



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**VALIDACIÓN DE LA REGLA DE LAS MEZCLAS PARA LA MANUFACTURA DE
COMPUESTOS METÁLICOS LAMINADOS DE ACEROS INOXIDABLES BORADOS.**

TESINA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA
CARLOS NOYOLA SALDAÑA



CDMX

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: SANJUAN SANJUAN GERARDO

VOCAL: Profesor: SALAS REYES ANTONIO ENRIQUE

SECRETARIO: Profesor: RUIZ RAMIREZ AGUSTIN

1er. SUPLENTE: Profesor: OJEDA RAMIREZ BALBINA

2° SUPLENTE: Profesor: GARCIA GALAN SERGIO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM



ASESOR DEL TEMA: AGUSTÍN RUIZ RAMÍREZ



SUPERVISOR TÉCNICO: SERGIO GARCÍA GALÁN



SUSTENTANTE (S): CARLOS NOYOLA SALDAÑA

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES.....	3
1.1 Materiales Compuestos Metálicos Laminados (CML).....	3
1.1.1 Aspecto Histórico.....	6
1.1.2 Fabricación de CML's.....	8
1.2 Fabricación de CML's por Técnicas de Unión.....	9
1.2.1 Procesos de Unión por Deformación.....	11
1.2.2 Laminado en caliente convencional.....	11
1.3 Tecnología de Unión por Laminación en Caliente (ULC).....	12
1.3.1 CML fabricados por medio de ULC.....	14
1.4 Uso de la regla de las mezclas para predecir propiedades mecánicas de los CML.....	15
1.5 Efecto del boro en aceros.....	21
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1 Realización de búsqueda bibliográfica.....	23
2.2 Digitalización de datos.....	25
2.3 Cálculos.....	27
2.4 Determinación de módulo de Young y esfuerzo de fluencia convencional al 0.2%.....	29
3. RESULTADOS.....	30
Aplicación de Regla de las Mezclas para cálculo de las curvas esfuerzo-deformación ingenieril.....	30
Compuesto Metálico Laminado 316-B.....	30
Compuesto Metálico Laminado 304-B.....	36
Variación de espesores en las curvas calculadas por medio de la Regla de las Mezclas.....	42
Determinación de los Módulos de Young y Esfuerzos de Fluencia Convencional el 0.2% de deformación.....	45
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
Comparación de la curva calculada del compósito frente a las curvas de los materiales que lo componen.....	47
Comparación de las curvas calculadas con la curva reportada experimentalmente.....	49
Comparación de las curvas calculadas con distintas relaciones de espesor.....	54
5. CONCLUSIONES.....	57
6. REFERENCIAS.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama que ilustra el proceso de fabricación de un CML por medio de laminación en caliente	4
Figura 1.2. Acomodos de CML de dos caras (a) y tipo sándwich simétrico (b)	5
Figura 1.3. Curva típica ingenieril esfuerzo-deformación en ensayo de tracción ejemplificando los comportamientos elástico y plástico de un material, así como la localización del UTS.....	16
Figura 1.4. Representación esquemática de los comportamientos de isodeformación e isoesfuerzo para dos materiales con comportamientos esfuerzo–deformación diferentes presentado por Leuser et al.....	18
Figura 1.5. Regla de las mezclas bajo el modelo de isodeformación en tracción uniaxial para una placa de material revestido de forma simétrica presentada por Semiatin et al	20
Figura 2.1. Selección de área de análisis	25
Figura 2.2. Calibración de valores máximos y mínimos en los ejes x & y.....	26
Figura 2.3. Curva esfuerzo-deformación del artículo construida con los datos digitalizados usando ImageJ.	26
Figura 3.1. Curvas esfuerzo-deformación reportadas por Li et al. para el acero borado y el CML 316-B.....	30
Figura 3.2. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de las curvas reportadas por Li et al. para los materiales y condiciones de interés.	31
Figura 3.3. Curvas experimentales esfuerzo-deformación para el acero 316 reportado por Jia et al. La curva de color negro es la de interés para el caso que compete a este estudio.	32
Figura 3.4. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de la zona de interés (0 a 10% de deformación) de la curva reportada por Jia et al para el acero 316.	33
Figura 3.5. Curva para el compósito obtenida por RDM a partir de las curvas de los materiales individuales.	34
Figura 3.6. Comparativa de curvas calculada por medio de RDM y experimental para el CML 316-B.....	35
Figura 3.7. Curvas esfuerzo-deformación reportadas por Li et al. para acero borado y para el compósito fabricado con dicho acero.	36
Figura 3.8. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de las curvas reportadas por Li et al. para los materiales y condiciones de interés.	37

Figura 3.9. Curvas experimentales esfuerzo-deformación para el acero 304 reportado por Jia et al. La curva de color negro es la de interés para el caso que compete a este estudio.	38
Figura 3.10. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de la zona de interés de la curva reportada por Jia et al. para el acero 304.....	39
Figura 3.11. Curva para el compuesto obtenida por RDM a partir de las curvas de los materiales individuales.	40
Figura 3.12. Comparativa de curvas calculada por medio de RDM y experimental para el CML 304-B.....	41
Figura 3.13.Comparativa de curvas calculada y experimental para el CML 316-B, considerando además una alteración en la relación de espesores de la curva calculada de 1:6:1 a 1:3:1.....	43
Figura 3.14. Comparativa de curvas calculada y experimental para el CML 304-B, considerando además una alteración en la relación de espesores de la curva calculada de 1:3:1 a 1:6:1.....	44
Figura 3.15. Determinación del módulo de Young y Esfuerzo de fluencia y esfuerzo de fluencia convencional al 0.2% de deformación para la curva del CML 316-B reportado por Li et al	45
Figura 3.16. Determinación del Módulo de Young y Esfuerzo de fluencia convencional al 0.2% de deformación para la curva del CML 304-B reportado por Li et al.....	46
Figura 4.1. Mecanismo de supresión de agrietamiento de borde reportado por Li et al	52
Figura 4.2. Curva experimental por Li, et al y curvas calculadas por Regla de las Mezclas para el CML 316-B con cuatro diferentes RE's.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales técnicas de fabricación de CML de acuerdo con lo reportado por Leuser.....	9
Tabla 1.2. Métodos de fabricación de CML por Unión de acuerdo con lo reportado por Leuser.....	10
Tabla 1.3. Procesos de fabricación de unión por deformación en CML de acuerdo con lo reportado por Leuser	11
Tabla 1.4. Procesos de unión de Aceros Inoxidables de acuerdo con lo reportado por Leuser.....	13
Tabla 1.5. Tipos de CML fabricados con un acero inoxidable como material base	14
Tabla 2.1. Comparación entre los materiales de ambos artículos	24
Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de cada curva calculada con una RE diferente.....	53
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del CML 316-B y regla de las mezclas	56
Tabla 4.3. Propiedades mecánicas del CML 304-B y regla de las mezclas	56

AGRADECIMIENTOS.

DEDICATORIA.

RESUMEN.

La fabricación de compuestos metálicos laminados (CML) por medio de unión por laminado en caliente (ULC) es una técnica emergente de manufactura enfocada en mejorar las propiedades de materiales con baja conformabilidad por medio de la unión de un material base que requiere de ciertas propiedades, con un material de revestido que le provea dichas propiedades. Los CML son de gran utilidad en la industria nuclear donde se requieren contenedores fabricados de aceros borados, que son particularmente difíciles de conformar, para almacenar residuos combustibles. En el proceso de ULC se aplica una metodología que permite predecir el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación ingenieril del CML fabricado: la regla de las mezclas. Ésta permite obtener una predicción aproximada del desempeño mecánico del material fabricado con base en las curvas esfuerzo-deformación ingenieril de los materiales individuales y las fracciones de área transversal ocupadas por cada capa; además, ha sido utilizado en la fabricación de CML's desde los años 70 hasta la fecha, por lo que no es un recurso obsoleto, pero tiene sus limitaciones.

En este trabajo se aplicó la regla de las mezclas a los resultados reportados en los trabajos de investigación publicados por Li, Y.-W. et al. [1,2] para contrastar las curvas calculadas contra las experimentales y analizar si la metodología es una aproximación confiable o no en estos casos y qué se podría concluir acerca de la misma en cuanto a usarla de una manera más precisa.

Tras hacer los cálculos y contrastar los resultados se puede apreciar que la metodología es más precisa en unos casos que en otros, deduciendo que un factor que afecta en esto es la relación de espesores entre las capas de material base y material de revestido. De esta forma se puede concluir que hay valores límite en la relación de espesores al aplicar el cálculo para poder obtener una predicción más acertada, esto puede deberse a un fenómeno físico durante la ULC en la manufactura de los CML este es: el agrietamiento de borde.

HIPÓTESIS.

Es posible aplicar la metodología conocida como regla de las mezclas para hacer un cálculo teórico preciso de la curva esfuerzo-deformación ingenieril de un compuesto metálico laminado de capas de materiales distintos, a partir de la curva individual de cada material involucrado en dicho compuesto.

OBJETIVOS.

Objetivo General

Contrastar las curvas esfuerzo-deformación ingenieriles experimentales para compuestos metálicos laminados, cuyos materiales base son aceros inoxidable borados, con las curvas calculadas a partir de la metodología conocida como regla de las mezclas.

Objetivos Particulares

- I. Calcular las curvas esfuerzo-deformación ingenieriles para compuestos metálicos laminados, utilizando la metodología de regla de las mezclas.
- II. Comparar las curvas esfuerzo-deformación ingenieriles teóricas con las experimentales reportadas en bibliografía especializada para compuestos metálicos laminados de aceros inoxidable borados.
- III. Determinar si la regla de las mezclas es una metodología adecuada para predecir curvas esfuerzo-deformación ingenieril de compuestos metálicos laminados de aceros inoxidable borados.

1. ANTECEDENTES

Dentro de la industria metalmecánica, las actividades y estudios de mejora están enfocadas en beneficiar las propiedades mecánicas de un material determinado, sin embargo, existen factores intrínsecos en los materiales que dificultan o definitivamente impiden el beneficio de dichas propiedades, siendo el principal de ellos la composición química del material que se quiere trabajar, o mejor dicho, conformar; la conformabilidad (traducción del término *formability* de la literatura técnica de habla inglesa para hacer referencia a los procesos de deformación de láminas) es un concepto amplio y complejo que puede intentar definirse como la facilidad con la que a un material se le puede dar forma mediante deformación plástica sin que se produzcan fracturas, grietas, defectos de llenado o de apariencia [3] es una propiedad de manufactura de los materiales que refleja la facilidad de deformación en procesos como laminación, extrusión, forja, embutido, etc., y, por tanto, indica también las limitaciones de deformación de cada material [4].

Beneficiar las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de metales monolíticos (es decir que no están compuestos de capas de materiales diferentes y con una composición química que se asume homogénea en todo su volumen) es un desafío que ha evolucionado hacia la producción de compuestos metálicos en capas que están unidas entre sí por juntas de naturaleza metalúrgica [4,5], esto funciona de tal manera que las capas de uno o más materiales proveen de ciertas propiedades a otro con el que se une [4].

1.1 Materiales Compuestos Metálicos Laminados (CML).

Se les llama así a los materiales en forma de hoja o placa que consisten en dos o más capas hechas de materiales diferentes que sean metálicos o con cierto contenido metálico acomodados de manera alternada y que se unen por medio de interfaces fuertes generadas durante el laminado. Los materiales de los cuales están hechas las capas de los CML's suelen ser seleccionados con el propósito de mejorar las propiedades físicas de uno de los componentes del CML en

específico, al cual se le llama Material Base, a través de la unión con otro material llamado material de refuerzo o Material de Revestido que posee propiedades con las que se quiere beneficiar al Material Base.

Cuando el material base de un CML es algún tipo de acero inoxidable, se les suele llamar placas inoxidables revestidas y algunos de los más fabricados comercialmente tienen las combinaciones Al/Acero inoxidable ferrítico, Acero inoxidable austenítico/Al/Cu, Acero inoxidable ferrítico/Ti y Acero inoxidable/Acero al carbono [5].

En la Figura 1.1 está ilustrada someramente la fabricación de un CML por medio de laminación en caliente. Como se puede observar, el primer paso es realizar un pulido en ambas capas para después unir las por medio de ULC, a este proceso se introducen las dos capas de material, el de Base y el de Revestido y se obtiene una capa de acero revestido sólidamente unida.

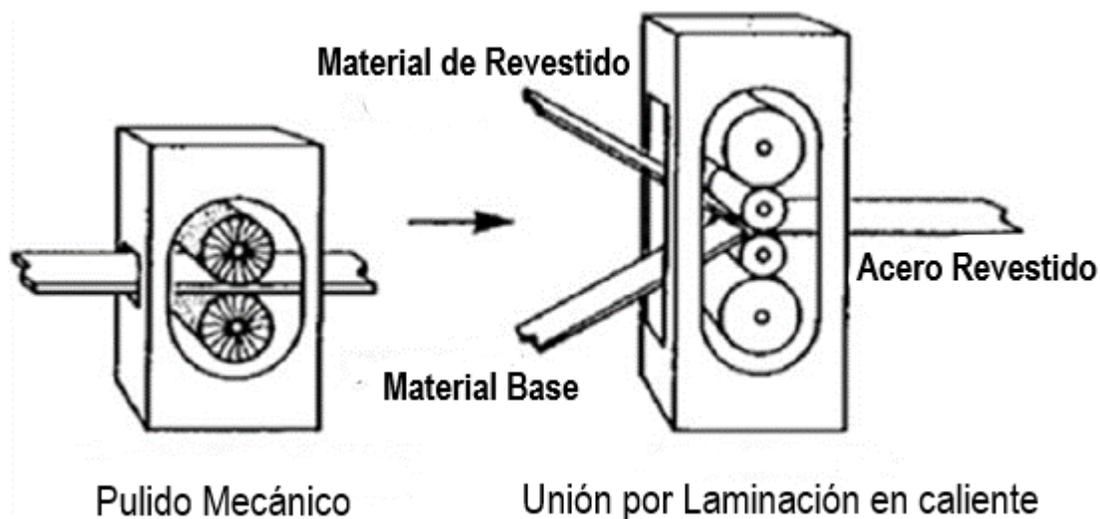


Figura 1.1. Diagrama que ilustra el proceso de fabricación de un CML por medio de laminación en caliente [5].

La Figura 1.1 muestra un aspecto relativo a la distribución de los materiales en un CML, puesto que en el caso ilustrado se compone únicamente de dos capas, una de material base y una de material de revestido, teniendo como resultado final dos caras de materiales diferentes unidas fuertemente por el proceso de laminación en caliente; sin embargo existen varias distribuciones diferentes, entre las cuales

cabe mencionar una en la que, debido al acomodo de las placas componentes del CML de manera alternada, es común encontrar publicaciones científicas en las que se les llama “placas sándwich”; la Figura 1.2 permite explicar con mayor claridad el acomodo de las placas, el cual es descrito como simétrico tomando como eje de referencia la capa media del material, la cual queda revestida por ambos lados con uno o más materiales pero en el mismo orden.

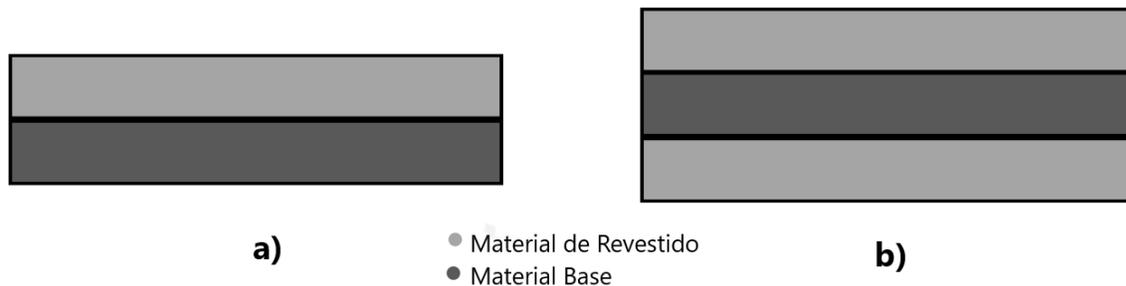


Figura 1.2. Acomodos de CML de dos caras (a) y tipo sándwich simétrico (b). [Elaboración propia].

En esta distribución el material base puede ser tanto la parte interna del “sándwich”, como puede tratarse de las “tapas” del mismo; y ocurre de igual manera con el material de revestido, el cual se puede ubicar en cualquiera de esas posiciones. Sin embargo, en los estudios relacionados con casos referentes a metales ferrosos es común que la capa media sea de material base, del mismo modo que en la Figura 1.2 (b).

Este tipo de materiales busca mejorar drásticamente propiedades de interés estructural y de manufactura como son:

- Tenacidad a la fractura
- Comportamiento de fatiga e impacto.
- Capacidades de resistencia al desgaste y la corrosión.
- Proveer propiedades mejoradas de conformabilidad o ductilidad para materiales que, de otra forma, serían frágiles y quebradizos.

El punto clave en la fabricación de este tipo de materiales para garantizar las mejoras que se buscan es la firmeza de la unión entre las capas, es decir, las

interfaces formadas en las que se dan fenómenos de transporte de masa de algunos elementos químicos. Por medio de estudios en estas zonas de los CML's se ha descubierto una relación entre la firmeza de unión de la interfaz y la composición microestructural en las secciones de material base, material de refuerzo y las interfaces, con las propiedades del producto final [5].

Una de las ventajas que presentan estos materiales, además de la mejora en las propiedades antes mencionadas, es que se cuenta con la posibilidad de predecir algunos aspectos de su desempeño mecánico aún antes de someter al material al proceso de unión por medio de metodologías y /o modelos matemáticos como es la llamada "arquitectura de laminado", la cual es una consideración conjunta de la fracción de área transversal de las capas componentes que permite determinar parámetros de procesamiento adecuados para cumplir con las propiedades requeridas [4].

