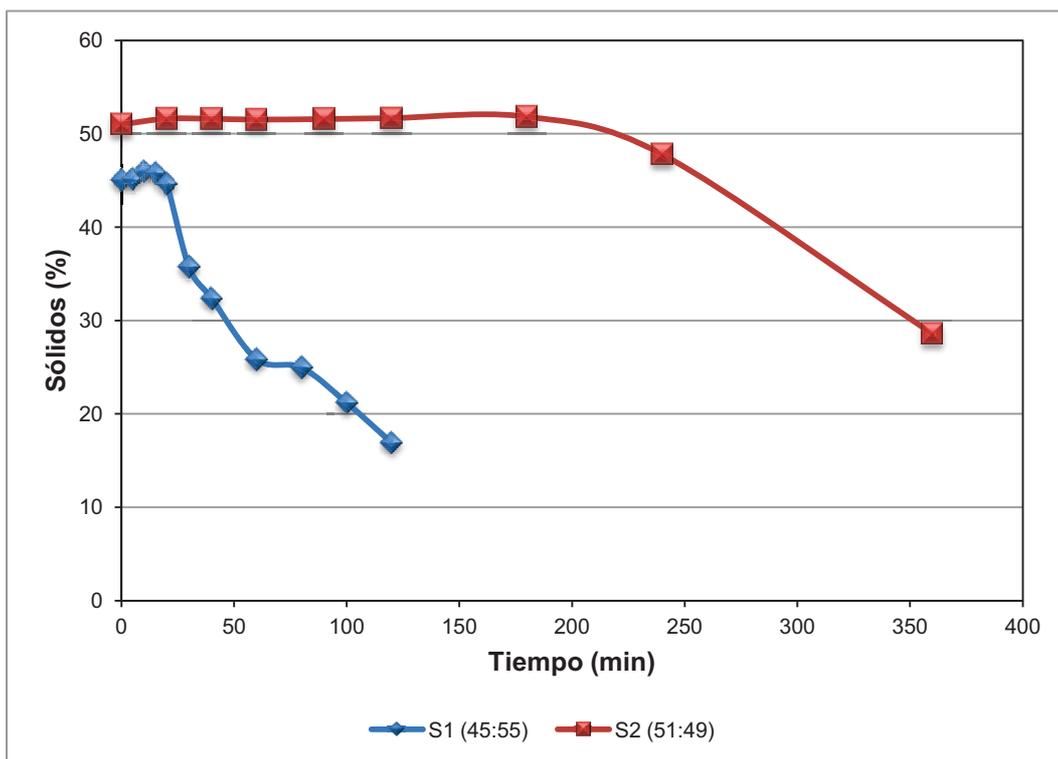


**Figura 3.2.** Curva de sedimentación de la suspensión S2 (S/L=51:49)

Como se observa en la Figura 3.2, la estabilidad de la suspensión S2 se mantuvo hasta los 180 min aproximadamente, luego la suspensión empezó a sedimentar con una velocidad aproximada de 0,20 % de sólidos/min. También se puede observar que, a partir de los 180 min la relación S/L bajó hasta 28,59:71,41 en 360 min.

La suspensión S2 empezó a sedimentar, posiblemente debido al exceso de carboximetilcelulosa con respecto a la relación S/L 51:49, ya que al añadir la carboximetilcelulosa, esta se adsorbió sobre la superficie de las partículas en suspensión (Moreno, 2005, p. 262), e incrementó su tamaño o radio, lo cual provocaría el incremento de la velocidad de sedimentación, según la ley de Stokes mostrada en la ecuación 1.1. Se concluye que la estabilidad de la suspensión S2 fue aproximadamente de 56,06 % en 360 min (6 h).

En la Figura 3.3, se presentan las curvas de sedimentación de las suspensiones S1 y S2, con el fin de apreciar el efecto defloculante de la carboximetilcelulosa añadida en la suspensión S2.



**Figura 3.3.** Comparación de las curva de sedimentación de las suspensión S1 y S2

En la Figura 3.3, se presentan las curvas de sedimentación de la suspensión S1 con relación S/L 45:55 y S2 con relación S/L 55:49.

En la composición de la suspensión S2 se incluyó 0,1 % de carboximetilcelulosa, por lo tanto, al comparar las curvas de estabilidad de las suspensiones S1 y S2, se puede observar claramente la acción dispersante de la carboximetilcelulosa, puesto que, la suspensión S2 permaneció estable un mayor tiempo en comparación con la suspensión S1.

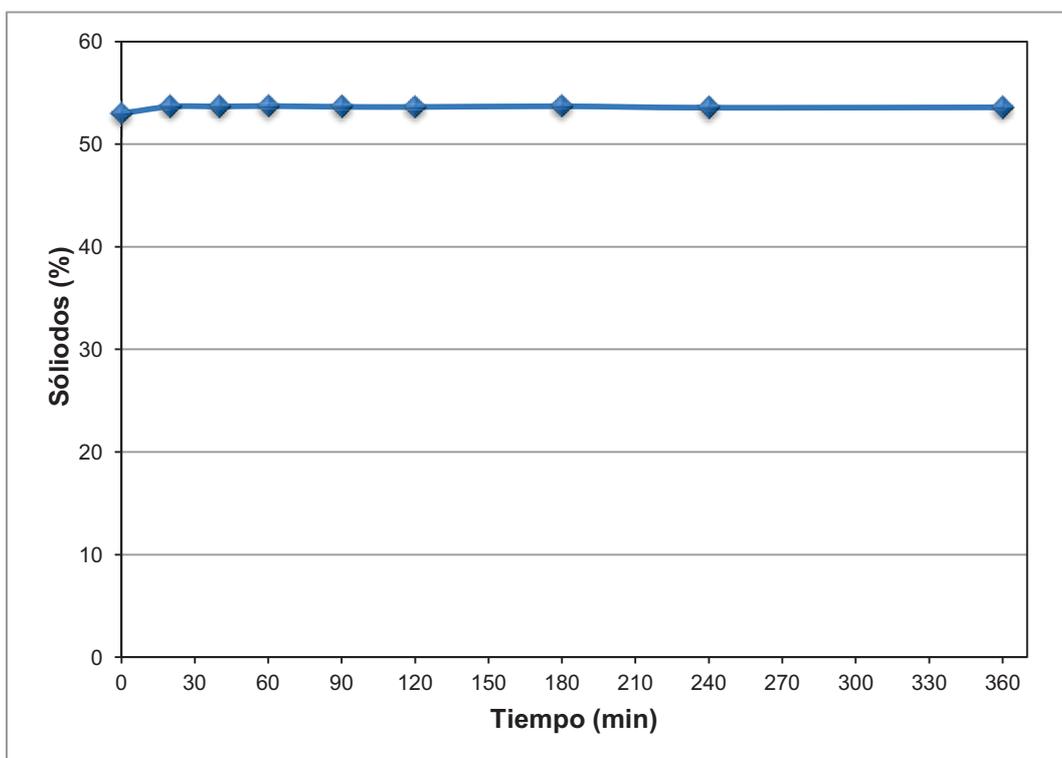
Esto se comprobó, debido a que la velocidad de sedimentación de la suspensión S1 disminuyó, en comparación con la velocidad de sedimentación de la suspensión S2, tomando en cuenta que, la concentración de sólidos en suspensión fue mayor así, la velocidad de sedimentación de la suspensión S1 fue 1,19 % de sólidos/min, mientras que, la velocidad de sedimentación de la suspensión S2 fue 0,20 % de sólidos/min y, por consiguiente, el tiempo de estabilidad incrementó de 20 min a 180 min.

### 3.1.3 ESTABILIDAD DE LA SUSPENSIÓN CON RELACIÓN S/L 53:47 (S3)

Los resultados del ensayo de sedimentación de la suspensión S3 con relación S/L 53:47 se reportan en la Tabla 3.4 y, en la Figura 3.4 se muestra la curva de sedimentación. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se presentan en el Anexo II.

**Tabla 3.4.** Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S3

Tiempo (min)	Concentración de sólidos (%)
0	53,00
20	53,66
40	53,68
60	53,72
90	53,65
120	53,63
180	53,70
240	53,56
360	53,60



**Figura 3.4.** Curva de sedimentación de la suspensión S3 (S/L=53:47)

En la Figura 3.4, se puede ver que la relación S/L de la suspensión S3 no varió durante los 360 min que duró el ensayo de sedimentación. Por lo tanto, la suspensión con relación 53:47 presenta un 100 % de estabilidad en un tiempo mayor que 300 min.

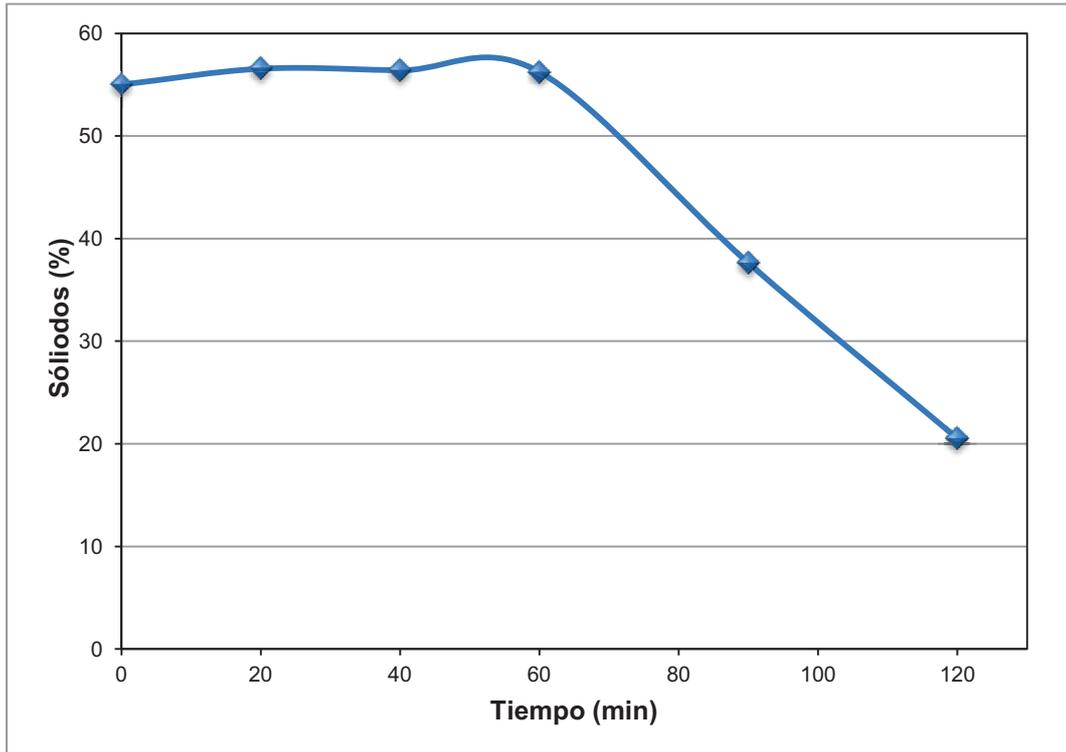
Es notable el hecho de que el incremento de la concentración de sólidos en la relación S/L favoreció a la estabilidad de la suspensión S3, posiblemente al hecho de que la misma cantidad de carboximetilcelulosa se adsorbió en una mayor cantidad de sólidos en suspensión, logrando así un equilibrio entre la concentración de sólidos y la CMC.

#### 3.1.4 ESTABILIDAD DE LA SUSPENSIÓN CON RELACIÓN S/L 55:45 (S4)

En la Tabla 3.5 y en la Figura 3.5 se reportan los resultados del ensayo de sedimentación de la suspensión S4 cuya relación S/L fue 55:45. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se presentan en el Anexo II.

**Tabla 3.5.** Resultados de los ensayos de sedimentación de la suspensión S4

Tiempo (min)	Concentración de sólidos (%)
0	55,00
20	56,55
40	56,40
60	56,24
90	37,63
120	20,53



**Figura 3.5.** Curva de sedimentación de la suspensión S4 (S/L=55:45)

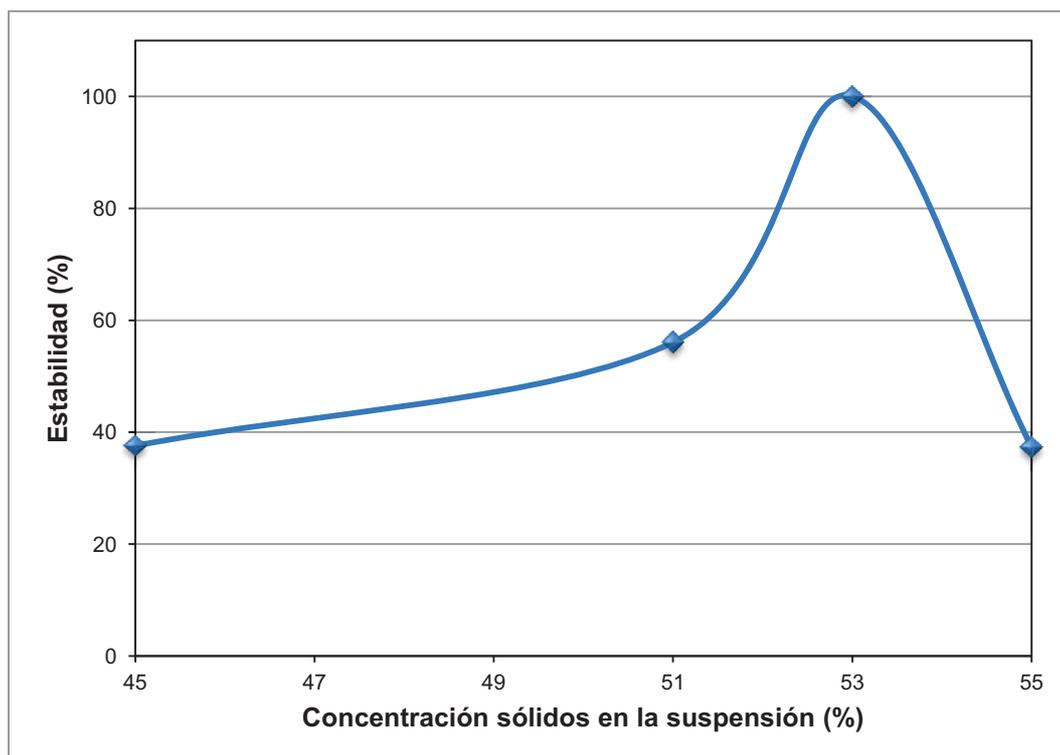
Como se puede apreciar en la Figura 3.5, la estabilidad de la suspensión S4 se mantuvo invariable durante 60 min, a partir de este tiempo la suspensión empezó a sedimentar con una velocidad aproximada de 0,42 % de sólidos/min, hasta que a los 120 min alcanzó una relación S/L de 20,53:79,47.

En la Figura 3.5 se observa la acción dispersante de la carboximetilcelulosa hasta los 60 min, sin embargo, no fue suficiente para mantener la estabilidad de la suspensión con relación S/L 55:45.

Este fenómeno puede deberse al hecho de que al incrementar la concentración de sólidos, las distancias entre las partículas se redujeron y se formaron flóculos que provocaron una sedimentación masiva (Moreno, 2000, p. 603), por ello la estabilidad de la suspensión S4 fue 37,33 %, es decir, sedimentó el 62,67 % de sólidos en apenas 120 min.

### 3.1.5 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN S/L PARA OBTENER UNA SUSPENSIÓN CON ESTABILIDAD MAYOR QUE EL 80 %

En la Figura 3.6 se resumen los resultados del estudio de la influencia de la relación sólido – líquido en la estabilidad de la suspensión de esmalte porcelánico, de acuerdo con lo obtenido en las secciones anteriores.



**Figura 3.6.** Estabilidad de las suspensiones en función de la relación sólido-líquido

Como se observa en la Figura 3.6, la adición de 0,1 % del carboximetilcelulosa en la suspensión con relación S/L 51:49, mejoró la estabilidad de 37,56 % a 56,06 %, en comparación con la suspensión con relación 45:55.

De la Figura 3.6 se determinó que para obtener una estabilidad mayor que el 80 % se debe trabajar con una suspensión con relación S/L mayor que 51:49. Además se obtuvo la máxima estabilidad, 100 %, con la relación S/L 53:47; sin embargo, a partir de esta relación la estabilidad disminuyó notablemente, posiblemente debido al exceso de la concentración de sólidos que provocaron la sedimentación masiva de la suspensión (Moreno, 2000, p. 603).

### 3.2 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLORURO DE AMONIO EN LA VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES

A partir de la suspensión con relación sólido – líquido 53:47, que presentó la máxima estabilidad, se estudió la influencia del cloruro de amonio en las propiedades reológicas.

Para ello se midió la viscosidad a temperatura ambiente y a velocidad de corte de 50 rpm; además se determinó la variación de la viscosidad con la velocidad de corte y con el tiempo, y la viscosidad cinemática.

Se prepararon cuatro suspensiones sin cloruro de amonio con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa; y ocho suspensiones: con dos concentraciones de carboximetilcelulosa y cada una con cuatro concentraciones de cloruro de amonio. En la Tabla 3.6 se detalla la composición de las suspensiones sin cloruro de amonio con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa.

**Tabla 3.6.** Composición de las suspensiones con carboximetilcelulosa, relación S/L 53:47

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	Tripolifosfato de sodio (%)	Bentonita (%)	Vidrio (%)
SC1	0,05	0,5	3,0	96,45
SC2	0,10	0,5	3,0	96,40
SC3	0,15	0,5	3,0	96,35
SC4	0,30	0,5	3,0	96,20

#### 3.2.1 VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON CARBOXIMETILCELULOSA

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados de viscosidad de las suspensiones con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa medidos a 50 rpm y a temperatura ambiente.

**Tabla 3.7.** Viscosidad de las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4

Parámetros	Suspensión			
	SC1	SC2	SC3	SC4
<b>Carboximetilcelulosa (%)</b>	0,05	0,10	0,15	0,30
<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	50	50	50	50
<b>Esfuerzo cortante (mN·m)</b>	0,021	0,056	0,863	0,701
<b>Temperatura ( °C)</b>	20	20	20	20
<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	189,60	500,80	7 686,67	6 240,00

En la Tabla 3.7 se puede ver que conforme incrementó la cantidad de carboximetilcelulosa también aumentó la viscosidad de la suspensión hasta una concentración igual a 0,15 %. Dicho comportamiento se atribuye a la alta solubilidad de la carboximetilcelulosa en el agua que provocó la formación de puentes de hidrógeno y por consiguiente el incremento de la viscosidad (Calvo, 2010, P.113).

