

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E**  
**TECNOLOGIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA**  
**DOS MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NA**  
**CONFORMABILIDADE DA CHAPA TRIMETÁLICA – 304L/AI/430**  
**OBTIDA POR LAMINAÇÃO A FRIO**

**FABRÍCIO PERTILE**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NA  
CONFORMABILIDADE DA CHAPA TRIMETÁLICA – 304L/AI/430  
OBTIDA POR LAMINAÇÃO A FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

P469i Pertile, Fabrício

Influência da temperatura de recozimento na conformabilidade da chapa trimetálica - 304L/Al/430 obtida por laminação a frio [recurso eletrônico] / Fabrício Pertile. – 2023.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2023.

Orientação: Alexandre Fassini Michels.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Materiais - Propriedades térmicas. 2. Laminação (Metalurgia). 3. Materiais. I. Michels, Alexandre Fassini, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NA  
CONFORMABILIDADE DA CHAPA TRIMETÁLICA – 304L/AI/430  
OBTIDA POR LAMINAÇÃO A FRIO**

Dissertação de mestrado submetido a avaliação da banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais

**Banca examinadora**

Professor Doutor Alexandre Fassini Michels (Orientador)

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Professora Doutora Maria Cristina Moré Farias

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Professor Doutor Alexandre Viecelli

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Professor Doutor Lívio Schaeffer

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por conceder força, saúde e conhecimento necessário para seguir esta jornada.

A minha namorada Júlia por todo incentivo, momentos de escutar os desabafos e o mais fundamental as palavras de apoio mesmo quando parecia que tudo estava dando errado, desta forma ajudando sempre a seguir em frente, trazendo momentos de reflexões para que então tivesse a motivação para que o sucesso fosse alcançado. Com certeza todo este apoio foi fundamental para a elaboração e finalização deste trabalho.

Meus pais Jaime e Ieda por todos os ensinamentos de vida que me passaram, o apoio com palavras de aconselhamento em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels, meu orientador, por todo o conhecimento, dedicação, confiança e todo o empenho para que juntos superássemos as dificuldades.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade de Caxias do Sul, em conjunto com todos os servidores que juntos a uma infraestrutura impecável e uma dedicação imensa sempre muito prestativos em ajudar a desenvolver a ciência. Em especial ao técnico Rodrigo Antônio Barbieri, do Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC), por toda paciência em repetir os ensaios sempre com muita eficiência e por toda a ajuda na parte de análises de imagens. À CAPES pelo programa de incentivo financeiro à pesquisa, ao qual não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Tramontina Farroupilha S.A. pela confiança e oportunidade de compor uma parceria para o desenvolvimento deste estudo. Também por disponibilizar os materiais e equipamentos para confecção e avaliação das amostras. Também gostaria de agradecer os colaboradores que direta ou indiretamente auxiliaram de alguma forma neste estudo, em especial ao engenheiro metalúrgico da unidade Samyr Ismail por todas as trocas de conhecimentos e todas as discussões construtivas e também ao Alexandre Giacomini por todo esforço e empenho em realizar testes no departamento de tratamento térmico da empresa.

À Tramontina Teec, por abrir as portas para que pudéssemos realizar os ensaios de embutimento em sua unidade, em especial ao colaborador Roberto Gomes Moojen, técnico do laboratório de análises mecânicas dos materiais da unidade, por ter executado o ensaio e auxiliado em sua interpretação.

Enfim, a todos que de alguma forma tiveram envolvimento na realização deste trabalho, muito obrigado. Imensa gratidão!

## RESUMO

A expansão industrial tem impulsionado a busca por processos de produção mais eficientes e materiais de qualidade superior, capazes de combinar propriedades diversas. Nesse cenário, destacam-se os materiais multicamadas, que possibilitam a fusão de características distintas. A técnica de laminação a frio surge como uma abordagem economicamente viável para a produção desses materiais, caracterizado pela deformação plástica significativa para garantir a união entre as camadas. Consequentemente, um recozimento é necessário para aliviar o efeito do encruamento proveniente da deformação a frio e para promover uma melhor aderência entre as camadas, por meio de difusão. Entretanto, o tratamento térmico de materiais multicamadas é intrincado devido à formação de compostos intermetálicos nas interfaces das camadas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo investigar as propriedades mecânicas e as interfaces de uma chapa composta por três materiais distintos: aço inoxidável austenítico AISI 304L, alumínio AA1050 e aço inoxidável ferrítico AISI 430. Essa chapa foi submetida a tratamentos térmicos de recozimento por 3 h a temperaturas de 250, 350, 450 e 550 °C. As regiões de interface foram analisadas por meio de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) em conjunto com imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, a influência do tratamento térmico na microestrutura foi avaliada por meio de análise metalográfica. A conformabilidade foi avaliada por meio da curva limite de conformação obtida pelo ensaio Nakajima, enquanto a aderência entre as camadas foi avaliada pelo ensaio de descolamento. Outras propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios de tração. A análise microestrutural indicou que o alumínio foi o mais afetado pelo aumento das temperaturas de recozimento, apresentando variação no formato e tamanho dos grãos de sua microestrutura. A análise por MEV e EDS revelou que não ocorreu a formação de uma camada de difusão com espessura micrométrica, fato benéfico a conformabilidade do material. No entanto, o aumento da temperatura de recozimento resultou em uma melhoria na aderência entre as camadas, recristalização da camada de AA1050 (com alteração na anisotropia) e melhorando as propriedades mecânicas como índice de encruamento e coeficiente de anisotropia, exceto pela resistência à tração e ao escoamento. Entre 350 e 450 °C, as propriedades mecânicas se estabilizaram, e o tratamento a 350 °C proporcionou um equilíbrio ideal entre propriedades mecânicas, aderência e conformabilidade.

Palavras-chave: laminação a frio; material multicamadas; interfaces; temperatura de recozimento.

## ABSTRACT

The industrial expansion has driven the search for more efficient production processes and higher-quality materials capable of combining diverse properties. In this scenario, multilayer materials stand out, enabling the fusion of distinct characteristics. The cold rolling technique emerges as an economically viable approach for the production of these materials, characterized by significant plastic deformation to ensure the bonding between layers. Consequently, annealing is required to relieve the work-hardening effect resulting from cold deformation and to promote better adhesion between the layers through diffusion. However, the heat treatment of multilayer materials is intricate due to the formation of intermetallic compounds at the layer interfaces. In this context, this study aims to investigate the mechanical properties and interfaces of a sheet composed of three different materials: austenitic stainless steel AISI 304L, aluminum AA1050, and ferritic stainless steel AISI 430. This sheet underwent annealing treatments for 3 hours at temperatures of 250, 350, 450, and 550 °C. The interface regions were analyzed through energy dispersive spectroscopy (EDS) in conjunction with scanning electron microscopy (SEM) images. Furthermore, the influence of heat treatment on the microstructure was evaluated through metallographic analysis. Conformability was assessed through the forming limit curve obtained by the Nakajima test, while adhesion between layers was evaluated by the peeling test. Other mechanical properties were determined through tensile tests. Microstructural analysis indicated that aluminum was the most affected by the increase in annealing temperatures, showing variation in the shape and size of its grain structure. SEM and EDS analysis revealed that the formation of a micrometric diffusion layer did not occur, which is beneficial for material conformability. However, the increase in annealing temperature resulted in improved adhesion between the layers, recrystallization of the AA1050 layer (with changes in anisotropy), and improvement in mechanical properties such as work-hardening index and anisotropy coefficient, except for tensile and yield strength. Between 350 and 450 °C, the mechanical properties stabilized, and the treatment at 350 °C provided an ideal balance between mechanical properties, adhesion, and conformability.

Keywords: Cold rolling, multilayer material, interfaces, annealing temperature.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema ilustrando materiais multicamadas na laminação.....	17
Figura 2- Esquema de produção de chapas multicamadas por meio de união por laminação a frio. ....	19
Figura 3- Esquema ilustrando o processo de união por laminação, quebra da camada frágil superficial de óxidos e redução das rugosidades até a união entre as camadas.....	20
Figura 4- Difusão (a) por lacuna; (b) intersticial. ....	22
Figura 5- Esquema ilustrando o processo de estampagem profunda. ....	24
Figura 6- Ilustração das regiões e suas tensões. ....	25
Figura 7- Curva do limite de conformação de um material no ensaio de embutimento. ....	26
Figura 9- Corte das amostras na máquina de corte por eletroerosão a fio.....	30
Figura 10- Gravações a laser da temperatura do tratamento térmico e direção da retirada das amostras em relação ao sentido de laminação. ....	31
Figura 11- Gráficos do ciclo de tratamento térmico de recozimento das amostras nas temperaturas, (a) 250 °C, (b) 350 °C, (c) 450 °C e (d) 550 °C, nos quais a linha azul representa o ponto de ajuste, a linha vermelha o termopar de controle e a linha verde é do termopar fixado na amostra.....	32
Figura 12- Ilustração dos corpos de prova para o ensaio de embutimento Nakajima com a gravação eletroquímica da malha quadriculada 2,0 x 2,0 mm. ....	32
Figura 13- Máquina EMIC Modelo DL 20000, utilizada no ensaio de tração e anisotropia. ..	34
Figura 14- Ilustração do corpo de prova para o ensaio de descolamento.....	35
Figura 15- Máquina Shimadzu, modelo AGS-X utilizada no ensaio de descolamento. ....	36
Figura 16- Ilustração do corpo de prova para o Ensaio Nakajima. ....	36
Figura 17- (a) parte superior (matriz) e (b) parte inferior (prensa chapa e punção) da ferramenta utilizada no ensaio Nakajima.....	37
Figura 18- Equipamento Hexagon Metrology Optiv Lite DCC modelo 3020 utilizado para medição das deformações nas amostras do ensaio Nakajima.....	38
Figura 19- Medição da maior e menor deformação de um ponto próximo a região de fratura. ....	38
Figura 20- Imagens de microestrutura óptica da microestrutura do alumínio AA 1050 laminado, ilustrando o alívio das tensões de laminação e o crescimento de grão devido ao tratamento térmico de recozimento, (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.....	40



Figura 21- Imagens de microscopia óptica da amostra 304 laminada (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.....	41
Figura 22- Imagens de microscopia óptica da amostra 430 laminada (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.....	42
Figura 23- Gráficos da resistência ao deslocamento versus temperatura de recozimento. (a) Face 304/AA1050. (b) Face 430/AA1050. ....	43
Figura 24- (a) e (e) amostras sem tratamento térmico, amostras tratadas termicamente (b) e (f) a 250 °C, (c) e (g) a 350 °C e (d) e (h) a 450 °C .....	44
Figura 25- Espectro de EDS em linha das amostras (a) 430 sem tratamento térmico, (b) 304 sem tratamento térmico, (c) 430– 250 °C, (d) 304– 250 °C, (e) 430– 350 °C, (f) 304– 350 °C, (g) 430– 450 °C e (h) 304– 450 °C.....	46
Figura 26- Mapa de composição Al, Fe e Cr, (a) 430- sem tratamento térmico; (b) 430- 250 °C; (c) 430- 350 °C, (d) 430- 450 °C; (e) 304- sem tratamento térmico; (f) 304- 250 °C; (g) 304- 350 °C, (h) 304- 450 °C;.....	47
Figura 27- Gráfico do ensaio de tração, tensão x deformação verdadeira, amostras retiradas no sentido de laminação. ....	51
Figura 28- Corpos de prova após o ensaio Nakajima.....	52
Figura 29- Curva CLC com indicação de qual ponto representa cada uma das diferentes geometrias das amostras. ....	53
Figura 30- Curva limite de conformação (CLC) com amostras tratadas termicamente em diferentes temperaturas.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química dos materiais da chapa multicamada. ....	30
Tabela 2 - Distribuição das amostras cortadas para cada ensaio separadas por temperatura de tratamento térmico. ....	31
Tabela 3 - Valores de anisotropia do material de camada tripla conforme a temperatura de recozimento. ....	49
Tabela 4 - Valores da tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, alongamento, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência, obtidos por meio do ensaio de tração do material de camada tripla conforme a temperatura de recozimento e direção de retirada da amostra a partir do sentido de laminação. ....	50
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais de forma individual. ....	52