A pesar de que los CML suenan como un concepto de origen reciente, tienen una historia que contar, desde tiempos antiguos hasta la industrialización a partir del siglo XX. A continuación, se presenta una breve retrospectiva.

1.1.1 Aspecto Histórico.

El concepto de los CML ha existido históricamente desde los mitos griegos, donde el escudo de Aquiles es descrito como uno de estos materiales; por otra parte, se han encontrado herramientas de agricultura y granjería en Grecia que datan del siglo IV A.C.; así como espadas ornamentales del mismo siglo en regiones tan diversas como Noruega, China, Indonesia y Japón, donde estos materiales se fabricaban de manera artesanal [4].

Al estudiar las piezas halladas en Japón y Noruega se hicieron descubrimientos que ayudan a esclarecer la conformabilidad de materiales CML utilizados con fines estéticos casi exclusivamente. Por parte de Japón se encontraron algunas espadas Samurái, que son herramientas de corte fabricadas uniendo capas de acero de ultra alto carbono con otras de hierro blando por medio de forja a una temperatura de entre 1000 – 1100°C teniendo como resultado final un material que posee una cobertura de acero de ultra alto carbono duro y un centro de hierro

blando, este es tratado térmicamente a 800°C y enfriado en agua, manteniendo el centro sin afectaciones, pero transformando el borde de la cuchilla en martensita, lo que da sus propiedades de corte características. En el caso de Noruega se encontraron dagas ornamentales de tres capas laminadas hechas por medio de unión en estado sólido con fines de cuchillería, teniendo una capa central de acero de herramienta de alto carbono y capas externas de acero inoxidable bajo carbono.

Si se comparan ambos casos, puede notarse que prácticamente son contrarios uno del otro, pues el primero está estructurado con el metal duro en el exterior, específicamente en la zona del borde, y el metal blando en el centro, mientras que el segundo los presenta en acomodo inverso. A pesar del acomodo diferente, ambos materiales presentan un mecanismo de prevención de agrietamiento similar relacionado con la unión de materiales, pues la espada japonesa tiene un filo duro con un centro tenaz que lo refuerza e inhibe el agrietamiento; mientras que en la daga noruega el componente de alta dureza en el centro es protegido de agrietamiento por la presencia de capas tenaces externas. De este análisis se puede determinar que el material blando es el que auxilia al material duro inhibiendo el agrietamiento tanto si se encuentra como capa de revestido o como capa central del CML.

Desde el siglo XIX se ha adoptado esta tecnología de forma muy limitada para aplicaciones ingenieriles tales como tuberías largas, boquillas usadas a altas presiones, e intercambiadores de calor [4]. En cuanto a las tuberías y las boquillas, estas consisten en piezas cilíndricas angostas y largas, pero igualmente compuestas por láminas delgadas de acero que se envuelven juntas y se sueldan para formar cáscaras que resisten la propagación de grietas transversales [4].

Esta tecnología tuvo auge en los campos tanto de aplicación, investigación y desarrollo en la extinta U.R.S.S., donde se tiene registro de uno de los primeros procesos aplicados efectivamente, llamado Procedimiento de Laminación Helicoidal de Cizalla Radial, (del cual no se tiene precisión sobre los parámetros) en el que el material se pasaba a través de tres rodillos de forma poco

convencional con el resultado de producir deformación sin cambios en la geometría, aplicando este proceso a materiales como hierros grises [4].

Estudios como los realizados en la U.R.S.S. durante el siglo pasado indicaron que, en materia de aceros, la principal aplicación de esta tecnología se realizó en aceros con niveles extremadamente altos de carbono (mayores al 2% en peso), así como en otros materiales que requieren buena resistencia a la corrosión, características anti-fricción y resistencia al desgaste, y que, además, tienen muy pobres propiedades de conformabilidad que se podrían mejorar [4].

Ha surgido una gran demanda en la industria por una estructura que pueda satisfacer simultáneamente la combinación de ductilidad y resistencia a la corrosión, y funcionar como un sustituto de materiales inoxidables a granel, las placas de acero revestido se han vuelto muy populares para aplicaciones ingenieriles siendo usadas en muchos campos como el de tubos de transferencia, buques, embalses intercambiadores de calor y utensilios de cocina [5]. A continuación, se establece un resumen de las principales tecnologías mediante las cuales se fabrican CML con diferentes propósitos.

1.1.2 Fabricación de CML's.

Existen diferentes tipos de fabricación de CML caracterizados por la técnica empleada para obtener las placas compuestas, se distinguen por el tipo de unión, deposición, y aspersion de la capa a la que se une el material base; estos se explican en la Tabla 1.1.

Dentro de estas diferentes clasificaciones de técnicas para fabricar compuestos metálicos laminados, la fabricación por unión es la técnica de interés de este trabajo, por lo que el siguiente subtema la explora, así como sus subdivisiones haciendo hincapié en el método de unión por deformación, cuya importancia para este trabajo se detallará posteriormente.

Tabla 1.1 Principales técnicas de fabricación de CML de acuerdo con lo reportado por Leuser [4] [Elaboración propia].

Técnica de Fabricación	Descripción
Deposición	Involucra transporte de masa a escala atómica o molecular del material de refuerzo por medio de: evaporación, deposición física o química de vapor, o electroplatinado. Esta técnica suele ser útil para la fabricación de recubrimientos de metales, pero presenta muchas limitantes para componentes estructurales.
Aspersión	Se distribuyen partículas del material de refuerzo o el base en el material complementario inyectándolo cuando este último se encuentra en estado líquido. Así se forma un sólido con una estructura de capas, unas compuestas por el material en un inicio fundido, y otras por los polvos del metal asperjado.
Unión	Esta técnica comienza a partir de componentes en forma de láminas o placas en estado sólido que se unen posteriormente por medio de la formación de una interfaz entre pares de láminas (capas) sin cambiar el estado de agregación de estas.

1.2 Fabricación de CML's por Técnicas de Unión.

Como ya se mencionó, la fabricación de CML's por medio de la técnica de unión de capas sólidas se basa en generar uniones fuertes en la interfaz, capaces de evitar el fenómeno de “delaminación”, que es la separación entre sí de las capas que componen al CML y que puede ocurrir en cualquier etapa del ciclo de vida del componente. Esta unión se consigue por medio de diferentes métodos de fabricación como se resume en la Tabla 1.2 [4].

El método de unión por deformación es el más eficiente en términos de procesamiento industrial, pues garantiza propiedades que permiten fabricar componentes utilizados para la construcción e incluye, a su vez, una clasificación de acuerdo con el proceso de conformado por el cual se fabrican, siendo por presión, laminado, y explosión (para fabricar placas), y extrusión (para fabricar varillas) [4].

Tabla 1.2. Métodos de fabricación de CML por Unión de acuerdo con lo reportado por Leuser [4] [Elaboración propia].

Método de Unión	Descripción
Adhesión	Estos se fabrican usando un medio adhesivo, como la resina epóxica, que se aplica entre las capas de metal sólido. Se generan interfaces muy fuertes que no se delaminan bajo condiciones de tracción en la dirección de laminado.
Fusión	Se sumergen las capas de metal sólido en un baño de metal fundido presionándose entre sí y aprisionando parte del líquido en la interfaz que actuará como “pegamento” y solidificará en capas alternadas. Este método se suele utilizar para la fabricación de CML's compuestos por aceros al C y Zn.
Infiltración	Se empaquetan capas de metal entre cintas de compuestos porosos y se calientan por encima de la temperatura de fusión del metal causando la infiltración del metal líquido en el sólido. Un ejemplo de ello son los CML compuestos de Al y B ₄ C.
Difusión	Se empaquetan juntas las capas de materiales en una prensa de vacío en caliente y se llevan a temperatura de solución aplicando una presión menor a la necesaria para causar flujo plástico en el material facilitando así la difusión y, por ende, la unión.
Reacción	Se alternan hojas de metales diferentes que se calientan, a presiones elevadas, cerca de la temperatura de fusión del metal con el punto de fusión más bajo. Los metales reaccionan entre ellos formando intermetálicos y haciendo interfaces entre pares consistentes de una capa de metal y una capa de intermetálico del tipo Metal 1–Intermetálico e Intermetálico–Metal 2.
Deformación	Las capas de los materiales componentes se empaquetan juntas, por lo general en forma de “sándwich”, para después someterse a grandes deformaciones plásticas formando así interfaces fuertes inducidas por la deformación. Esta es la técnica más utilizada para componentes de uso estructural y puede ser llevada a la producción industrial.

En la siguiente sección se profundiza en los procesos de unión por deformación haciendo especial mención al proceso de laminado en caliente convencional y las alteraciones que se hacen a este para laminar un empaquetado de varias capas.

1.2.1 Procesos de Unión por Deformación.

Los procesos de Conformado de Unión por Deformación someten a los componentes de un CML a grandes deformaciones plásticas durante el procesamiento; el flujo plástico de los materiales promueve una unión muy firme entre las capas al romper las películas de óxidos y capas de impurezas que pudieran interferir. Para ello se puede recurrir a distintos procesos de conformado que involucran deformación (predominando los convencionales) y los cuales se mencionan en la tabla 1.3 [4,5].

Tabla 1.3. Procesos de fabricación de unión por deformación en CML de acuerdo con lo reportado por Leuser [4] [Elaboración propia].

Proceso de Deformación	Descripción
Presión	Se ha utilizado en aceros de ultra alto carbono empaquetando hojas que siguen una relación entre espesores de 3:5:1, y que se presionan entre sí a temperaturas altas por debajo del punto de fusión.
Extrusión	Se empaquetan tiras de metal y/o hojas en acomodo en espiral, se encapsulan y se extruyen en dirección axial a una temperatura suficiente para lograr la deformación plástica pero que no permita que las interfaces estén compuestas de soluciones sólidas.
Laminado	Se empaquetan las láminas que componen al material compuesto y se unen por laminación formando interfaces. En este proceso las capas se unen gracias a las condiciones de deformación y, en el caso de laminación en caliente, a la temperatura elevada que genera uniones metalúrgicas sólidas, es decir que ocurren no por adhesión, sino por interacciones entre las estructuras cristalinas de ambos materiales, así como por fenómenos de transporte de masa.

Relacionado a la unión por laminado, es necesario mencionar cómo se lleva a cabo el proceso de laminado en caliente convencional, puesto que esto permitirá una mejor comprensión de los fenómenos relacionados con este método de unión.

1.2.2 Laminado en caliente convencional

El laminado en caliente aplicado a aceros monolíticos es el proceso de conformado más común y barato a gran escala aplicado a aceros, en el cual el metal se calienta por encima de temperaturas de recristalización y se deforma plásticamente al hacerlo pasar entre dos rodillos para aplanarlo, alargarlo, reducir

su área transversal y obtener un espesor uniforme conservando el volumen de la pieza original. Este proceso genera cambios metalúrgicos importantes, puesto que el material de partida que proviene de colada continua tiene una microestructura inicial de grano grande, columnar y no uniforme cuyos límites son débiles pues crece en la dirección de solidificación, haciéndolo frágil al contener defectos como cavidades por contracción, porosidad causada por gases, y materiales extraños como óxidos metálicos. El laminado en caliente actúa a nivel microestructural rompiendo las estructuras de grano y destruye los límites de grano, favoreciendo la formación de estructuras nuevas con límites de grano fuertes y microestructuras recrystalizadas [6].

La forma más común en la que este proceso se lleva a cabo a nivel industrial es tomando como material de inicio ya sea un planchón o palanquilla proveniente de colada continua que pasa directamente a los castillos de laminación, donde se procesa el material en múltiples pasos de deformación, es decir que cuando pasan completamente a través de los rodillos y salen de dicha zona, se vuelven a introducir para continuar con la deformación hasta alcanzar el espesor requerido. En operaciones a menor escala, se tienen los materiales a temperatura ambiente y se calientan ya sea por inducción o en hornos antes de introducirse al castillo [5,6].

En general, el laminado en caliente puede beneficiar a propiedades mecánicas en aceros monolíticos como tenacidad, ductilidad, conformabilidad y soldabilidad [5].

Habiendo ya mencionado en qué consiste el proceso de laminación, en el siguiente subtema se profundiza en este proceso de deformación y su aplicación para la fabricación de CML denominado como tecnología de Unión por Laminación en Caliente para unir hojas de distintos materiales.

1.3 Tecnología de Unión por Laminación en Caliente (ULC).

En años recientes los procesos más comunes para manufacturar placas revestidas por medio de unión en materia de aceros inoxidables son: por explosión, por difusión, y por laminación en caliente, los cuales se explican en la Tabla 1.4 [5,7-9].

Tabla 1.4. Procesos de unión de Aceros Inoxidables de acuerdo con lo reportado por Leuser [4] [Elaboración propia].

Proceso de Unión	Descripción
Explosión	Es un proceso en el cual las láminas son unidas a altas presiones por medio de una explosión controlada. En este proceso se logra una soldadura directa de forma instantánea independientemente de que los metales sean similares o no.
Difusión	Es un proceso de unión donde el principal mecanismo es difusión en estado sólido. Igualmente aplica tanto para materiales similares como diferentes.
Laminación en Caliente	Es un proceso en fase sólida donde la unión se genera entre áreas apiladas por deformación. Este proceso permite unir materiales similares o diferentes con bajas tolerancias dimensionales.

Durante la unión por laminación las capas superficiales frágiles de metal se fracturan coherentemente, el metal debajo de estas capas es expuesto y deformado al someterse a la presión normal de laminado a través del agrietamiento de las capas superficiales. Siendo el grado de deformación uno de los parámetros de control, se ha descubierto que la unión generada a través de este proceso no ocurre sino hasta que se llega a cierto límite de deformación, el cual depende de la combinación de materiales a unir y, una vez que este límite es rebasado, la fuerza de unión incrementa con el grado de deformación. Los fenómenos anteriormente mencionados son potenciados cuando el proceso se realiza en caliente, pues el material se vuelve más dúctil y los cambios en la microestructura durante el calentamiento y el enfriamiento refuerzan los beneficios a las propiedades alcanzados por esta técnica.

El proceso de unión por laminado en caliente suele estar entre los procesos de conformado más comunes para CML y proporciona mejoras sustanciales a las propiedades de los materiales por medio de la generación de uniones de naturaleza metalúrgica que son tan o más fuertes que el material base en sí [5].

Este proceso se puede aplicar para diferentes combinaciones de materiales, las cuales se mencionan en la siguiente sección, incluyendo aquellas que contemplan el material de interés para este trabajo: Aceros Inoxidables.

1.3.1 CML fabricados por medio de ULC.

El producto de ULC suele consistir en un metal base colocado en el centro con capas externas de material de refuerzo (del mismo material o de materiales distintos), y las combinaciones que más comúnmente se fabrican en materia de aceros inoxidables están presentadas en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Tipos de CML fabricados con un acero inoxidable como material base [Elaboración propia].

Combinación	Capa Central	Capas Externas
Acero inoxidable y Al	Acero inoxidable	Al
	Al	Acero Inoxidable
Acero inoxidable austenítico y Al	Acero inoxidable austenítico	Al
Acero inoxidable austenítico y Cu	Acero inoxidable austenítico	Cu
Acero inoxidable & Acero al C	Acero al C	Acero inoxidable

En la gran mayoría de los materiales CML que se fabrican de forma industrial y experimental a través del proceso de ULC, las láminas de los materiales que los componen están acomodadas de forma alternada en acomodos de dos capas, o bien, tipo “sándwich” de tres o más capas como es el caso de los estudios realizados por Semiatin et al. [10] y Afonja et al. [11] siendo estos acomodos el tipo de estructura que hasta la fecha más se utiliza. Además, el proceso de ULC se aplica casi exclusivamente a CML compuestos de capas gruesas, como planchones provenientes de colada continua [5,10,11].

Habiendo ejemplificado algunas de las combinaciones de materiales que se han fabricado por medio de ULC, cabe mencionar que la fabricación de CML por medio de este proceso cuenta con otra gran ventaja: la de predecir algunas propiedades por medio de una metodología basada en una metodología, tópico que se aborda en el siguiente subtema.

1.4 Uso de la regla de las mezclas para predecir propiedades mecánicas de los CML.

Los procesos de ULC requieren una selección cuidadosa de la temperatura y el rango de deformación, pues de ellos depende el grado de unión alcanzado y su firmeza. Desafortunadamente, los parámetros y descripciones de estos procesos son confidenciales bajo patentes [4].

En los CML y, por ende, en sus procesos de fabricación, ciertas propiedades dependen solo de cantidades relativas y de las propiedades de los constituyentes individuales, como es el caso del comportamiento mecánico en deformación (curva esfuerzo-deformación). La regla de las mezclas puede predecir con exactitud estas propiedades [12].

La Regla de las Mezclas (RDM) es una metodología (de naturaleza empírica) que consiste en conocer el o los valores de la o las propiedades de los componentes individuales de un CML como pueden ser módulo elástico, esfuerzo de cedencia o la carga máxima soportada por un material (UTS); y posteriormente hacer el cálculo de la(s) propiedad(es) en cuestión por medio de un promedio ponderado determinado por las fracciones de volumen [13].

En un CML de configuración sándwich simétrica sometido a tracción uniaxial se considera que la deformación es uniforme a través del espesor y del ancho, e igual en todos los componentes al asumir que son isotrópicos.

La ecuación general de RDM utilizada para realizar el cálculo se presenta en la Ec. 1:

$$P_c = \Sigma(V_i P_i) = V_1 P_1 + V_2 P_2 + \dots + V_n P_n \quad (\text{Ec. 1})$$

donde P_c es una propiedad determinada del compuesto (módulo elástico, esfuerzo de cedencia, UTS, etc.); P_1, P_2 hasta P_n es el valor de la propiedad en cuestión de cada constituyente del material compuesto; y V_1, V_2 hasta V_n son las fracciones volumétricas de cada constituyente [12,14]. Otras propiedades no mecánicas que

se pueden calcular con un error insignificante son la densidad, la conductividad eléctrica y térmica [12]

Lee et al. [13], Choi et al. [15] y Kim et al. [16] mencionan que al poder aplicar la RDM sobre los valores de esfuerzo de cedencia o σ_{UTS} , y al estar relacionadas con el comportamiento elástico y plástico de un material en deformación que se refleja en la curva esfuerzo-deformación, se puede aplicar de la misma manera sobre cualquier valor de esfuerzo en cualquier punto de una curva esfuerzo-deformación.