Sin embargo, a partir de 0,15 % de CMC se puede observar que la viscosidad disminuyó desde 7686,67 mPa·s hasta 6 240,00 mPa·s con 0,330 % de carboximetilcelulosa. Este fenómeno se explica con más detalle a partir de las respectivas curvas de viscosidad en función de la velocidad de corte de las suspensiones SC3 y SC4 en la sección 3.2.2.1.

En la Tabla 3.7 se puede notar que la suspensión SC1 con 0,05 % de carboximetilcelulosa, presentó una viscosidad igual a 189,6 mPa·s a una velocidad de corte de 50 rpm, al duplicar la concentración de carboximetilcelulosa a 0,10 %, la viscosidad incrementó 2,6 veces.

En comparación con la suspensión SC1, las suspensiones SC3 y SC4 con 0,15 % y 0,30 % de carboximetilcelulosa, incrementaron su viscosidad alrededor de 40 y 32 veces, respectivamente. Debido a que los valores de viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4 fueron mayores a 2 000 mPa·s, se consideraron no aptas para su aplicación por aspersion (Uniovi, 2006, p. 45).

### 3.2.2 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE LA VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON CARBOXIMETILCELULOSA

Se determinó la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa, y se obtuvieron las curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte (curvas de flujo), y viscosidad en función de la velocidad de corte (curvas de viscosidad).

A partir de las curvas de flujo se realizaron regresiones lineales y se obtuvo el comportamiento reológico de las suspensiones estudiadas de acuerdo con el modelo matemático de Ley de Potencia.

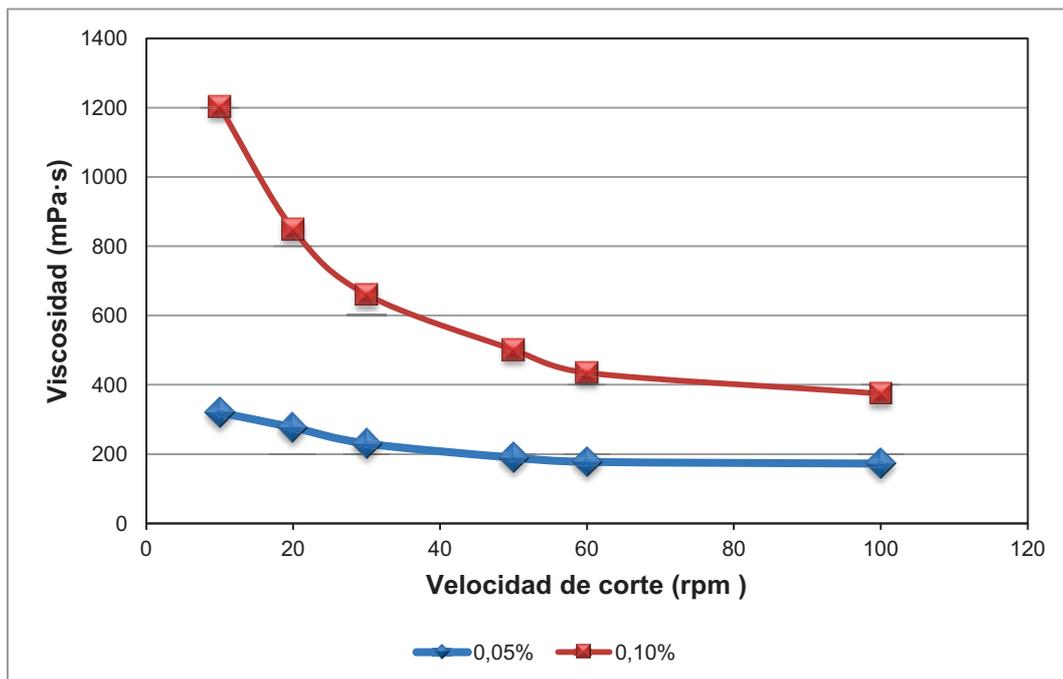
#### 3.2.2.1 Viscosidad en función de la velocidad de corte

##### Suspensiones SC1 y SC2

En la Tabla 3.8 y en la Figura 3.7 se presentan los resultados de variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1 y SC2 con 0,05 % y 0,10 % de carboximetilcelulosa, respectivamente. Los datos registrados se presentan en el Anexo III en las Tablas AIII.1 y AIII.2.

**Tabla 3.8.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con la velocidad de corte

Suspensión	SC1	SC2
Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	
10	320,0	1 203,0
20	276,7	849,0
30	230,3	660,3
50	189,6	500,8
60	177,7	434,5
100	172,5	374,3



**Figura 3.7.** Curvas de viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2

En la Figura 3.7, se puede observar que la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2, disminuyó a medida que incrementó la velocidad de corte. A pequeños incrementos de velocidades de corte (entre 10 rpm y 50 rpm), hubo grandes decrecimientos de viscosidad.

Este comportamiento fue más evidente para la suspensión SC2, por lo tanto, se puede decir que, las suspensiones fueron dependientes del esfuerzo cortante aplicado. Mientras que a altas velocidades de corte (entre 60 rpm y 100 rpm) la viscosidad prácticamente se volvió constante, tanto para la suspensión SC1 como para la suspensión SC2.

Es decir, las suspensiones SC1 y SC2 presentaron un comportamiento reológico propio de un fluido pseudoplástico, el cual se caracterizó por el decrecimiento de la viscosidad con el incremento de la velocidad de corte, lo cual se atribuye a la presencia de carboximetilcelulosa en la formulación de las suspensiones (Andreola et al., 1999, p. 213).

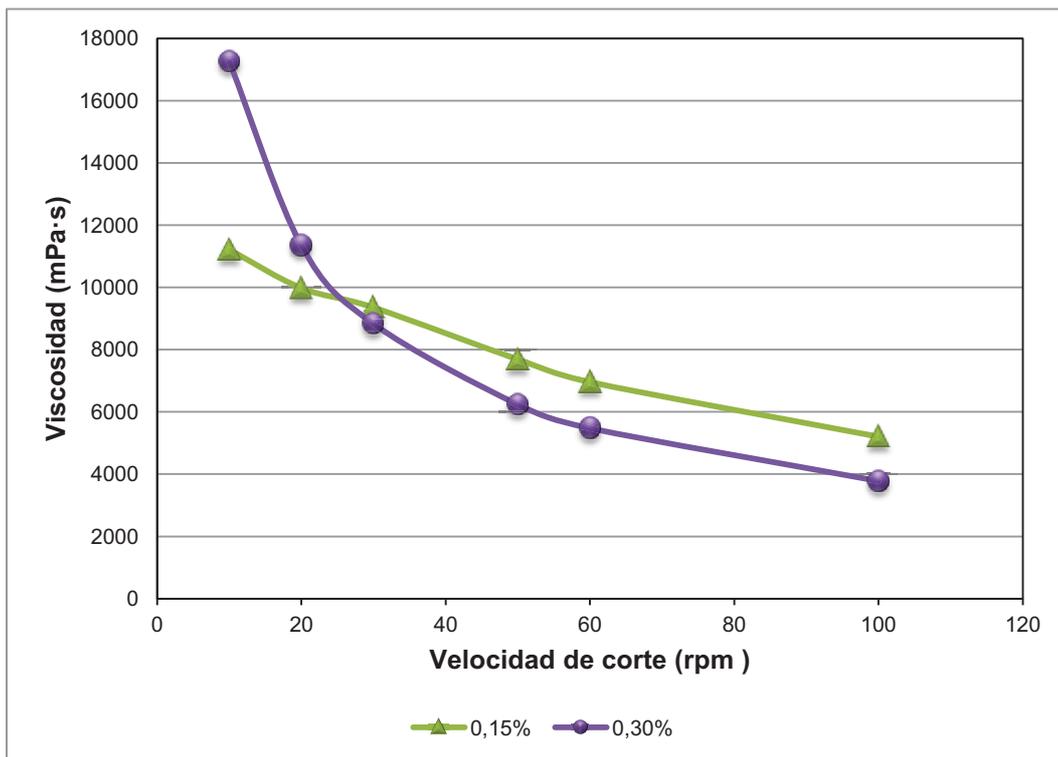
Al comparar las curvas de flujo de las suspensiones SC1 y SC2, se puede concluir que al incrementar la cantidad de carboximetilcelulosa, también la suspensión adquirió un mayor comportamiento pseudoplástico.

### Suspensiones SC3 y SC4

En la Tabla 3.9 y en la Figura 3.8 se presentan los resultados de variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC3 y SC4 con 0,15 % y 0,30 % de carboximetilcelulosa, respectivamente. Los datos registrados se presentan en el Anexo III en las Tablas AIII.3 y AIII.4.

**Tabla 3.9.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4 con la velocidad de corte

Suspensión	SC3	SC4
Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	
10	11 213,3	17 260,0
20	9 980,0	11 350,0
30	9 353,3	8 833,3
50	7 686,7	6 240,0
60	6 956,7	5 480,0
100	5 200,0	3 784,0



**Figura 3.8.** Curvas de viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4

Como se observa en la Figura 3.8, la viscosidad de las suspensiones SC3 y SC4 disminuyó al incrementar la velocidad de corte.

Las suspensiones SC3 y SC4 no presentaron una viscosidad constante a altas velocidades de corte como el caso de las suspensiones SC1 y SC2, esto se debió a que el incremento en la concentración de carboximetilcelulosa incrementó la viscosidad y es necesario estudiar su comportamiento a velocidades de corte mayores a 100 rpm, dicho valor excedía la capacidad del equipo utilizado por lo cual no se realizó. Pese a ello el comportamiento de las suspensiones corresponde a un fluido pseudoplástico.

Al comparar el comportamiento de las suspensiones SC3 y SC4, se puede observar que, ésta última, presentó una mayor dependencia de la viscosidad con la velocidad de corte entre 10 rpm y 100 rpm. Además, a partir de 30 rpm hasta 100 rpm, los valores de viscosidad de la suspensión SC3 fueron mayores que los de la suspensión SC4.

Dichos efectos se pueden atribuir al incremento de concentración de carboximetilcelulosa de 0,15 a 0,30 % lo cual provocó un marcado comportamiento pseudoplástico por parte de la suspensión SC4, de tal modo que hasta 20 rpm presentó mayores valores de viscosidad, mientras que, a velocidades de corte entre 30 rpm y 100 rpm, la suspensión se volvió más fluida, presentando menores valores de viscosidad.

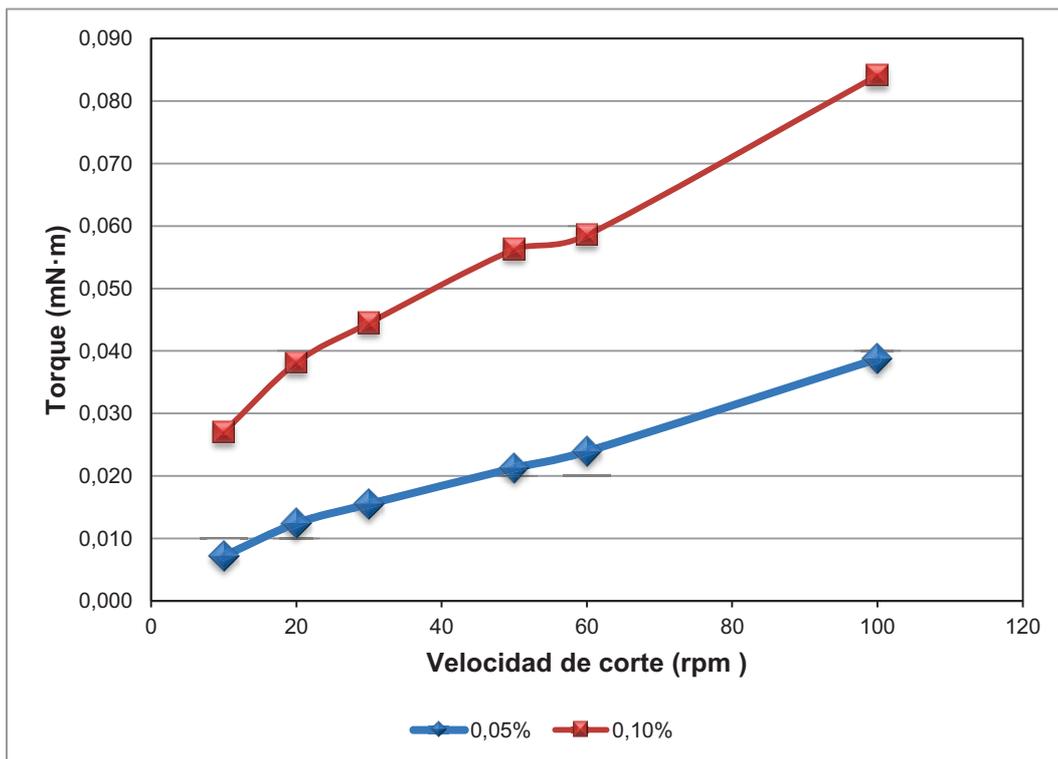
### 3.2.2.2 Torque en función de la velocidad de corte

#### Suspensiones SC1 y SC2

En la Tabla 3.10 y en la Figura 3.9 se presenta la variación del esfuerzo cortante (torque) con la velocidad de corte de las suspensiones SC1 y SC2. Los datos registrados se presentan en el Anexo III en las Tablas AIII.1 y AIII.2 respectivamente.

**Tabla 3.10.** Variación del torque de las suspensiones SC1 y SC2 con la velocidad de corte

Suspensión	SC1	SC2
Velocidad de corte (rpm)	Torque (mN·m)	
10	0,007	0,027
20	0,012	0,038
30	0,016	0,044
50	0,021	0,056
60	0,024	0,059
100	0,039	0,084



**Figura 3.9.** Curvas de flujo de las suspensiones SC1 y SC2

En la Figura 3.9 se presenta las curvas de flujo de las suspensiones SC1 y SC2, al comparar con la Figura 1.5 se puede observar que el comportamiento de las suspensiones fue aproximadamente similar al de un fluido pseudoplástico (Chhabra y Richardson, 1999, p. 7).

Se ajustaron las curvas de flujo al modelo matemático de Ley de Potencia (ecuación 1.12) y se determinaron los parámetros  $k$  y  $n$  por regresión lineal a partir de los resultados experimentales de las suspensiones SC1 y SC2; los resultados se detallan en la Tabla 3.11.

**Tabla 3.11.** Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC1 y SC2

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	$k$	$n$	Coefficiente de correlación
SC1	0,05	0,0014	0,6999	0,9922
SC2	0,10	0,0091	0,4706	0,9889

De acuerdo con la Tabla 3.11, los índices de fluidez ( $n$ ), que constituyen la “huella digital reológica” de las suspensiones SC1 y SC2, fueron menores que uno, por lo tanto, se corrobora el comportamiento pseudoplástico de las suspensiones con ciertas concentraciones de carboximetilcelulosa. Además los valores de coeficientes de correlación fluctuaron entre 0,98 y 0,99, validando así el modelo de regresión lineal.

En la suspensión con 0,05 % de carboximetilcelulosa, el índice de fluidez ( $n$ ) fue de aproximadamente 0,7, mientras que, de la suspensión con 0,10 % de carboximetilcelulosa fue de aproximadamente 0,5, con lo cual se concluye que a mayores concentraciones de carboximetilcelulosa el valor de  $n$  se alejó de la unidad, y el comportamiento de la suspensión se volvió más pseudoplástico.

Las suspensiones SC1 y SC2 presentaron valores de índice de consistencia ( $k$ ) de 0,0014 y 0,0091; por lo tanto a mayor concentración de carboximetilcelulosa, las suspensiones se volvieron más consistentes, con ello también se comprueba el efecto espesante de la carboximetilcelulosa.

### **3.2.3 EFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON CARBOXIMETILCELULOSA**

Se estudió la variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con el tiempo a velocidades de corte de 10 y 100 rpm.

#### **3.2.3.1 Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 10 rpm**

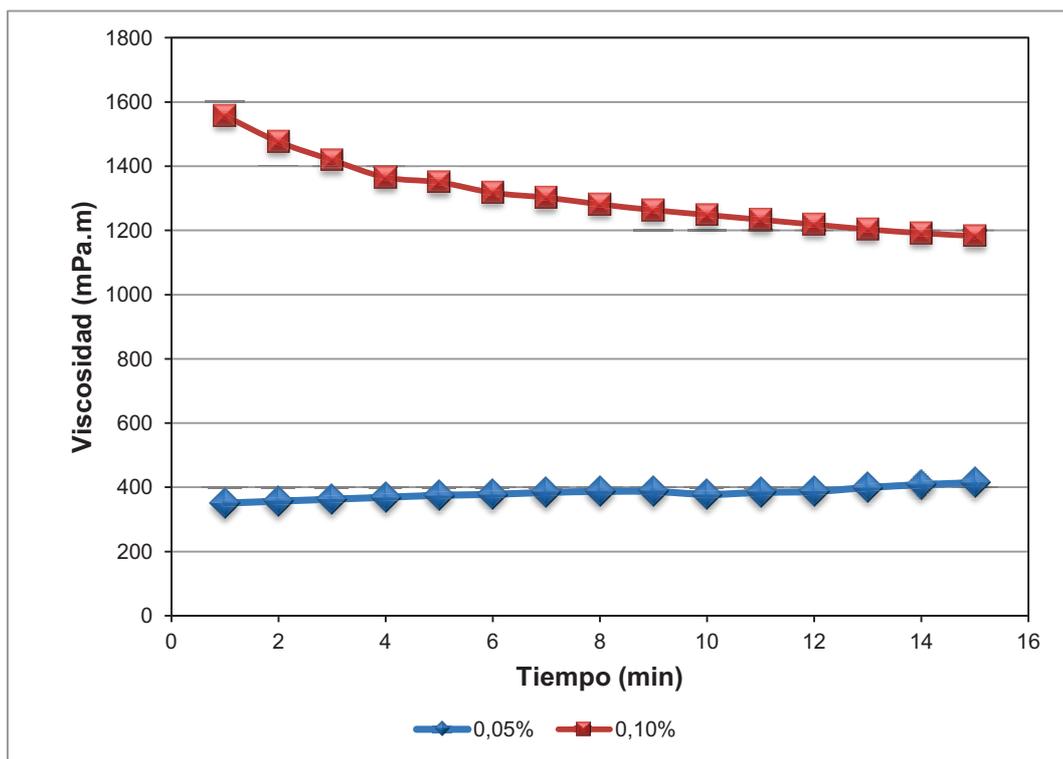
##### **Suspensiones SC1 y SC2**

En la Tabla 3.12 y en la Figura 3.10 se muestran los resultados de variación de la viscosidad de las suspensiones con 0,05 % y 0,10 % de carboximetilcelulosa con

el tiempo a velocidad de corte de 10 rpm. Los datos registrados se presentan en el Anexo III en las Tablas AIII.5.y AIII.6, respectivamente.