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

CLC – Curva Limite de Conformação

EDS – Espectroscopia de Raio X por Dispersão de Energia

ISO – *International Organization for Standardization*

LCMIC – Laboratório Central de Microscopia Israel Baumvol

LNTP – Laboratório de Novas Tecnologias de Produção

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

UCS – Universidade de Caxias do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

- D – Coeficiente de Difusão  
 $D_0$  – Constante de Difusão ou Difusividade  
E – Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young  
K – Coeficiente de Resistência  
n – Coeficiente de Encruamento  
Q – Energia de Ativação  
r – Anisotropia  
 $\bar{r}$  – Anisotropia Normal  
R – Constante dos Gases  
 $S_e$  – Tensão de Escoamento  
T – Temperatura  
x – Distância de Difusão  
 $\varepsilon$  – Alongamento  
 $\varphi$  – Deformação Verdadeira  
 $\varphi_1$  – Deformação Real Maior  
 $\varphi_2$  – Deformação Real Menor  
 $\Delta_r$  – Anisotropia Planar  
 $\sigma$  – Tensão Verdadeira  
 $\sigma_{m\acute{a}x}$  – Tensão Máxima

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 Objetivo geral .....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1 Materiais multicamadas.....	17
3.2 Processos de produção de materiais multicamadas e mecanismo de adesão .....	18
3.3 Difusão em materiais .....	21
3.4 Tratamento térmico posterior à laminação .....	22
3.5 Materiais multicamadas fabricados por laminação .....	23
3.6 Estampagem e Conformabilidade.....	24
3.7 Métodos de avaliação da conformabilidade .....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
4.1 Materiais .....	29
4.2 métodos .....	30
4.2.1 Preparação das amostras .....	30
4.2.2 Análise da interface.....	33
4.2.3 Análise das propriedades mecânicas .....	34
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
5.1 Tratamento térmico .....	39
5.2 Microestrutura do material .....	40
5.3 Avaliação da adesão entre camadas .....	42
5.4 Avaliação da região de interface .....	43
5.5 Avaliação das propriedades mecânicas .....	48
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>57</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil está entre os 30 maiores países exportadores do mundo, porém um percentual bem acentuado de *commodities*, ou seja, é enviado a outros países, a matéria-prima ou a base para ser industrializada. Dados de junho de 2021 mostram que, no Brasil, aproximadamente 60 % dos produtos exportados são, ou podem ser considerados matéria prima para a indústria de transformação. Por outro lado, no mesmo período, mais de 90 % das importações realizadas são de produtos resultantes da indústria da transformação (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇO, 2021).

Em tentativa de efetuar uma redução nos custos com a importação, algumas empresas vêm buscando a verticalização dos seus processos, optando assim, por transformar materiais base em materiais utilizados em seu processo de produção. Esta verticalização ou centralização se torna importante para o desenvolvimento estratégico do país, pois desta forma se tem um maior investimento na busca pelo conhecimento e domínio da tecnologia, o que favorece o desenvolvimento econômico (BALESTRIN; VERSCHOORE, 2016; CHIARINI; VIEIRA, 2012).

Contudo, a expansão industrial requer uma constante busca por aprimoramento de seus processos de fabricação. Logo, materiais mais refinados proporcionam uma aplicabilidade mais adequada e retificam os possíveis defeitos destes processos. Neste sentido, estudos de avaliações qualitativas dos materiais se tornam relevantes, já que buscam a melhora do desempenho fabril (ABEDI; AKBARZADEH, 2015).

Neste contexto, se destaca o aumento da utilização de combinações de dois ou mais tipos de materiais, de modo a obter a associação das propriedades distintas entre eles. Estas combinações apresentam ganhos por meio da redução de massa, mantendo as propriedades de resistência mecânica do material, por exemplo. Além disso, é possível a utilização de combinações de materiais de maior e menor custo, o que acarreta na redução de valores econômicos (RHEE et al., 2004).

As aplicações de materiais multicamadas são diversificadas, como na indústria automotiva, na indústria de eletrônicos e até na confecção de utensílios para uso culinário (KIM et al., 2004; OYA et al., 2010). Sua fabricação pode ser realizada por diferentes tipos de processos, tais como: soldagem por explosão, extrusão, trefilagem e laminação. Desses se evidenciam os processos de produção de chapas multicamadas, o de laminação a frio, visto sua alta produtividade e o baixo custo de produção (HWANG; HSU; LEE, 1995).

Nesse método, para se obter a união das chapas de dois ou mais tipos de materiais, é necessário a aplicação de uma deformação plástica para criar uma ligação entre as camadas

(MANESH; TAHERI, 2003a). No entanto, para que o material tenha uma maior conformabilidade, se faz necessário o tratamento térmico de recozimento. Tal processo, é responsável por proporcionar um alívio do encruamento, ou seja, do endurecimento por deformação plástica criado pela laminação e por aumentar a adesão entre as camadas (LEE et al., 2007; MANESH; TAHERI, 2003a).

O tratamento térmico de recozimento é uma parte crítica do processo, pois dependendo do tempo de encharque e da temperatura utilizada, é possível haver perda das propriedades mecânicas ou piora do desempenho do material (LEE et al., 2007). Uma das consequências da escolha errônea da temperatura e tempo desse tratamento térmico é o aumento da camada de difusão, que pode conter compostos intermetálicos frágeis, em muitos casos são indesejados, já que podem reduzir a capacidade de conformação do material (MANESH; TAHERI, 2003a).

De fato, para os materiais multicamadas, a união entre as chapas é um dos pontos importantes e que influenciam nas propriedades requeridas desta junção de materiais. A adesão é o interesse primordial na formação de chapas de vários materiais para que assim se consiga unir, mesclar e interrelacionar as propriedades dos materiais ligados. Uma boa adesão depende não apenas da ancoragem mecânica entre os materiais, mas também do tratamento térmico posterior, que proporciona uma difusão entre as camadas se não for bem definida pode se tornar prejudicial aos processamentos futuros que as chapas multicamadas irão sofrer (MANESH; TAHERI, 2003a).

Uma chapa com baixa difusão implica em uma baixa adesão, o que em um posterior processamento pode acarretar no deslizamento relativo entre as camadas. Por outro lado, o aumento da espessura da camada de difusão pode causar o surgimento dos intermetálicos frágeis que irão reduzir as propriedades mecânicas do material, principalmente, a resistência adesão (MANESH; TAHERI, 2003a).

Esses materiais são amplamente processados por conformação mecânica por estampagem, como por exemplo na estampagem de uma panela. Nesse caso, o processo depende da geometria final da peça e poderá apresentar regiões com tensões trativas e outras compressivas. Assim, se em uma região que está sofrendo tração houver uma camada muito espessa de difusão com a presença de intermetálicos, é possível que ocorram falhas no momento da conformação mecânica.

Entretanto, apesar dos benefícios já citados, este processo inovador revelou problemas na estampagem das chapas, resultando em retrabalhos de produção ou mesmo aumento na geração de sucata. Assim, é essencial analisar e caracterizar a região de interface dos materiais multicamadas para otimizar os processos de fabricação e encontrar os melhores parâmetros de

produção, visando aprimorar as propriedades mecânicas para os processos subsequentes. Isso visa reduzir a geração de resíduos devido a falhas no processo produtivo e também o índice de retrabalho, tornando a produção mais enxuta e eficiente.



## 2. OBJETIVOS

Esta seção, abordará os objetivos geral e específicos que direcionam o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as interfaces internas de uma chapa multicamada composta de aço inoxidável AISI 304L, alumínio AA1050 e aço inoxidável AISI 430, tratadas termicamente em diferentes temperaturas de recozimento e a sua influência nas propriedades mecânicas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência do tratamento térmico posterior à laminação a frio na interface entre as camadas da chapa tripla e a ocorrência de difusão entre as camadas.

- Identificar a influência da variação nas temperaturas de recozimento posterior à laminação a frio nas propriedades mecânicas de conformabilidade, anisotropia, resistência a tração, resistência ao descolamento e a microestrutura das chapas multicamadas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

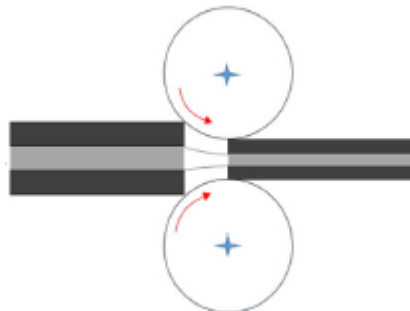
Nesta seção, será abordado os conceitos fundamentais e essenciais para compreender o trabalho desenvolvido.

#### 3.1 MATERIAIS MULTICAMADAS

Os materiais multicamadas são estudados há muitos anos e, como seu próprio nome descreve, são composições em camadas de um único material ou mesmo a união de materiais distintos por meio de uma interface. Podem ter formação de inúmeras camadas de cada material, como mostra a Figura 1. Essas camadas podem ser, por exemplo, compostas por metal/metal ou mesmo metal/cerâmico (LESUER et al., 2012).

A tecnologia dos materiais multicamadas passou a ser desenvolvida com o objetivo de unir as propriedades de dois ou mais tipos de materiais, com o intuito de criar materiais compostos para aplicações nas quais um único não seria capaz de atender por inteiro às necessidades. Essa tecnologia dos materiais multicamadas permite que se obtenham produtos com propriedades distintas das alcançadas por meios de revestimentos comuns (GILLESPIE, 2017).

Figura 1- Esquema ilustrando materiais multicamadas na laminação.



Fonte: adaptada de (ABEDI; AKBARZADEH, 2015)

Por meio dessa tecnologia, se desenvolvem combinações de materiais com duas ligas de alumínio, uma com maior resistência à corrosão e outra com maior resistência mecânica em uma mesma chapa, por exemplo. Essa configuração é muito utilizada na indústria automobilística onde, a parte com maior resistência à corrosão fica exposta, protegendo a camada com maior resistência mecânica de uma deterioração prematura (GILLESPIE, 2017).

Outras aplicações destes materiais multicamadas são encontradas em utensílios domésticos, que podem ter sua superfície externa de aço inoxidável com outra camada de alumínio, cobre ou outro material com alta condutividade térmica. Dessa forma, o material com

maior condutividade irá distribuir o calor de uma forma uniforme, enquanto o aço inoxidável é utilizado para não ter uma interação química entre o alimento e o recipiente (GILLESPIE, 2017).

### 3.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE MATERIAIS MULTICAMADAS E MECANISMO DE ADESÃO

Os materiais multicamadas podem ser fabricados de diferentes formas, dentre elas estão cromagem, colagem por explosão, galvanoplastia, laminação por martelamento, união por laminação a quente, a união por laminação a frio, entre outros (FORSTER; JHA; AMATRUDA, 1993). Tratando de multicamadas de materiais distintos, um dos processos mais utilizados é a união por laminação. Isso devido ao baixo custo em comparação com os demais e também por ter maior nível de produtividade (CHAUDHARI; ACOFF, 2009).