La Figura 1.3 ilustra una curva esfuerzo-deformación ingenieril típica y los puntos mencionados (UTS y carga máxima soportada).

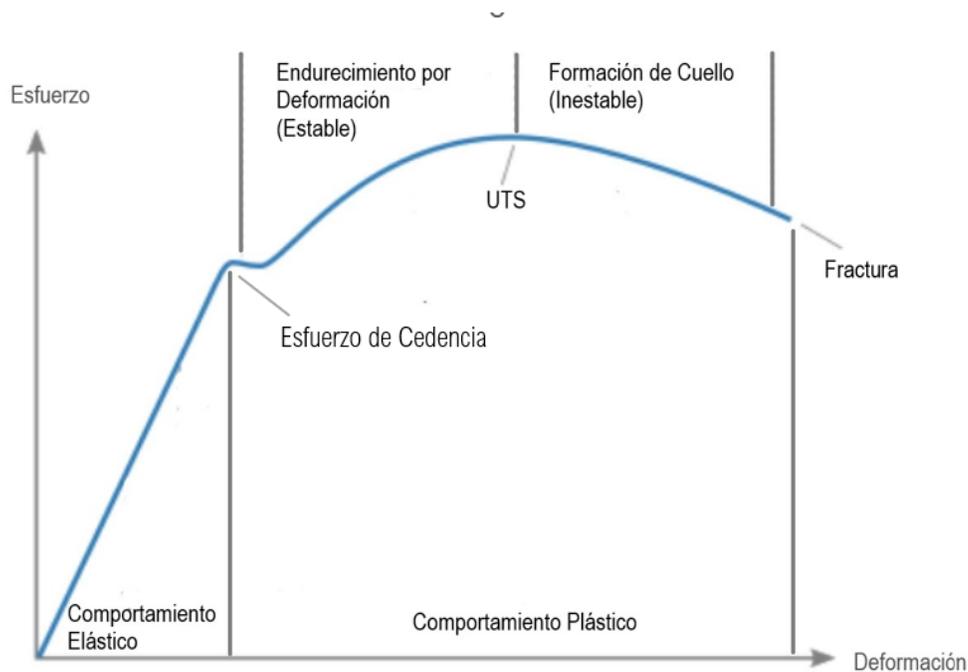


Figura 1.3. Curva típica ingenieril esfuerzo-deformación en ensayo de tracción ejemplificando los comportamientos elástico y plástico de un material, así como la localización del UTS. [Elaboración propia].

En cuanto a las propiedades mecánicas que la curva esfuerzo-deformación ilustra, el UTS es de gran interés dado que indica la carga máxima que el material soporta cuando se somete a ensayo de tracción; esto implica que previo a alcanzar este punto la deformación es útil, es decir, aporta propiedades mecánicas al material y,

una vez rebasado, la carga aplicada comienza a decaer e indica el fin la deformación plástica útil; a estas etapas de utilidad de la deformación, Dhib, Z. et al. las llaman deformaciones estable (previa a alcanzar el UTS) e inestable (una vez rebasada la UTS) [5]. La Figura 1.3 ilustra también estas etapas de deformación.

Cuando un material se somete a ensayo de tracción el UTS coincide con la formación de un “cuello” en la probeta ensayada, es decir, que la sección transversal reduce su espesor, lo que puede llevar a una eventual fractura; la formación de cuello ha sido el punto de estudio de diversas publicaciones que involucran la aplicación de la RDM.

Los conceptos antes mencionados se aplican a materiales monolíticos, pero estos se pueden transportar al campo de los CML, alla RDM aplicar la RDM a curvas esfuerzo-deformación de la forma $\sigma = \sigma(\epsilon_1)$, donde el término (ϵ_1) hace referencia a que los esfuerzos están tomados a un mismo valor de deformación. Si se adapta la Ec. 1 a los valores de esfuerzo a una misma deformación para el caso de un material revestido simétrico de dos componentes (que tienen láminas de revestido del mismo material) queda como está escrita en la Ec. 2.

$$\sigma_s(\epsilon_1) = V_m\sigma_m(\epsilon_1) + V_c\sigma_c(\epsilon_1) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde los subíndices corresponden a: “sándwich” (s), capa media o central del acomodo (m), y capas de revestido (c); asimismo, los términos V se refieren a las fracciones de volumen de cada componente, y el término ϵ_1 indica que se consideran los esfuerzos a un mismo valor de deformación [10].

La RDM considere primordialmente dos conceptos considerados por Leuser et al. [4] que son los comportamientos de isoefuerzo e isodeformación pues estos son esenciales para establecer los parámetros del proceso.

El comportamiento de isodeformación se presenta cuando todos los componentes del CML presentan la misma deformación sin importar si están sometidos al mismo esfuerzo o no, como se puede apreciar en el inciso a) de la Figura 1.4; mientras que el comportamiento de isoefuerzo es el caso contrario al de

isodeformación, los materiales están sometidos al mismo esfuerzo, pero no necesariamente a la misma deformación, esto está ilustrado en el inciso b) de la Figura 1.4. Cabe resaltar que el comportamiento de isodeformación fortalece la unión entre las capas [4].

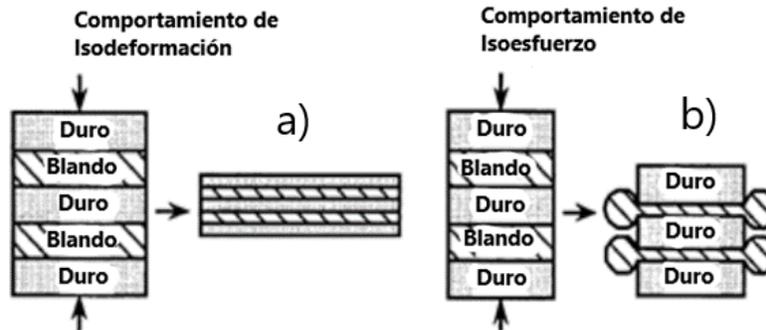


Figura 1.4. Representación esquemática de los comportamientos de isodeformación e isoefuerzo para dos materiales con comportamientos esfuerzo-deformación diferentes presentado por Leuser et al. [4].

Al momento de fabricar un CML en configuración sándwich, se procura seguir el comportamiento de isodeformación, como lo establece Li et al. en [1], por lo que los materiales no deben exceder sus dimensiones laterales entre sí. Esta condición permite utilizar las fracciones volumétricas iniciales para el cálculo a realizar con fines predictivos; además, si se asume que las capas componentes tienen el mismo largo, la fracción volumétrica es igual a la fracción de área transversal como se establece en la Ec 3:

$$\sigma_s(\epsilon_1) = A_m\sigma_m(\epsilon_1) + A_c\sigma_c(\epsilon_1) \quad (\text{Ec. 3})$$

donde σ es un valor de esfuerzos en la curva esfuerzo-deformación, A es la fracción de área de cada componente y los subíndices s , m y c se refieren al componente sándwich, la capa media y las capas de revestido respectivamente.

Y de la misma manera, al tener las capas el mismo ancho, la fracción transversal se considera igual que la fracción de espesor en el CML, por lo que la Ec. 3 se puede establecer como lo indica la Ec. 4:

$$\sigma_s(\epsilon_1) = X_m\sigma_m(\epsilon_1) + X_c\sigma_c(\epsilon_1) \quad (\text{Ec. 4})$$

cambiando el factor A (fracción de espesor) por X que es la fracción de espesor de cada componente manteniendo los mismos subíndices.

Estudios llevados a cabo por Lee et al., [13] Choi et al. [15] y Semiatin et al. [9] en placas de aluminio revestido con acero inoxidable; y por Kim et al. [16] en placas de acero TWIP revestido con acero bajo carbono validan el uso de la regla de las mezclas para CML's para determinar el flujo de esfuerzos en CML's en configuración de sándwich.

Es importante tomar en cuenta ciertas consideraciones al aplicar la RDM, entre ellas que la metodología no es aplicable a bajos valores de esfuerzo, puesto que se cuenta con un estado de esfuerzos distinto al supuesto en la construcción de la metodología en el que el módulo elástico ha adquirido un valor definido. Por ello, se limita su aplicación en los datos de grado de deformación solo cuando estos son mayores o iguales a 0.05 [10].

Aunado a lo anterior la aplicación de la Regla de las Mezclas considera las siguientes suposiciones:

- El esfuerzo axial en cada componente es equivalente al esfuerzo que sostendría si fuera tensionado individualmente.
- Los esfuerzos de flexión que pudieran presentarse durante la tracción son despreciables.
- Los componentes se deforman juntos, no hay deslizamiento en interfaces entre las capas, por lo que está ligado al comportamiento de isodeformación (deformaciones equivalentes).
- Las diferencias de propiedades entre materiales no inducen esfuerzos transversales.

Además, se considera, a nivel estado de esfuerzos en la placa conformada, que solo actúan esfuerzos planares en el momento de la deformación (Semiatin, 1979), es decir, en la dimensión paralela a la dirección de laminado (y) y en la dirección ortogonal que se extiende en el ancho de la placa (x); mientras que los esfuerzos que corresponden a la dirección del espesor (z) son despreciables e

igualados a cero en la formulación matemática (Ec. 5-7) del cálculo de esfuerzos como se puede observar en la Figura 1.5.

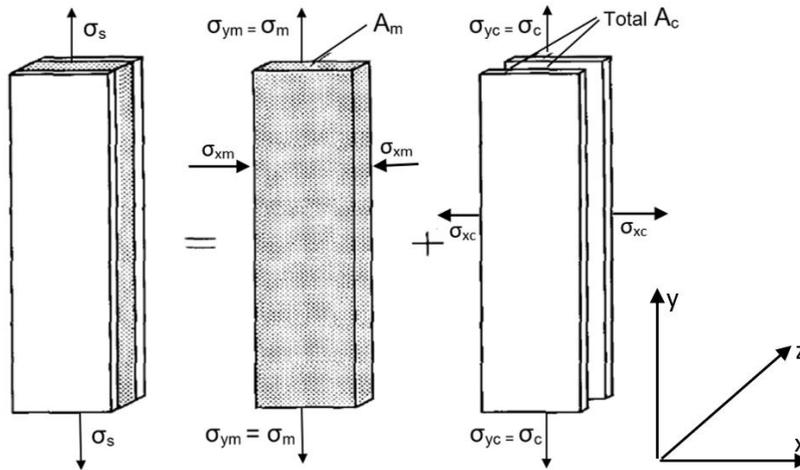


Figura 1.5. Regla de las mezclas bajo el modelo de isodeformación en tracción uniaxial para una placa de material revestido de forma simétrica presentada por Semiatin et al. [10]

$$\sigma_{ys} = A_m \sigma_{ym} + A_c \sigma_{yc} \quad (A_m + A_c = 1) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\sigma_{xs} = 0 = A_m \sigma_{xm} + A_c \sigma_{xc} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\sigma_{zs} = \sigma_{zc} = 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde σ se refiere a los valores de esfuerzo y A las fracciones de área, los primeros subíndices x, y, z hacen referencia a los ejes en la placa (ilustrados en la Figura 1.5), haciendo referencia al ancho, largo y espesor respectivamente; mientras que los segundos: s, m y c se refieren a sándwich, capa media y capa de revestido.

La tecnología de CML's fabricados por ULC se ha aplicado recientemente en el campo de materiales con baja conformabilidad, como los aceros con altos contenidos de boro.

1.5 Efecto del boro en aceros.

Uno de los usos más estudiados para CML's es en lo concerniente a la industria nuclear, cuyas actividades en el área de generación de energía limpia por medio de plantas de energía nuclear han incrementado; además del uso de isótopos de radiación nuclear en medicina, agricultura, industria y ciencia de materiales [17]. Sin embargo, no es un secreto que la exposición descontrolada a la radiación nuclear puede causar daños graves a la salud tanto de los trabajadores de las plantas, como de la población de los alrededores o al entorno mismo. Es por ello por lo que se prioriza en estrategias de protección a la radiación efectiva para poder asegurar los beneficios que otorga la energía nuclear, lo que ha llevado a la difícil tarea de buscar materiales que provean una efectiva protección a la radiación basados en el estudio de la protección contra neutrones y rayos gamma, tras lo cual se descubrió que los elementos de aleación de los que más información existe son el plomo (Pb), bismuto (Bi) y boro (B), así como sus compuestos.

Como cualquier elemento aleante en el acero, el boro se añade cuando el metal se encuentra en estado líquido, y el comportamiento de estas adiciones se ve reflejado una vez que el material solidifica, por lo que el grado de difusión de un elemento en el acero está influenciado por la temperatura a la que se encuentra el material, de modo que el grado de difusión incrementa a medida que incrementa la temperatura del material. Los primeros estudios realizados por Busby et al. [18] establecían un rango de solubilidad máxima del boro en aceros menor al 0.0006%, parámetro que con estudios posteriores sería puesto a prueba, por ejemplo, en el realizado por Jiménez et al. [19] donde se establece que la solubilidad máxima del boro en el acero es de entre 0.0016% - 0.0033% en fase austenítica, disminuyendo en fase ferrítica.

Dado que la solubilidad del boro en el hierro es muy pequeña, esto refleja solo la limitante al formar una solución sólida, más no especifica qué ocurre cuando se agregan cantidades mayores y, en especial, mucho mayores que el límite de

solubilidad del boro en el hierro (Fe), por lo que prácticamente cualquier adición de boro que exceda el límite de solubilidad formará partículas de segunda fase (boruros), que tienen especial afinidad con la matriz de hierro, así como con el cromo (Cr) presente en aceros inoxidable [20].

Los aceros inoxidable borados son, básicamente, aceros inoxidable austeníticos comerciales modificados con contenidos de entre 0.2 – 2.5% de boro en peso; estos han sido utilizados para la industria de energía nuclear debido a la ya mencionada capacidad térmica de absorber neutrones y radiación gamma otorgada por el boro.

Se han hecho algunos estudios en materiales como el acero AISI 304 con contenidos de 1 – 2% de boro, el cual es un material de dos fases heterogéneo caracterizado por la presencia de grandes partículas de boro en una matriz austenítica. Los aceros inoxidable con altos contenidos de boro suelen presentar deficiencias al someterse a procesos de conformación en caliente debido, sobre todo, a la presencia de precipitados de segunda fase, que en este caso son boruros, estos tienen dos características a resaltar: son resistentes, pero a la vez, frágiles, y se suelen presentar en una red continua, al menos en el material obtenido de colada [21].

Dentro de la industria nuclear, los aceros inoxidable borados (B: 2.1% - 2.5% en peso) son utilizados específicamente para fabricar contenedores de residuos de combustible, pero la misma naturaleza de los materiales hace que no posean las propiedades adecuadas para ser conformados en caliente; sin embargo, cuando un acero inoxidable de características frágiles se une a materiales dúctiles por tecnología de unión por deformación, sus propiedades de conformado se mejoran, haciendo viable que se pueda dar la forma requerida a un componente.

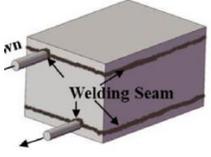
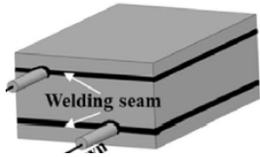
2. METODOLOGÍA.

2.1 Realización de búsqueda bibliográfica.

El primer acercamiento al tema fue a través del artículo *Suppression of edge cracking and improvement of ductility in high borated stainless steel composite plate fabricated by hot-roll-bonding* [1] por Li, Y.-W. et al., encontrado durante el desarrollo de un trabajo previo de investigación en materia de tratamientos termomecánicos de aceros, el cual fue considerado como el punto de partida de este trabajo en los aspectos de investigación bibliográfica y obtención de datos. Posteriormente, a través del portal bidi UNAM (Biblioteca Digital UNAM) se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva orientada hacia CML's en configuración de sándwich que involucraran aceros inoxidables con altos contenidos en boro revestidos con un material más dúctil; este criterio se aplicó debido al fenómeno de mejora de ductilidad por unión observado en [1]. De esta manera se encontró otro artículo del mismo equipo de trabajo [2], el cual explora el acomodo de las capas que componen a los CML's y los mecanismos de mejora de la ductilidad, además de la posibilidad de predecir si los materiales fabricados cumplirán con las propiedades requeridas a través de la RDM.

La Tabla 2.1 muestra un resumen de los artículos [1] y [2] con las características de cada material y los principales aspectos que se estudiaron en cada trabajo; de esas características cabe resaltar la relación de espesores (referida como RE en adelante), la composición química de las capas que componen a cada compósito y el objetivo de cada artículo, así como la denominación con la que se identificará cada compósito a lo largo de este trabajo.

Tabla 2.1. Comparación entre los materiales de ambos artículos [1,2] [Elaboración propia].