**Tabla 3.12.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm

<b>Suspensión</b>	<b>SC1</b>	<b>SC2</b>
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	
1	351,0	1 557,0
2	357,0	1 476,0
3	363,0	1 419,0
4	369,0	1 365,0
5	375,0	1 350,0
6	378,0	1 317,0
7	384,0	1 302,0
8	387,0	1 281,0
9	387,0	1 263,0
10	378,0	1 248,0
11	384,0	1 233,0
12	387,0	1 218,0
13	399,0	1 203,0
14	408,0	1 191,0
15	414,0	1 182,0



**Figura 3.10.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1 y SC2 a velocidad de corte de 10 rpm

En la Figura 3.10, se puede observar que la viscosidad de la suspensión SC1 aumentó ligeramente con el tiempo. Por lo tanto, se podría decir que a 10 rpm su comportamiento fue ligeramente reopéctico. La viscosidad de la suspensión SC2 disminuyó desde 1 557 hasta 1 182 mPa·s en 15 min, comportamiento característico de un fluido tixotrópico.

Por lo tanto, conforme incrementó la concentración del polímero mayor fue la dependencia de la viscosidad con el tiempo. Este fenómeno se puede explicar debido a que, conforme incrementó la concentración de carboximetilcelulosa, ante la influencia de velocidad de corte, la velocidad desenredamiento de las macromoléculas de polímero, fue mayor que la de re-entrelazamiento, logrando la alineación de las cadenas del polímero a lo largo de la dirección de corte y traduciéndose en la disminución de la viscosidad (Benchabane y Bekkour, 2008, p. 1178).

Se concluye que a bajas velocidades de corte la carboximetilcelulosa influyó en la dependencia de la viscosidad de las suspensiones con el tiempo de modo que hasta 0,05 % su comportamiento fue ligeramente reopéctico, en cambio, a 0,10 % fue tixotrópico.

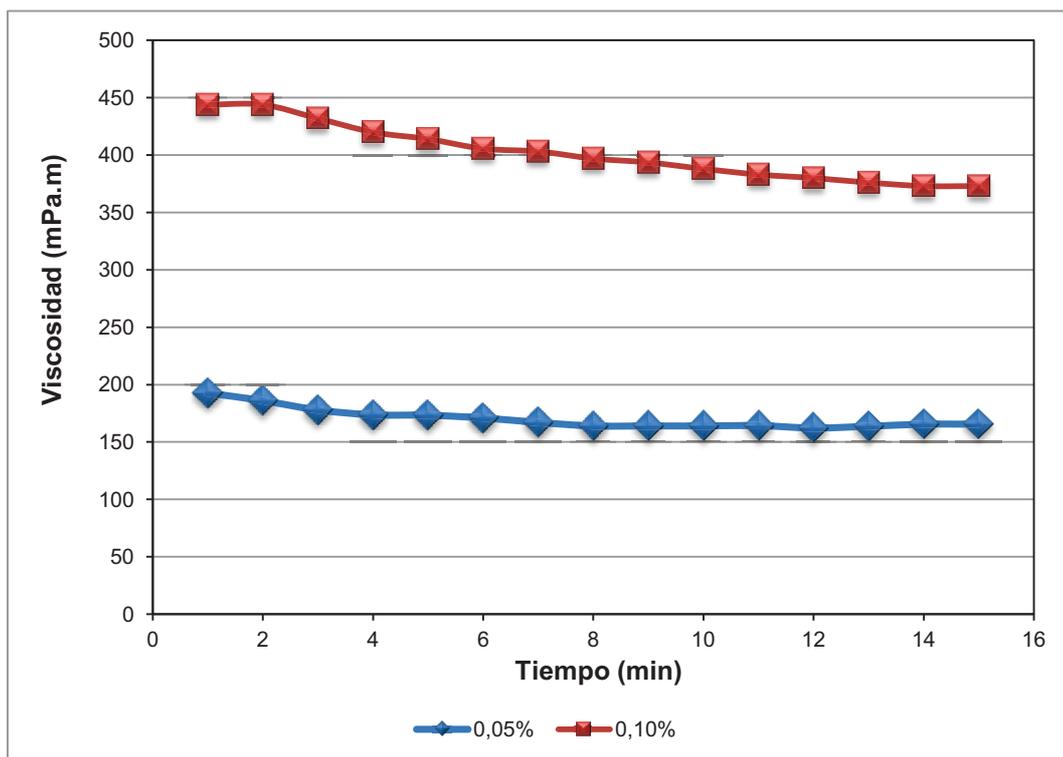
### 3.2.3.2 Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 100 rpm

#### Suspensiones SC1 y SC2

En la Tabla 3.13 y en la Figura 3.11 se presentan los resultados de variación de la viscosidad en función del tiempo de las suspensiones con 0,05 % y 0,10 % de carboximetilcelulosa a velocidad de corte de 100 rpm. Los datos registrados se presentan en el Anexo III en las Tablas AIII.5.y AIII.6, respectivamente.

**Tabla 3.13.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm

Suspensión	SC1	SC2
Tiempo (min)	Viscosidad (mPa·s)	Viscosidad (mPa·s)
1	192,6	444,0
2	186,0	444,0
3	177,9	432,0
4	173,7	420,0
5	173,4	414,0
6	171,0	405,6
7	167,1	403,2
8	164,1	397,0
9	164,1	393,6
10	164,1	388,0
11	164,4	383,0
12	162,3	380,0
13	163,8	376,0
14	165,6	373,0
15	165,6	373,0



**Figura 3.11.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1 y SC2 a velocidad de corte de 100 rpm

La Figura 3.11 muestra que a 100 rpm la viscosidad de la suspensión SC1 disminuyó ligeramente hasta los 7 min luego permaneció prácticamente constante e igual a  $164,6 \pm 1,4$  mPa·s. La viscosidad de la suspensión SC2 disminuyó con el tiempo desde 444 mPa·s hasta 373 mPa·s, es decir, a altas velocidades de corte también mantuvo su comportamiento tixotrópico.

Se concluye que a altas velocidades de corte el comportamiento de las suspensiones con 0,05 % de carboximetilcelulosa fue casi independiente del tiempo. Mientras que a 0,10 % presentaron el comportamiento típico de un fluido tixotrópico, posiblemente debido a que, a altas velocidades de corte, predominó la interacción de las partículas con el fluido, creando flujos que afectan a las partículas vecinas, provocando así, que la viscosidad disminuya con el tiempo, dicho fenómeno se denomina interacción hidrodinámica (Moreno, 2005, p. 262).

### 3.2.4 VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON CLORURO DE AMONIO

Se determinó la viscosidad de las suspensiones SC1 y SC2 con concentraciones de 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. La composición de las suspensiones con cloruro de amonio y carboximetilcelulosa se presenta en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14.** Composición de las suspensiones con cloruro de amonio, relación S/L 53:47

Suspensión	Cloruro de amonio (%)	Carboximetilcelulosa (%)	Tripolifosfato de sodio (%)	Bentonita (%)	Vidrio (%)
SC1-A	0,1	0,05	0,5	3,0	96,35
SC1-B	0,2	0,05	0,5	3,0	96,25
SC1-C	0,3	0,05	0,5	3,0	96,15
SC1-D	0,5	0,05	0,5	3,0	95,95
SC2-A	0,1	0,10	0,5	3,0	96,30
SC2-B	0,2	0,10	0,5	3,0	96,20
SC2-C	0,3	0,10	0,5	3,0	96,10
SC2-D	0,5	0,10	0,5	3,0	95,90

#### Suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

Se midió la viscosidad de la suspensión SC1 ante la influencia del cloruro de amonio, los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15.** Viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

Parámetros	Suspensión				
	SC1	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D
Cloruro de amonio (%)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5
Velocidad de corte (rpm)	50	50	50	50	50
Esfuerzo cortante (mN·m)	0,021	0,016	0,016	0,021	0,022
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20
Viscosidad (mPa·s)	189,60	143,20	145,60	185,13	196,00

En la Tabla 3.15 se puede apreciar que la viscosidad de la suspensión SC1 disminuyó desde 189,60 hasta 145,6 mPa·s conforme incrementó la concentración de cloruro de amonio hasta 0,2 %, a partir de ésta concentración ocurrió el efecto contrario.

Al comparar los valores de viscosidad de la suspensiones con 0,1 y 0,2 % de cloruro de amonio y considerando una exactitud del 1 % del equipo utilizado, se puede concluir que la viscosidad se mantuvo prácticamente constante.

La disminución de la viscosidad se puede atribuir a las fuerzas de repulsión electrostática generadas entre los iones del cloruro de amonio y el grupo ionizado  $\text{COO}^-$  de la carboximetilcelulosa, las cuales provocaron su encubrimiento y la formación de una estructura menos expandida y, por ende, la disminución de la viscosidad de la suspensión (Benyounes y Benmounah, 2012, p.1794).

En cambio, la viscosidad de las suspensiones con 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio incrementó incluso a un valor mayor al de la suspensión sin cloruro de amonio. Este comportamiento posiblemente se debe a dos efectos:

El primero es el hecho de que a altas concentraciones de sal amónica, las cadenas de carboximetilcelulosa pierden flexibilidad y el tamaño hidrodinámico de la molécula disminuye, produciendo la aglomeración de las cadenas del polímero y por consiguiente el incremento de la viscosidad. (Benyounes y Benmounah, 2012, p. 1794).

El segundo es que al incrementar la cantidad de cloruro de amonio, el pH de la suspensión disminuyó. Si el pH de la suspensión es menor que 4 se forma ácido carboximetilcelulósico, el cual es insoluble y floclula dando como resultado el incremento de la viscosidad (Rowe et al, 2009, p. 120).

Los resultados de la Tabla 3.15 permiten concluir que la viscosidad de la suspensión SC1 disminuye aproximadamente 1,3 veces con 0,2 % de cloruro de amonio, a mayores concentraciones ocurre el efecto contrario.

### Suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

En la Tabla 3.16 se presentan los resultados de viscosidad de la suspensión SC2 con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio.

**Tabla 3.16.** Viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

Parámetros	Suspensión				
	SC2	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
Cloruro de amonio (%)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5
Velocidad de corte (rpm)	50	50	50	50	50
Esfuerzo cortante (mN·m)	0,056	0,036	0,033	0,027	0,028
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20
Viscosidad (mPa·s)	500,80	319,40	292,00	241,80	247,00

La Tabla 3.16 permite ver que la viscosidad de la suspensión SC2 disminuyó conforme incrementó la concentración de cloruro de amonio hasta 0,3 %, a partir de dicha concentración la viscosidad empezó a incrementar.

Este incremento posiblemente se debió al hecho de que a mayor concentración de carboximetilcelulosa, mayor es la cantidad de grupos  $\text{COO}^-$  en la suspensión; por lo tanto, para disminuir la estructura del polímero y lograr la disminución de la viscosidad fue necesario mayor concentración de sal amónica.

Del mismo modo la aglomeración de las cadenas de carboximetilcelulosa y el incremento de la viscosidad, se produjo a mayor concentración de cloruro de amonio (Benyounes y Benmounah, 2012, p. 1794).

Con base en estos resultados se puede concluir que la viscosidad de la suspensión SC2 disminuyó prácticamente a la mitad con 0,3 % de cloruro de amonio, a mayores concentraciones la viscosidad incrementó.

### 3.2.5 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE EN LAS SUSPENSIONES CON CLORURO DE AMONIO

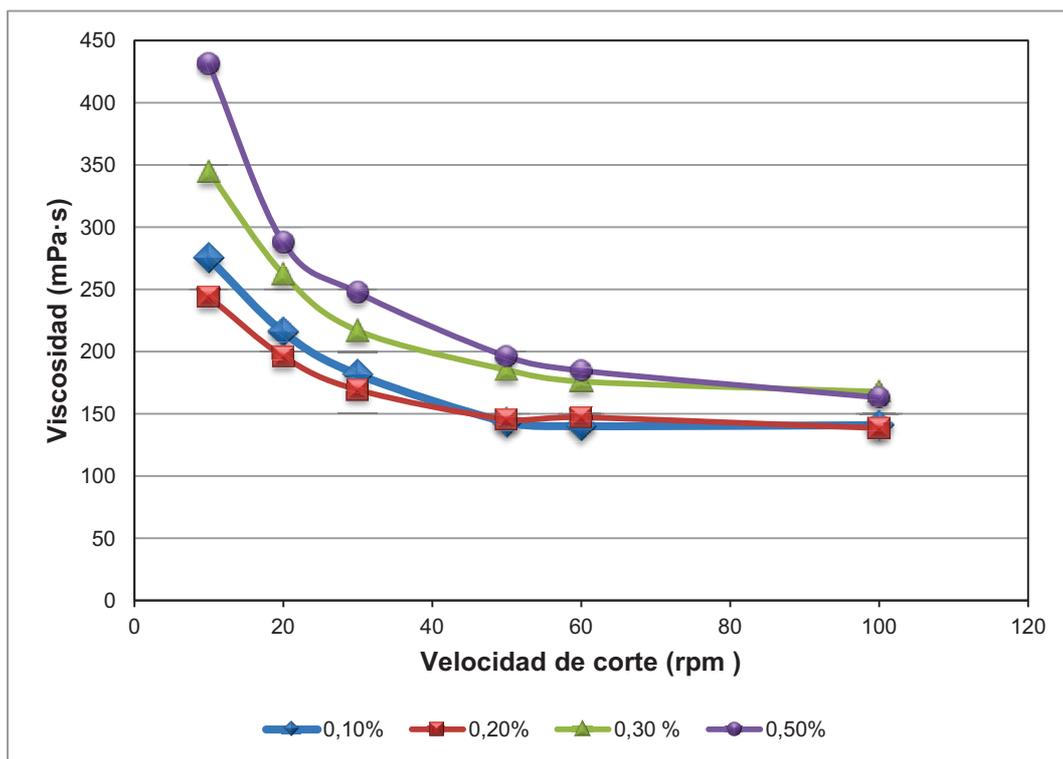
#### 3.2.5.1 Viscosidad en función de la velocidad de corte

#### Suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

La Tabla 3.17 y la Figura 3.12 presentan la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1 con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.17.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con la velocidad de corte

Suspensión	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D
<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>			
10	274,8	244,0	344,2	431,2
20	215,6	196,0	262,2	287,7
30	181,5	169,3	216,7	247,3
50	143,2	145,6	185,1	196,0
60	140,0	147,2	175,8	184,7
100	140,8	138,5	167,6	163,1



**Figura 3.12.** Curvas de viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

Como se observa en la Figura 3.12, la suspensión SC1 mantuvo su comportamiento pseudoplástico conforme incrementó la concentración de cloruro de amonio. A velocidades de corte de 10 rpm, la disminución de la viscosidad a diferentes concentraciones de cloruro de amonio fue mucho más evidente que a velocidades de corte de 100 rpm.

Posiblemente se puede atribuir este comportamiento a la presencia de fuerzas iónicas predominantes sobre la viscosidad a bajas velocidades de corte; mientras que a altas velocidades domina la interacción hidrodinámica, que se refiere a la interacción de las partículas con el fluido, creando flujos que afectan a las partículas vecinas, provocando así, que la viscosidad disminuya con el tiempo (Moreno, 2005, p. 262).

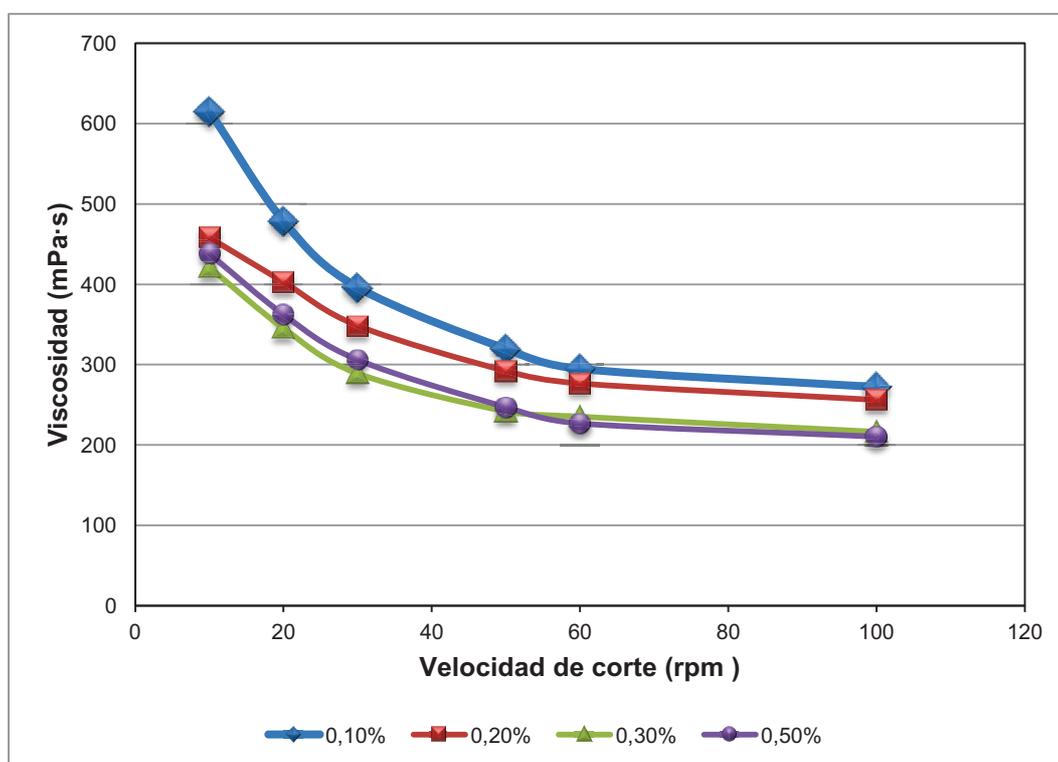
Los resultados obtenidos permiten concluir que la presencia de cloruro de amonio en la suspensión SC1 no influyó en su comportamiento reológico, pues la viscosidad disminuyó conforme incrementó la velocidad de corte, comportamiento característico de un fluido pseudoplástico.

### Suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

En la Tabla 3.18 y en la Figura 3.13 se muestran los resultados de variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2 con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.18.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con la velocidad de corte

Suspensión	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)			
10	615,0	458,0	421,0	438,0
20	478,3	402,7	345,3	362,3
30	396,0	348,3	289,0	306,0
50	319,4	292,0	241,8	247,0
60	294,7	276,5	235,2	226,8
100	272,1	256,0	216,3	210,4



**Figura 3.13.** Curvas de viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

En la Figura 3.13, se puede observar que el comportamiento pseudoplástico de la suspensión SC2 no varió a medida que incrementó la cantidad de cloruro de amonio. Se puede apreciar claramente el efecto del cloruro de amonio en la disminución de la viscosidad; sin embargo, a partir de 0,3 % la tendencia de la curva de viscosidad prácticamente no varió. Se concluye que la suspensión SC2 a diferentes concentraciones de cloruro de amonio mantuvo su comportamiento pseudoplástico es decir la viscosidad disminuyó con el incremento de la velocidad de corte.

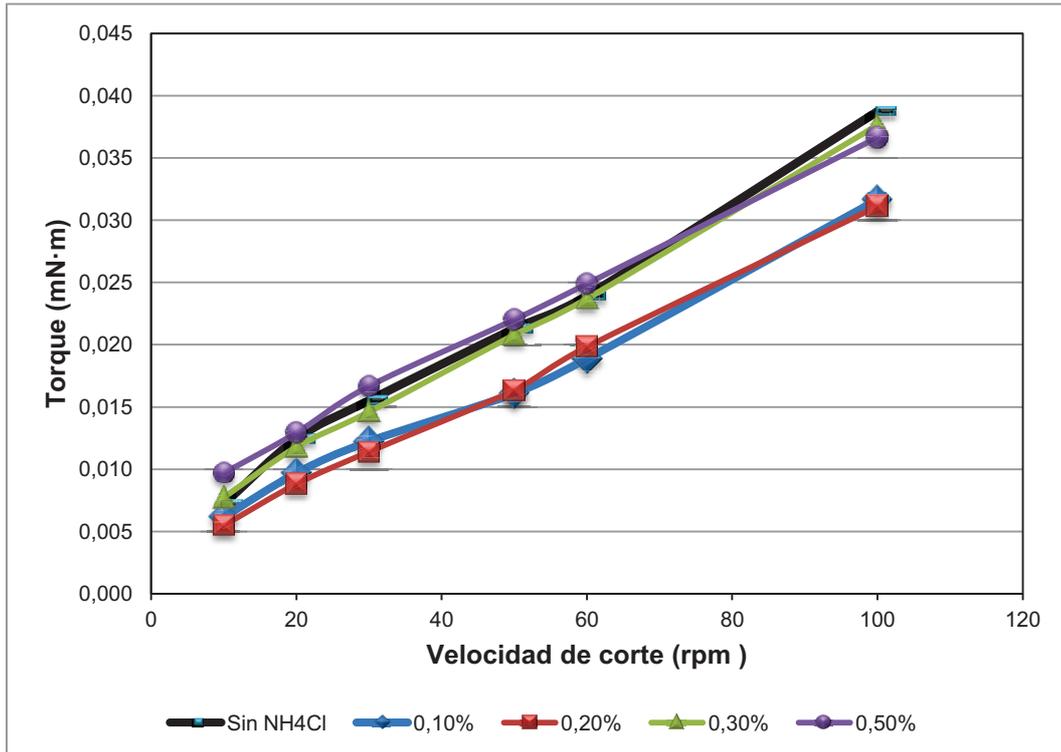
### 3.2.5.2 Torque en función de la velocidad de corte

#### Suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

En la Tabla 3.19 y en la Figura 3.14 se muestra la variación del torque con la velocidad de corte de la suspensión SC1 con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.19.** Variación del torque de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con la velocidad de corte

Suspensión	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D
Velocidad de corte (rpm)	Torque (mN·m)			
10	0,006	0,005	0,008	0,010
20	0,010	0,009	0,012	0,013
30	0,012	0,011	0,015	0,017
50	0,016	0,016	0,021	0,022
60	0,019	0,020	0,024	0,025
100	0,032	0,031	0,038	0,037



**Figura 3.14.** Curvas de flujo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

En la Figura 3.14 se presenta las curvas de flujo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D, al comparar con la Figura 1.5 se puede observar que el comportamiento de las suspensiones fue aproximadamente similar al de un fluido pseudoplástico (Chhabra y Richardson, 1999, p. 7).

Se puede apreciar que las suspensiones con 0,1 % y 0,2 % de cloruro de amonio presentaron un comportamiento semejante entre sí, mientras que las suspensiones con 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio adquirieron un comportamiento similar al de la suspensión sin cloruro de amonio.

Se ajustaron las curvas de flujo al modelo matemático Ley de Potencia (ecuación 1.2) y los valores de índice de consistencia ( $k$ ) e índice de fluidez ( $n$ ) obtenidos, se presentan en la Tabla 3.20.

**Tabla 3.20.** Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	Cloruro de amonio (%)	k	n	Coefficiente de correlación
SC1-A	0,05	0,1	0,0013	0,6767	0,9830
SC1-B	0,05	0,2	0,0009	0,7432	0,9938
SC1-C	0,05	0,3	0,0016	0,6717	0,9901
SC1-D	0,05	0,5	0,0024	0,5741	0,9878

En la Tabla 3.20 se puede notar que los valores de índice de fluidez (n) de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D fueron menores que uno, por lo tanto se concluye que la presencia de cloruro de amonio no provocó un cambio considerable en el comportamiento pseudoplástico de la suspensión SC1.

Los coeficientes de correlación fueron mayores que 0,98 por lo tanto, el modelo de Ley de Potencia fue adecuado para explicar el comportamiento reológico de las suspensiones.

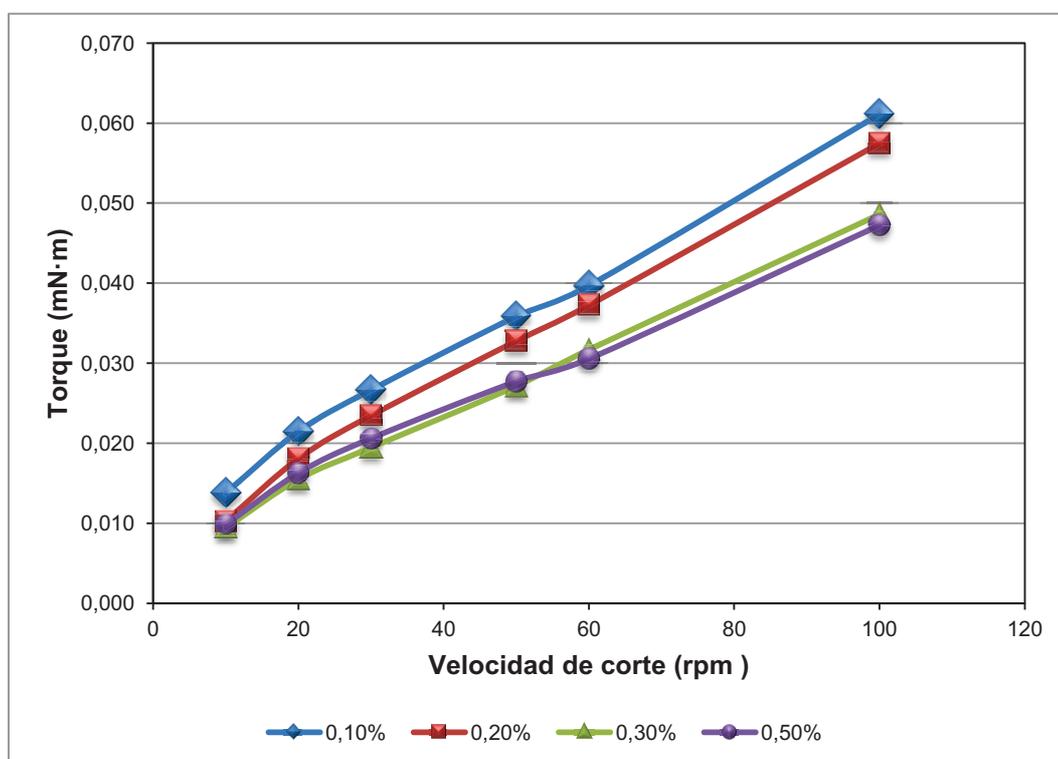
El índice de consistencia (k) de la suspensión SC1 disminuyó con 0,2 % de cloruro de amonio, a mayores concentraciones incrementó. Por lo tanto, se concluye que la adición cloruro de amonio dio lugar a la aparición de fuerzas de repulsión electrostáticas que provocaron la disminución de la viscosidad a concentraciones entre 0,1 y 0,2 % de cloruro de amonio y su efecto contrario a concentraciones mayores a 0,3 % (Benyounes y Benmounah, 2012, p.1795).

### **Suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D**

La Tabla 3.21 y en la Figura 3.15 se presentan los resultados de variación del torque en función de la velocidad de corte de la suspensión SC2 con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.21.** Variación del torque de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con la velocidad de corte

Suspensión	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>			
10	0,014	0,010	0,009	0,010
20	0,021	0,018	0,016	0,016
30	0,027	0,023	0,019	0,021
50	0,036	0,033	0,027	0,028
60	0,040	0,037	0,032	0,031
100	0,061	0,057	0,049	0,047



**Figura 3.15.** Curvas de flujo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

En la Figura 3.15 se muestran las curvas de flujo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D, el comportamiento de las mismas, corresponde a un fluido pseudoplástico, en comparación con la Figura 1.5. Se observa que las curvas de flujo de las suspensiones a concentraciones mayores que 0,3 % de cloruro de amonio, prácticamente fueron iguales.

Los valores de índice de consistencia (k) y de fluidez (n) de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D, obtenidos con el modelo de Ley de Potencia se presentan en la Tabla 3.22.

**Tabla 3.22.** Parámetros de la Ley de Potencia de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	Cloruro de amonio (%)	k	n	Coefficiente de correlación
SC2-A	0,10	0,1	0,0032	0,6241	0,9936
SC2-B	0,10	0,2	0,0020	0,7269	0,9973
SC2-C	0,10	0,3	0,0019	0,6935	0,9957
SC2-D	0,10	0,5	0,0022	0,6567	0,9949

En la Tabla 3.22 se observa que los coeficientes de correlación de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D fueron mayores que 0,99 por lo tanto las curvas de flujo de las suspensiones se ajustan al modelo Ley de Potencia (ecuación 1.2).

Los valores de índice de fluidez (n) fueron menores que uno; por lo tanto, la suspensión SC2 mantuvo su comportamiento pseudoplástico ante la presencia de cloruro de amonio entre 0,1 y 0,5 %.

El índice de consistencia (k) de la suspensión SC2 disminuyó conforme incrementó la concentración de cloruro de amonio hasta 0,3 %, comprobando la disminución de la viscosidad ante la presencia de fuerzas electrostáticas de repulsión; luego el índice de consistencia empezó a incrementar de igual manera ocurrió con la viscosidad, posiblemente debido a los efectos explicados con anterioridad en la sección 3.2.4.

### 3.2.6 EFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA VISCOSIDAD DE LAS SUSPENSIONES CON CLORURO DE AMONIO

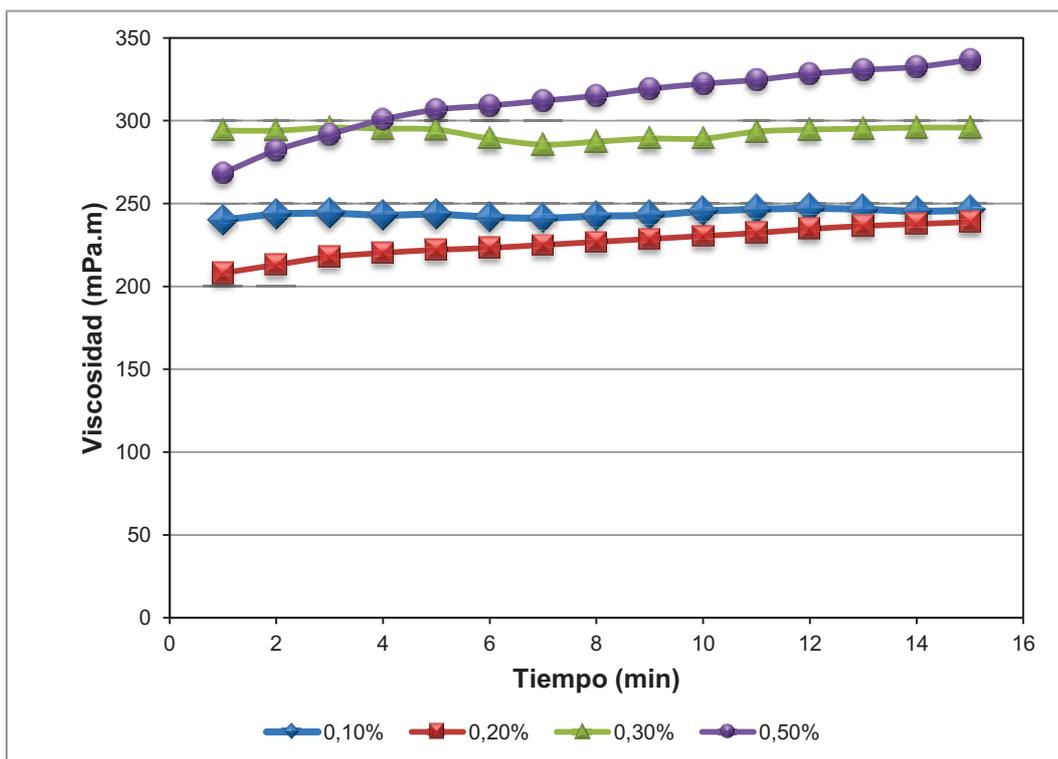
#### 3.2.6.1 Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 10 rpm

#### Suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

En la Tabla 3.23 y en la Figura 3.16 se presentan los resultados de variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1 con 0,1%, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.23.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm

Suspensión	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D
Tiempo (min)	Viscosidad (mPa·s)			
1	240,0	208,0	294,0	268,2
2	243,6	213,0	294,0	282,0
3	244,2	217,8	295,8	291,6
4	243,0	220,2	295,2	300,6
5	243,6	222,0	294,6	306,6
6	241,8	223,2	289,2	309,0
7	241,2	225,0	285,6	312,0
8	242,4	226,8	287,4	315,0
9	243,0	228,6	289,2	319,2
10	245,4	230,4	289,2	322,2
11	246,6	232,2	293,4	324,6
12	247,2	234,6	294,6	328,2
13	246,6	236,4	295,2	330,6
14	245,4	237,6	295,8	332,4
15	246,0	238,8	295,8	336,6



**Figura 3.16.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D a velocidad de corte 10 rpm

Como se observa en la Figura 3.16, a 10 rpm la viscosidad de la suspensión SC1-A con 0,1 % de cloruro de amonio se mantuvo constante con el tiempo y fue igual a  $244,0 \pm 2,2$  mPa·s.

En cambio, para las suspensiones con concentraciones mayores que 0,2 %, se observó que la viscosidad incrementó con el tiempo, siendo mucho más evidente para la suspensión SC1-D con 0,5 % de cloruro de amonio.

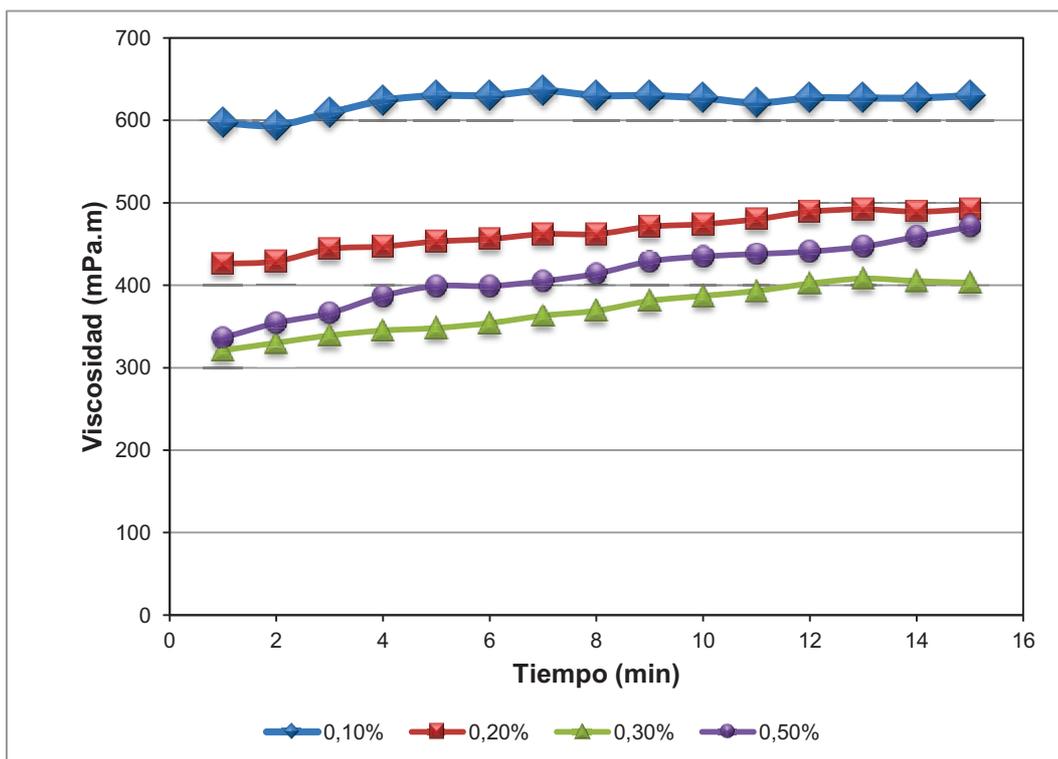
Los resultados permitieron concluir que, a bajas velocidades de corte, la viscosidad de la suspensión SC1 presentó un comportamiento independiente del tiempo ante la presencia de 0,1 % de cloruro de amonio, sin embargo, a partir de 0,2 % la suspensión adquirió un comportamiento reopéctico. Este comportamiento posiblemente se debe a que, ante la presencia del cloruro de amonio, las cadenas del CMC perdieron flexibilidad y se aglomeraron provocando el incremento de la viscosidad (Benyounes y Benmounah, 2012, p. 1794).

### Suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

La Tabla 3.24 y la Figura 3.17 muestran los resultados del estudio de la variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2 a diferentes concentraciones de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.24.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con el tiempo a velocidad de corte 10 rpm

Suspensión	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
Tiempo (min)	Viscosidad (mPa·s)			
1	597,0	426,0	321,0	336,0
2	594,0	429,0	330,0	354,0
3	609,0	444,0	339,0	366,0
4	624,0	447,0	345,0	387,0
5	630,0	453,0	348,0	399,0
6	630,0	456,0	354,0	399,0
7	636,0	462,0	363,0	405,0
8	630,0	462,0	369,0	414,0
9	630,0	471,0	381,0	429,0
10	627,0	474,0	387,0	435,0
11	621,0	480,0	393,0	438,0
12	627,0	489,0	402,0	441,0
13	627,0	492,0	408,0	447,0
14	627,0	489,0	405,0	459,0
15	630,0	492,0	403,0	471,0



**Figura 3.17.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D a velocidad de corte 10 rpm

La Figura 3.17 muestra que a 10 rpm la viscosidad de la suspensión SC2-A con 0,1 % de cloruro de amonio incrementó ligeramente los primeros 5 min a partir de este tiempo la viscosidad prácticamente se mantuvo constante y su valor fue de  $628,6 \pm 3,6$  mPa·s.

Se observa que la viscosidad de las suspensiones con concentraciones mayores a 0,2 % de cloruro de amonio incrementó conforme transcurrió el tiempo, dicha conducta fue más prominente con 0,5 %.

Por lo tanto, se concluye que a bajas velocidades de corte, la presencia de cloruro de amonio, en la suspensión SC2, intervino de forma tal que hasta 0,1 %, la viscosidad se volvió independiente del tiempo, mientras que a concentraciones mayores a 0,2 % adquirió un comportamiento reopéctico, dicho efecto se puede atribuir a la aglomeración de las cadenas de carboximetilcelulosa ante la presencia de cloruro de amonio, dando como resultado el incremento de la viscosidad.

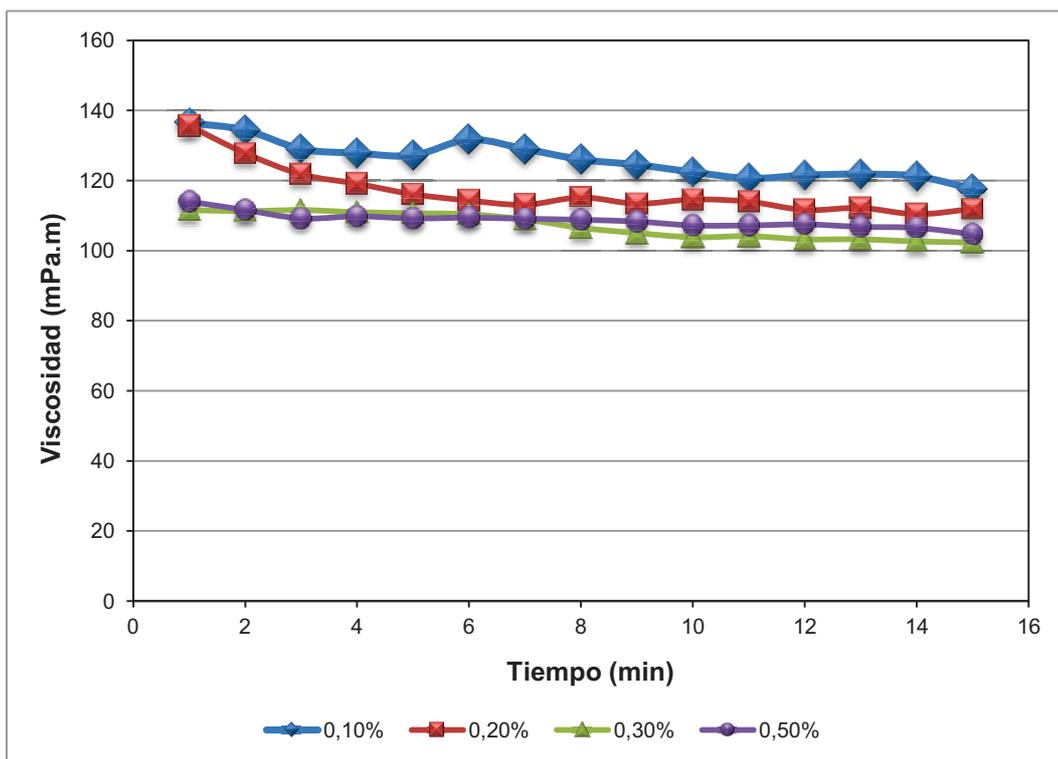
### 3.2.6.2 Viscosidad en función del tiempo a velocidad de corte 100 rpm

#### Suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D

La Tabla 3.25 y la Figura 3.18 muestran el comportamiento de la viscosidad en función del tiempo de la suspensión SC1 con diferentes concentraciones de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.25.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm

Suspensión	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D
Tiempo (min)	Viscosidad (mPa·s)			
1	136,5	135,6	111,6	114,0
2	134,4	127,8	111,3	111,6
3	129,0	121,8	111,6	109,2
4	127,8	119,1	111,0	109,8
5	127,2	116,1	110,7	109,2
6	131,7	114,3	110,4	109,4
7	129,0	113,1	108,9	109,1
8	126,0	115,2	106,5	108,8
9	124,5	113,4	105,0	108,3
10	122,4	114,6	103,8	107,2
11	120,6	114,0	104,1	107,2
12	121,5	111,6	103,2	107,5
13	121,8	112,2	103,2	106,8
14	121,2	110,4	102,6	106,5
15	117,6	111,9	102,3	104,7



**Figura 3.18.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D a velocidad de corte 100 rpm

En la Figura 3,18 se puede apreciar que a 100 rpm las viscosidades de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D con 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % y 0,5 % de cloruro de amonio, respectivamente, disminuyeron con el tiempo.

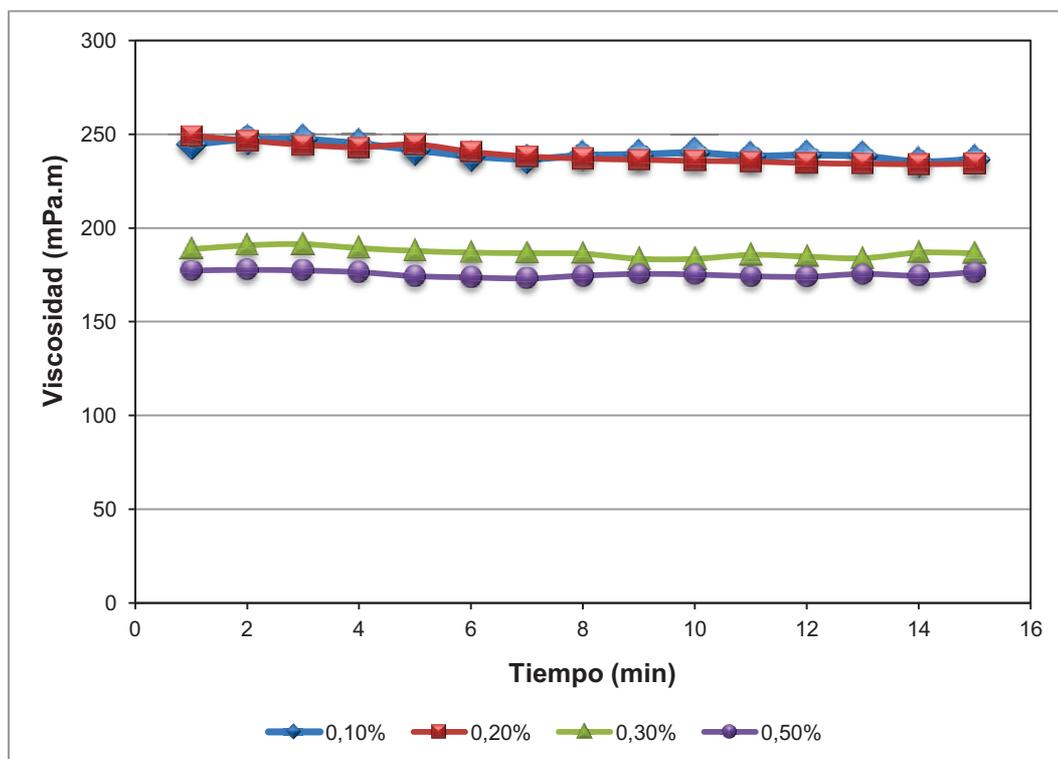
Se puede concluir que a 100 rpm, la suspensión SC1 con concentraciones de cloruro de amonio entre 0,1 % y 0,5 %, presentó un comportamiento tixotrópico, posiblemente debido a la predominación de la interacción hidrodinámica a altas velocidades de corte, de modo que la viscosidad de las suspensiones disminuyó con el tiempo (Moreno, 2005, p. 262).

### Suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

La Tabla 3.26 y Figura 3.19 muestran los resultados obtenidos a partir de la variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2 con diferentes concentraciones de cloruro de amonio. Los datos registrados se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 3.26.** Variación de la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D con el tiempo a velocidad de corte 100 rpm

Suspensión	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
Tiempo (min)	Viscosidad (mPa·s)			
1	244,5	249,0	188,7	177,3
2	247,2	246,6	190,8	177,6
3	247,2	244,2	191,4	177,3
4	244,8	243,0	189,3	176,4
5	241,5	244,5	187,8	174,3
6	238,2	240,6	186,9	173,7
7	236,7	238,2	186,6	173,1
8	238,5	237,0	186,3	174,6
9	239,1	236,4	183,6	175,5
10	240,0	235,8	183,6	175,2
11	238,2	235,5	185,7	174,3
12	238,8	234,6	184,8	174,0
13	238,2	234,3	183,9	175,5
14	235,2	234,0	186,9	174,6
15	236,4	234,3	186,6	176,4



**Figura 3.19.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D a velocidad de corte de 100 rpm

En la Figura 3.19 es posible notar que a 100 rpm la viscosidad de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D prácticamente se mantuvieron constantes con el tiempo y sus valores respectivamente fueron:  $240,3 \pm 3,9$  mPa·s,  $239,2 \pm 5,0$  mPa·s,  $186,9 \pm 2,4$  mPa·s y  $175,3 \pm 1,4$  mPa·s.

En conclusión, a 100 rpm, la presencia de cloruro de amonio en concentraciones entre 0,1 y 0,5 % influyó en la viscosidad de la suspensión SC1 de modo que se tornó independiente de tiempo. Posiblemente se dio este comportamiento debido a que en la suspensión con 0,10 % de carboximetilcelulosa, la mayoría de los sitios aniónicos de la carboximetilcelulosa estuvieron ocupados por cationes de  $\text{NH}_4^+$ , de modo que la suspensión se mantuvo estable, y por ende la viscosidad no varió no con el tiempo (Benyounes y Benmounah, 2012, p.1794) .

### **3.2.7 INFLUENCIA DEL CLORURO DE AMONIO EN LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE LAS SUSPENSIONES**

Se determinó la viscosidad cinemática de las suspensiones SC1 y SC2 y la influencia del cloruro de amonio a concentraciones entre 0,1 y 0,5 % para cada caso. Los segundos de viscosidad de las suspensiones se midieron en la copa Saybolt y luego se transformaron en viscosidad cinemática.

Se tomó como referencia la viscosidad de los esmaltes porcelánicos de la empresa Franz Viegner, cuyo valor está entre 0,85 y 0,91 St para esmaltes porcelánicos aplicados por aspersion (Verdezoto, 2009, p. 56).

#### **3.2.7.1 Viscosidad cinemática de las suspensiones SC1, SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D**

En la Tabla 3.27 se presentan los resultados de viscosidad cinemática de la suspensión SC1 y con diferentes concentraciones de cloruro de amonio.

**Tabla 3.27.** Efecto del cloruro de amonio en la viscosidad cinemática de la suspensión SC1

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	Cloruro de Amonio (%)	Rango de viscosidad (St)	Viscosidad Cinemática (St)	Observaciones
SC1	0,05	0,0	0,85-0,91	0,73	Bajo el Rango
SC1-A	0,05	0,1		0,49	Bajo el Rango
SC1-B	0,05	0,2		0,46	Bajo el Rango
SC1-C	0,05	0,3		0,44	Bajo el Rango
SC1-D	0,05	0,5		0,39	Bajo el Rango

La Tabla 3.27 permite apreciar que la viscosidad cinemática de la suspensión con 0,05 % de carboximetilcelulosa disminuyó conforme se incrementó la cantidad de cloruro de amonio. Los valores expuestos no definen la viscosidad de las suspensiones, debido a que las medidas de viscosidad no son muy precisas, y no debería ser usado en fluidos No Newtonianos (Moreno, 2005, p. 133); sin embargo, los resultados obtenidos sirvieron de referencia para seleccionar aquellas que sean aptas para su aplicación por aspersion.

De acuerdo con el rango de viscosidad cinemática de referencia para esmaltes porcelánicos, se observa que ninguna de las suspensiones estuvieron dentro del rango, sus valores están por debajo. Solamente la suspensión SC1 sin cloruro de amonio con 0,05 % de carboximetilcelulosa registró una viscosidad ligeramente cercana a 0,85 St.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que para adecuar la viscosidad de la suspensión SC1 no fue necesario agregar cloruro de amonio a su composición. Solamente con 0,05 % de carboximetilcelulosa la viscosidad se encuentra cercana a los valores de referencia para esmaltes porcelánicos aplicados por aspersion.

### 3.2.7.2 Viscosidad cinemática de las suspensiones SC2, SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D

En la Tabla 3.28 se muestran los resultados de viscosidad cinemática de la suspensión SC2 y con diferentes concentraciones de cloruro de amonio

**Tabla 3.28.** Efecto del cloruro de amonio en la viscosidad cinemática de la suspensión SC2

Suspensión	Carboximetilcelulosa (%)	Cloruro de Amonio (%)	Rango de viscosidad (St)	Viscosidad Cinemática (St)	Observaciones
SC2	0,10	0,0	0,85-0,91	1,40	Sobre el Rango
SC2-A	0,10	0,1		0,94	Sobre el Rango
SC2-B	0,10	0,2		0,89	Dentro del Rango
SC2-C	0,10	0,3		0,65	Bajo el Rango
SC2-D	0,10	0,5		0,62	Bajo el Rango

Como se observa en la Tabla 3.28, conforme incrementó la concentración de cloruro de amonio la viscosidad cinemática de la suspensión con 0,1 % de carboximetilcelulosa disminuyó desde 1,40 St hasta 0,62 St.

Al comparar los valores de viscosidad de las suspensiones SC2 y SC1, se nota el efecto espesante de la carboximetilcelulosa, por el incremento de la viscosidad de 0,73 a 1,40 St. Es decir, incrementó al doble, corroborándose con los resultados obtenidos mediante viscosimetría rotacional.

Cabe notar que la suspensión SC2-A con 0,1 % de cloruro de amonio presentó una viscosidad cinemática ligeramente mayor que 0,91 St.

Con base en los resultados expuestos en la Tabla 3.28 se puede concluir que, la suspensión SC2-B con 0,2 % de cloruro de amonio presentó una viscosidad dentro del rango de referencia para esmaltes porcelánico aplicados por aspersion.

### 3.3 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CARBOXIMETILCELULOSA EN LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE DE ACERO

Con el objeto de determinar la concentración de carboximetilcelulosa que permita obtener la mejor adherencia, se prepararon cuatro suspensiones con relación S/L 53:47 con diferentes concentraciones de carboximetilcelulosa. Se esmaltaron por aspersion placas de acero de 6x6 cm las cuales se sometieron a ensayos de adherencia. La composición de las suspensiones estudiadas se reportaron en la Tabla 3.10.

En la Tabla 3.29 se pueden observar los resultados de adherencia obtenidos a partir de las suspensiones con 0,05 %, 0,10 %, 0,15 % y 0,30 % de carboximetilcelulosa. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se encuentran en el Anexo V.

**Tabla 3.29.** Efecto de la carboximetilcelulosa en la adherencia entre el esmalte y la superficie de acero

Suspensión	CMC (%)	Adherencia (%)
SC1	0,05	62,07
SC2	0,10	70,21
SC3	0,15	72,84
SC4	0,30	80,58

La Tabla 3.29 permite observar que conforme aumentó la concentración de carboximetilcelulosa también incrementó la adherencia entre el esmalte porcelánico y la superficie de acero, confirmando así su efecto ligante.

La suspensión SC1 presentó el menor porcentaje de adherencia e igual a 62,07 %; en cambio, las suspensiones SC2 y SC3 presentaron una adherencia muy parecida alrededor del 70 %, siendo para ambos casos un valor aceptable.

Como era de esperarse la suspensión SC4 con 0,3 % de carboximetilcelulosa alcanzó la mejor adherencia, sin embargo dicha concentración no es apta para la aplicación por aspersion debido a que su viscosidad fue igual a 6 240 mPa·s, valor excesivamente alto en comparación con el recomendado por bibliografía (2 000 mPa·s) para su aplicación por aspersion (Uniovi, 2006, p. 45).