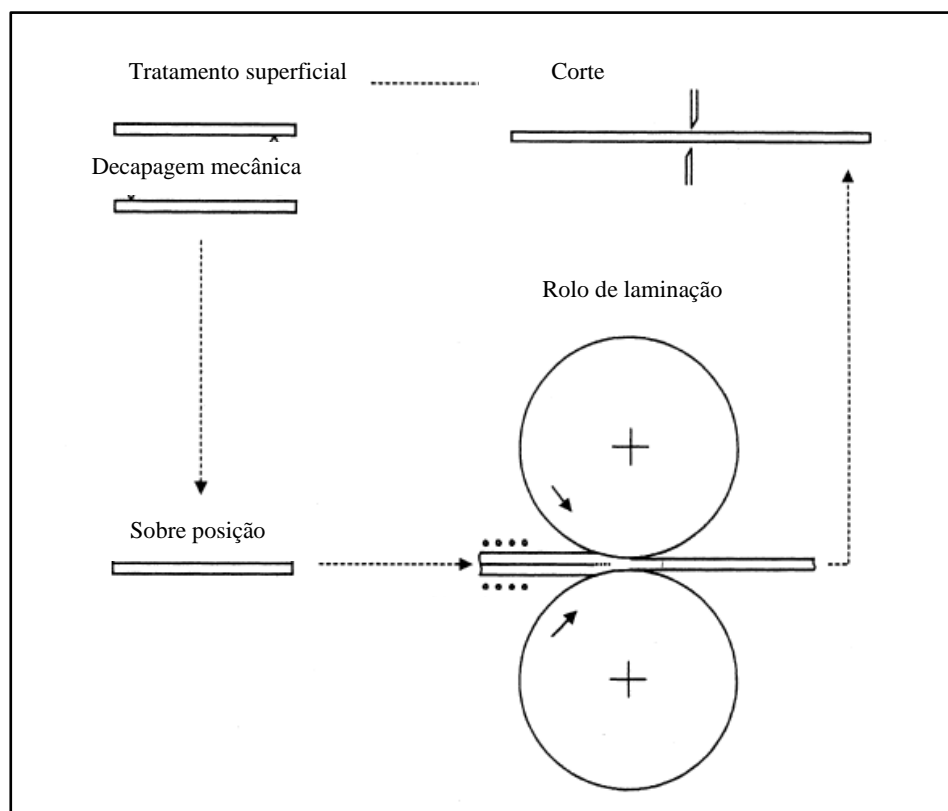
O processo de laminação é a técnica de união por solda no estado sólido dos materiais, sem que ocorra a fusão dos mesmos. Esse processo pode ser realizado a quente ou a frio, dependendo da temperatura de recristalização dos materiais envolvidos. Quando realizado a quente, indica que ocorre acima da temperatura de recristalização dos materiais utilizados, e a frio, o processo ocorre abaixo da temperatura de recuperação (LIU et al., 2018).

Durante a união por laminação, os materiais são submetidos a altas deformações, que causam alterações em sua microestrutura, fazendo com que o material tenha um aumento de dureza por encruamento e uma redução na ductilidade. Uma forma de minimizar esses fenômenos é realizar a laminação a quente, o que permite a recristalização da microestrutura, reduz a dureza e aumenta a ductilidade do material. A temperatura de recristalização pode ser aproximadamente um terço até a metade da temperatura absoluta de fusão do material, que varia de acordo com o tipo de material e os esforços a qual ele foi submetido (CALLISTER; RETHWISCH, 2008).

Se a união das chapas ocorre abaixo da temperatura de recuperação dos materiais envolvidos na laminação, então este é o processo de laminação a frio. Nesta técnica, os materiais, ou ao menos um material, terá sua espessura reduzida, e, dessa forma, ocorre uma deformação na rede cristalina e um alongamento nos grãos na direção da laminação. Essa deformação irá resultar em um endurecimento por encruamento no material. O aumento da dureza acaba reduzindo a capacidade de conformabilidade do material em operações subsequentes, mas em algumas situações o encruamento pode ser desejado, dependendo da aplicação posterior das chapas laminadas (LI; NAGAI; YIN, 2008; RAY, 2016).

O processo de laminação para união de chapas ocorre conforme a Figura 2, no qual, primeiramente, as chapas precisam ser cortadas ou desbobinadas, no caso de um processo de laminação contínua. As chapas são posicionadas de forma alinhadas com as faces que se deseja unir. Na sequência, essas faces sofrem uma limpeza superficial e então podem ser lixadas ou escovadas mecanicamente, a fim de remover os óxidos formados na superfície dos materiais. A remoção dos óxidos favorece a ligação entre os materiais, devido à formação de defeitos superficiais que serão então preenchidos na laminação e, também, por conta da força de ligação entre os materiais puros, maior do que com a camada de óxido (LENARD, 2007; SAITO et al., 1999).

Figura 2- Esquema de produção de chapas multicamadas por meio de união por laminação a frio.

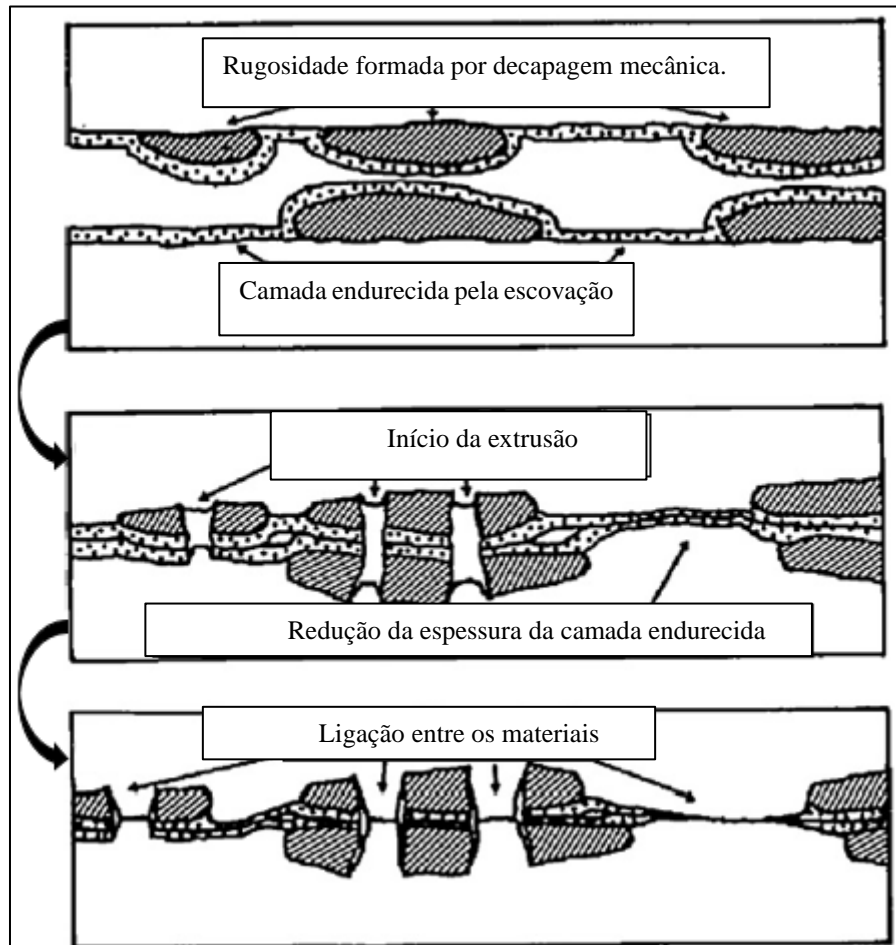


Fonte: adaptado de (LENARD, 2007)

A ligação inicial das chapas é dada pela deformação plástica que os materiais irão sofrer na laminação. Esta ligação vai depender da área superficial de contato entre as chapas, e dependendo do método de escovação a que os materiais são submetidos, haverá um aumento da sua área superficial, o que proporciona um aumento na superfície de contato. Desse modo, se torna indispensável a decapagem mecânica antes do processamento de laminação, o que acaba gerando uma superfície endurecida e frágil. A superfície ao ser submetida ao processo da laminação sofrerá rupturas superficiais, o que permite o contato entre os materiais,

principalmente os materiais puros, que farão a ligação entre as camadas como mostra a Figura 3 (MORI et al., 2013).

Figura 3- Esquema ilustrando o processo de união por laminação, quebra da camada frágil superficial de óxidos e redução das rugosidades até a união entre as camadas.



Fonte: adaptada de (MORI et al., 2013).

Com o processo de união por laminação a frio, as chapas sofrem uma ligação atômica primária e uma união mecânica através do contato entre as superfícies irregulares providas do escovamento e/ou lixamento (WRIGHT; SNOW; TAY, 1978). Esta etapa de tratamento superficial é de extrema importância para garantir uma boa adesão entre as camadas, pois as impurezas e os óxidos encontrados na superfície acabam dificultando a união. Com auxílio de produtos para limpeza superficial, como desengraxantes, fica fácil a remoção das sujidades superficiais. Porém, os óxidos ao serem removidos de forma mecânica, e, em alguns materiais acabam se formando quase que instantaneamente, e por conta desse fato, que, na laminação, as chapas devem sofrer uma deformação superficial (GILLESPIE, 2017).

Após o tratamento superficial das áreas de contato, os materiais podem ser aquecidos ou não e, então, são laminados de forma a criar uma união por meio da deformação plástica que

estão sofrendo. A deformação nos materiais pode ser de até 50 % por passe de laminação, logo a ligação apenas irá ocorrer se um certo valor for aplicado (LENARD, 2007; SAITO et al., 1999).

Estudos indicam que para obter uma boa ligação entre chapas de alumínio AA1050/aço inoxidável AISI 304L/alumínio AA1050, a redução de espessura mínima deve ser de 10 %, tendo a melhor resistência ao descolamento entre as chapas quando se atinge uma redução de 50 %. Porém, estes valores de deformação irão variar de acordo com os materiais envolvidos. Estudos reportados na literatura mostram que, a força necessária para o descolamento de chapas de três camadas de alumínio AA1050/aço inoxidável AISI 304L/alumínio AA1050, foi superior à resistência mecânica dos materiais envolvidos nos ensaios (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016; MANESH; TAHERI, 2003a).

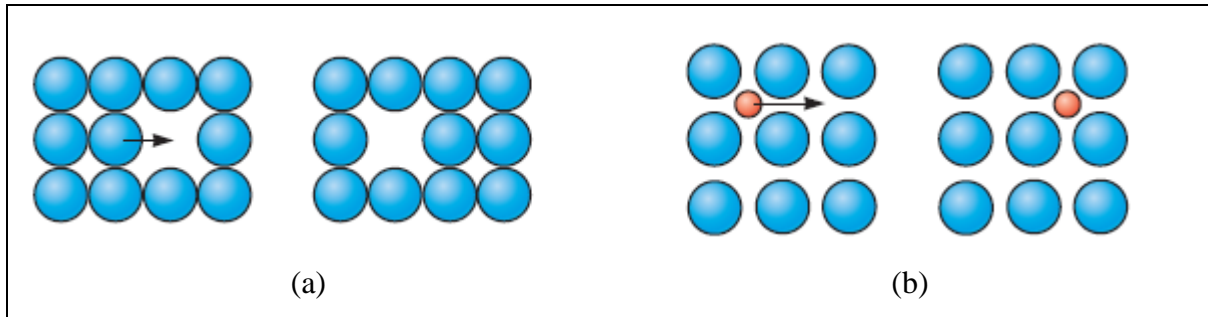
### 3.3 DIFUSÃO EM MATERIAIS

A difusão em materiais no estado sólido pode ser definida como o transporte de matéria por meio do movimento dos átomos, moléculas e íons. Como os átomos permanecem sempre em movimento vibracional em torno de suas posições de equilíbrio, porém, para ocorrer a migração de um átomo para um sítio vago, primeiramente, é necessário que se aplique uma energia vibracional suficiente para que o átomo quebre sua ligação atômica com o vizinho e então se desloque para um sítio vago formando uma distorção na rede cristalina do material. A energia vibracional é gerada por variação na temperatura que normalmente é utilizado temperaturas elevadas. Com o aumento da temperatura também aumenta a quantidade de difusão de átomos nos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2008).

Para os metais, a difusão ocorre de duas formas principais, por lacunas e por interstícios. Na difusão por lacunas, um átomo se desloca de sua posição natural para um espaço vazio na sua própria rede cristalina. (Figura 4 (a)). Na difusão intersticial, o átomo se desloca através dos interstícios do material, como mostra a Figura 4 (b) (CALLISTER; RETHWISCH, 2008).