Artículo Li, Yong-Wang, et al.	Supression of edge cracking and improvement of ductility in high borated stainless steel composite [1]	Microstructure & tensile elongation enhancement of 1.6%B stainless steel plates fabricated by composite rolling [2]
Denominación del compuesto	CML 316-B	CML 304-B
Año	2018	2019
Material Base	Acero inox borado (Cr: 18.5%, Ni: 13.97%, B: 2.12%, Mn: 1.76%)	Acero Inox borado (Cr: 18.47%, Ni: 9.04%, B: 1.62%)
Material de Revestido	Acero inox 316 aust (Cr: 18.45%, Ni: 14.01%, Mn: 1.78%)	Acero 304 Inox aust (Cr: 18.51%, Ni: 9.82%)
Tipo de CML fabricado	Material Base revestido de forma simétrica con una capa de material de refuerzo por cada cara 	Material Base revestido de forma simétrica con una capa de material de refuerzo por cada cara 
Relación de espesores (RE)	1:6:1	1:3:1
Fracciones de Área	0.125, 0.75, 0.125	0.2, 0.6, 0.2
Objetivo del estudio	Inhibir el agrietamiento en los bordes de la lámina fabricada, y estudio de los mecanismos de falla y de mejora de propiedades	Mejoras de elongación a la tracción a partir del grado de endurecimiento por deformación
Pruebas de Caracterización	Ensayo de tracción, Preparación metalográfica, MEB y Fractografía	Ensayo de tracción, Preparación metalográfica, Difracción de rayos X, MEB y Fractografía

Posterior a ello se hizo búsqueda de artículos que coincidieran con las palabras clave “hot roll bonding”, “sandwich composite” y “clad plates”; de esta búsqueda se encontraron artículos relacionados con la técnica de unión por laminación en caliente y que exploran más a fondo la RDM; dichos artículos fueron encontrados a través de los portales Compendex, ScienceDirect, Scopus y SpringerLink, y cabe mencionar dos de ellos: *Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates*. [5] por Dhib, Z. et al., pues hace un estudio enfocado a los fenómenos de unión de aceros inoxidables laminados; y *Deformation of sandwich sheet materials in uniaxial tension*. [10] por Semiatin S.L. et al. que explora a mayor profundidad la metodología, además este

autor fue tomado como referencia para encontrar publicaciones que se hayan enfocado en aplicar la regla.

2.2 Digitalización de datos.

Tras dar una lectura y revisión exhaustiva de los artículos [1] y [2] se tomaron los datos reportados en ambos artículos y se digitalizaron por medio del software ImageJ. Dicha digitalización se describe a continuación:

Se utilizó la herramienta de rectángulo se selecciona el área a calibrar, como se puede observar en la Figura 2.1, tomando como referencia los ejes “x” & “y” de las curvas esfuerzo-deformación:

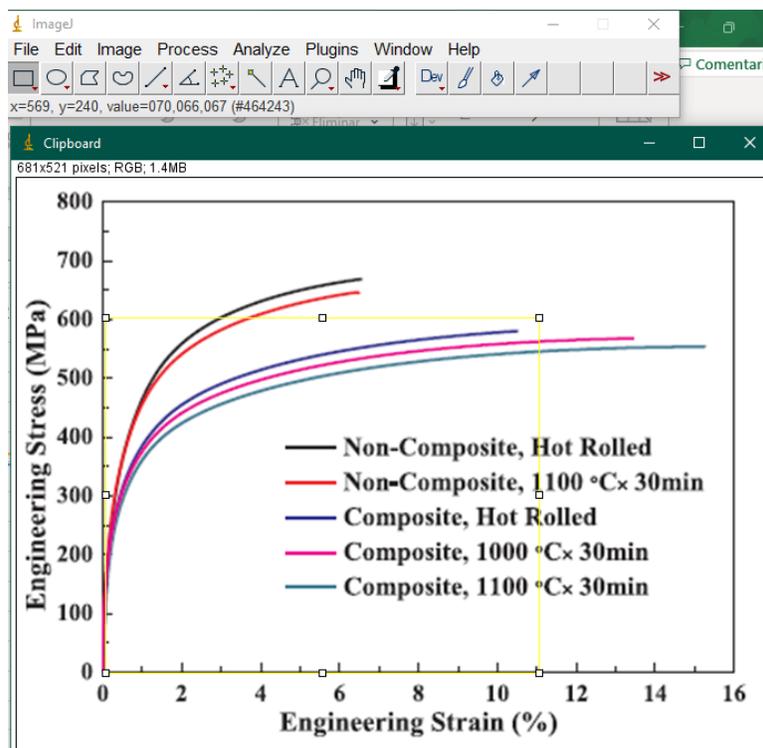


Figura 2.1. Selección de área de análisis

Después se utilizó la herramienta de calibración ilustrada en la Figura 2.2 para, una vez seleccionada el área, dar los valores a los puntos máximos y mínimos en los ejes “x” & “y”, que corresponden a los vértices del rectángulo trazado:

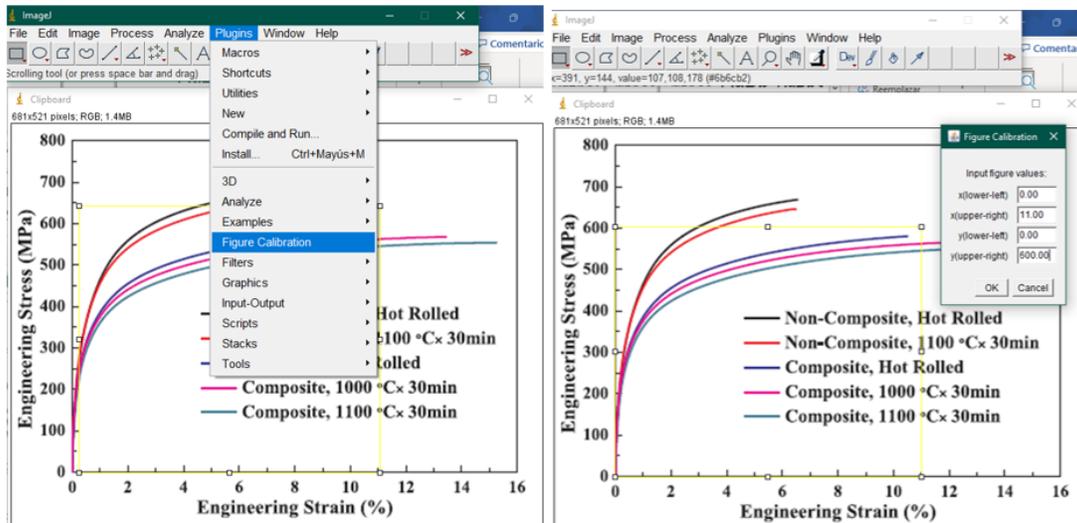


Figura 2.2. Calibración de valores máximos y mínimos en los ejes x & y.

A continuación, se usó la herramienta multi-punto para trazar puntos siguiendo la curva y, una vez trazados, se oprimieron los comandos Ctrl + M para desplegar los valores de esfuerzo y deformación en forma de tabla, estos se trasladaron a una hoja de cálculo para así poder insertar un gráfico con los datos obtenidos. Este mismo procedimiento se aplicó a todas las curvas que se deseaban digitalizar obteniendo un gráfico como el que se muestra en la Figura 2.3:

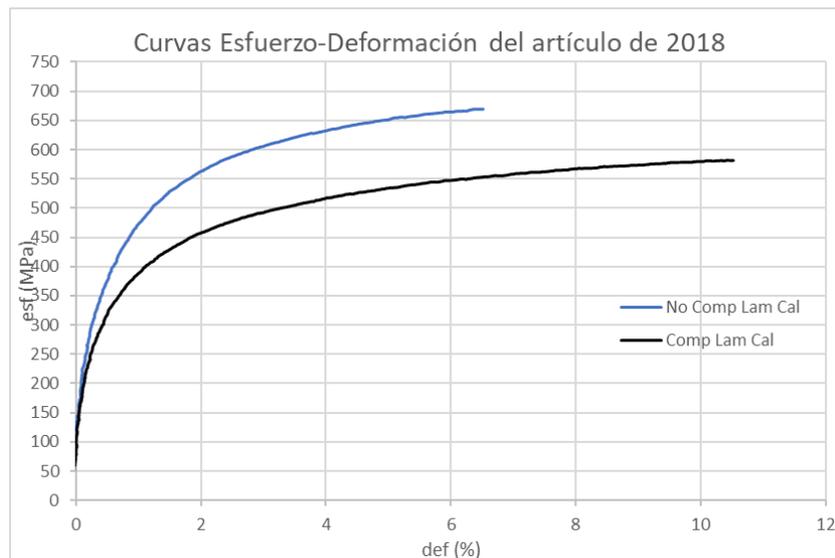


Figura 2.3. Curva esfuerzo-deformación del artículo [1] construida con los datos digitalizados usando ImageJ.

En la Figura 2.3 se puede observar la digitalización de las curvas correspondientes al CML 316-B y el acero borado que compone su capa media; estos datos fueron utilizados tanto para los cálculos con la regla y su análisis comparativo.

Teniendo en cuenta que la RDM (Ec. 1) utiliza datos de las curvas esfuerzo-deformación de todos los materiales que componen al CML, se recurrió a una segunda búsqueda bibliográfica enfocada a encontrar las curvas esfuerzo-deformación de los aceros de revestido por medio de los mismos portales utilizados en la primera investigación tomando como criterio de búsqueda el que los aceros ensayados hayan sido laminados en caliente. Esta segunda búsqueda llevó al artículo *Experiments on dynamic mechanical properties of austenitic stainless steel S30408 and S31608* [22] por Jia, S. et al. donde reportan curvas esfuerzo-deformación experimentales para aceros 304 y 316 nombrados en él como S30408 y S31608 respectivamente. A estas imágenes se les dio el mismo tratamiento de digitalización de datos para obtener las curvas correspondientes acotando los valores de deformación en el máximo alcanzado en las curvas de los CML de los artículos [1] y [2].

2.3 Cálculos

Una vez digitalizadas todas las curvas que son de interés (ambos compósitos, acero 304, acero 316 y ambos aceros borados), se procedió a hacer los cálculos pertinentes a la regla de las mezclas por medio de la Ec. 4, la cual se enuncia nuevamente a continuación:

$$\sigma_s(\epsilon_1) = X_m \sigma_m(\epsilon_1) + X_c \sigma_c(\epsilon_1) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde los subíndices corresponden a:

- s: sándwich o compósito completo.
- m: capa central o media del acomodo de capas.
- c: capas de revestido.
- A: fracciones de área transversal.

*NOTA: El término ϵ_1 indica que los cálculos de los valores de esfuerzos del CML se hacen con datos de esfuerzo para un mismo valor de deformación de cada material individual.

Teniendo en cuenta la ecuación que la metodología involucra, el primer paso fue calcular las fracciones de área transversal de cada material. Por ejemplo, en el caso del CML 316-B se menciona que las capas que lo componen tienen una RE de 1:6:1 referentes a las capas revestido, media y revestido respectivamente; de esta forma, se consideró un espesor unitario para el compuesto, por lo que las fracciones de área serían 0.125, 0.75, 0.125 respectivamente. Ahora bien, el artículo tiene como objeto de estudio un CML en configuración de sándwich simétrico, lo que quiere decir que las dos capas que revisten a la capa media son del mismo material, por lo que sus fracciones de área se sumaron para ser consideradas en la formulación de la Ec. 1, teniendo la siguiente ecuación para el caso del CML 316-B:

$$\sigma_{us}(\epsilon_1) = 0.750\sigma_{um}(\epsilon_1) + 0.250\sigma_{uc}(\epsilon_1) \quad (\text{Ec. 8})$$

De esta forma, solo se sustituyeron los valores de esfuerzo a una misma deformación de cada material. Los datos de esfuerzo calculados por medio de la Ec. 2 se graficaron contra los valores de deformación; además con fines de análisis comparativo este gráfico se colocó junto con la curva del compuesto digitalizada. La aplicación de la regla se realizó de igual forma para el compuesto 304-B.

Como un paso final adicional se hizo el cálculo de RDM invirtiendo las RE de los artículos en la Ec. 1, es decir, el CML 316-B que tiene una relación de 1:6:1 manejaría ahora la relación de espesores del CML 304-B que es de 1:3:1 y viceversa; este cambio en los cálculos se hace con el propósito de observar el efecto que tendrá el cambio de espesor sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril en cuanto a la cercanía a la curva experimental reportada en su respectivo artículo [1,2].

2.4 Determinación de módulo de Young y esfuerzo de fluencia convencional al 0.2%.

Una vez obtenidas las curvas esfuerzo-deformación ingenieriles para cada CML tanto reportado por Li et al. [1,2] como calculado por medio de RDM con distintas RE, se procedió a hacer el cálculo del módulo de Young, así como la lectura del esfuerzo de fluencia convencional al 0.2% de deformación para cada una de estas curvas, y de esta manera ilustrar el efecto de la variación de la RE sobre las curvas de manera cuantitativa en los valores de dichas propiedades.

3. RESULTADOS.

Aplicación de Regla de las Mezclas para cálculo de las curvas esfuerzo-deformación ingenieril.

Compuesto Metálico Laminado 316-B.

Inicialmente se presentan los resultados relacionados al CML 316-B reportado en el artículo *Suppression of edge cracking and improvement of ductility in high borated stainless steel composite plate fabricated by hot-roll-bonding* por Li, et al. [1]. En la Figura 3.1 se puede observar la curva reportada para el acero borado utilizado y el compósito obtenido, ambos bajo distintas condiciones de procesamiento

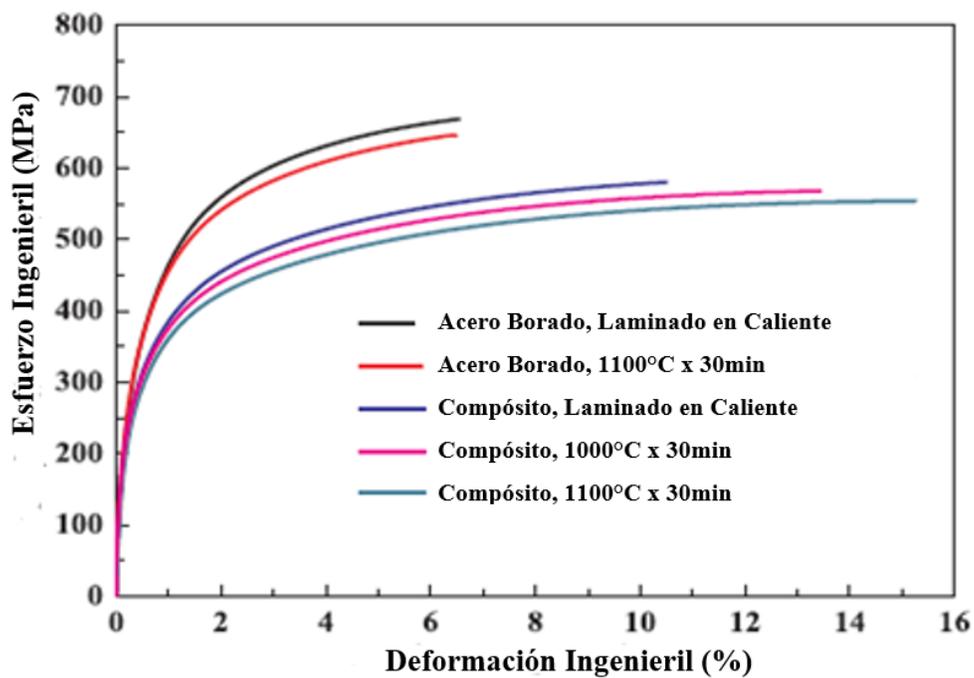


Figura 3.1. Curvas esfuerzo-deformación reportadas por Li et al. en [1] para el acero borado y el CML 316-B.

De la figura 3.1 se digitalizan los datos de las curvas de interés para este estudio, es decir las correspondientes al acero borado y al compuesto fabricado, ambos sin tratamiento térmico posterior. Estas curvas se encuentran recreadas en la Figura 3.2.

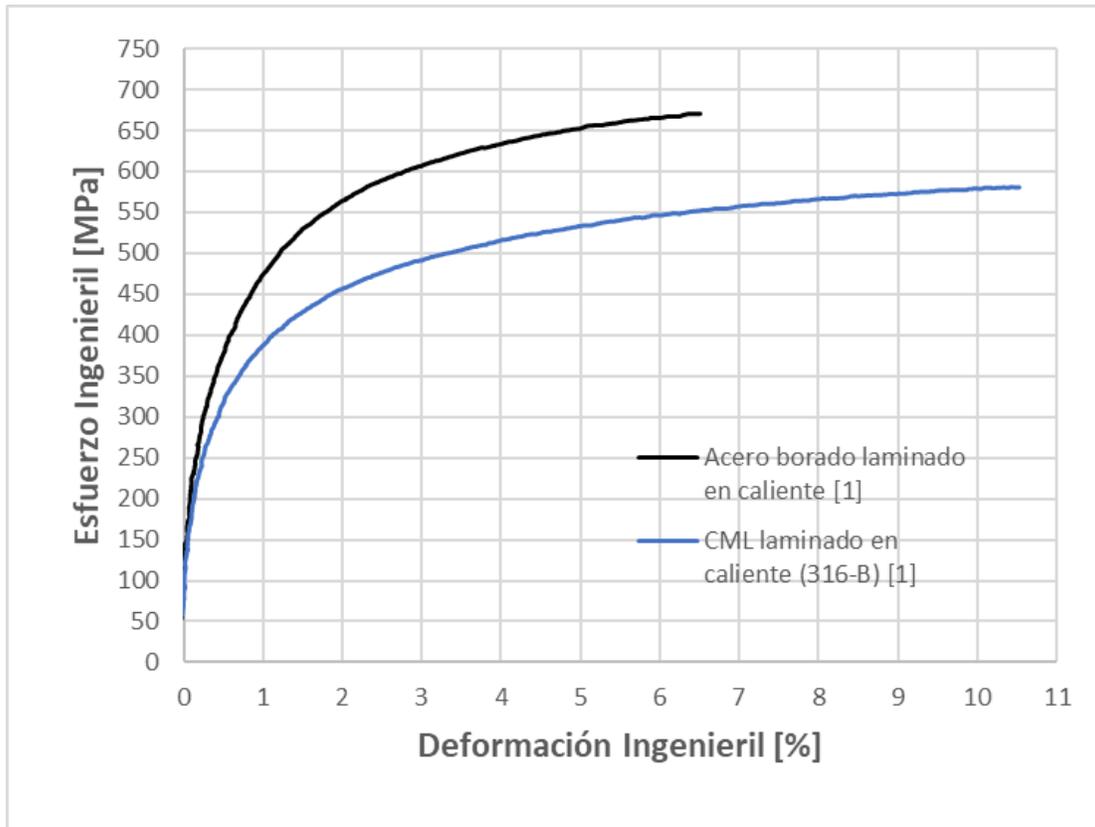


Figura 3.2. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de las curvas reportadas por Li et al. en [1] para los materiales y condiciones de interés.