Los resultados obtenidos permitieron concluir que al duplicar la concentración de carboximetilcelulosa desde 0,05 % hasta 0,10 % la adherencia entre el esmalte y la superficie de acero incrementó un 8 %, al triplicarla mejoró un 11 % y al sextuplicarla se optimizó un 18 %.

En la Tabla 3.30 se presentan las placas de acero esmaltadas con las suspensiones de estudio y la apariencia de las mismas antes y después del ensayo de adherencia.

**Tabla 3.30.** Placas de acero esmaltadas con las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4 sometidas al ensayo de adherencia

Suspensión	Antes del ensayo	Después del ensayo
SC1		
SC2		
SC3		
SC4		

La Tabla 3.30 permite observar la acción ligante que ejerció la carboximetilcelulosa entre el esmalte porcelánico en crudo y las pieza de acero. A excepción de la placa cubierta con el esmalte SC1, todas las placas presentaron una buena adherencia, lo cual se comprobó mediante la determinación de la resistencia a la manipulación de la pieza.

### 3.4 EVALUACIÓN DE LA CAPTACIÓN DEL ESMALTE SOBRE PIEZAS DE ACERO

Con el fin de evaluar la captación del esmalte sobre las piezas de acero, se aplicaron por aspersión las suspensiones SC1, SC2-A y SC2; debido a que presentaron la mejor estabilidad, viscosidad y adherencia.

Se aplicaron cuatro capas de esmalte sobre las placas de acero y se determinó la captación y el espesor de cada capa.

La captación y el espesor de los esmaltes ensayados se compararon con los datos bibliográficos de captación y espesor de esmaltes alúmbicos aplicados por aspersión, cuyos valores respectivamente son  $5 \text{ g/dm}^2$  y entre 0,15 a 0,50 mm (Vielhaber, 2002, p. 112; Espinoza et al, 2006, p. 26).

#### 3.4.1 CAPTACIÓN DE LAS SUSPENSIONES SC1, SC2-A Y SC2-B

Los resultados de captación de los esmalte SC1, SC2-A y SC2-B se pueden observar en la Tabla 3.31. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se reportan en el Anexo VI.

**Tabla 3.31.** Captación de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B en función del número de aplicaciones

No. Aplicaciones	Captación ( $\text{g/dm}^2$ )		
	Suspensión		
	SC1	SC2-A	SC2 – B
1	0,5046	0,4913	0,5299
2	2,1291	2,2319	2,2431
3	4,0096	3,6041	4,1147
4	5,2173	6,0933	7,5495

Como se muestra en la Tabla 3.31, la primera capa de esmalte SC1 presentó una captación igual a  $0,5046 \text{ g/dm}^2$ , al aplicar la segunda capa la captación incrementó cuatro veces, con la tercera capa aumentó ocho veces y con la cuarta capa la captación aumentó diez veces.

El esmalte SC2-A exhibió una captación igual a  $0,4913 \text{ g/dm}^2$  en la primera capa, al aplicar la segunda capa la captación fue aproximadamente cinco veces mayor, la tercera capa aumentó siete veces y la cuarta presentó una captación doce veces mayor al valor inicial.

Finalmente la captación del esmalte SC2-B en la primera capa fue igual a  $0,5299 \text{ g/dm}^2$ , la captación de la segunda capa fue cinco veces mayor, con la tercera incrementó aproximadamente ocho veces y la cuarta aumentó hasta catorce veces su valor inicial.

Posiblemente no se observó una captación uniforme, para las suspensiones SC1, SC2-A y SC2-B, debido a que el sistema de esmaltado no posee un sistema de dosificación exacta del esmalte, sino que influye de manera directa la experiencia del esmaltador.

Con base en los resultados obtenidos se pudo concluir que, la captación de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2 - B fue proporcional al número de capas aplicadas, y para alcanzar un valor de captación alrededor de  $5 \text{ g/dm}^2$ , el número óptimo de aplicaciones fue 4.

### **3.4.2 ESPESOR DE LAS CAPAS DE ESMALTE SC1, SC2-A Y SC2-B**

En la Tabla 3.32, se pueden observar los resultados de espesor de las capas de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B. El ejemplo de cálculo y los datos registrados se reportan en el Anexo VI.

**Tabla 3.32.** Espesor de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B en función del número de aplicaciones

No. Aplicaciones	Espesor (mm)		
	Suspensión		
	SC1	SC2-A	SC2 – B
1	0,0508	0,0306	0,0593
2	0,2286	0,2084	0,2879
3	0,3302	0,2846	0,3387
4	0,5842	0,6402	0,7197

De acuerdo a la Tabla 3.32, el espesor de la primera capa del esmalte SC1 fue 0,0508 mm, la segunda capa incrementó su valor aproximadamente cinco veces, la tercera capa aumentó siete veces y la cuarta fue doce veces mayor.

La primera capa del esmalte SC2-A presentó un espesor igual a 0,0306 mm, la segunda capa fue siete veces mayor, la tercera capa aumentó nueve veces y el espesor de la cuarta capa incrementó hasta veinte veces su valor inicial.

El esmalte SC2 presentó un espesor igual a 0,0593 mm en su primera capa dicho valor incrementó aproximadamente cinco veces en la segunda capa, seis veces en la tercera capa y doce veces en la cuarta capa.

En conclusión, el espesor de los esmaltes SC1, SC2-A y SC2 - B fue proporcional al número de capas aplicadas. De acuerdo al dato bibliográfico de espesores para alcanzar un espesor de aproximadamente 5 mm, fue necesario aplicar 4 capas de esmalte.

### **3.4.3 PROPIEDADES SUPERFICIALES DE LAS PLACAS DE ACERO CUBIERTAS POR LOS ESMALTES SC1, SC2-A Y SC2-B**

Se esmaltaron por aspersión placas de acero de 6x6 cm<sup>2</sup>, con los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B, y se analizaron las propiedades superficiales como: cobertura,

aspecto de la superficie, presencia de defectos, adherencia y espesor, que presentaron tras la cuarta aplicación. En la Tabla 3.33 se pueden observar las placas esmaltadas con sus respectivas características.

**Tabla 3.33.** Placas de acero cubiertas con cuatro capas con los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B

Suspensión	Observaciones		Pieza esmaltada
SC1	Cobertura:	Total	
	Superficie al tacto:	Rugosa	
	Defectos:	Burbujas internas, burbujas estalladas y grumos	
	Adherencia:	62,07 %	
	Captación:	5,22 g/dm <sup>2</sup>	
	Espesor:	0,58 mm	
SC2-A	Cobertura:	Total	
	Superficie al tacto:	Parcialmente Lisa	
	Defectos:	Burbujas internas sectorizadas	
	Adherencia:	70,21 %	
	Captación:	6,09 g/dm <sup>2</sup>	
	Espesor:	0,64 mm	
SC2-B	Cobertura:	Total	
	Superficie al tacto:	Lisa	
	Defectos:	No presenta fallas	
	Adherencia:	70,21 %	
	Captación:	7,55 g/dm <sup>2</sup>	
	Espesor:	0,72 mm	

La Tabla 3.33 permite apreciar, el aspecto final de las placas de acero cubiertas con los esmaltes SC1, SC2-A y SC2-B, correspondientes a la cuarta aplicación.

La placa con esmalte SC1 no presentó buena calidad en la superficie, se observaron defectos como burbujas internas y burbujas estalladas en toda la superficie, espesor no homogéneo. Dichas características se debieron a la baja viscosidad y bajo porcentaje de adherencia que presentó su formulación.

La placa cubierta con el esmalte SC2-A fue buena, presentó superficie lisa, adherencia aceptable y burbujas internas en el centro de la placa. Dicho defecto se debió, entre otras causas, a la inadecuada aplicación más no por problemas en la formulación.

Finalmente, el esmalte SC2-B presentó una superficie muy buena por sus características como superficie lisa, adherencia aceptable, espesor uniforme y sin presencia de fallas.

Se concluye que, la suspensión porcelánica con mejor estabilidad, viscosidad, adherencia y óptimas propiedades superficiales fue la suspensión SC2-B, cuya composición tuvo 0,10 % de carboximetilcelulosa y 0,2 % de cloruro de amonio.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

1. Los ensayos de estabilidad de las suspensiones S2, S3 y S4, con relación S/L 51:49, 53:47 y 55:45, permitieron concluir que: al aumentar la relación S/L mejoró la estabilidad de la suspensión hasta la relación 53:47, luego la estabilidad de la suspensión disminuyó notablemente debido a la cantidad excedida de sólidos en suspensión.
2. Se comprobó la acción defloculante de la carboximetilcelulosa al ser añadida en una concentración igual a 0,1 % en la suspensión S2 con relación sólido – líquido 53:47.
3. Para obtener una estabilidad de la suspensión mayor que el 80 % se debe trabajar con la suspensión S2 cuya relación S/L fue 53:47, y cuya composición fue: 0,1 % de carboximetilcelulosa, 3,0 % de bentonita y 0,5 % de tripolifosfato de sodio.
4. El estudio de la viscosidad de las suspensiones con carboximetilcelulosa permite concluir que el incremento de la viscosidad de las suspensiones es proporcional al aumento de la concentración de carboximetilcelulosa, con 0,1 % la viscosidad aumenta 2,6 veces, con 0,15 % incrementa 40 veces y con 0,30 % incrementa hasta 32 veces.
5. Las suspensiones SC1 y SC2 presentaron una viscosidad menor que 2 000 mPa·s, por ende, fueron aptas para aplicarlas por aspersión, lo que permite decir que, la concentración adecuada de carboximetilcelulosa se encuentra entre 0,05 % y 0,10 %.
6. Las suspensiones SC1 y SC2 cumplieron con el modelo matemático de ley de potencia. Los valores de índice de fluidez fueron 0,7 y 0,5, por tanto, se

comprobó el comportamiento propio de un fluido pseudoplástico. La presencia de 0,2 % de carboximetilcelulosa en la suspensión SC2 causó mayor dependencia de la viscosidad con la velocidad de corte, es decir, a menores valores de índice de fluidez mayor es el comportamiento pseudoplástico.

7. Las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D presentaron un comportamiento reológico propio de un fluido pseudoplástico, de igual manera ocurrió con las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D; por lo tanto, se concluye que, la presencia de cloruro de amonio en las suspensiones SC1 y SC2 no afectó su comportamiento pseudoplástico.
8. El comportamiento reológico de la suspensión se volvió tixotrópico ante la presencia de carboximetilcelulosa en concentraciones mayores e iguales que 0,10 %.
9. La viscosidad de la suspensión SC1 disminuyó 1,3 veces ante la presencia de 0,2 % de cloruro de amonio en su composición, mientras que, a concentraciones mayores e iguales que 0,3 % ocurrió el efecto contrario.
10. La viscosidad de la suspensión SC2 disminuyó prácticamente a la mitad con 0,3 % de cloruro de amonio, sin embargo, a concentraciones mayores e iguales que 0,5 % la viscosidad empezó a incrementar.
11. A 10 rpm, la viscosidad de la suspensión SC1 con 0,1 % de cloruro de amonio fue independiente del tiempo, mientras que, a concentraciones mayores que 0,2 % de cloruro de amonio su comportamiento fue reopéctico.
12. A 100 rpm, la suspensión SC1 con concentraciones de cloruro de amonio entre 0,1 % y 0,5 %, presentó un comportamiento tixotrópico.
13. A 10 rpm, la viscosidad de la suspensión SC2 con 0,1 % de cloruro de amonio fue independiente del tiempo, mientras que, a concentraciones mayores e

iguales que 0,2 % de cloruro de amonio, presentaron un comportamiento reopéctico.

14. A 100 rpm, la presencia de cloruro de amonio en concentraciones entre 0,1 % y 0,5 %, influyó en la viscosidad de la suspensión SC2, de modo que, se tornó independiente de tiempo.

15. La suspensión SC1 mostró una viscosidad cinemática cercana al rango de referencia entre 0,85 St y 0,91 St, por lo tanto, no es necesario añadir cloruro de amonio en su composición.

16. Para adecuar la viscosidad cinemática de la suspensión SC2 dentro del rango de referencia para su aplicación por aspersion, es necesario añadir a su composición entre 0,1 % y 0,2 % de cloruro de amonio.

17. Se determinó que la suspensión SC2-B con 0,10 % de carboximetilcelulosa y 0,2 % de cloruro de amonio presentó estabilidad del 100 %, adherencia mayor que 70 %, un valor de viscosidad aparente igual a 292 mPa·s, comportamiento reológico correspondiente a un fluido pseudoplástico e independiente del tiempo, captación igual 7,55 g/dm<sup>2</sup>, 0,72 mm y características óptimas como: superficie lisa y sin presencia de fallas, por lo tanto, se considera óptima para su aplicación por aspersion sobre placas de acero.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

1. A partir del esmalte porcelánico en crudo tipo capa base que presenta los mejores resultados de estabilidad, adherencia y viscosidad, se recomienda estudiar la compatibilidad con el esmalte de segunda capa.
2. Hacer el estudio del efecto del número de capas de aplicación con la calidad del esmalte luego de la cocción

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andreola, F., Pozzi, P. y Romagnoli, M. (1999). Reología de suspensiones de Esmaltes cerámicos para monococción: estudio de la influencia de los aditivos utilizados. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 209-213. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/20090514180442.199938209.pdf> (Abril, 2012)
2. Aqualon. (2008). *Sodium Carboxymethylcellulose: Physical and chemical properties*. Recuperado de [http://www.ashland.com//Ashland/Static/Documents/AAFI/PRO-250-10H\\_Aqualon\\_CMC.pdf](http://www.ashland.com//Ashland/Static/Documents/AAFI/PRO-250-10H_Aqualon_CMC.pdf) (Abril, 2012)
3. ArcelorMittal. (2008). *Los aceros para esmaltación y el acero esmaltado: Guía de utilización*. Recuperado de [http://www.arcelormittal.com/fcel/repository/Brochures/Steelforenaming\\_usermanual\\_ES.pdf](http://www.arcelormittal.com/fcel/repository/Brochures/Steelforenaming_usermanual_ES.pdf) (Abril, 2011)
4. Arranz, J. y Forner, V. (2007). Aproximación sencilla al problema de sedimentación de materiales cerámicos no coloidales. *Técnicacerámica*, 304. Recuperado de <http://www.aditivosceramicos.com/img/Sedimentacion.pdf> (Abril, 2012).
5. Barba, C. (2002). *Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC) a partir de pastas de plantas anuales*. (Disertación doctoral). Recuperada de la base de datos Tesis Doctorales en Red. (B.1153-2002).
6. Barba, C., Montané, D., Rinaudo, M. y Farriol, X. (2002). Synthesis and characterization of carboxymethylcelluloses from non-wood pulps II. Accessibility of cellulose fiber and CMC synthesis. *Cellulose*, 9(3), 319-326. doi: 10.1023/A:1021184509189

7. Benchabane, A. y Bekkour, K. (2008). Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid and Polymer Science*, 286(10), 1173-1180. doi: 10.1007/s00396-008-1882-2
8. Benyounes, K. y Benmounah, A. (2012). Rheological and electrokinetic properties of carboximethylcellulose-water dispersions in the presence of salts. *International Journal of Physical Science*, 7(11), 1790-1798. doi: 10.5897/IJPS11.1779
9. Calvo, J., (2010), *Pinturas y Recubrimientos: Introducción a su tecnología*. Madrid, España: Díaz de Santos.
10. CANNON. (1998). *Manual Viscometer Model 2020*. Estados Unidos: State College.
11. Chang, R. y College, W. (2002). *Química*, (7ma. ed.). España, Madrid: McGraw Hill Interamericana.
12. Chhabra, R. y Richardson, J. (1999). *Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Engineering Applications*. Inglaterra, Gran Bretaña: Butterworth-Heinemann.
13. Dupont. 2010. *Aplicación de recubrimientos*. Recuperado de <http://psm-dupont.com.mx/paginas/aplicacion.htm> (Abril, 2012)
14. Espinoza, J., García, T. y Acosta, M. (2006). Evaluación de los factores que inciden en el comportamiento reológico de una suspensión de esmalte para baldosas. *Redalyc*, 13(1), 26-35. Recuperado de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/707/70713104.pdf> (Abril, 2012)
15. García, J. (2008). *Reología de Sistemas Multifásicos*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/3631> (Abril, 2012)

16. Giles, R. (1994). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. (3ra. ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
17. Giudice, C. y Pereyra, A. (2009). *Tecnología de pinturas y recubrimientos: componentes, formulación, manufactura y calidad*. Buenos Aires, Argentina: Edutecne.
18. Gómez, M., Bou, E., Moreno, A., Cook, S. y Galindo, M. (2009). Nueva materia prima borácica como componente de esmaltes cerámicos. Estudio de su solubilidad en suspensiones acuosas concentradas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 48 (1), 45-52. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/20090401110207.20094845.pdf> (Abril, 2012)
19. Gutiérrez, C., Sánchez, A. y Moreno, R. (2000). ¿Plástico o pseudoplástico? Método de determinación y análisis del punto de fluidez de suspensiones cerámicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39 (1), 105-117. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/20090506134500.200039105.pdf> (Abril, 2012)
20. Hellerstein, J., Bender, J., Hadley, J. y Hohman, C. (1998). Vidrio, Cerámica y Materiales Afines. En Stellman, J. (Ed.). *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (Vol. 3, pp. 84.3-84.30). Madrid, España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
21. Hohemberger, J. (2002). *Estudio y desarrollo de pigmentos y colorantes cerámicos "in situ", en vidriados cerámicos, a través de métodos de síntesis no convencionales*. (Disertación doctoral). Recuperado de la base de datos Universia Biblioteca.Net. (Id. 3270361)
22. Ibarz, A. y Barbosa, G. (2003). *Unit Operations in Food Engineering*. New York, Estados Unidos: CRC Press LLC.