Considerando dois elementos, o que possuir menor ponto de fusão teria maior coeficiente de difusão. Porém no exemplo de átomos de ferro e alumínio percebe-se que, devido ao ferro apresentar raio atômico (0,124 nm) menor que o alumínio (0,143 nm), para um átomo de alumínio difundir para o ferro iria causar uma distorção na rede cristalina do ferro, o que necessitaria de muita energia para ocorrer. Assim, neste exemplo, o maior coeficiente de difusão ocorre do ferro no alumínio (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016).

Figura 4- Difusão (a) por lacuna; (b) intersticial.



Fonte: adaptado de (BRANDES; BROOK, 1992).

O processo de difusão torna-se dependente de algumas variáveis como o tempo, contudo em alguns casos, este fator pode ser desconsiderado e assim considerar um processo estacionário. Porém, em uma superioridade de ocorrências de difusão, o tempo é um fator que deve ser considerado e assim, o que caracteriza um estado não estacionário ou transitório de difusão.

#### 3.4 TRATAMENTO TÉRMICO POSTERIOR À LAMINAÇÃO

As chapas na laminação, devido a aplicação de uma tensão, acabam tendo um endurecimento por trabalho a frio. O tratamento térmico de recozimento também auxilia no alívio das tensões residuais, o que irá influenciar na redução da resistência à deformação nos processos subsequentes, principalmente, se nesses processos, as chapas sofrerem esforços cisalhantes, como em um processo de estampagem. No entanto, esse tratamento térmico irá variar de acordo com os materiais utilizados para formar as camadas (STEINLAGE; BOWMAN; TRUMBLE, 1996).

O tratamento térmico de recozimento subsequente deve ser controlado de forma a garantir as propriedades desejadas. O aumento da temperatura ou do tempo de permanência pode acarretar em um aumento na força de ligação entre as camadas. Este aumento ocorre devido ao movimento atômico de curto alcance que é estimulado termicamente, desta forma, o recozimento acaba completando a união. O controle dos parâmetros utilizados deve ser monitorado para que não se crie uma camada de difusão de espessura indesejável nas interfaces das camadas (LI; NAGAI; YIN, 2008; MANESH; TAHERI, 2003a).

No caso de chapas multicamadas compostas por materiais com alto teor de ferro, os parâmetros do recozimento devem ser estudados de modo que se encontre um tratamento ideal para evitar a formação de intermetálicos frágeis nas camadas intermediárias. No entanto, é possível considerar que, para espessuras de camada intermetálicas entre 3 a 5  $\mu\text{m}$ , a resistência

ao descolamento é conservada, porém, a resistência da ligação começa a ficar comprometida quando esta espessura passa dos 10  $\mu\text{m}$  (MANESH; TAHERI, 2003a; YAHIRO et al., 1991).

Na utilização do aço inoxidável austenítico AISI 304L e do alumínio AA1050, foi possível observar que o aumento dessa camada intermediária ocorre com o aumento da temperatura, ou com o aumento do tempo de permanência no encharque. Com amostras sem tratamento térmico até 450 °C, esta camada inicia sua formação, mas, com o aumento da temperatura de recozimento a partir de 500 °C, esta camada de difusão apresenta um aumento em sua espessura (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016).

De certa forma, o tratamento térmico posterior apresenta grande influência na resistência da união entre os diferentes materiais e, além disso, intervém no seu comportamento nas operações subsequentes. Sendo assim, o tratamento térmico é um dos principais processos a ser observado na produção de materiais multicamadas, pois pode melhorar a resistência à tração, mas reduzir a resistência ao descolamento, por exemplo. Dessa forma, o importante é buscar um tratamento térmico ideal para as condições e aplicações desejadas para cada tipo de material (JIN; HONG, 2014).

### 3.5 MATERIAIS MULTICAMADAS FABRICADOS POR LAMINAÇÃO

Uma grande diversidade de combinações de materiais pode ser obtida por meio de união por laminação, em que é possível efetuar a ligação entre chapas de mesmo material ou de materiais distintos (FORSTER; JHA; AMATRUDA, 1993).

O alumínio e suas ligas são vastamente utilizados na fabricação de materiais multicamadas, isso ocorre devido a sua condutividade térmica, elétrica e a baixa densidade e a boa resistência à corrosão, por exemplo. Outros materiais que possui uma utilização muito difundida são os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico. Estes materiais são muito utilizados devido a sua resistência mecânica e por possuir um alto índice de endurecimento por trabalho a frio o que, em muitos casos, é desejado. Outro fator que amplia a sua utilização é uma excelente resistência à corrosão (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016).

Aços inoxidáveis, para serem assim considerados, devem ter como base 11 % do elemento químico cromo. Dentre inúmeras tipologias destaco os martensíticos que possuem sua fase principal composta por martensita, o que permite esses materiais serem tratados termicamente para ter maior dureza; os ferríticos, que apresentam uma microestrutura ferrítica e; os austeníticos, que no estado recozido, apresentam a microestrutura da austenita. Este último apresenta maior resistência à corrosão devido a adição de elementos de liga, como por exemplo



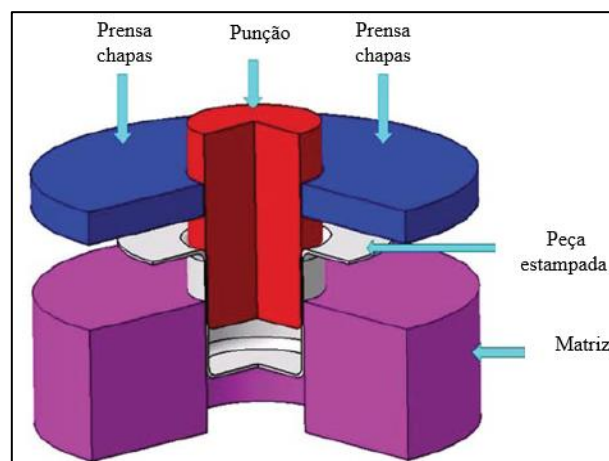
o Ni, Mo e, por ter um maior teor de Cr em sua composição. Esses materiais têm a sua maior utilização em chapas, e o principal processo de fabricação que são submetidos é a estampagem (CALLISTER; RETHWISCH, 2008).

### 3.6 ESTAMPAGEM E CONFORMABILIDADE

Na estampagem profunda, um *blank* é empurrado por um punção para dentro de uma matriz com o formato da peça final, como mostra a Figura 5. Este processo é utilizado para obtenção de vasos de pressão, latas de bebidas, painéis, componentes automotivos e muitos outros. Na estampagem, o material a ser processado irá apresentar regiões principais, que são diferenciadas devido à presença de diferentes tensões, como ilustra a Figura 6 (ALTAN; TEKKAYA, 2012; KAKANDIKAR; NANDEDKAR, 2017).

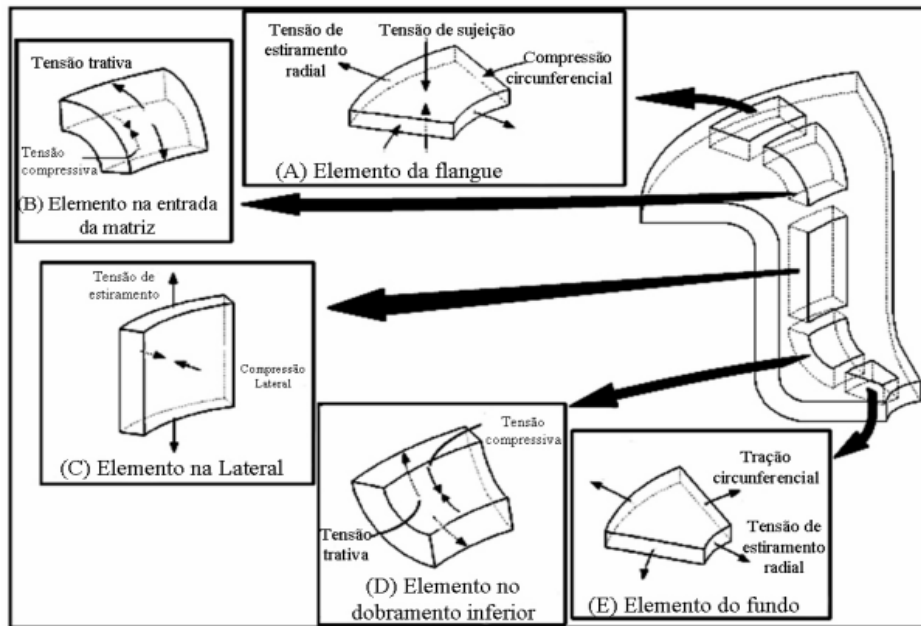
O fundo, que fica em contato com o punção, possui a carga total para formar o copo, apresenta tensões circunferenciais e radiais. As paredes do copo, deslizam pelo raio da matriz no decorrer do processo e possuem uma tensão de estiramento e uma compressão lateral, podendo apresentar redução na espessura. Na parte superior, o flange é a área onde se encontram as maiores deformações do *blank*, pois sofre um alongamento na direção radial e uma compressão na direção circunferencial. Em ambos os raios, da extremidade da matriz quanto do punção, os esforços acontecem de forma similar, apenas invertendo a tensão de compressão e tração na parte interna e externa do copo (ALTAN; TEKKAYA, 2012; KAKANDIKAR; NANDEDKAR, 2017).

Figura 5- Esquema ilustrando o processo de estampagem profunda.



Fonte: adaptado de (KAKANDIKAR; NANDEDKAR, 2017).

Figura 6- Ilustração das regiões e suas tensões.

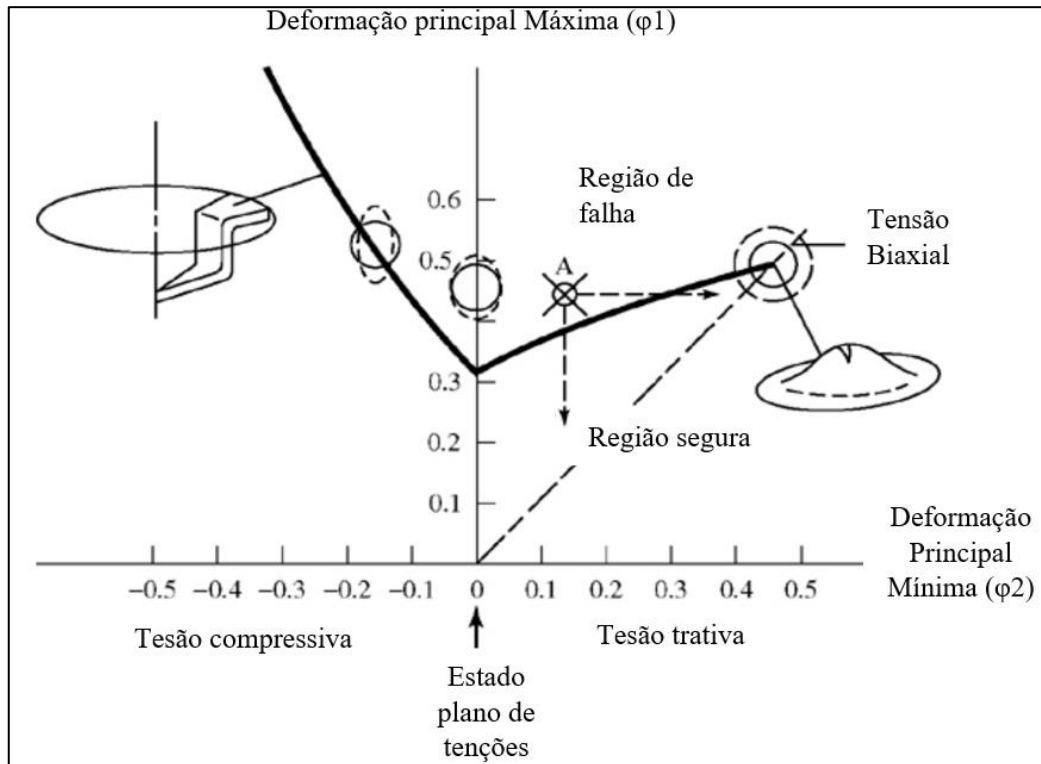


Fonte: adaptado de (EMMENS, 2011)

O que vai determinar se o material vai suportar os esforços presentes na estampagem é a sua conformabilidade, definida pela quantidade de deformação suportada por ele até que ocorra o surgimento de fraturas. O processo depende de três pontos: o material utilizado, o ferramental de conformação e as variáveis que os determinam. O limite de conformação de um dado material é obtido por meio do diagrama e da curva limite de conformação, Figura 7, nos quais o embutimento profundo é dado por  $\phi_1 = -\phi_2$ , tração uniaxial  $\phi_1 = -2\phi_2$ , tensão plana  $\phi_2 = 0$  e estiramento biaxial  $\phi_1 = \phi_2$ , onde  $\phi_1$  é a deformação real maior e  $\phi_2$  é a deformação real menor (EMMENS, 2011; SCHAEFFER, 2004).