Cabe mencionar nuevamente que el CML 316-B está fabricado de un acero borado como capa central, el cual tiene la misma composición química que el acero inoxidable austenítico que lo reviste (esto se puede ver en la Tabla 2.1), a excepción de tener cierta cantidad de boro añadida. Basado en la composición química reportada para el acero de revestido, se puede realizar la búsqueda de un acero inoxidable austenítico comercial que coincida con dicha composición, la cual corresponde al acero inoxidable 316, del cual se procedió a buscar una curva esfuerzo-deformación bajo condiciones de laminado en caliente, la cual fue

extraída del artículo [22] por Jia et al. y se presenta en color negro en la Figura 3.3.

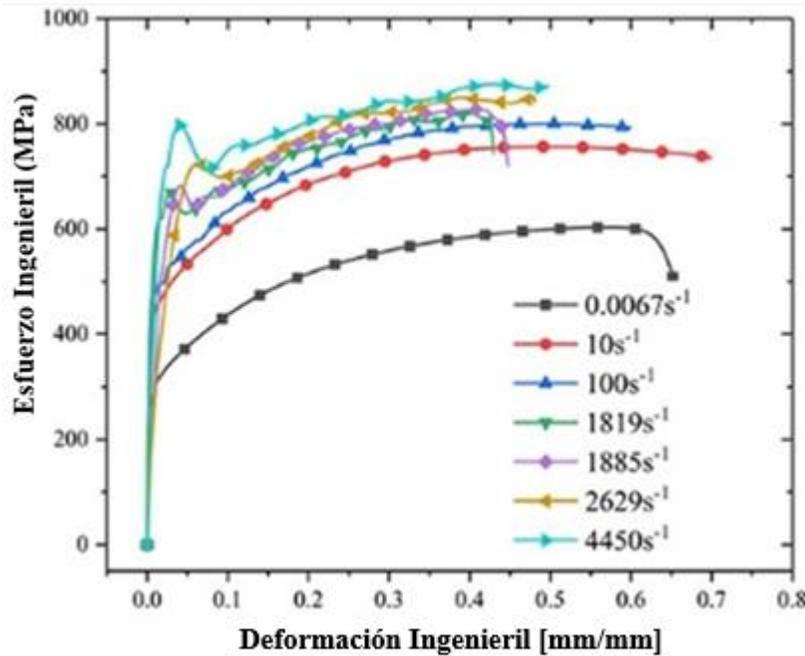


Figura 3.3. Curvas experimentales esfuerzo-deformación para el acero 316 reportado por Jia et al. en [22]. La curva de color negro es la de interés para el caso que compete a este estudio.

De la misma manera que con la Figura 3.2, en la Figura 3.4 se encuentra recreada la curva correspondiente al acero 316, cuyos datos se obtuvieron igualmente con el software ImageJ.

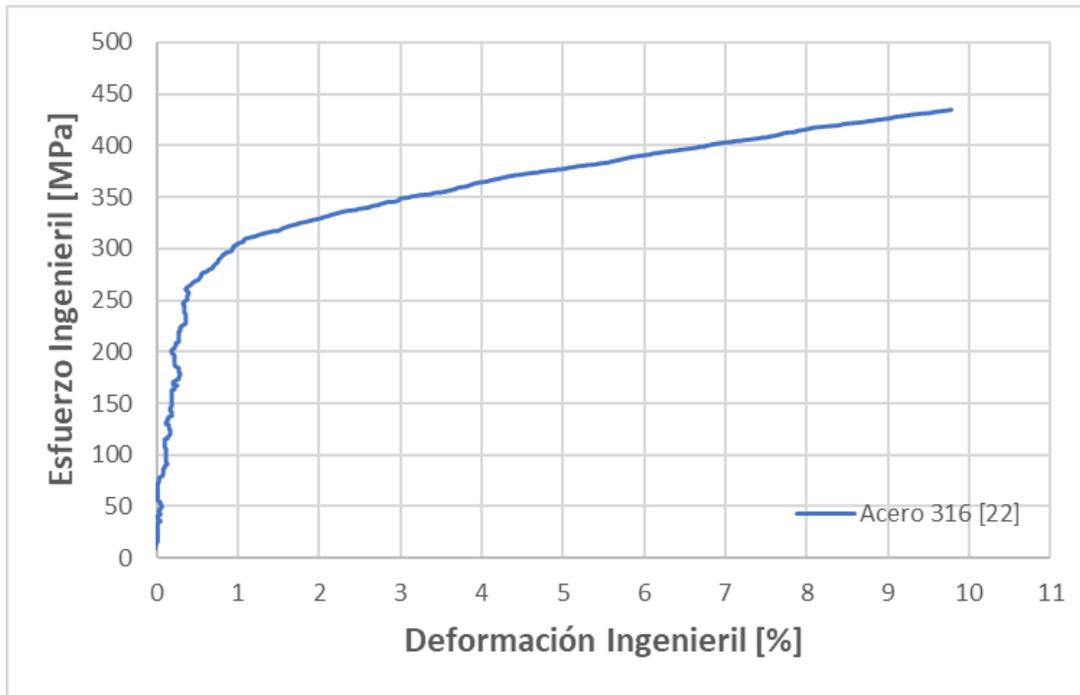


Figura 3.4. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de la zona de interés (0 a 10% de deformación) de la curva reportada por Jia et al. en [22] para el acero 316.

En la Figura 3.5 se muestran las tres curvas involucradas en la RDM, es decir, la del acero borado, la del acero inoxidable y la calculada del CML 316-B por medio de la Ec. 1, mostrando que, de acuerdo con lo reportado por Li, et al. [1,2], Semiatin, et al. [10] y Jiménez, et al. [19], la curva calculada presenta propiedades mecánicas intermedias a las correspondientes a los materiales que lo componen.

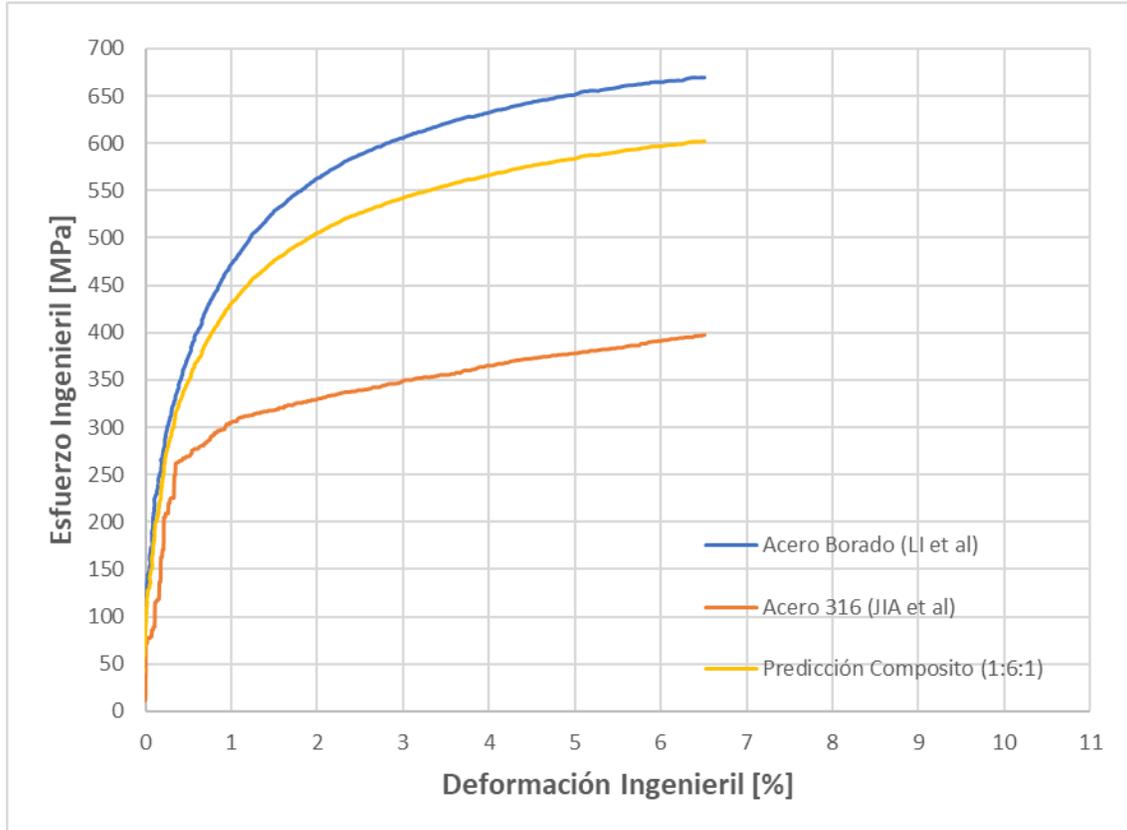


Figura 3.5. Curva para el compuesto obtenida por RDM a partir de las curvas de los materiales individuales.

Con fines comparativos se presenta en la Figura 3.6 la curva obtenida por medio de la aplicación de la regla al lado de la curva del CML 316-B obtenida experimentalmente por Li et al. Se puede apreciar que el comportamiento de la curva calculada por RDM presenta diferencias contra la curva experimental.

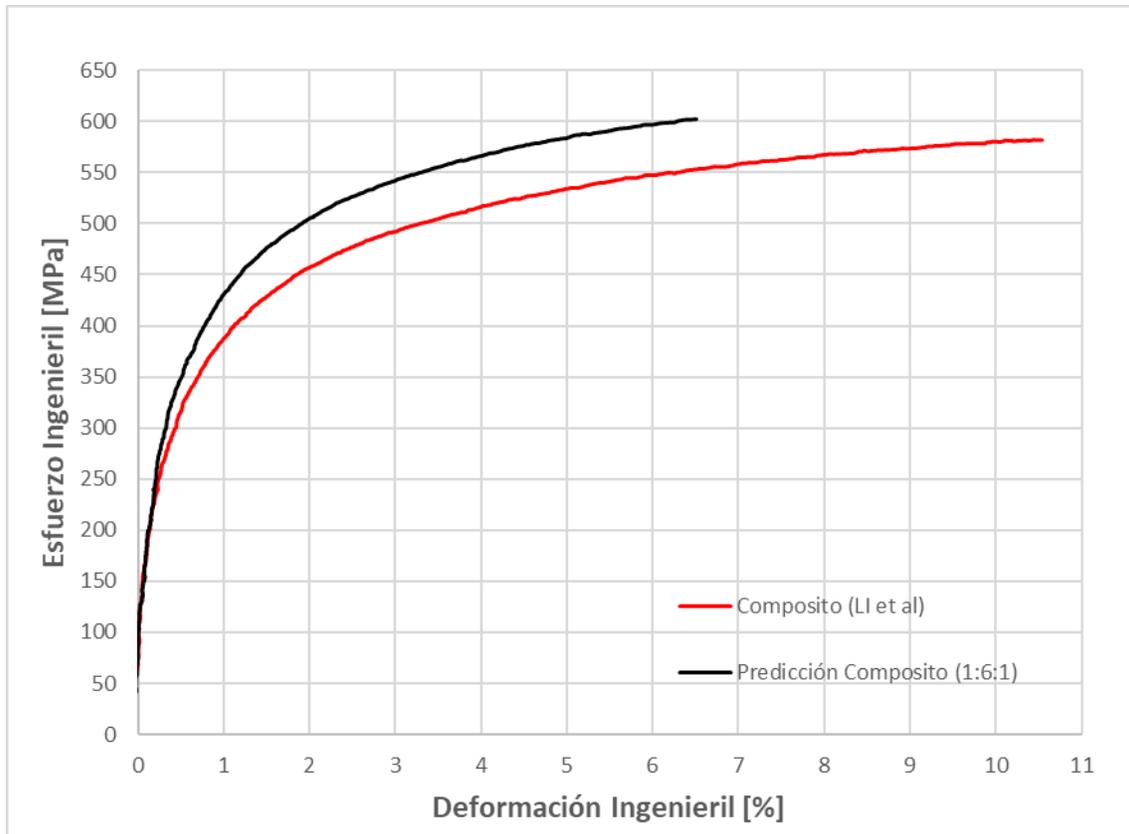


Figura 3.6. Comparativa de curvas calculada por medio de RDM y experimental para el CML 316-B [1].

Compuesto Metálico Laminado 304-B

Al igual que con el artículo anterior, en la Figura 3.7 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas por Li et al [2].

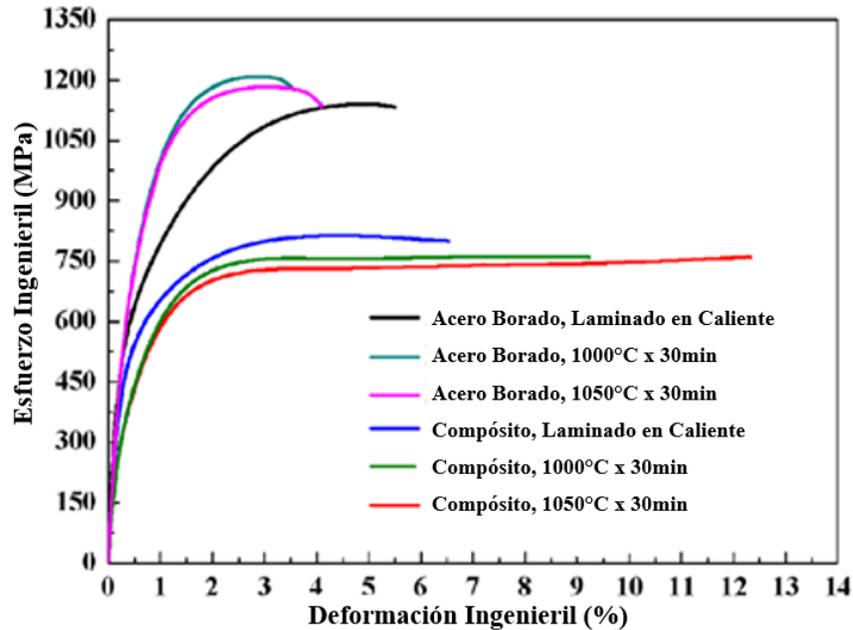


Figura 3.7. Curvas esfuerzo-deformación reportadas por Li et al. en [2] para acero borado y para el compuesto fabricado con dicho acero.

Por medio del software ImageJ se extraen los datos y se recrean las curvas correspondientes al material borado y el compuesto fabricado bajo condiciones de laminación en caliente, que están presentadas en la Figura 3.8.

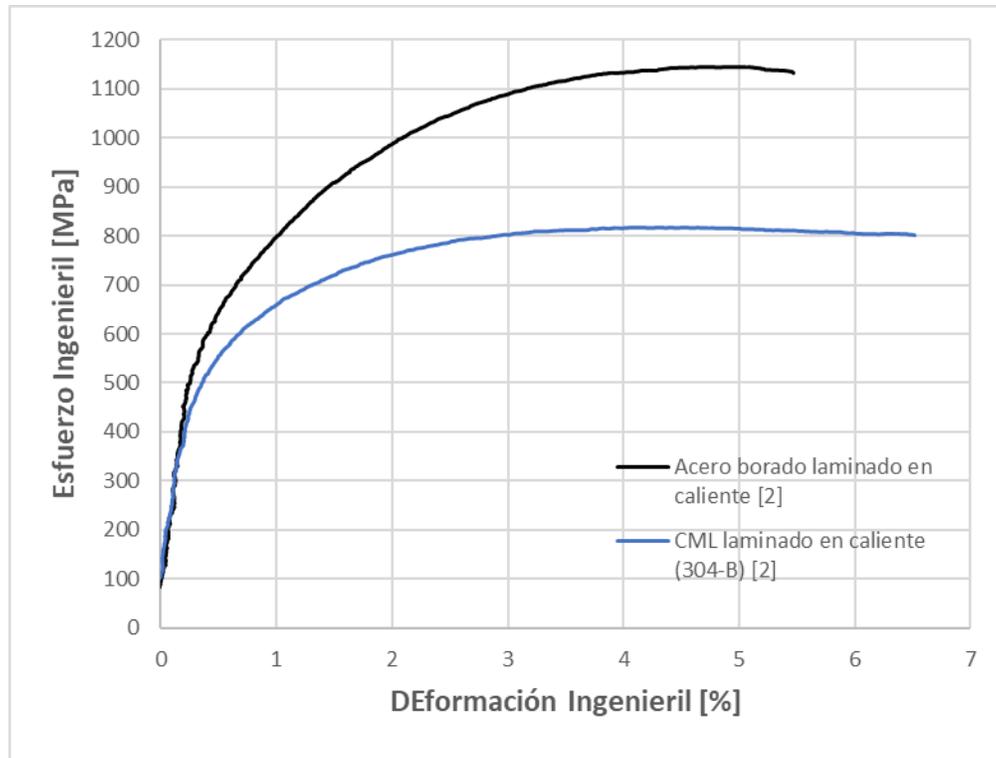


Figura 3.8. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de las curvas reportadas por Li et al. en [2] para los materiales y condiciones de interés.

De forma paralela al artículo anterior, se presenta la curva esfuerzo-deformación del material de revestido, que en este caso es un acero 304; en la Figura 3.9 se presenta la curva obtenida por Jia et al. en [22] para este acero.