23. Instituto de Tecnología Cerámica y Comisión de Trabajo (ITCCT). (2010). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector de fabricación de baldosas cerámicas en la comunitat valenciana*. Recuperado de <http://www.cma.gva.es/webdoc/documento.ashx?id=128629> (Abril, 2012)
24. Kirk, R. y Othmer, D. (1962). Acabados en piezas cerámicas. *En Enciclopedia de Tecnología Química* (Vol. 7. pp. 32-45). México, México: Unión Tipográfica Hispanoamérica.
25. Maestro, A. (2002). *Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo*. (Disertación doctoral). Recuperado de base de datos Tesis Doctorales en Red. (Id. B.3916-2009)
26. Maincer. 2012. *Viscosímetro copa Ford*. Recuperado de [http://maincer.es/71085\\_es/Viscosimetro-de-gravedad-para-esmaltes-ceramicos](http://maincer.es/71085_es/Viscosimetro-de-gravedad-para-esmaltes-ceramicos) (Abril, 2012)
27. Méndez, A., Pérez, L. y Paniagua, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4 (1), 237-245. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3695964> (Abril, 2012)
28. Moreno, R. (2000). Tendencias en el conformado de suspensiones cerámicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(5), 601-608. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/20090512162534.200039601.pdf> (Marzo, 2012)
29. Moreno, R. (2005). *Reología de suspensiones cerámicas*. Madrid, España: Bouncopy S.A.
30. Rowe, R., Sheskey, P. y Quinn, M. (2009). *Handbook of pharmaceutical excipientes*. (6ta. ed.). Londres, Inglaterra: Pharmaceutical Press.

31. Sanches, E. (1997). Matérias-Primas para la Fabricação de Fritas e Esmaltes Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 2 (3), 32-40. Recuperado de [http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v02n34/v2n34\\_5.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v02n34/v2n34_5.pdf) (Abril, 2012)
32. Tripoliven. (2009). *Tripolifosfato de sodio*. Recuperado de <http://www.tripoliven.com/vemas/D60200.pdf> (Abril, 2012)
33. Uniovi. (2006). *Conformado cerámicos*. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema5.MaterialesCERAMICOS.CONFORMADO.Slip.CASTING.pdf> (Marzo, 2012)
34. Verdezoto, F. (2009). *Reciclaje de esmaltes contaminados en el tono de colores fuertes y pasteles, en la empresa Franz Viegener Andina S.A., división sanitarios*. (Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
35. Vicentiz J. (2007). *Materias primas*. Recuperado de [http://www.vicentiz.com/Acrobat/info\\_parcial/MatPrimas.pdf](http://www.vicentiz.com/Acrobat/info_parcial/MatPrimas.pdf) (Marzo, 2012).
36. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los esmaltes*. Barcelona, España: Reverté.  
Von, J. y Boxall, J. (1976). *Protective paint coatings for metals*. Inglaterra, Gran Bretaña: Partcullis Press Ltd.
37. Zambrano, J. (1996). *Introducción del proceso de porcelanizado en una planta de fabricación de electrodomésticos*. (Proyecto de titulación). Recuperado de Centro de Información Bibliotecario ESPOL. (D-16700)

## **ANEXOS**

**ANEXO I**

**DOSIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA  
PREPARACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DE ESMALTE  
PORCELÁNICO**

**Ejemplo de cálculo de la dosificación de las materias primas para la preparación de la suspensión S2 con relación S/L 51:49**

Con base en 50 g de sólidos totales se calculó la cantidad de cada materia prima con la ecuación Al.1.

Peso materia prima=Peso sólidos totales\*% Materia prima [Al.1]

- **Cálculo de la cantidad de vidrio**

$$P_{\text{Vidrio}} = 50 \text{ g sólido totales} * \frac{96,4 \text{ g vidrio}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 48,2 \text{ g}$$

- **Cálculo de la cantidad de bentonita**

$$P_{\text{Bentonita}} = 50 \text{ g sólido totales} * \frac{3,0 \text{ g bentonita}}{100 \text{ g sólidos totales}} = 1,5 \text{ g}$$

- **Cálculo de la cantidad de tripolifosfato de sodio**

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio}} = 50 \text{ g sólido totales} * \frac{0,5 \text{ g tripolifosfato de sodio}}{100 \text{ g sólidos totales}}$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio(PURO)}} = 0,25 \text{ g}$$

El cálculo de la cantidad de tripolifosfato impuro se lo realiza mediante la ecuación Al.2.

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio(IMPURO)}} = \frac{P_{\text{Tripolifosfato de sodio(PURO)}}}{\% \text{ Pureza}} \quad [\text{AI.2}]$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio(IMPURO)}} = \frac{0,25 \text{ g Tripolfosfato de sodio (PURO)}}{\frac{94 \text{ g Tripolfosfato de sodio (IMPURO)}}{100 \text{ g Tripolfosfato de sodio (PURO)}}$$

$$P_{\text{Tripolifosfato de sodio(IMPURO)}} = 0,27 \text{ g}$$

- **Cálculo de la cantidad de carboximetilcelulosa**

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa}} = 50 \text{ g sólido totales} * \frac{0,1 \text{ g carboximetilcelulosa}}{100 \text{ g sólidos totales}}$$

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa (PURO)}} = 0,05 \text{ g}$$

$$P_{\text{Carboximetilcelulosa (IMPURO)}} = \frac{0,05 \text{ g Carboximetilcelulosa (PURO)}}{\frac{99,9 \text{ g Carboximetilcelulosa (IMPURO)}}{100 \text{ g Carboximetilcelulosa (PURO)}}} = 0,05 \text{ g}$$

- **Cálculo de la cantidad de agua**

El cálculo de la cantidad de agua se la realiza mediante la ecuación AI.3.

$$\text{Peso agua} = \frac{\% \text{ Líquido} * \text{Peso Sólidos totales}}{\% \text{ Sólidos}} \quad [\text{AI.3}]$$

$$\text{Peso agua} = \frac{\frac{49 \text{ g líquido}}{100 \text{ g suspensión}} * 50 \text{ g sólido}}{\frac{51 \text{ g H}_2\text{O}}{100 \text{ g suspensión}}} = 48,04 \text{ g}$$

$$\text{Volumen agua} = \frac{\text{Peso agua}}{\text{Densidad agua}}$$

$$\text{Volumen agua} = \frac{48,04 \text{ g agua}}{1 \text{ g/cm}^3} = 48 \text{ cm}^3$$

## ANEXO II

### DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN LAS SUSPENSIONES A DIFERENTES INTERVALOS DE TIEMPO

#### Ejemplo de cálculo de la concentración de sólidos en la suspensión S1

La concentración de la suspensión S1 a los 5 min en el punto de muestreo de la columna de sedimentación se determinó mediante la ecuación All.1.

$$\% \text{Concentración} = \frac{\text{Peso del sólido}}{\text{Peso de la suspensión}} * 100 \quad [\text{All.1}]$$

Donde:

$$\text{Peso del sólido} = \text{Peso}_{\text{Frasco+sólido}} - \text{Peso}_{\text{Frasco}}$$

$$\text{Peso de la suspensión} = \text{Peso}_{\text{Frasco+suspensión}} - \text{Peso}_{\text{Frasco}}$$

Reemplazando los datos:

$$\text{Peso del sólido} = 11,5228 - 10,6643 = 0,8585 \text{ g}$$

$$\text{Peso de la suspensión} = 12,5666 - 10,6643 = 1,9023 \text{ g}$$

$$\% \text{Concentración} = \frac{0,8585 \text{ g}}{1,9023 \text{ g}} * 100 = 45,13 \%$$

#### Ejemplo de cálculo de la velocidad de sedimentación de la suspensión S1

La velocidad de sedimentación de la suspensión S1 se determinó a partir de la ecuación All.2:

$$\text{Velocidad de sedimentación} = \frac{\text{Concentración de sólidos}}{\text{Tiempo de estabilidad}} \quad [\text{All.2}]$$

La concentración de sólidos corresponde al primer dato, en el cual se evidencia que la suspensión empezó a sedimentar, así:

$$\text{Velocidad de sedimentación} = \frac{35,73 \%}{30 \text{ min}} = 1,19 \text{ \%/min}$$

### **Ejemplo de cálculo del porcentaje de estabilidad de la suspensión S1**

La estabilidad de la suspensión S1 se determinó a partir de la ecuación All.3:

$$\% \text{ de Estabilidad} = \frac{\text{Concentración final de sólidos}}{\text{Concentración inicial de sólidos}} * 100 \quad [\text{All.3}]$$

Reemplazando los datos:

$$\% \text{ de Estabilidad} = \frac{16,9}{45,0} * 100 = 37,6 \%$$

Los datos de los pesos registrados para el cálculo de la concentración de las suspensiones S1, S2, S3, S4 se presentan en las Tablas All.1, All.2, All.3 y All.4 respectivamente.

**Tabla AII.1.** Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S1 con relación S/L 45:55

Tiempo (min)	Pf (g)	Pf+su (g)	Pf+so (g)	Psu (g)	Pso (g)	Concentración (%)
0	4,6835	6,7337	5,6061	2,0502	0,9226	45,00
5	10,6643	12,5666	11,5228	1,9023	0,8585	45,13
10	8,5770	10,1419	9,2964	1,5649	0,7194	45,97
15	10,3031	11,6852	10,9361	1,3821	0,6330	45,80
20	8,7863	10,8697	9,7165	2,0834	0,9302	44,65
30	8,8896	10,9760	9,6350	2,0864	0,7454	35,73
40	11,1692	12,1423	11,4843	0,9731	0,3151	32,38
60	14,6924	16,6977	15,2110	2,0053	0,5186	25,86
80	20,5155	21,6853	20,8074	1,1698	0,2919	24,95
100	12,8171	14,4343	13,1597	1,6172	0,3426	21,18
120	8,8024	10,6456	9,1139	1,8432	0,3115	16,90

Pf: Peso del frasco vacío

Pf+su: Peso del frasco con la suspensión

Pf+so: Peso del frasco con el sólido

Psu: Peso de la suspensión

Pso: Peso del sólido

**Tabla AII.2.** Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S2 con relación S/L 51:49

Tiempo (min)	Pf (g)	Pf+su (g)	Pf+so (g)	Psu (g)	Pso (g)	Concentración (%)
0	16,3215	17,1286	16,7331	0,8071	0,4116	51,00
20	16,3451	16,6282	16,4912	0,2831	0,1461	51,61
40	4,8064	5,0797	4,9474	0,2733	0,1410	51,59
60	5,6316	5,9298	5,7852	0,2982	0,1536	51,51
90	4,7107	5,0076	4,8638	0,2969	0,1531	51,57
120	7,6165	7,9680	7,7981	0,3515	0,1816	51,66
180	4,7957	5,0132	4,9084	0,2175	0,1127	51,82
240	4,6829	6,3223	5,4663	1,6394	0,7834	47,79
360	13,0412	14,7385	13,5264	1,6973	0,4852	28,59

Pf: Peso del frasco vacío

Pf+su: Peso del frasco con la suspensión

Pf+so: Peso del frasco con el sólido

Psu: Peso de la suspensión

Pso: Peso del sólido

**Tabla AII.3.** Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S3 con relación S/L 53:47

Tiempo (min)	Pf (g)	Pf+su (g)	Pf+so (g)	Psu (g)	Pso (g)	Concentración (%)
0	10,4809	14,0201	12,3567	3,5392	1,8758	53,00
20	16,3434	19,1722	17,8614	2,8288	1,5180	53,66
40	4,8064	7,5360	6,2716	2,7296	1,4652	53,68
60	5,6304	7,7152	6,7503	2,0848	1,1199	53,72
90	4,7102	6,5508	5,6976	1,8406	0,9874	53,65
120	7,6162	10,3848	9,1010	2,7686	1,4848	53,63
180	4,7957	7,0638	6,0136	2,2681	1,2179	53,70
240	16,2350	18,0539	17,2092	1,8189	0,9742	53,56
360	17,2297	19,6396	18,5213	2,4099	1,2916	53,60

Pf: Peso del frasco vacío

Pf+su: Peso del frasco con la suspensión

Pf+so: Peso del frasco con el sólido

Psu: Peso de la suspensión

Pso: Peso del sólido

**Tabla AII.4.** Pesos registrados a diferentes tiempos para la determinación de la concentración de sólidos en la suspensión S4 con relación S/L 55:45

Tiempo (min)	Pf (g)	Pf+su (g)	Pf+so (g)	Psu (g)	Pso (g)	Concentración (%)
0	24,3050	26,9268	25,7470	2,6218	1,4420	55,00
20	12,9158	14,7581	13,9577	1,8423	1,0419	56,55
40	8,9767	10,9466	10,0877	1,9699	1,1110	56,40
60	8,7828	10,5482	9,7756	1,7654	0,9928	56,24
90	8,8394	10,2548	9,3720	1,4154	0,5326	37,63
120	8,9134	10,5805	9,2557	1,6671	0,3423	20,53

Pf: Peso del frasco vacío

Pf+su: Peso del frasco con la suspensión

Pf+so: Peso del frasco con el sólido

Psu: Peso de la suspensión

Pso: Peso del sólido

### ANEXO III

## PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS SUSPENSIONES CON CARBOXIMETILCELULOSA

### Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1 y SC2 se presentan en las Tablas AIII.1 y AIII.2 respectivamente.

**Tabla AIII.1.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1 (0,05 % CMC)

Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
10	320,0	0,007
20	276,7	0,012
30	230,3	0,016
50	189,6	0,021
60	177,7	0,024
100	172,5	0,039

**Tabla AIII.2.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2 (0,10 % CMC)

Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
10	1 203,0	0,027
20	849,0	0,038
30	660,3	0,044
50	500,8	0,056
60	434,5	0,059
100	374,3	0,084

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC3 y SC4 se presentan en las Tablas AIII.3 y AIII.4 respectivamente.

**Tabla AIII.3.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC3 (0,15 % CMC)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	11 213,3	0,252
20	9 980,0	0,448
30	9 353,3	0,630
50	7 686,7	0,863
60	6 956,7	0,937
100	5 200,0	1,168

**Tabla AIII.4.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC4 (0,30 % CMC)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	17 260,0	0,388
20	11 350,0	0,510
30	8 833,3	0,595
50	6 240,0	0,701
60	5 480,0	0,738
100	3 784,0	0,850

### Variación de la viscosidad con el tiempo a velocidad de corte de 10 rpm y 100 rpm de las suspensiones SC1 y SC2

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 y 100 rpm de la suspensión SC1 se presentan en la Tabla AIII.5.

**Tabla AIII.5.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1 (0,05 % CMC)

Velocidad de corte (rpm)	10		100	
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
1	351,0	7,88E-03	192,6	4,33E-02
2	357,0	8,02E-03	186,0	4,18E-02
3	363,0	8,15E-03	177,9	4,00E-02
4	369,0	8,29E-03	173,7	3,90E-02
5	375,0	8,42E-03	173,4	3,89E-02
6	378,0	8,49E-03	171,0	3,84E-02
7	384,0	8,62E-03	167,1	3,75E-02
8	387,0	8,69E-03	164,1	3,69E-02
9	387,0	8,69E-03	164,1	3,69E-02
10	378,0	8,49E-03	164,1	3,69E-02
11	384,0	8,62E-03	164,4	3,69E-02
12	387,0	8,69E-03	162,3	3,64E-02
13	399,0	8,96E-03	163,8	3,68E-02
14	408,0	9,16E-03	165,6	3,72E-02
15	414,0	9,30E-03	165,6	3,72E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 y 100 rpm de la suspensión SC2 se presentan en la Tabla AIII.6.

**Tabla AIII.6.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2 (0,10 % CMC)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	1 557,0	3,50E-02	444,0	9,97E-02
2	1 476,0	3,31E-02	444,0	9,97E-02
3	1 419,0	3,19E-02	432,0	9,70E-02
4	1 365,0	3,07E-02	420,0	9,43E-02
5	1 350,0	3,03E-02	414,0	9,30E-02
6	1 317,0	2,96E-02	405,6	9,11E-02
7	1 302,0	2,92E-02	403,2	9,05E-02
8	1 281,0	2,88E-02	397,0	8,92E-02
9	1 263,0	2,84E-02	393,6	8,84E-02
10	1 248,0	2,80E-02	388,0	8,71E-02
11	1 233,0	2,77E-02	383,0	8,60E-02
12	1 218,0	2,74E-02	380,0	8,53E-02
13	1 203,0	2,70E-02	376,0	8,44E-02
14	1 191,0	2,67E-02	373,0	8,38E-02
15	1 182,0	2,65E-02	373,0	8,38E-02

**ANEXO IV**

**PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS SUSPENSIONES CON  
CLORURO DE AMONIO**

**Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D**

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1-A y SC1-B se presentan en las Tablas AIV.1 y AIV.2 respectivamente.

**Tabla AIV.1.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-A (0,05 % CMC; 0,1 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	274,8	0,006
20	215,6	0,010
30	181,5	0,012
50	143,2	0,016
60	140,0	0,019
100	140,8	0,032

**Tabla AIV.2.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-B (0,05 % CMC; 0,2 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	244,0	0,005
20	196,0	0,009
30	169,3	0,011
50	145,6	0,016
60	147,2	0,020
100	138,5	0,031

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC1-C y SC1-D se presentan en las Tablas AIV.3 y AIV.4 respectivamente.

**Tabla AIV.3.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-C (0,05 % CMC; 0,3 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	344,2	0,008
20	262,2	0,012
30	216,7	0,015
50	185,1	0,021
60	175,8	0,024
100	167,6	0,038

**Tabla AIV.4.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC1-D (0,05 % CMC; 0,5 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	431,2	0,010
20	287,7	0,013
30	247,3	0,017
50	196,0	0,022
60	184,7	0,025
100	163,1	0,037

**Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones: SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D**

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC2-A y SC2-B se presentan en las Tablas AIV.5 y AIV.6 respectivamente.

**Tabla AIV.5.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-A (0,10 % CMC; 0,1 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	615,0	0,014
20	478,3	0,021
30	396,0	0,027
50	319,4	0,036
60	294,7	0,040
100	272,1	0,061

**Tabla AIV.6.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-B (0,10 % CMC; 0,2 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
10	458,0	0,010
20	402,7	0,018
30	348,3	0,023
50	292,0	0,033
60	276,5	0,037
100	256,0	0,057

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con la velocidad de corte de las suspensiones SC2-C y SC2-D se presentan en las Tablas AIV.7 y AIV.8 respectivamente.