Além dos fatores do ferramental, as propriedades dos materiais influenciam na conformabilidade. Se pode citar o coeficiente de resistência (K), o coeficiente de encruamento (n), a anisotropia (r), dentre outros. O K possui pouca influência no formato da peça, mas é relevante na força em que o punção deve exercer para que se forme a peça final. O n é o indicador da conformabilidade do material, portanto, tem grande significância na estampagem já que indica o quanto o material suporta de encruamento antes da estrição de ruptura. Já a r é a razão da deformação da largura pela deformação na espessura do material, propriedade que influenciará na capacidade que o material possui em ser alongado, sem atingir a falha (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

Figura 7- Curva do limite de conformação de um material no ensaio de embutimento.



Fonte: adaptado de (CHHIKARA et al., 2020)

No entanto, a conformabilidade dos materiais é limitada por fratura dúctil, a qual ocorre durante a conformação em função da redução da área por tração. A ductilidade de um material é afetada principalmente pela sua matriz e pela presença de inclusões. Porém, em muitos casos, as inclusões são desejadas para se obter um aumento da resistência, no entanto, podem ocasionar a redução da ductilidade. A resistência à fratura frágil tem influência das inclusões na ductilidade e varia com a natureza, fração de volume, forma e distribuição das inclusões na matriz do material. Os trabalhos mecânicos realizados nas chapas com inclusões acabam propiciando um alongamento promovendo, assim, o aparecimento de trincas e fraturas. Estas fraturas podem ser relacionadas com a formação de vazios no entorno das inclusões devido ao trabalho mecânico realizado, portanto, com a aplicação de esforços no material estes vazios são alongados através da sua união até formar uma trinca (CHAUDHARI; ACOFF, 2009).

Além de trincas e rupturas outros problemas podem ocorrer durante a conformação de chapas de aço, como estiramento, enrugamento, enrugamento da borda ou das paredes, riscos, linhas circunferenciais, superfície áspera (casca de laranja), fissuras, rachaduras na base ou em demais pontos com esforço elevado, dentre outros. Estes defeitos estão relacionados a ferramenta de estampagem, o atrito no qual a chapa terá com a ferramenta na operação, os parâmetros utilizados na conformação, as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais

envolvidos e, por conta do alongamento sofrido pela chapa que, em muitos casos, supera o limite de resistência do material. Para determinar qual é o limite de conformação de um dado material é utilizado as curvas limites de conformação (BUNGE, H. J. AND PÖHLANDT, K. AND TEKKAYA, A. E. AND BANABIC, 2010).

### 3.7 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE

Os métodos de avaliação da conformabilidade de um material, são empregados para de fato comprovar se aquele elemento irá suportar os esforços da estampagem em determinadas regiões, ou para que seja possível determinar qual o esforço deve ser utilizado para chegar no produto desejado. Um dos ensaios mecânicos mais utilizados para determinação de propriedades de chapas planas é o ensaio de tração. Esse ensaio consiste basicamente em aplicação de força uniaxial com atrito nulo (GARCIA; SPIM; DOS SANTOS, 2010; SCHAEFFER, 2004).

O ensaio de tração possibilita a obtenção dos valores de limite de resistência, limite de escoamento, grau de encruamento e do índice de anisotropia. Sendo que, para materiais que em seu processo de fabricação são submetidos a esforços mecânicos como trefilação ou laminação, é de extrema importância que seja feita uma análise da anisotropia. Isso porque, com a deformação causada ao material na etapa de fabricação, sua resistência pode variar dependendo do sentido da retirada da amostra. Na análise da anisotropia as amostras são retiradas a 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação do material, sendo 0° paralelo ao sentido de laminação (DE SOUZA, 1982; GARCIA; SPIM; DOS SANTOS, 2010).

O grau de encruamento, que pode ser determinado a partir do ensaio de tração, é uma propriedade de grande significância, pois baseado nele é possível determinar o quanto o material irá resistir à falha por encruamento. Este, por sua vez, é desfavorável em um processo de embutimento, já que acaba criando resistência à deformação, possibilitando o surgimento de falhas no produto (SCHAEFFER, 2004).

Ainda, com o ensaio de tração é possível obter muitas propriedades mecânicas dos materiais como tensão de escoamento ( $S_e$ ), tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e módulo de elasticidade (E). Porém, o ensaio de tração considera apenas um estado de tensão uniaxial o que pode apresentar limitação na obtenção dos resultados. Desta forma, outro método de avaliação utilizado são os ensaios de embutimento, que levam em consideração não apenas esforços uniaxiais, mas também esforços biaxiais. Dentre os ensaios de embutimento se pode citar Erichsen, Swift, Fukui, Nakajima, dentre outros. Para avaliação dos resultados do ensaio Nakajima, por

exemplo, é necessário a construção da curva limite de conformação do material, que determina a região de segurança na qual não ocorrerá falha durante a conformação do material (BUNGE, H. J. AND PÖHLANDT, K. AND TEKKAYA, A. E. AND BANABIC, 2010; DE SOUZA, 1982).

Os materiais multicamadas vem tendo uma crescente utilização na indústria, para que se possa ter combinações de materiais distintos e bem como de suas propriedades. Portanto, se torna essencial a pesquisa nos métodos de fabricação e nos próprios materiais para uma otimização dos meios produtivos, garantindo boas propriedades para cada tipo de aplicação deste tipo de material.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será abordado os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste estudo.

### 4.1 MATERIAIS

As chapas utilizadas no presente trabalho foram fornecidas pela empresa Tramontina Farroupilha SA. A chapa de camada tripla utilizada na confecção das amostras foi fabricada por meio de laminação a frio e é composta pelo aço inoxidável austenítico AISI 304L, o alumínio AA 1050 e o aço inoxidável ferrítico AISI 430. De modo a simplificar no decorrer do trabalho esses três materiais serão denominados como 304, AA1050, 430, respectivamente.

A laminação ocorreu após os materiais sofrerem uma decapagem mecânica por rolos, e, após essa decapagem, a rugosidade média das chapas foi de 0,537  $\mu\text{m}$  para o 430, de 0,327  $\mu\text{m}$  para o 304 e 2,580  $\mu\text{m}$  para o AA1050. A rugosidade foi obtida por meio de um ensaio de perfilometria 3D, em uma área de 1  $\text{mm}^2$ , no perfilômetro e rugosímetro com resolução nanométrica (Talysurf Intra - Taylor Hobson) localizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. A composição química de cada um dos materiais utilizados é apresentada na Tabela 1 e foram obtidas por espectrometria de emissão óptica por centelha, no equipamento SPECTROMAXx, modelo LMM06 da Tramontina Cutelaria. Os resultados obtidos estão em conformidade com as especificações nominais de cada material.

No final do processo de laminação, a espessura da chapa de camada tripla foi de 2,6 mm. As chapas sofreram uma redução de aproximadamente 31,57% em sua espessura durante este processo. Posteriormente todo o material laminado, passou pela etapa de tratamento térmico de recozimento. Foi variada a temperatura de recozimento, a fim de observar alterações na interface, como a espessura da camada de difusão e possíveis formações de intermetálicos, também foi avaliado o comportamento mecânico das amostras.

Tabela 1- Composição química dos materiais da chapa multicamada.

Alumínio AA1050									
Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	V	Ti	Pb
Composição %	99,38	0,113	0,208	0,0393	0,0084	0,0111	0,0056	0,0016	0,2
Aço inoxidável ferrítico AISI 430									
Elemento	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Nb	Al	Fe
Composição %	0,0267	0,362	0,123	0,0134	16,44	0,103	0,349	0,0041	82,4
Aço inoxidável austenítico AISI 304L									
Elemento	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	P	Al	Fe
Composição %	0,0334	1,07	8,38	18,77	0,137	0,437	0,0252	0,0091	70,2

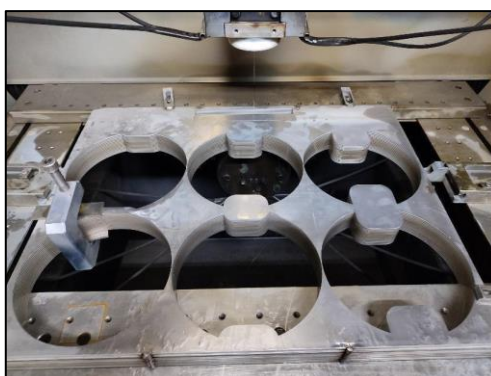
Fonte: o autor (2023).

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Preparação das amostras

Inicialmente foram fornecidas pela empresa 15 chapas do material multicamada, nas dimensões de 1213 mm de comprimento por 500 mm de largura e com espessura de 2,6 mm (+/- 0,1 mm). Estas chapas foram cortadas em três unidades de 620 x 500 x 2,6 mm, 420 x 500 x 2,6 mm e 173 x 500 x 2,6 mm, de modo a obter o maior aproveitamento do material e também para ser possível efetuar o corte das amostras em uma máquina de corte por eletroerosão a fio. Todas as amostras utilizadas nos ensaios mecânicos Nakajima, descolamento e tração foram cortadas em uma máquina de corte por eletroerosão a fio conforme Figura 8.

Figura 8- Corte das amostras na máquina de corte por eletroerosão a fio.



Fonte: o autor (2023).

As amostras cortadas foram separadas conforme as temperaturas do tratamento térmico posterior, de acordo com a Tabela 2. As amostras foram gravadas a laser conforme a temperatura do tratamento térmico e o sentido de retirada da amostra, nos casos em que havia diferentes direções de extração em relação ao sentido de laminação (Figura 9).

Tabela 2 - Distribuição das amostras cortadas para cada ensaio separadas por temperatura de tratamento térmico.

Ensaio	Sem tratamento térmico	Temperaturas (°C)				Total de amostras
		250	350	450	550	
Anisotropia 0°	3	3	3	3	3	15
Anisotropia 45°	3	3	3	3	3	15
Anisotropia 90°	3	3	3	3	3	15
Tração	3	3	3	3	3	15
Peeling	3	3	3	3	3	15
Nakajima	15	15	15	15	15	75

Fonte: o autor (2023).

Figura 9- Gravações a laser da temperatura do tratamento térmico e direção da retirada das amostras em relação ao sentido de laminação.