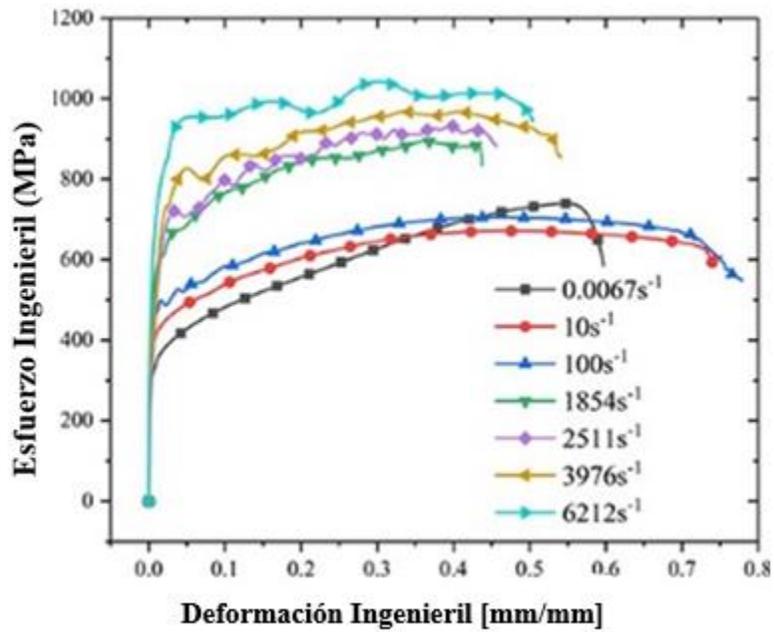


Figura 3.9. Curvas experimentales esfuerzo-deformación para el acero 304 reportado por Jia et al. en [22]. La curva de color negro es la de interés para el caso que compete a este estudio.

En la Figura 3.10 se muestra la recreación de la curva presentada por Jia et al. para el acero inoxidable 304 por medio del software ImageJ.

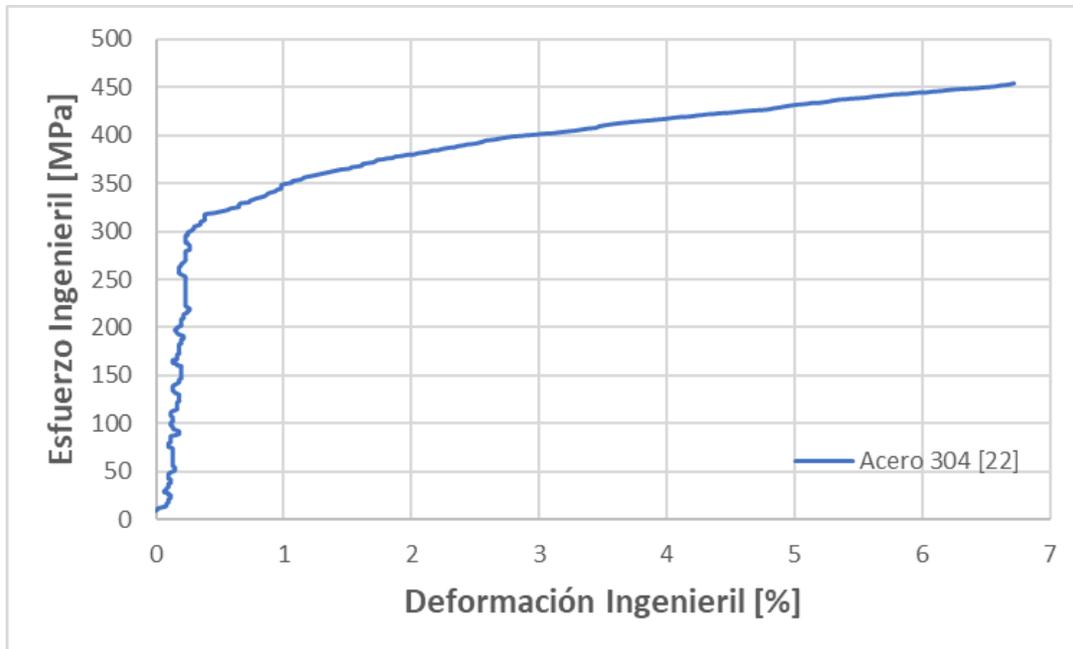


Figura 3.10. Digitalización por medio de ImageJ y Excel de la zona de interés de la curva reportada por Jia et al. en [22] para el acero 304.

Con los datos digitalizados de las curvas de interés, se lleva a cabo el cálculo de la curva del compósito por medio de RDM usando la Ec. 1; dichas curvas se presentan en la Figura 3.11 y, al igual que en el caso del artículo [1], la curva calculada queda ubicada en el área intermedia entre la curva del acero borado y la del acero inoxidable austenítico.

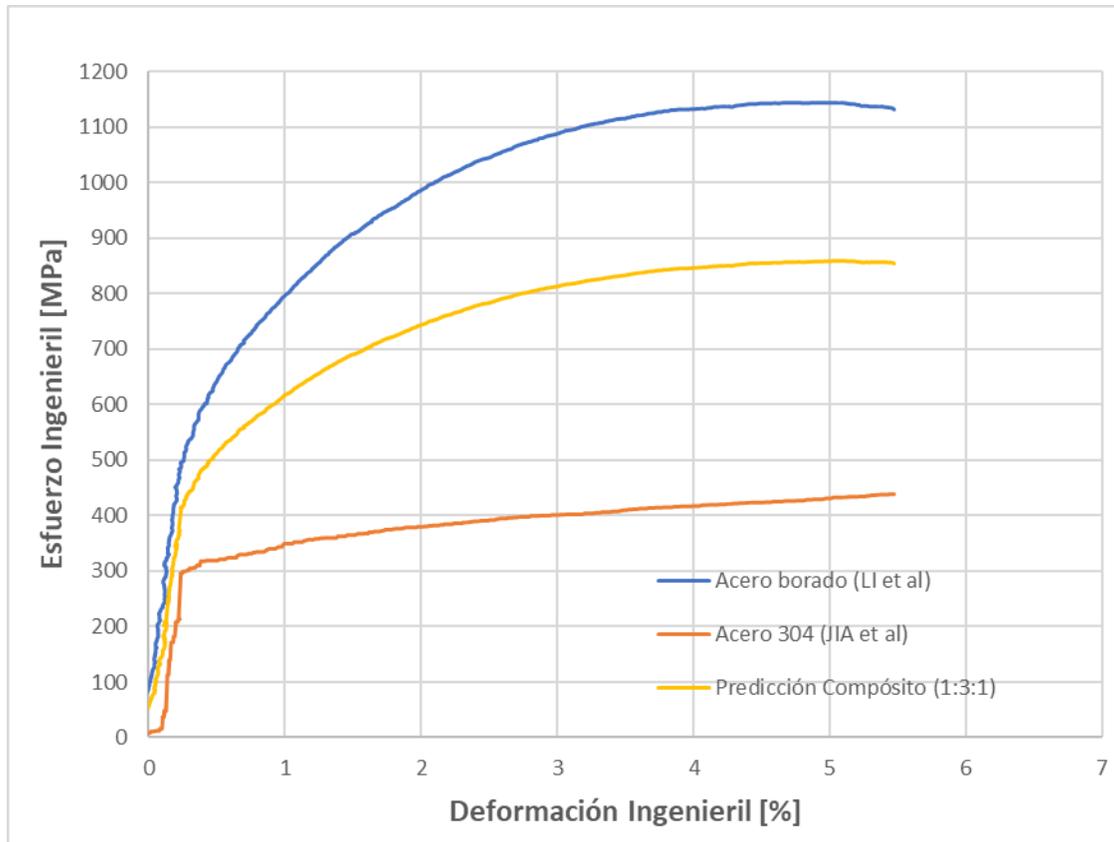


Figura 3.11. Curva para el compósito obtenida por RDM a partir de las curvas de los materiales individuales.

Finalmente, y con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, en la Figura 3.12 se presentan tanto la curva para el compósito obtenida por medio de RDM, como la curva para el mismo obtenida experimentalmente por Li et al en [2]. En esta figura se puede observar que, a diferencia de lo ocurrido con los cálculos relacionados a [1], el comportamiento de la curva calculada es más cercano al experimental de Li et al.

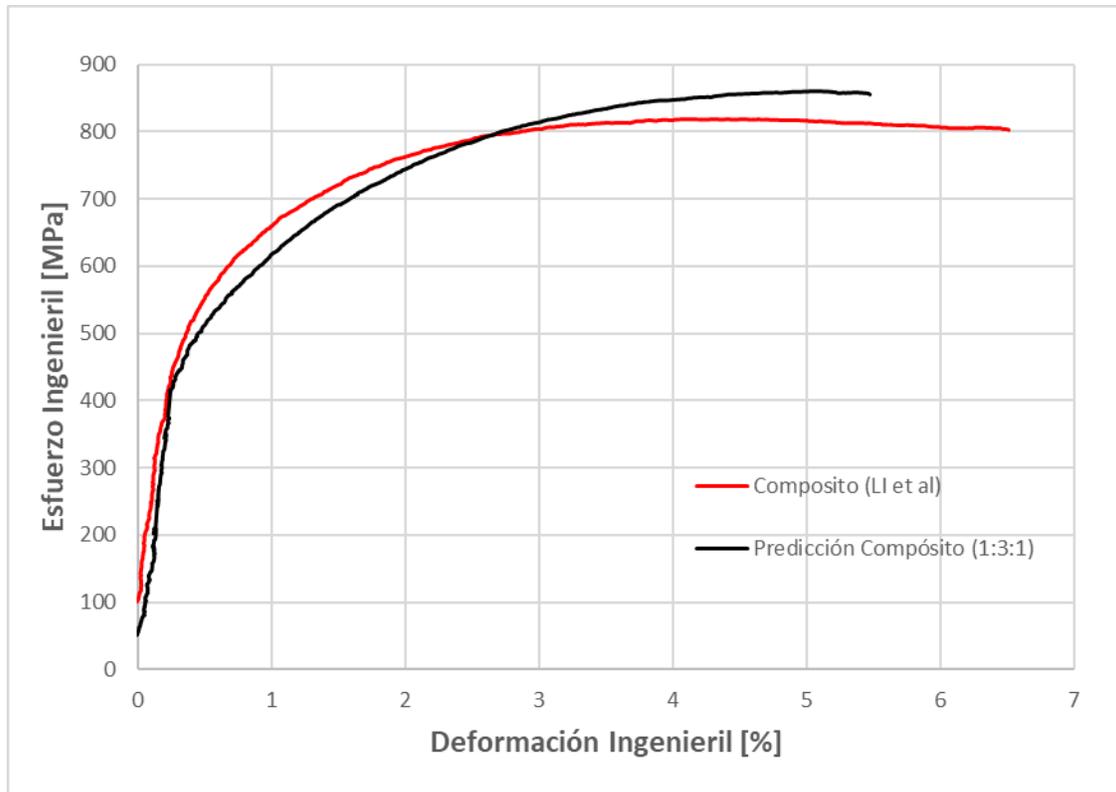


Figura 3.12. Comparativa de curvas calculada por medio de RDM y experimental para el CML 304-B [2].

Variación de espesores en las curvas calculadas por medio de la Regla de las Mezclas.

En las Figuras 3.6 y 3.12, se presentan las curvas calculadas por medio de RDM y las obtenidas experimentalmente por Li et al. en [1] y [2] respectivamente, mientras que en las Figuras 3.13 y 3.14 se presentan estos mismos datos junto con una variación a las fracciones de área introducidas al cálculo de RDM.

La alteración realizada al cálculo de las curvas para los CML se describe a continuación: la Figura 3.6 presenta la curva obtenida para el CML 316-B [1] y corresponde a un compósito que originalmente tiene una RE de 1:6:1; la Figura 3.11 hace lo propio con resultados reportados para el CML 304-B [2], el cual presenta una RE de 1:3:1. Si se comparan ambas figuras, se puede observar que la curva del CML 304-B con RE 1:3:1 es más cercana a la curva experimental correspondiente que la del CML 316-B con RE de 1:6:1. Con base en ese razonamiento, se aplicó un intercambio de los valores de RE en los cálculos usando la Ec. 1, es decir, el CML 316-B con relación 1:6:1 se le aplicó la relación 1:3:1 y viceversa con el CML 304-B.

En las Figuras 3.13 y 3.14 se toma como referencia la curva en color rojo, pues es la experimental por Li, et al. para ambos CML, en cada una de ellas hay, además, una curva cuyo comportamiento es más cercano al experimental. De los resultados obtenidos con el nuevo cálculo por medio de RDM, presentados en color verde, sale a relucir que, en ambas figuras, la curva más cercana al comportamiento experimental fue la que correspondía con una RE de 1:3:1.

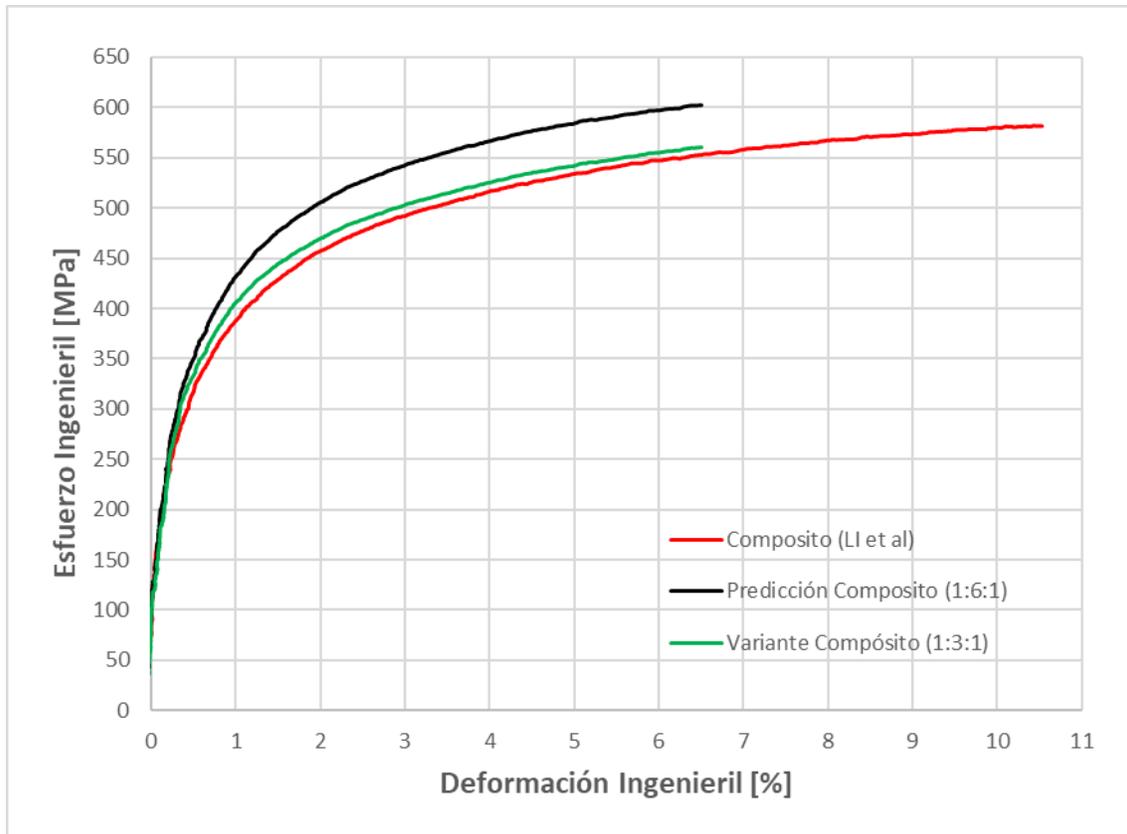


Figura 3.13. Comparativa de curvas calculada y experimental para el CML 316-B, considerando además una alteración en la relación de espesores de la curva calculada de 1:6:1 a 1:3:1.

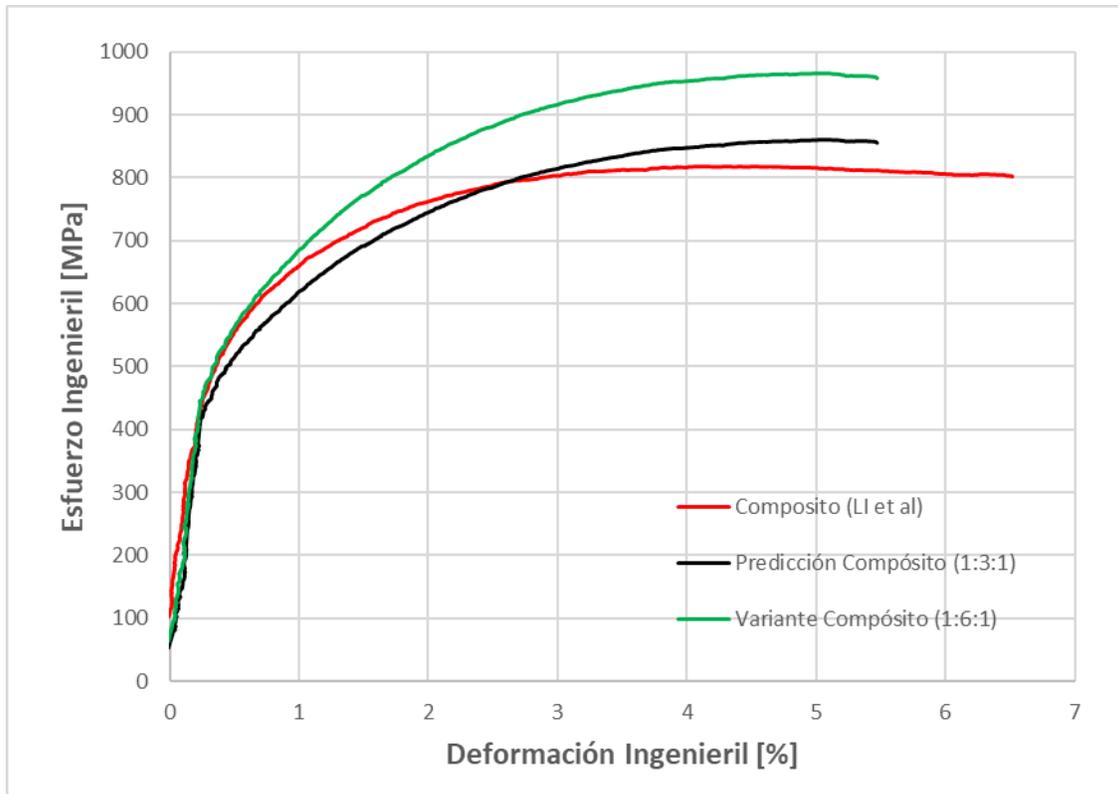


Figura 3.14. Comparativa de curvas calculada y experimental para el CML 304-B, considerando además una alteración en la relación de espesores de la curva calculada de 1:3:1 a 1:6:1.