**Tabla AIV.7.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-C (0,10 % CMC; 0,3 % NH<sub>4</sub>Cl)

Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
10	421,0	0,009
20	345,3	0,016
30	289,0	0,019
50	241,8	0,027
60	235,2	0,032
100	216,3	0,049

**Tabla AIV.8.** Variación de la viscosidad con la velocidad de corte de la suspensión SC2-D (0,10 % CMC; 0,5 % NH<sub>4</sub>Cl)

Velocidad de corte (rpm)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
10	438,0	0,010
20	362,3	0,016
30	306,0	0,021
50	247,0	0,028
60	226,8	0,031
100	210,4	0,047

**Variación de la viscosidad con el tiempo a velocidad de corte de 10 y 100 rpm de las suspensiones: SC1-A, SC1-B, SC1-C y SC1-D**

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC1-A se presentan en la Tabla AIV.9.

**Tabla AIV.9.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-A (0,05 % CMC; 0,1 % NH<sub>4</sub>Cl)

Velocidad de corte (rpm)	10		100	
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
1	240,0	5,39E-03	136,5	3,07E-02
2	243,6	5,47E-03	134,4	3,02E-02
3	244,2	5,48E-03	129,0	2,90E-02
4	243,0	5,46E-03	127,8	2,87E-02
5	243,6	5,47E-03	127,2	2,86E-02
6	241,8	5,43E-03	131,7	2,96E-02
7	241,2	5,42E-03	129,0	2,90E-02
8	242,4	5,44E-03	126,0	2,83E-02
9	243,0	5,46E-03	124,5	2,80E-02
10	245,4	5,51E-03	122,4	2,75E-02
11	246,6	5,54E-03	120,6	2,71E-02
12	247,2	5,55E-03	121,5	2,73E-02
13	246,6	5,54E-03	121,8	2,74E-02
14	245,4	5,51E-03	121,2	2,72E-02
15	246,0	5,52E-03	117,6	2,64E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC1-B se presentan en la Tabla AIV.10.

**Tabla AIV.10.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-B (0,05 % CMC; 0,2 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	208,0	4,67E-03	135,6	3,05E-02
2	213,0	4,78E-03	127,8	2,87E-02
3	217,8	4,89E-03	121,8	2,74E-02
4	220,2	4,94E-03	119,1	2,67E-02
5	222,0	4,99E-03	116,1	2,61E-02
6	223,2	5,01E-03	114,3	2,57E-02
7	225,0	5,05E-03	113,1	2,54E-02
8	226,8	5,09E-03	115,2	2,59E-02
9	228,6	5,13E-03	113,4	2,55E-02
10	230,4	5,17E-03	114,6	2,57E-02
11	232,2	5,21E-03	114,0	2,56E-02
12	234,6	5,27E-03	111,6	2,51E-02
13	236,4	5,31E-03	112,2	2,52E-02
14	237,6	5,34E-03	110,4	2,48E-02
15	238,8	5,36E-03	111,9	2,51E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC1-C se presentan en la Tabla AIV.11.

**Tabla AIV.11.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-C (0,05 % CMC; 0,3 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	294,0	6,60E-03	111,6	2,51E-02
2	294,0	6,60E-03	111,3	2,50E-02
3	295,8	6,64E-03	111,6	2,51E-02
4	295,2	6,63E-03	111,0	2,49E-02
5	294,6	6,62E-03	110,7	2,49E-02
6	289,2	6,49E-03	110,4	2,48E-02
7	285,6	6,41E-03	108,9	2,45E-02
8	287,4	6,45E-03	106,5	2,39E-02
9	289,2	6,49E-03	105,0	2,36E-02
10	289,2	6,49E-03	103,8	2,33E-02
11	293,4	6,59E-03	104,1	2,34E-02
12	294,6	6,62E-03	103,2	2,32E-02
13	295,2	6,63E-03	103,2	2,32E-02
14	295,8	6,64E-03	102,6	2,30E-02
15	295,8	6,64E-03	102,3	2,30E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC1-D se presentan en la Tabla AIV.12.

**Tabla AIV.12.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC1-D (0,05 % CMC; 0,5 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	268,2	6,02E-03	114,0	2,56E-02
2	282,0	6,33E-03	111,6	2,51E-02
3	291,6	6,55E-03	109,2	2,45E-02
4	300,6	6,75E-03	109,8	2,47E-02
5	306,6	6,89E-03	109,2	2,45E-02
6	309,0	6,94E-03	109,4	2,46E-02
7	312,0	7,01E-03	109,1	2,45E-02
8	315,0	7,07E-03	108,8	2,44E-02
9	319,2	7,17E-03	108,3	2,43E-02
10	322,2	7,24E-03	107,2	2,41E-02
11	324,6	7,29E-03	107,2	2,41E-02
12	328,2	7,37E-03	107,5	2,41E-02
13	330,6	7,42E-03	106,8	2,40E-02
14	332,4	7,46E-03	106,5	2,39E-02
15	336,6	7,56E-03	104,7	2,35E-02

**Variación de la viscosidad con el tiempo a velocidad de corte de 10 y 100 rpm de las suspensiones SC2-A, SC2-B, SC2-C y SC2-D**

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC2-A se presentan en la Tabla AIV.13.

**Tabla AIV.13.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-A (0,10 % CMC; 0,1 % NH<sub>4</sub>Cl)

Velocidad de corte (rpm)	10		100	
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
1	597,0	1,34E-02	244,5	5,49E-02
2	594,0	1,33E-02	247,2	5,55E-02
3	609,0	1,37E-02	247,2	5,55E-02
4	624,0	1,40E-02	244,8	5,50E-02
5	630,0	1,41E-02	241,5	5,42E-02
6	630,0	1,41E-02	238,2	5,35E-02
7	636,0	1,43E-02	236,7	5,32E-02
8	630,0	1,41E-02	238,5	5,36E-02
9	630,0	1,41E-02	239,1	5,37E-02
10	627,0	1,41E-02	240,0	5,39E-02
11	621,0	1,39E-02	238,2	5,35E-02
12	627,0	1,41E-02	238,8	5,36E-02
13	627,0	1,41E-02	238,2	5,35E-02
14	627,0	1,41E-02	235,2	5,28E-02
15	630,0	1,41E-02	236,4	5,31E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC2-B se presentan en la Tabla AIV.14.

**Tabla AIV.14.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-B (0,10 % CMC; 0,2 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	426,0	9,57E-03	249,0	5,59E-02
2	429,0	9,63E-03	246,6	5,54E-02
3	444,0	9,97E-03	244,2	5,48E-02
4	447,0	1,00E-02	243,0	5,46E-02
5	453,0	1,02E-02	244,5	5,49E-02
6	456,0	1,02E-02	240,6	5,40E-02
7	462,0	1,04E-02	238,2	5,35E-02
8	462,0	1,04E-02	237,0	5,32E-02
9	471,0	1,06E-02	236,4	5,31E-02
10	474,0	1,06E-02	235,8	5,30E-02
11	480,0	1,08E-02	235,5	5,29E-02
12	489,0	1,10E-02	234,6	5,27E-02
13	492,0	1,10E-02	234,3	5,26E-02
14	489,0	1,10E-02	234,0	5,25E-02
15	492,0	1,10E-02	234,3	5,26E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC2-C se presentan en la Tabla AIV.15.

**Tabla AIV.15.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-C (0,10 % CMC; 0,3 % NH<sub>4</sub>Cl)

Velocidad de corte (rpm)	10		100	
	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)	Viscosidad (mPa·s)	Torque (mN·m)
1	321,0	7,21E-03	188,7	4,24E-02
2	330,0	7,41E-03	190,8	4,28E-02
3	339,0	7,61E-03	191,4	4,30E-02
4	345,0	7,75E-03	189,3	4,25E-02
5	348,0	7,81E-03	187,8	4,22E-02
6	354,0	7,95E-03	186,9	4,20E-02
7	363,0	8,15E-03	186,6	4,19E-02
8	369,0	8,29E-03	186,3	4,18E-02
9	381,0	8,56E-03	183,6	4,12E-02
10	387,0	8,69E-03	183,6	4,12E-02
11	393,0	8,83E-03	185,7	4,17E-02
12	402,0	9,03E-03	184,8	4,15E-02
13	408,0	9,16E-03	183,9	4,13E-02
14	405,0	9,09E-03	186,9	4,20E-02
15	403,0	9,05E-03	186,6	4,19E-02

Los datos registrados de la variación de la viscosidad con el tiempo a 10 rpm y 100 rpm de la suspensión SC2-D se presentan en la Tabla AIV.16

**Tabla AIV.16.** Variación de la viscosidad con el tiempo de la suspensión SC2-D (0,10 % CMC; 0,5 % NH<sub>4</sub>Cl)

<b>Velocidad de corte (rpm)</b>	<b>10</b>		<b>100</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>	<b>Viscosidad (mPa·s)</b>	<b>Torque (mN·m)</b>
1	336,0	7,55E-03	177,3	3,98E-02
2	354,0	7,95E-03	177,6	3,99E-02
3	366,0	8,22E-03	177,3	3,98E-02
4	387,0	8,69E-03	176,4	3,96E-02
5	399,0	8,96E-03	174,3	3,91E-02
6	399,0	8,96E-03	173,7	3,90E-02
7	405,0	9,09E-03	173,1	3,89E-02
8	414,0	9,30E-03	174,6	3,92E-02
9	429,0	9,63E-03	175,5	3,94E-02
10	435,0	9,77E-03	175,2	3,93E-02
11	438,0	9,84E-03	174,3	3,91E-02
12	441,0	9,90E-03	174,0	3,91E-02
13	447,0	1,00E-02	175,5	3,94E-02
14	459,0	1,03E-02	174,6	3,92E-02
15	471,0	1,06E-02	176,4	3,96E-02

**ANEXO V**

**DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA ENTRE EL ESMALTE  
CRUDO Y LA SUPERFICIE DE ACERO**

**Ejemplo de cálculo de la adherencia de la suspensión SC1 con la superficie de acero**

Se determinó la adherencia del esmalte crudo con la superficie de acero a partir de la cantidad de esmalte no desprendida en el área de ensayo, después de aplicar una fuerza de fricción. Se calculó el % Adherencia con las siguientes ecuaciones:

$$Pi \text{ esmalte} = Pi_{(p+e)} - Pf_{(p+e)} \quad [AV.1]$$

$$Pf \text{ esmalte} = Pf_{(p+e)} - Pf_{(p+e)} \quad [AV.2]$$

$$PE \text{ desprendido} = Pi \text{ esmalte} - Pf \text{ esmalte} \quad [AV.3]$$

$$PE \text{ area de ensayo} = \frac{AE * Pi \text{ esmalte}}{AP} \quad [AV.4]$$

$$\% \text{Desprendido} = \frac{PE \text{ desprendido}}{PE \text{ area de ensayo}} * 100 \quad [AV.5]$$

$$\% \text{Adherencia} = 100 - \% \text{Desprendido} \quad [AV.6]$$

$$PE \text{ desprendido} = Pi \text{ esmalte} - Pf \text{ esmalte} \quad [AV.7]$$

Donde:

**AP:** área de la placa

**AE:** área ensayada

**PP:** peso de la placa

**Pi<sub>(p+e)</sub>:** Peso de la placa con esmalte, antes del ensayo de fricción

**Pf<sub>(p+e)</sub>:** Peso de la placa con esmalte, después del ensayo de fricción

**Pi<sub>esmalte</sub>** : Peso del esmalte adherido, antes del ensayo de fricción

**Pf<sub>esmalte</sub>** : Peso del esmalte adherido, después del ensayo de fricción

**PE<sub>desprendido</sub>**: Peso del esmalte desprendido del área de ensayo

**PE<sub>área de ensayo</sub>**: Peso del esmalte adherido en el área de ensayo, antes de la fricción

### Prueba N°1.

$$AP = 9,0 \text{ cm}^2$$

$$AE = 3,1416 \text{ cm}^2$$

$$PP = 4,7637 \text{ g}$$

$$Pi_{(p+e)} = 5,4802 \text{ g}$$

$$Pf_{(p+e)} = 5,3787 \text{ g}$$

$$Pi_{\text{esmalte}} = (5,4802 - 4,7637) \text{ g} = 0,7165 \text{ g}$$

$$Pf_{\text{esmalte}} = (5,3787 - 4,7637) \text{ g} = 0,6150 \text{ g}$$

$$PE_{\text{desprendido}} = (0,7165 - 0,6150) \text{ g} = 0,1015 \text{ g}$$

$$PE_{\text{área de ensayo}} = \frac{3,1416 \text{ cm}^2 * 0,7165 \text{ g}}{9,0 \text{ cm}^2} = 0,2501 \text{ g}$$

$$\% \text{Desprendido} = \frac{0,1015 \text{ g}}{0,2501 \text{ g}} * 100 = 40,58$$

$$\% \text{Adherencia} = 100 - 40,58 = 59,42 \%$$

Los pesos registrados en las pruebas de adherencia de las suspensiones SC1, SC2, SC3 y SC4 se muestran en la Tabla AV.1, donde para cada concentración ensayada de CMC se hicieron tres pruebas paralelas.

**Tabla AV.1.** Datos registrados para la determinación de la influencia de la carboximetilcelulosa en la adherencia del esmalte con la superficie de acero

Suspensión	CMC (%)	AP (cm <sup>2</sup> )	AE (cm <sup>2</sup> )	PP (g)	Pi (p+e) (g)	Pi esmalte (g)	Pf esmalte (g)	PE (AE) (g)	PE desprendido (g)	Desprendido (%)	Desprendido o promedio (%)	Adherencia (%)
SC1	0,05	9,0	3,1416	4,6737	5,4802	0,7165	0,6150	0,2501	0,1015	40,58	37,93	62,07
		9,0	3,1416	4,6473	5,5123	0,8650	0,7526	0,3019	0,1124	37,23		
		9,0	3,1416	4,5753	5,3891	0,8138	0,7116	0,2841	0,1022	35,98		
SC2	0,10	9,0	3,1416	4,7820	5,5174	0,7354	0,6576	0,2567	0,0778	30,31	29,79	70,21
		9,0	3,1416	4,8068	5,4141	0,6073	0,5432	0,2120	0,0641	30,24		
		9,0	3,1416	4,5868	5,2112	0,6244	0,5616	0,2180	0,0628	28,81		
SC3	0,15	9,0	3,1416	4,7518	5,3824	0,6306	0,5700	0,2201	0,0606	27,53	27,16	72,84
		9,0	3,1416	4,6427	5,2606	0,6179	0,5612	0,2157	0,0567	26,29		
		9,0	3,1416	4,6134	5,2194	0,6060	0,5475	0,2115	0,0585	27,66		
SC4	0,30	9,0	3,1416	4,7172	5,4419	0,7247	0,6737	0,2530	0,0510	20,16	19,42	80,58
		9,0	3,1416	4,7897	5,5439	0,7542	0,7031	0,2633	0,0511	19,41		
		9,0	3,1416	4,6523	5,4007	0,7484	0,6996	0,2612	0,0488	18,68		

## ANEXO VI

### DETERMINACIÓN DE LA CAPTACIÓN Y EL ESPESOR DEL ESMALTE SOBRE LAS PIEZAS DE ACERO

#### Ejemplo de cálculo de la captación del esmalte SC1 en la primera aplicación

La captación del esmalte se calcula a partir de la ecuación AVI.1.

$$\text{Captación} = \frac{\text{Peso esmalte retenido (g)}}{\text{Área cubierta (cm}^2\text{)}} \quad [\text{AVI.1}]$$

$$\text{Peso retenido} = \text{Peso}_{\text{placa+esmalte}} + \text{Peso}_{\text{placa}} \quad [\text{AVI.2}]$$

Reemplazando los datos:

$$\text{Peso}_{\text{placa+esmalte}} = 19,4563 \text{ g}$$

$$\text{Peso}_{\text{placa+esmalte}} = 19,2687 \text{ g}$$

$$\text{Peso retenido} = (19,4563 - 19,2687) \text{ g} = 0,1876 \text{ g}$$

$$\text{Captación} = \frac{0,1876 \text{ g}}{37,1760 \text{ cm}^2} = 0,0050 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = 0,5046 \frac{\text{g}}{\text{dm}^2}$$

#### Ejemplo de cálculo del espesor del esmalte SC1 en la primera aplicación

El espesor de la capa del esmalte se calcula mediante la ecuación AVI.3.

$$\text{Espesor} = \text{Espesor}_{\text{placa+esmalte}} - \text{Espesor}_{\text{placa}} \quad [\text{AVI.3}]$$

$$\text{Espesor} = 0,7620 - 0,7112 = 0,0508$$

Los datos registrados de captación se muestran en la Tabla AVI.1 y los datos de espesor se muestran en la Tabla A.VI.2

**Tabla AVI.1.** Datos registrados de pesos de esmalte captados en cada aplicación de las suspensiones SC1, SC2-A Y SC2-B

Suspensión	Área placa (cm <sup>2</sup> )	Peso placa (g)	No. Aplicaciones	Peso placa+esmalte (g)	Peso Esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm <sup>2</sup> )
SC1	37,1760	19,2687	1	19,4563	0,1876	0,5046
			2	20,0602	0,7915	2,1291
			3	20,7593	1,4906	4,0096
			4	21,2083	1,9396	5,2173
SC2-A	36,8830	18,9787	1	19,1599	0,1812	0,4913
			2	19,8019	0,8232	2,2319
			3	20,3080	1,3293	3,6041
			4	21,2261	2,2474	6,0933
SC2-B	36,7441	19,0374	1	19,2321	0,1947	0,5299
			2	19,8616	0,8242	2,2431
			3	20,5493	1,5119	4,1147
			4	21,8114	2,774	7,5495

**Tabla AVI.2.** Datos registrados de espesores del esmalte en cada aplicación de las suspensiones SC1, SC2-A Y SC2-B

Suspensión	Espesor placa (mm)	No. Aplicaciones	Espesor placa+esmalte (mm)	Espesor esmalte (mm)
SC1	0,7112	1	0,7620	0,0508
		2	0,9398	0,2286
		3	1,0414	0,3302
		4	1,2954	0,5842
SC2-A	0,7060	1	0,7366	0,0306
		2	0,9144	0,2084
		3	0,9906	0,2846
		4	1,3462	0,6402
SC2-B	0,7027	1	0,7620	0,0593
		2	0,9906	0,2879
		3	1,0414	0,3387
		4	1,4224	0,7197