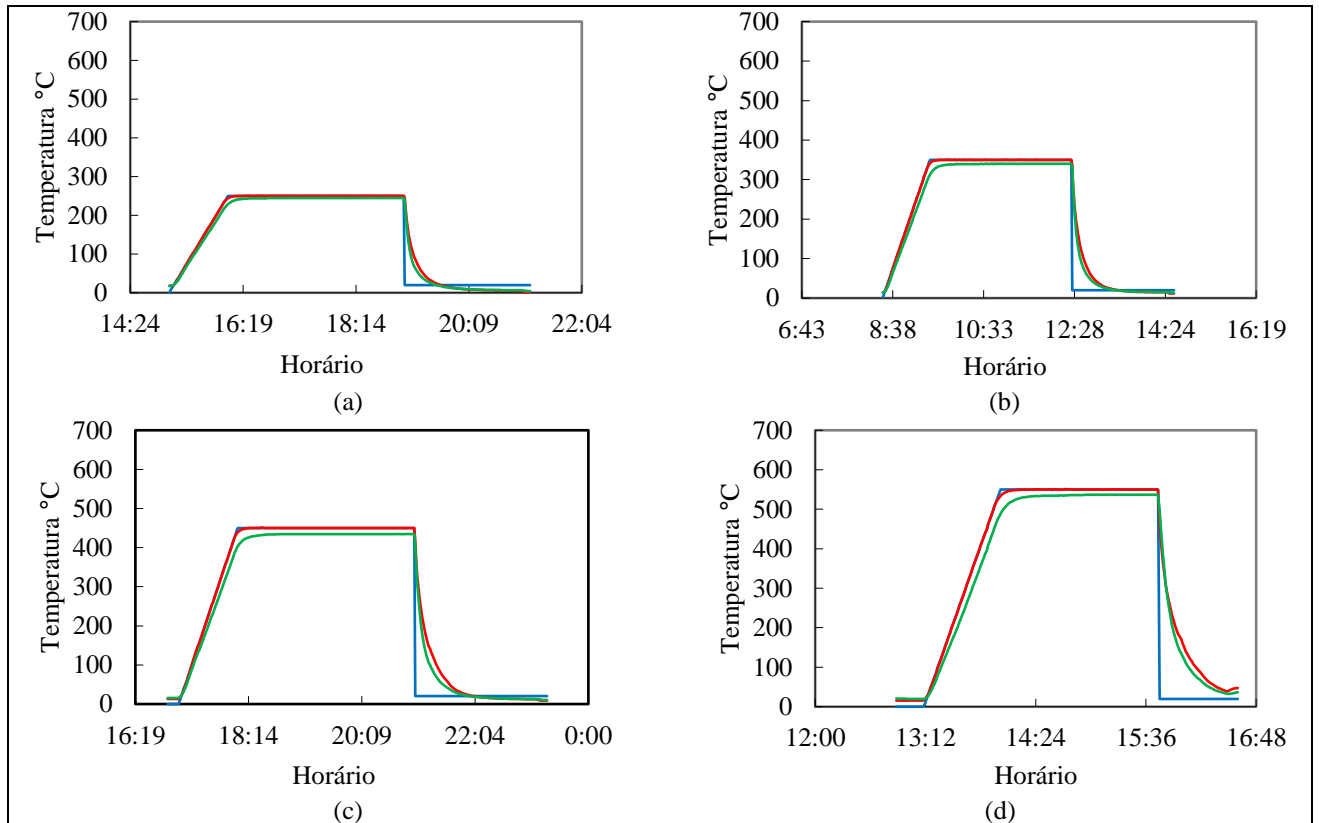
Fonte: o autor (2023).

As temperaturas do recozimento das amostras foram determinadas a partir da temperatura que o fornecedor do material já utiliza para o tratamento térmico e com base em estudos apresentados por (LEE et al., 2007; MANESH; TAHERI, 2003a). Contudo, o recozimento foi efetuado por um tempo fixo e em faixas de temperatura mais baixas que as apresentadas na literatura.

As amostras foram tratadas termicamente em um forno a vácuo (TAV – Modelo FT500) com atmosfera controlada. O tratamento térmico de recozimento ocorreu por 3 h nas temperaturas de 250, 350, 450 e 550°C com acompanhamento por termopar, conforme Figura 10(a)-(d). Estas temperaturas foram selecionadas de acordo com o processo já existente na empresa. Um grupo de amostras foi mantido apenas com a laminação, sem tratamento térmico posterior.



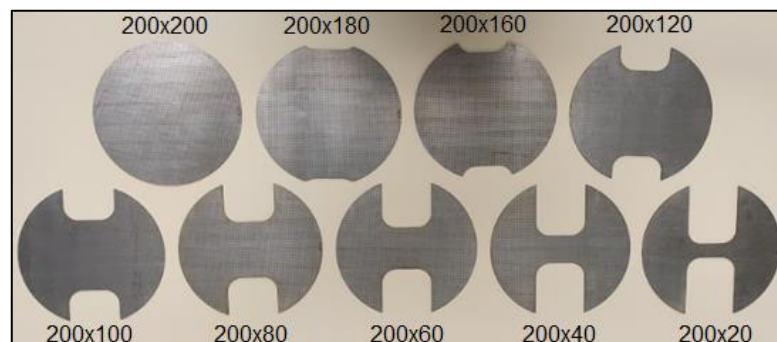
Figura 10- Gráficos do ciclo de tratamento térmico de recozimento das amostras nas temperaturas, (a) 250 °C, (b) 350 °C, (c) 450 °C e (d) 550 °C, nos quais a linha azul representa o ponto de ajuste, a linha vermelha o termopar de controle e a linha verde é do termopar fixado na amostra.



Fonte: o autor (2023).

Após a conclusão do tratamento térmico, os corpos de prova utilizados no ensaio de embutimento profundo passaram pela etapa de gravação eletroquímica, conforme ilustrado na Figura 12. Com o objetivo de criar uma malha quadriculada com dimensões de 2,0 x 2,0 mm e com uma distribuição uniforme em toda a superfície, em conformidade com as diretrizes da norma ISO 12004. É importante mencionar que essa gravação foi realizada no material 430, uma vez que, no ensaio de embutimento, esse material compõe a parte externa do copo.

Figura 11- Ilustração dos corpos de prova para o ensaio de embutimento Nakajima com a gravação eletroquímica da malha quadriculada 2,0 x 2,0 mm.



Fonte: o autor (2023).

#### ***4.2.2 Análise da interface***

As análises da região de interface foram realizadas utilizando técnicas distintas de caracterização de materiais como análise da microestrutura, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopias por dispersão de energia (EDS). O objetivo foi avaliar o mecanismo de adesão, a formação da camada de difusão entre os materiais e as alterações que as diferentes temperaturas do tratamento térmico causam nas interfaces.

Para a análise microestrutural, as amostras foram retiradas do ensaio de descolamento e cortadas seções de cada um dos materiais que compõem a chapa multicamada. Essa análise foi realizada a fim de avaliar as modificações na microestrutura dos materiais após a laminação e o efeito do tratamento térmico em cada uma das temperaturas. Para isso, as amostras foram cortadas em uma cortadeira metalográfica (Buehler), embutidas com baquelite em uma embutidora (Arotec), lixadas com lixas de grão 320 a 1200 na politriz (Struers Tegramim-20), e polidas em banho eletroquímico com reagente Kroll, Keller e solução de 2,5% de ácido fluorbórico diluído em água, para o 304, 430 e AA 1050 respectivamente. As imagens metalográficas do 304 e 430 foram obtidas no Laboratório de Metalografia e Materiais de Caxias do Sul - UCS, em microscópio Nikon Epiphot 200. As imagens metalográficas do AA 1050 foram obtidas no microscópio Olympus gx51, na divisão Starflon da Tramontina Cutelaria.

Visando determinar a ocorrência de uma camada de difusão entre os materiais e identificação de uma possível formação de intermetálicos nesta região, foi empregada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) na seção transversal das amostras do material multicamada. Para essa análise as amostras foram cortadas transversalmente em uma cortadeira, embutidas em resina condutora em uma embutidora, lixadas com lixas de grão 400 a 2500 e polidas utilizando suspensão de sílica coloidal em uma politriz, não foi realizado ataque químico nas amostras. As análises de MEV foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul - UCS, no equipamento Mira 3 LM da Tescan.

Ainda, foram realizadas espectroscopias por dispersão de energia (EDS), tendo em vista que as características do equipamento permitem a obtenção de dados qualitativos da composição química ao longo das camadas das amostras. Para isso, foi executado um espectro em linha, o que permitiu a investigação da formação da camada de difusão e as diferenças entre cada uma das temperaturas de recozimento empregadas.

### 4.2.3 Análise das propriedades mecânicas

Para obter uma caracterização completa das chapas de camada tripla, foram realizados os ensaios mecânicos de tração uniaxial, descolamento e Nakajuma. Estes ensaios objetivaram avaliar as variações nas propriedades mecânicas das chapas com a variação do tratamento térmico posterior à laminação.

O ensaio de tração foi realizado com objetivo de obter a curva tensão *versus* deformação do material multicamada, e, a partir desta determinar propriedades mecânicas como o coeficiente de encruamento ( $n$ ), a coeficiente de resistência ( $K$ ), tensão de escoamento ( $S_e$ ), tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e módulo de elasticidade ( $E$ ). A partir do ensaio de tração, também foi possível determinar o índice de anisotropia real ( $r$ ), que permitiu identificar as variações de resistência que o material apresenta em diferentes direções em relação ao sentido de laminação.

As amostras utilizadas no ensaio de tração seguiram a norma ABNT NBR 6892-1 (2013) com dimensões de 200 mm de comprimento e 20 mm de largura. As amostras foram retiradas nas direções de  $0^\circ$ , paralelo ao sentido de laminação,  $45^\circ$  em relação ao sentido de laminação e  $90^\circ$ , perpendicular ao sentido de laminação. Para o ensaio de anisotropia foi utilizado a máquina EMIC Modelo DL 20000, Figura 12, com capacidade de 20 t, localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

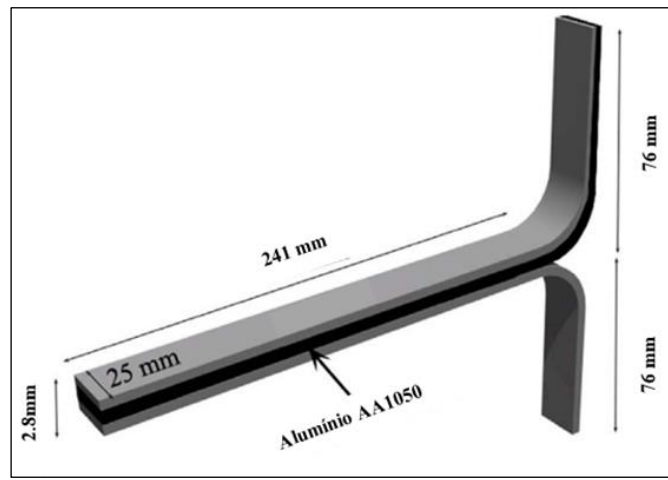
Figura 12- Máquina EMIC Modelo DL 20000, utilizada no ensaio de tração e anisotropia.



Fonte: o autor (2023).

O ensaio de descolamento foi realizado para determinar o esforço necessário para separação das chapas após a laminação e o tratamento térmico. Com isso, foi possível a determinação da temperatura de recozimento que proporciona uma maior força de ligação entre as chapas. Os corpos de prova e o ensaio de descolamento seguiram a norma ASTM D1876-01 (Figura 13). Para isso foi utilizada a máquina Shimadzu, modelo AGS-X com capacidade de 100 kN (Figura 14), localizada na empresa Tramontina Farroupilha S.A.

Figura 13- Ilustração do corpo de prova para o ensaio de descolamento.



Fonte: Imagem adaptada de (AKRAMIFARD, MIRZADEH e PARSA, 2014).

Para o ensaio de descolamento, conforme indicado pela norma ASTM D1876-01, é necessário que, as amostras, tanto o 304 quanto o 430 fossem deslocadas do AA1050. Este deslocamento inicial necessita um comprimento total de 76 mm para permitir a fixação da amostra nas garras do equipamento. As amostras deslocadas foram fixadas nas garras separadamente e analisadas as forças de adesão entre o AA1050 e o 430 e, posteriormente, entre o AA1050 e o 304. Para o ensaio, o AA1050 foi fixado na garra fixa e; o 430 e o 304 fixados na garra móvel.

Figura 14- Máquina Shimadzu, modelo AGS-X utilizada no ensaio de descolamento.

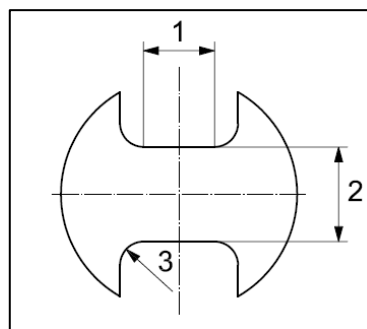


Fonte: o autor (2023).