Determinación de los Módulos de Young y Esfuerzos de Fluencia Convencional el 0.2% de deformación.

A continuación, se presentan las curvas para los CML 316-B y 304-B junto con sus respectivos módulos de Young y esfuerzos de fluencia convencionales en las Figuras 3.15 y 3.16.

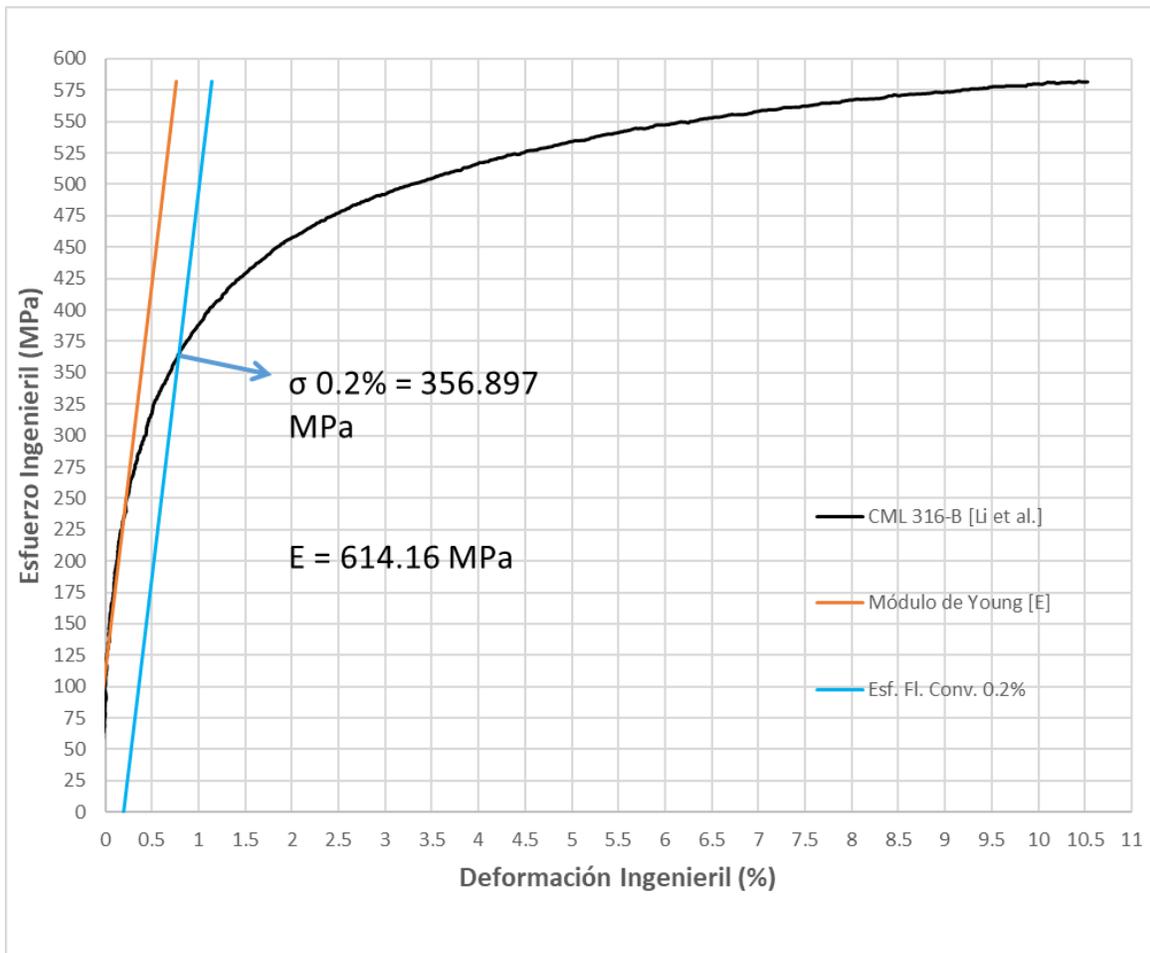


Figura 3.15. Determinación del módulo de Young y Esfuerzo de fluencia y esfuerzo de fluencia convencional al 0.2% de deformación para la curva del CML 316-B reportado por Li et al. [1] [Elaboración propia].

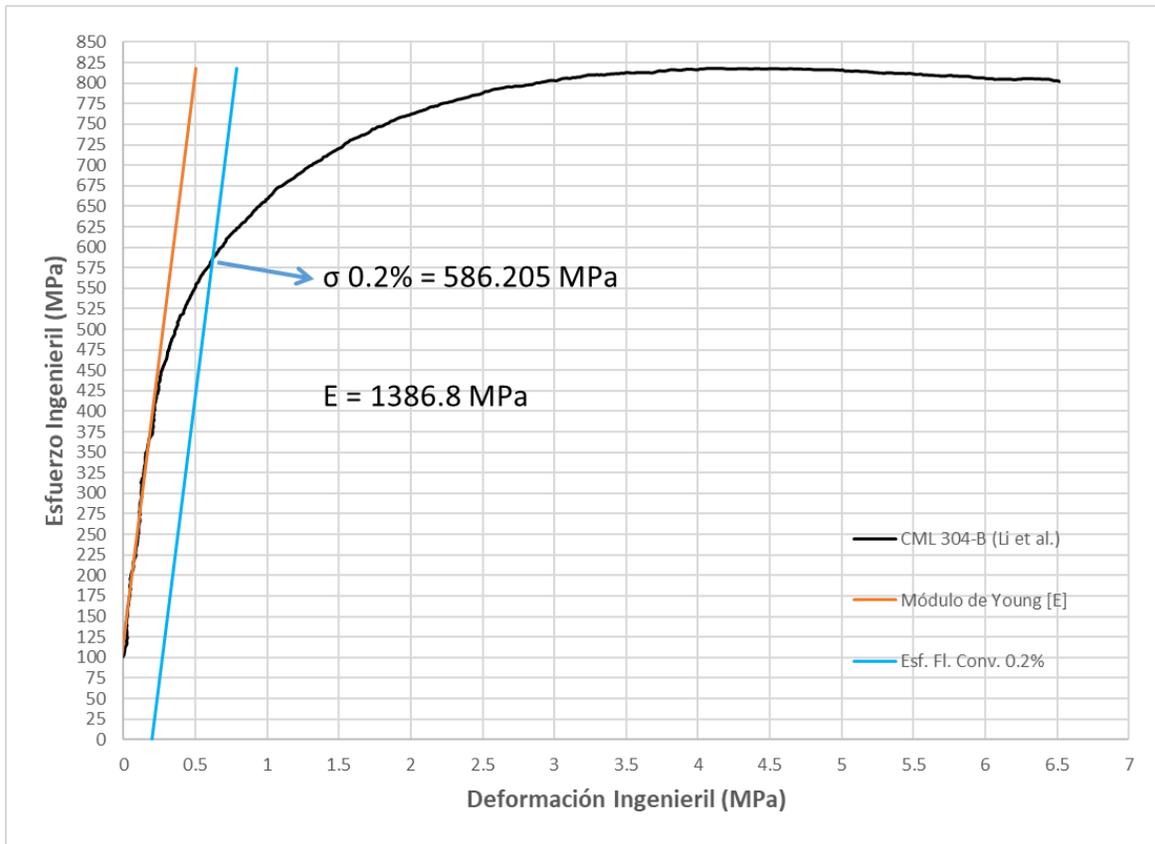


Figura 3.16. Determinación del Módulo de Young y Esfuerzo de fluencia convencional al 0.2% de deformación para la curva del CML 304-B reportado por Li et al. [2] [Elaboración propia].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En la sección anterior se presentan los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada por Li, Y.-W. et al [1,2] y digitalizados por medio de ImageJ: las Figuras 3.1 a 3.6 abarcan lo referente al CML 316-B [1] y las Figuras 3.7 a 3.12 hacen lo propio con lo reportado para el CML 304-B [2].

Previo a analizar los resultados, se retoman las características físicas y de fabricación de cada uno de los compósitos presentados. El CML 316-B [1] se compone de una capa media hecha de acero inoxidable borado 2.1%B y revestida por ambas caras con capas de acero inoxidable austenítico tipo 316 que tiene una relación de espesores 1:6:1; mientras que el CML 304-B [2] tiene una capa media de acero inoxidable borado 1.6%B revestida por ambas caras con acero inoxidable austenítico tipo 304 con una relación de espesores 1:3:1.

Partiendo de las curvas obtenidas, se analizan tres aspectos concernientes a la regla, en primer lugar el comportamiento de las curvas calculadas para los CML en relación con las curvas experimentales de los materiales de los que se componen; en segundo lugar se realiza una comparación de las curvas calculadas para los CML con las obtenidas experimentalmente para analizar las diferencias entre ellas; finalmente se analiza la alteración de las RE en el cálculo de la curva para cada CML y las posibles causas de los comportamientos observados.

Comparación de la curva calculada del compósito frente a las curvas de los materiales que lo componen.

Las Figuras 3.5 y 3.11 muestran las curvas esfuerzo-deformación ingenieril calculadas para los CML 316-B y 304-B respectivamente (amarillo), así como las curvas de los materiales individuales que las componen (azul: material base, naranja: material de revestido).

De acuerdo con lo esperado, en ambos casos las curvas amarillas se ubican en el área entre las curvas naranja y azul, reafirmando que la unión de ambos

materiales resultará en propiedades combinadas, más específicamente reduciendo el RMT (resistencia máxima a la tracción) y aumentando la deformación máxima a la fractura desde el punto de vista del material base, lo que aumenta su ductilidad y su conformabilidad [1,2], que son los resultados buscados en la manufactura por medio de ULC.

Dada la localización de la curva calculada en ambos casos, se puede asumir que las curvas de los materiales que componen cada CML son los máximos y mínimos que la curva del CML puede alcanzar.

En cuanto al efecto de un determinado espesor para las capas tanto media como de revestido Li, et al. [1,2] no menciona alguna razón específica de por qué seleccionar las RE utilizadas, Semiatin, et al. [10] menciona una justificación al respecto, la cual consiste en que, si se quiere mejorar algún material en específico por medio de ULC, este debe ocupar la mayoría del área transversal del CML; sin embargo, Li, et al. llevan a cabo sus estudios con RE's muy diferentes entre sí que pudieran aparentar ser arbitrarias pero, más bien, están relacionadas con el objetivo de cada artículo.

El artículo [1] en el que se trabajó el CML 316-B está relacionado con un fenómeno ocurrido en el laminado de compósitos llamado agrietamiento de borde, es decir, la presencia de grietas en el borde lateral de la placa unida por ULC el cual es un defecto presente durante la manufactura que impide obtener las propiedades deseadas; esta parece ser la razón de escoger una relación de espesores tal como 1:6:1 para el ULC pues con una capa central tan gruesa este defecto se hace más evidente; esto contrasta con la utilizada en el artículo [2] que menciona al CML 304-B cuyo objetivo es estudiar la microestructura y la elongación en tracción del compósito, por lo que una relación de 1:3:1 parece ser suficiente para unir las capas y llevar a cabo los estudios satisfactoriamente.

Una vez mencionada la relación que tienen las RE's con sus respectivos artículos se pueden hacer anotaciones respecto a la proximidad de la curva calculada hacia las curvas de los componentes. La curva calculada para el CML 316-B que tiene una RE de 1:6:1 es "más alta" teniendo (comparativamente) mayor cercanía a la

del acero borado que lo compone, no así en el caso del CML 304-B que con una RE de 1:3:1 su curva es “más baja”, lo que la acerca más a la del acero de revestido involucrado.

A partir de ello se puede inferir que el comportamiento de una curva calculada puede ser más cercano ya sea a la curva del material base o del material de revestido dependiendo de la proporción que uno u otro ocupe en el CML completo; de acuerdo con esta suposición, a medida que el material base ocupa mayor área de sección transversal, el comportamiento de la curva calculada se acerca más al de la curva del material base y, por ende, a medida que este mismo material ocupa menor área, el comportamiento de la curva calculada se acercará más al del material de revestido.

Comparación de las curvas calculadas con la curva reportada experimentalmente.

En las figuras 3.6 y 3.12 se presentan comparaciones de las curvas calculadas por RDM contra las del CML reportadas por el autor [1,2] para el CML 316-B y 304-B respectivamente, mostrando las curvas calculadas en color negro y las experimentales en color rojo.

De esta manera puede discutirse la cercanía entre las curvas calculadas con las reportadas por el autor, para lo cual se debe tomar en cuenta la RE de cada CML (1:6:1 para el CML 316-B y 1:3:1 para el CML 304-B).

Se aprecia cierta similitud entre los comportamientos de las curvas presentadas en la Figura 3.6 correspondiente al CML 316-B, sin embargo, no se sobreponen, pues la curva calculada presenta diferencias en cuanto a su módulo de Young, es decir, que tendría una mayor región elástica que la curva experimental, y en cuanto a su RMT que es más alto.

Por otra parte, en la Figura 3.12 que presenta lo relativo al CML 304-B, la similitud entre curvas es un poco más apreciable, pues si bien no son iguales, los valores son muy parecidos tanto en esfuerzo como deformación.

Por medio de este análisis se puede suponer que el comportamiento experimental del CML 304-B es más cercano a lo obtenido a través de RDM a comparación del caso del CML 316-B. Lo cual lleva a preguntarse si esta discrepancia está influenciada por el factor hasta ahora mencionado (RE) o si se debe a la naturaleza de los materiales o del proceso.

De acuerdo con Li, et al. [1] ambos CML presentan una unión de carácter metalúrgico sólida sin presencia de delaminaciones o defectos de unión entre las capas, lo cual respeta las limitaciones de la regla [10] y se puede descartar como causa de las discrepancias presentadas, pero tomando como referencia lo reportado en [1] se puede inferir una posible causa para esta diferencia. En dicho trabajo se menciona que en casos en que el espesor de la capa media es mucho mayor al de las de revestido, como es con el CML 316-B, las dimensiones laterales de la capa media pueden llegar a exceder las de las capas de revestido durante el laminado lo que causa la presencia de pequeñas grietas en los bordes laterales del CML obtenido.

De acuerdo con el excedente de dimensiones que causa el agrietamiento de borde, se puede inferir que el hecho de tener una capa media tan gruesa genera un cierto grado de error en la metodología de RDM. Visto desde el enfoque de los datos introducidos en la ecuación de la metodología, la explicación la siguiente: la regla toma en consideración la fracción de área transversal que ocupa cada material y, en la práctica, se considera un ancho unitario para todas las capas asumiendo que todas tendrán un mismo ancho al inicio y al final del proceso de ULC; por ello, si la capa central excede el ancho de las capas de revestido la consideración de un ancho unitario ya no es válida para el cálculo de las áreas transversales. Considerando un ancho unitario, la fracción de área se limita únicamente a los valores de espesor de cada capa, sin embargo, cuando esta condición no se cumple, la consideración de la RE no es suficiente para expresar

la fracción de área ocupada, pues se tendría que medir individualmente el ancho de cada capa tras realizar la ULC, medición que excede los límites de una metodología cuya finalidad es predecir y no basarse en mediciones que serían realizadas posterior a la manufactura.

De manera adicional, el mecanismo de supresión de agrietamiento de borde reportado se encuentra presentado en la Figura 4.1, en la cual se muestran los estados de esfuerzos en dos zonas diferentes a lo largo de la dirección Y de la placa laminada: en la parte interna el material de la capa media se encuentra en esfuerzo uniaxial de compresión, mientras que en la región de los bordes, hay un esfuerzo de compresión uniaxial en Z, mientras que hay uno de tracción en X, por lo que en zonas diferentes de la placa esta no se encuentra en el mismo estado de esfuerzos [1], lo que ilustra el fenómeno de excedente de dimensiones en el ancho derivando en el agrietamiento en los bordes. Sin embargo, dicho agrietamiento no cambia el hecho de que el procesamiento del compuesto por medio de ULC mejore su ductilidad, que es la propiedad más buscada al llevar a cabo dicho procesamiento

Este análisis de estados de esfuerzos presentado en la Figura 4.1 en diferentes zonas puede ser aplicable a cualquier compuesto de este acomodo tipo sándwich, pero el hecho de tener una capa media tan gruesa en comparación con las de revestido genera una gran diferencia con lo ocurrido en el caso de una capa media más delgada en comparación.

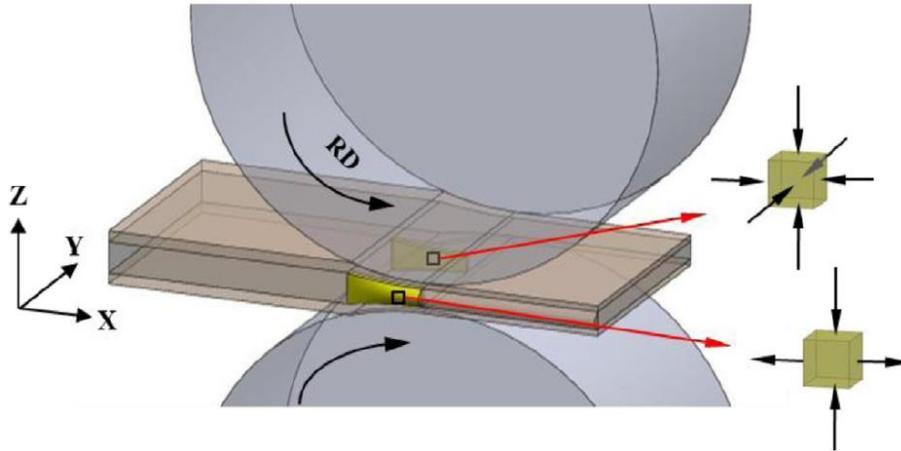


Figura 4.1. Mecanismo de supresión de agrietamiento de borde reportado por Li, et al. en [1].

Esto tiene fundamento dentro de la misma RDM pues al tener una capa más delgada, el agrietamiento de borde residual que se obtiene es relativamente menor, manteniendo las dimensiones laterales de la placa central del CML dentro de las alcanzadas por el material de revestido.

Para confirmar esta hipótesis se realizan los cálculos considerando RE's de 1:3:1, 1:4:1, 1:5:1 y 1:6:1 para el CML 316-B y comparar las curvas calculadas contra las obtenidas de la misma manera que se ilustra en las Figuras 3.15 y 3.16. En la Figura 4.2 se presentan las curvas calculadas con las RE anteriormente mencionados junto con la curva experimental para el CML 316-B. Puede observarse que, efectivamente, a medida que el espesor de la capa media crece, se hace un poco "más alta" que la curva experimental, por lo que una corroboración en laboratorio complementaría la nueva limitante propuesta para esta metodología.

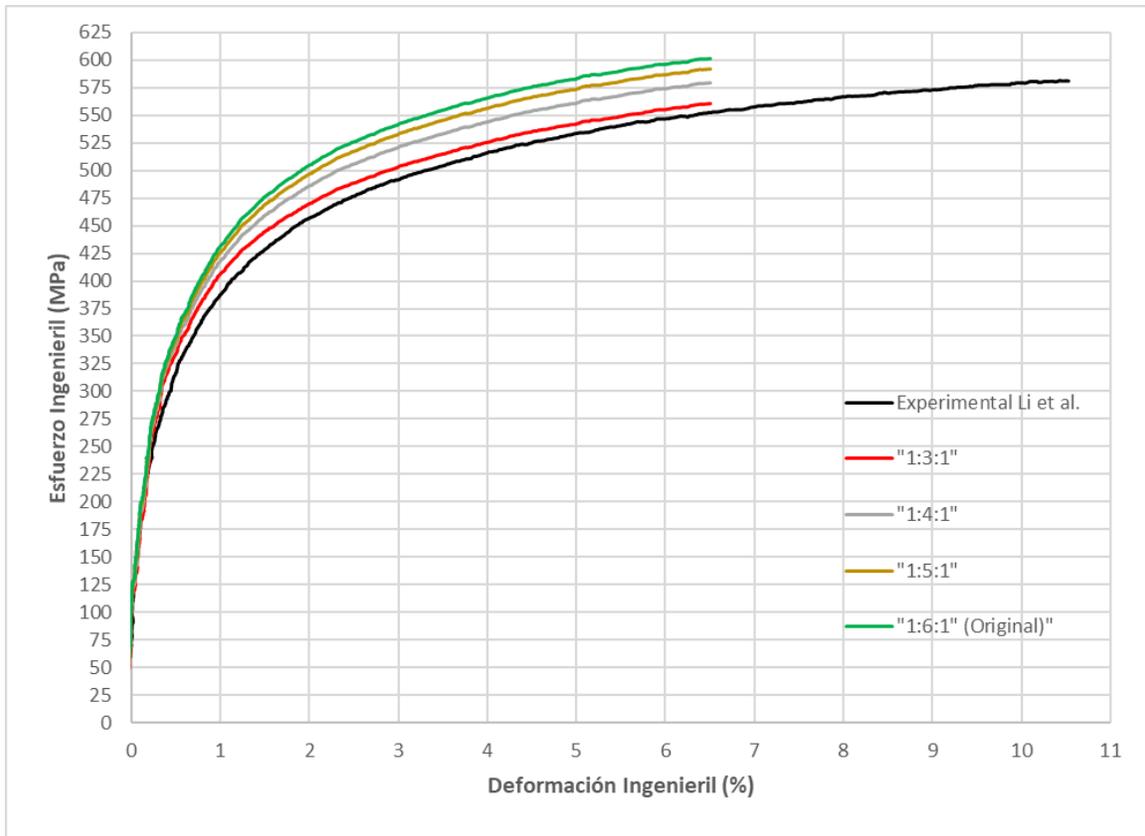


Figura 4.2. Curva experimental por Li, et al [6] y curvas calculadas por Regla de las Mezclas para el CML 316-B con cuatro diferentes RE's.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de cada curva calculada con una RE diferente.

Curva	σ 0.2% [Mpa]	% err.	E [Mpa]	% err.
Experimental	356.897	NA	614.16	NA
Original (1:6:1)	397.996	11.52	706.46	15.03
Modificada 1 (1:3:1)	375.845	5.31	630.12	2.60
Modificada 2 (1:4:1)	391.354	9.65	678.93	10.55
Modificada 3 (1:5:1)	409.307	14.68	629.87	2.56

En la Tabla 4.1 se enlistan los valores de esfuerzo de fluencia convencional y módulo de Young de cada curva, así como el porcentaje de error de cada cálculo con respecto a la curva experimental. Los porcentajes presentes no parecen mostrar una tendencia, sin embargo, para el cálculo con RE de 1:3:1, los valores de esfuerzo de fluencia convencional y módulo de Young presentan la menor

discrepancia de todos. Añadido a esto, en la Figura 4.2 se puede apreciar cómo, a medida que el espesor de la capa media aumenta, la curva se desplaza a valores de esfuerzo más altos y se aleja más de la curva experimental.

Comparación de las curvas calculadas con distintas relaciones de espesor.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el único factor que puede relacionarse con las discrepancias entre curvas calculadas y experimentales es la RE de cada CML, siendo la curva del CML 316-B la que tiene el comportamiento más dispar en comparación con su análoga experimental, y la del 304-B la más cercana a su respectiva curva experimental. Basado en esa observación, se determina que la relación de espesores afecta la cercanía de la curva calculada en el sentido de que, mientras menor sea la fracción transversal de área de la capa media, la curva calculada tendrá un comportamiento más cercano al de la experimental.

Basado en esa suposición, se realizó un cálculo nuevo el cual consiste en intercambiar las RE's entre CML's y, por ende, el valor de la fracción de área transversal, y así volver a realizar el cálculo de la RDM. En resumen, la curva calculada para el CML con relación de espesores 1:6:1 ahora considerará una relación de 1:3:1 y viceversa.

El nuevo cálculo se encuentra ilustrado en las Figuras 3.13 y 3.14, donde se presentan la curva experimental reportada por Li, et al. (color rojo), la curva obtenida originalmente por medio de RDM (color negro) y la curva calculada con el cambio de RE (color verde).

La Figura 3.13 muestra la discrepancia más grande observada entre las curvas respecto a lo originalmente presentado para el CML 316-B [1], por lo que, al prestar atención a la curva calculada con la nueva RE, es notorio que esta es más cercana al comportamiento de la curva experimental. De la misma manera, en la Figura 3.14 se hace lo propio con los datos del CML 304-B [2], en esta el cambio

en el cálculo lleva a resultados opuestos a los presentados en la Figura 3.13 desviando la curva de su cercanía con la reportada y haciéndola “más alta”.

Es de esta manera que, de acuerdo con lo presentado y con los cálculos realizados, podemos asumir que la RE de las capas que componen a un CML juega un papel importante en la predicción de una curva por medio de RDM; sin embargo, hay una consideración que no se debe pasar por alto: el material base debe ocupar al menos el 50% del espesor transversal total, por lo que, en el caso de un CML tipo sándwich simétrico, la RE más baja que se puede considerar es de 1:2:1 (o equivalente), de lo contrario, la mayor parte del CML sería ocupada por el material de revestido y los efectos serían del material base sobre el material de revestido, lo que contradice al objetivo de revestir un material para beneficiar sus propiedades.

Aclarado ese aspecto, cabe mencionar nuevamente que el comportamiento del CML con RE de 1:3:1 otorga un cálculo más cercano que el CML con RE de 1:6:1, lo que permite suponer que mientras más grande sea la fracción transversal de la capa media en un CML tipo sándwich simétrico, más se alejará la curva resultante de los resultados experimentales.

La RDM tiene varios años de haber sido propuesto, Semiatin, et al. [10] y Afonja, et al. [11] la reportan en sus trabajos de 1979, del mismo modo que Jiménez, et al. [19] lo hace en 1991, mientras que Dhib, et al. [5] lo retoma en estudios más recientes en 2017, al igual que Li, et al. [1,2] en 2018 y 2019. Esto permite dilucidar que no es una metodología olvidada en el terreno de la fabricación de CML's y sigue vigente al menos como una aproximación, pero lo analizado en este trabajo parece sacar a la luz una limitante más que Semiatin, et al. [10] no considera, y es una limitante en el espesor de la capa media de un CML tipo sándwich simétrico. Con base en lo observado, se puede asegurar que un cálculo con una RE de 1:3:1 otorgará una curva muy cercana al comportamiento experimental del CML calculado, pero en el caso de una RE de 1:6:1 este comienza a alejarse de la curva experimental acercándose a la del acero borado, lo cual tiene lógica considerando que abarca un 75% del área transversal de

espesor. Entonces, 1:3:1 pareciera ser la RE límite en la que se puede obtener una predicción cercana para un CML. Los valores de módulo de Young y de esfuerzo de fluencia convencional para las curvas experimentales de ambos CML's, y las dos aplicaciones de regla de las mezclas se encuentran reportados en las Tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del CML 316-B y regla de las mezclas.

Curva	σ 0.2% [Mpa]	% err.	E [Mpa]	% err.
Experimental	356.897	NA	614.16	NA
Original (1:6:1)	397.996	11.52	706.46	15.03
Modificada (1:3:1)	375.845	5.31	630.12	2.60

Tabla 4.3. Propiedades mecánicas del CML 304-B y regla de las mezclas.

Curva	σ 0.2% [Mpa]	% err.	E [Mpa]	% err.
Reportada	586.205	NA	1386.8	NA
Original (1:3:1)	514.981	12.15	1572	13.35
Modificada (1:6:1)	570.664	2.65	1647.7	18.81

Los porcentajes de error en las tablas 4.2 y 4.3 corresponden a la diferencia entre cada curva calculada respecto a la curva reportada por Li et al. en [1] y [2] para los CML's 316-B y 304-B respectivamente.

En el caso de las propiedades del CML 316-B, el cálculo con RE modificada es el que presenta un bajo porcentaje de error en las dos propiedades mencionadas con un valor de 5.31% para el esfuerzo de fluencia convencional, y de 2.60% para el módulo de Young; mientras que la curva con RE modificada del CML 304-B presenta su menor valor de porcentaje de error en el esfuerzo de fluencia siendo de 2.65%, mientras que el módulo de Young presenta una discrepancia de 18.81%.

De esta manera se puede observar que, en cuanto al esfuerzo de fluencia convencional, la curva modificada presenta un menor porcentaje de error que la curva original para ambos CML, no así para el módulo de Young, siendo el mejor resultado para ambas propiedades la modificación en la curva 316-B.

5. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se analizó la validez de la Regla de las Mezclas para predecir una curva esfuerzo-deformación para dos CML's diferentes con diferentes RE's a partir de curvas experimentales de los materiales que la componen, y posteriormente se compararon dichas curvas calculadas contra las experimentales para los mismos CML. Asimismo, se propuso una limitante adicional a la metodología de acuerdo con la comparación de las curvas de los CML calculados y los experimentales: la RE de un CML. De este análisis se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- ❖ Al contrastar las curvas calculadas por regla de las mezclas para dos compuestos metálicos laminados (316-B y 304-B) con sus homólogos experimentales, la correspondiente al CML 304-B otorga una buena aproximación, no así la del CML 316-B. Sin embargo, los porcentajes de error en cuanto a propiedades mecánicas entre los dos son similares, teniendo 11.52% y 12.15% en esfuerzo de fluencia; y 15.03% y 13.35% en módulo de Young para los CML 316-B y 304-B respectivamente.
- ❖ Se reafirma que la regla de las mezclas permite obtener curvas esfuerzo-deformación intermedias para un CML en comparación con las de los materiales individuales que lo componen.
- ❖ La regla de las mezclas otorga curvas aceptables para los CML's pero no del todo precisas en cuanto a la comparación contra las curvas experimentales de los mismos, presentando porcentajes de error sin una tendencia clara en cuanto a su relación con el cambio de la RE para los casos analizados en esta investigación.
- ❖ Se identifica la relación de espesores como uno de los factores que pueden influir en la exactitud de los resultados obtenidos por medio de la metodología, y se establece como una nueva limitante que considerar debido a fenómenos como el agrietamiento de borde causado por el excedente de dimensiones que cambia el área transversal considerada en el cálculo.

6. REFERENCIAS

- [1] Li, Y. W., Liu, H. T., Wang, Z. J., Zhang, X. M., & Wang, G. D. (2018). *Suppression of edge cracking and improvement of ductility in high borated stainless steel composite plate fabricated by hot-roll-bonding*. *Materials Science and Engineering: A*, 731, 377-384. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.039>
- [2] Li, Y., Liu, G., Wang, Z., Zhang, B., Zhang, X., & Liu, H. (2019). *Microstructure and Tensile Elongation Enhancement of 1.6 wt% B stainless Steel Plates Fabricated by Composite Rolling*. *Steel Research International*, 90(5), 1800491. <https://doi.org/10.1002/srin.201800491>
- [3] Briseño, L. V. (2015). *Formado de metales*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco,
- [4] Leuser, D. R., Syn, C. K., Sherby, O. D., Wadsworth, J., Lewandowsky, J. J., & Hunt, Jr, W. H. (1996). *Mechanical behavior of laminated metal composites*. *International Materials Reviews*, 41(5), 169–197. <https://doi.org/10.1179/095066096790151204>
- [5] Dhib, Z., Guermazi, N., Ktari, A., Gasperini, M., & Haddar, N. (2017b). *Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates*. *Materials Science and Engineering: A*, 696, 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.080>
- [6] Yue, S. (2002). *The Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel*. *Metal Forming Science and Practice*, 213-226. doi.org/10.1016/b978-008044024-8/50011-4
- [7] Yazdani, M., Toroghinejad, M. R., & Hashemi, S. M. (2015). *Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of St37 Steel-Ck60 Steel Joints by Explosive Cladding*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(10), 4032–4043. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1670-3>
- [8] Kurt, B., Orhan, N., Evin, E., & Çalik, A. (2007). *Diffusion bonding between Ti-6Al-4V alloy and ferritic stainless steel*. *Materials Letters*, 61(8–9), 1747–1750. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.07.123>
- [9] Hosseini, S., Hosseini, M., & Danesh Manesh, H. (2011). *Bond strength evaluation of roll bonded bi-layer copper alloy strips in different rolling conditions*. *Materials & Design*, 32(1), 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.032>
- [10] Semiatin, S. L., & Piehler, H. R. (1979). *Deformation of sandwich sheet materials in uniaxial tension*. *Metallurgical Transactions A*, 10(1), 85–96. <https://doi.org/10.1007/bf02686411>

- [11] Afonja, A. A., & Sansome, D. H. (1979). *Edge cracking in sandwich rolling*. *Journal of Mechanical Working Technology*, 3(1), 77–83. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(79\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0378-3804(79)90033-0)
- [12] Askeland, D., & Wright, W. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning. 619-621, 646
- [13] Lee, D. H., & Kim, Y. (1988). *On the rule of mixtures for flow stresses in stainless-steel-clad aluminium sandwich sheet metals*. *Journal of Materials Science*, 23(2), 558-564. <https://doi.org/10.1007/bf01174685>
- [14] Alibeyki, M., Mirzadeh, H., Najafi, M., & Kalhor, A. (2017). *Modification of Rule of Mixtures for Estimation of the Mechanical Properties of Dual-Phase Steels*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(6), 2683-2688. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2687-6>
- [15] Choi, S., Kim, K., Oh, K. H., & Lee, D. H. (1997). *Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet*. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 222(2), 158-165. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(96\)10514-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(96)10514-1)
- [16] Kim, J. G., Baek, S. M., Cho, W. T., Song, T. J., Chin, K. G., Lee, S., & Kim, H. S. (2017). *On the rule-of-mixtures of the hardening parameters in TWIP-cored three-layer steel sheet*. *Metals and Materials International*, 23(3), 459-464. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6674-0>
- [17] Dong, M., Zhou, S., Xue, X., Feng, X., Sayyed, M. I., Khandaker, M. U., & Bradley, D. A. (2021). *The potential use of boron containing resources for protection against nuclear radiation*. ScienceDirect. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969806X210025>
- [18] Busby, P. E., Warga, M. E., & Wells, C. (1953). *Diffusion and Solubility of Boron in Iron and Steel*. *JOM*, 5(11), 1463–1468. <https://doi.org/10.1007/bf03397637>
- [19] Jimenez, J. A., Gonzalez-Doncel, G., & RUANO, O. A. (2010). ChemInform Abstract: *Mechanical Properties of Ultrahigh Boron Steels*. *ChemInform*, 26(26), no. <https://doi.org/10.1002/chin.199526318>
- [20] Hahn, S., Isserow, S., & Ray, R. (1987). *Microstructures and mechanical properties of boride-dispersed precipitation-hardening stainless steels produced by RST*. *Journal of Materials Science*, 22(9), 3395–3401. <https://doi.org/10.1007/bf01161211>
- [21] Cizek, P., Parker, B. A., Bijok, M., & Zuna, P. (1994). *The Influence of Large Boride Particles on Microstructural Evolution in AISI 304 Steel*. *ISIJ International*, 34(8), 679–688. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.679>

[22] Jia, S., Tan, Q., Ye, J., Zhu, Z., & Jiang, Z. (2021a). *Experiments on dynamic mechanical properties of austenitic stainless steel S30408 and S31608*. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106556. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106556>

[23] Jiménez, J. A., Ruano, O. A., Smirnov, O. M., & Sherby, O. D. (1991). *Microstructural studies of a roll-bonded laminated ultrahigh carbon steel bar*. *Materials Characterization*, 27(3), 141–145. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(91\)90057-b](https://doi.org/10.1016/1044-5803(91)90057-b)