De modo a finalizar a caracterização da conformabilidade das chapas multicamadas foi realizado o ensaio de embutimento Nakajima. Este ensaio foi utilizado para possibilitar a verificação da estampabilidade ou conformabilidade por meio da curva limite de conformação (CLC) do material. Assim, foi selecionado por ter maior semelhança com as operações subsequentes que o material multicamada sofre na indústria.

Os corpos de prova apresentados na Figura 15, possuem variações das medidas do comprimento do entalhe (1), visto que a medida do raio (3) permanece constante em todas as amostras e a medida da largura (2) possui uma variação a uma taxa de 20 mm, iniciando com a medida de 200 mm até a medida final de 20 mm. Tanto a obtenção e preparação das amostras quanto o ensaio respeitaram as normas ISO 12004-1 e ISO 12004-2 (2008).

Figura 15- Ilustração do corpo de prova para o Ensaio Nakajima.

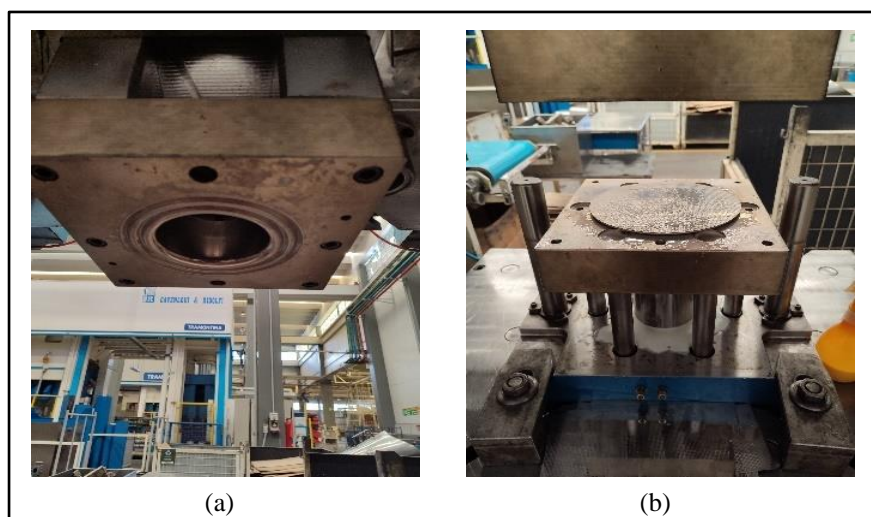


Fonte: adaptado de ISO 12004-2 (2008).

Este ensaio foi executado utilizando uma prensa hidráulica com capacidade de 80 t, com lubrificação composta por Estampatec LE-1, Draw 58 GS, Inibitec LE-1, com força de prensa

chapas de 9,81 MPa. A ferramenta utilizada no ensaio Nakajima seguia as normas ISO 12004-1 e ISO 12004-2 (2008). A parte superior, Figura 16 (a), era composta pela matriz com a cavidade para formar o copo e, a parte inferior, Figura 16(b), o prensa chapas e o punção esférico. O procedimento do ensaio constituiu na aplicação do lubrificante no punção e em ambos os lados da amostra, posicionamento da amostra sobre o prensa chapas e acionamento da prensa até o início da falha.

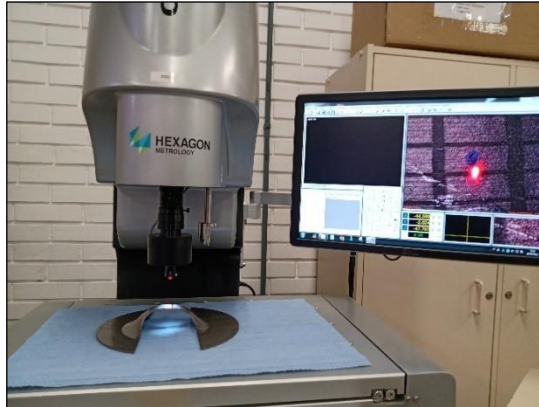
Figura 16- (a) parte superior (matriz) e (b) parte inferior (prensa chapa e punção) da ferramenta utilizada no ensaio Nakajima.



Fonte: o autor (2023).

Após a realização do ensaio Nakajima, foi realizada uma limpeza nas amostras para retirada do lubrificante e então selecionados os pontos para medição das deformações. Para realizar as medições, foi utilizado o equipamento *Hexagon Metrology Optiv Lite DCC* modelo 3020 no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP), da Universidade de Caxias do Sul (Figura 17). Este equipamento possibilita a realização de medição por imagem, com auxílio de um sistema duplo de eixos e o software PC-DIMIS permite a realização das medições com maior agilidade, qualidade e confiabilidade.

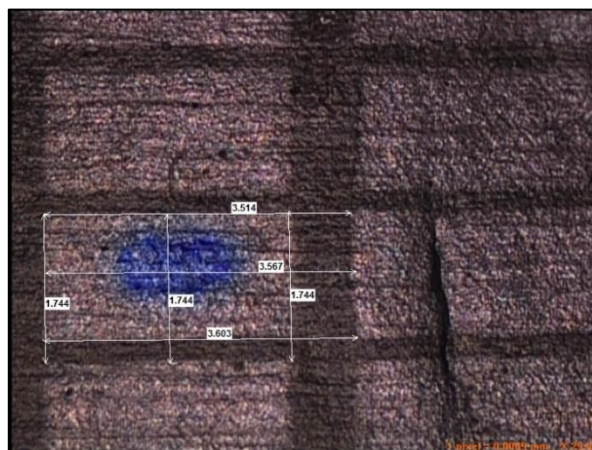
Figura 17- Equipamento *Hexagon Metrology Optiv Lite DCC* modelo 3020 utilizado para medição das deformações nas amostras do ensaio Nakajima.



Fonte: o autor (2023).

Para a medição foram selecionados os pontos com maior deformação e o mais próximo da região de ruptura, conforme indicado pelas normas ISO 12004-1 e ISO 12004-2 (2008). Posteriormente, foram realizadas três medições no ponto determinado no sentido da maior deformação e outras três no sentido da menor deformação, conforme mostrado na Figura 18. Para finalizar, as medidas das deformações foram inseridas em uma planilha de acordo com a temperatura de tratamento térmico e construída a curva limite de conformação para cada grupo de amostras

Figura 18- Medição da maior e menor deformação de um ponto próximo a região de fratura.



Fonte: o autor (2023).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são abordados os resultados obtidos com o presente estudo, considerando o tratamento térmico posterior à laminação em todas as análises das interfaces e propriedades mecânicas das amostras.

### 5.1 TRATAMENTO TÉRMICO

A partir da análise qualitativa da união das chapas, realizada logo após a etapa de tratamento térmico, foi possível constatar que para as temperaturas de 250, 350 e 450°C, as amostras não apresentaram nenhum tipo de defeito perceptível a olho nu. Já nas amostras tratadas termicamente na temperatura de 550°C, ocorreu a separação das camadas que compunham a chapa, ou seja, o deslocamento das amostras ainda na fase de tratamento térmico. Isso impossibilitou seguir com os ensaios mecânicos e com a análise da interface das placas unidas entre si, e foi apenas possível efetuar uma análise microestrutural nas faces que estavam em contato umas com as outras.

Para entender o que poderia ser feito para que o deslocamento não ocorresse na temperatura de 550 °C, foram realizados ciclos de aquecimento e resfriamento em retalhos do corte das amostras. Para o aquecimento foram realizadas duas variações: na primeira a peça em temperatura ambiente foi inserida no forno já a 550 °C, na segunda foi efetuado um aquecimento progressivo com rampas de 110 °C por hora, ambas em um forno poço sem convecção. Como resultados, no primeiro ciclo a amostra deslocou ainda no interior do forno, já no segundo a amostra permaneceu com as três camadas unidas.

Com isso foi possível a realização dos ciclos no resfriamento, para analisar se esta condição de deslocamento poderia ocorrer nesta etapa. Com as amostras aquecidas de forma progressiva até 550 °C foram realizados três ciclos: um com resfriamento forçado por ventilador, outro mergulhando a amostra em água a temperatura ambiente e outro deixando a amostra esfriar fora do forno em temperatura ambiente. Em todos os casos não houve o deslocamento das camadas. Desta forma, a melhor condição para que não ocorra o deslocamento das camadas no aquecimento foi realizar o aquecimento do recozimento de forma progressiva em forma de rampa de aquecimento. Contudo, não havia excedente de chapas para retirar mais amostras a temperatura de 550 °C, e por isso foi eliminada das análises mecânicas e de interface.

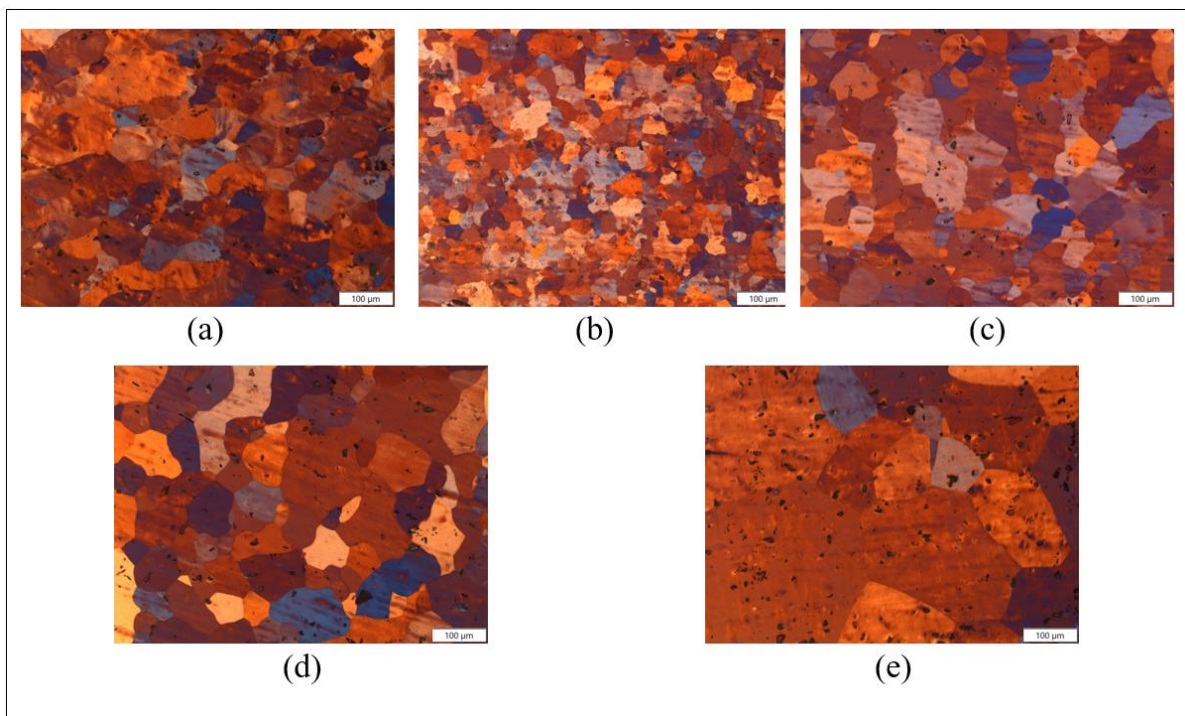


## 5.2 MICROESTRUTURA DO MATERIAL

A técnica de metalografia dos materiais 304, AA1050 e 430 permitiu avaliar os efeitos do tratamento térmico na microestrutura dos materiais. A Figura 19 (a) mostra a microestrutura do alumínio AA1050 somente laminado, em que foi possível observar o alongamento dos grãos do material. Já na Figura 19 (b), o alumínio havia passado por recozimento a 250 °C após ser laminado, e foi possível identificar que os grãos do material vão tendo uma redução no seu alongamento.

Nas Figura 19 (c) e Figura 19 (d), as quais representam as micrografias do alumínio AA1050 recozido a 350 °C e 450 °C, respectivamente, é possível perceber que os grãos do material possuem uma redução no seu alongamento e um formato poligonal. Já na Figura 19 (e), a qual mostra o alumínio AA1050 recozido a 550 °C, permite identificar um crescimento significativo do tamanho de grão do material. Esse crescimento pode ser explicado pela temperatura de recristalização da liga de alumínio AA1050, que ocorre na faixa de 390 a 410 °C (POP, 2019). Portanto na Figura 20 (e) a temperatura do tratamento térmico foi superior à temperatura de recristalização do alumínio, o que permitiu o crescimento dos grãos do material (LOW, 2000).

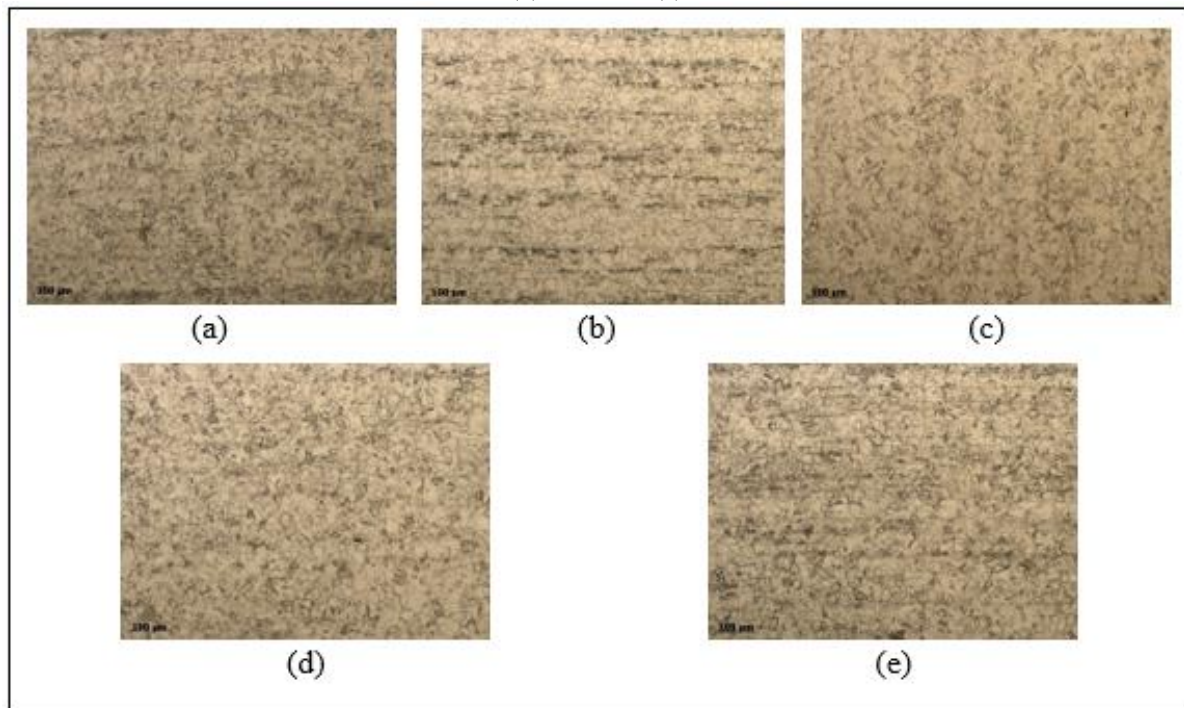
Figura 19- Imagens de microestrutura óptica da microestrutura do alumínio AA 1050 laminado, ilustrando o alívio das tensões de laminação e o crescimento de grão devido ao tratamento térmico de recozimento, (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.



Fonte: o autor (2023).

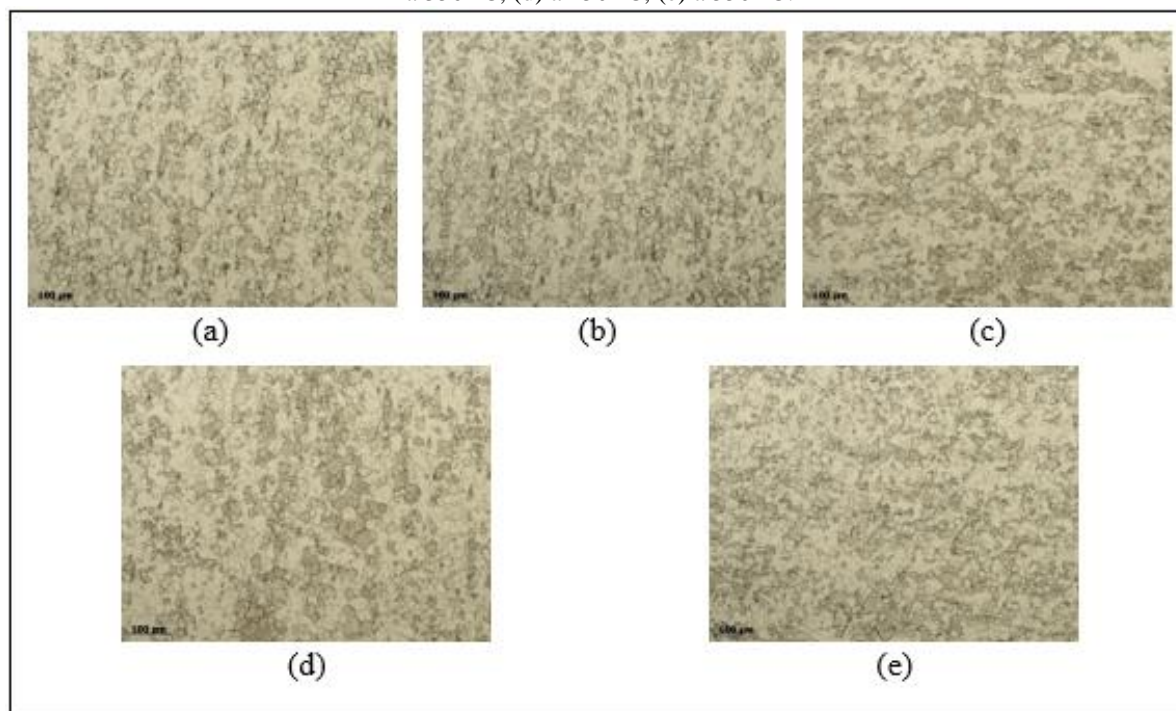
A mesma análise microestrutural foi realizada para as amostras 304 e o 430, de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, respectivamente, e os resultados seguem nas Figura 20 (a)-(e) e Figura 21 (a)-(e), respectivamente. Foi possível comprovar que, para os aços inoxidáveis, não houve nenhuma alteração na microestrutura e tamanho de grão, tanto no processo de laminação quanto com as diferentes temperaturas de tratamento térmico aplicadas. As microestruturas dos aços inoxidáveis 304 e 430 se mantiveram íntegras devido as baixas temperaturas do tratamento térmico em comparação as utilizadas para o recozimento, tanto do 304 quanto do 430. Segundo Chandler, essas temperaturas são de 1010 a 1120 °C e 760 a 815 °C, respectivamente (CHANDLER, 1994). Para se ter um crescimento de grão, os materiais deveriam ser mantidos por tempos elevados nessas temperaturas ou mesmo ser mantido em temperaturas superiores às respectivas temperaturas de recozimento. Nas temperaturas aplicadas neste estudo de (250, 350, 450 e 550 °C) acabaram não afetando a microestrutura do 304 e do 430.

Figura 20- Imagens de microscopia óptica da amostra 304 laminada (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.



Fonte: o autor (2023).

Figura 21- Imagens de microscopia óptica da amostra 430 laminada (a) sem tratamento térmico, (b) a 250 °C, (c) a 350 °C, (d) a 450 °C, (e) a 550 °C.

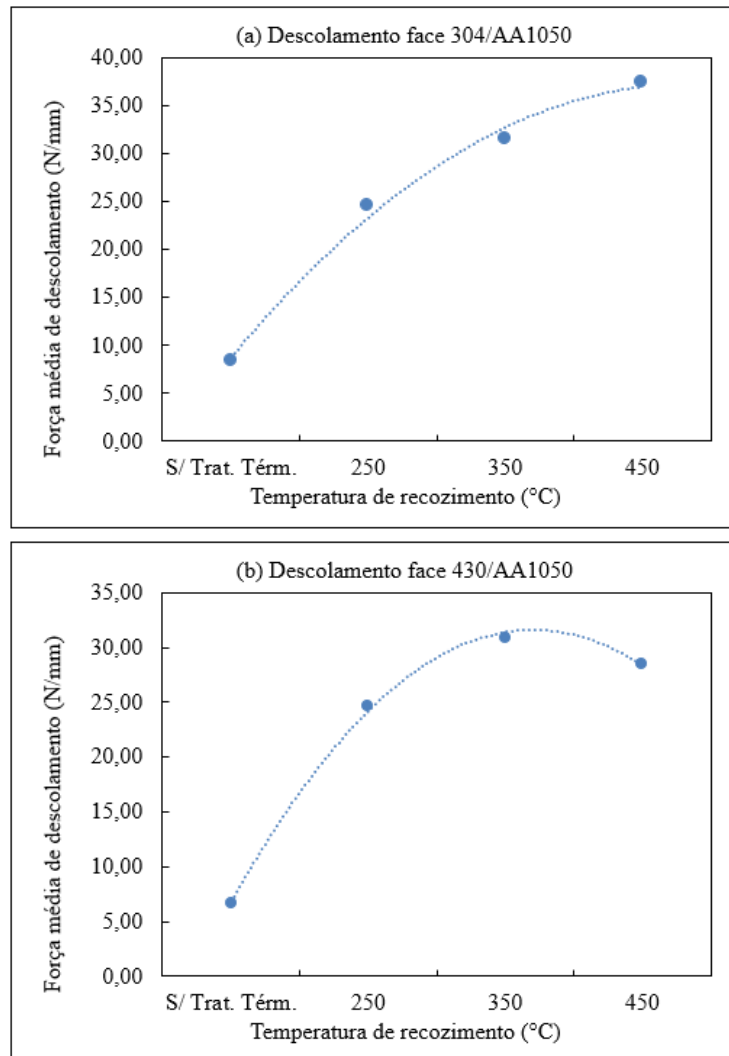


Fonte: o autor (2023).

### 5.3 AVALIAÇÃO DA ADESÃO ENTRE CAMADAS

A adesão entre as camadas foi quantitativamente avaliada por meio do ensaio de descolamento. O gráfico apresentado na Figura 22 (a)-(b) mostra os resultados da força média necessária para o descolamento das uniões 304/AA1050 e 430/AA1050 em cada uma das temperaturas utilizadas no tratamento térmico. A partir da Figura 22 (a)-(b), é possível observar que, à medida em que a temperatura do recozimento aumentou, ocorreu um aumento na adesão entre os materiais, especialmente na ligação 304/AA1050. Com valores de 8,36 N/mm amostra sem tratamento térmico e 37,37 N/mm amostras recozidas a 450 °C para a ligação entre 304/AA1050 e 6,65 N/mm para amostras sem tratamento térmico e 28,53 N/mm amostras recozidas 450 °C para 430/AA1050.

Figura 22- Gráficos da resistência ao deslocamento *versus* temperatura de recozimento. (a) Face 304/AA1050. (b) Face 430/AA1050.



Fonte: o autor (2023).

O aumento da temperatura permite uma maior mobilidade dos átomos, o que facilita o processo de difusão entre os materiais e aumenta a adesão entre camadas. Portanto, o aumento na adesão pode ser atribuído à formação de uma camada de difusão, mesmo que nanométrica, na região de interface. O aumento da temperatura (>500 °C) e do tempo do tratamento térmico (>12 h) permite que a camada de difusão alcance espessuras micrométricas, o que diminui a conformabilidade das chapas multicamadas (KIM; HONG, 2019; MANESH; TAHERI, 2003b; WANG et al., 2019).

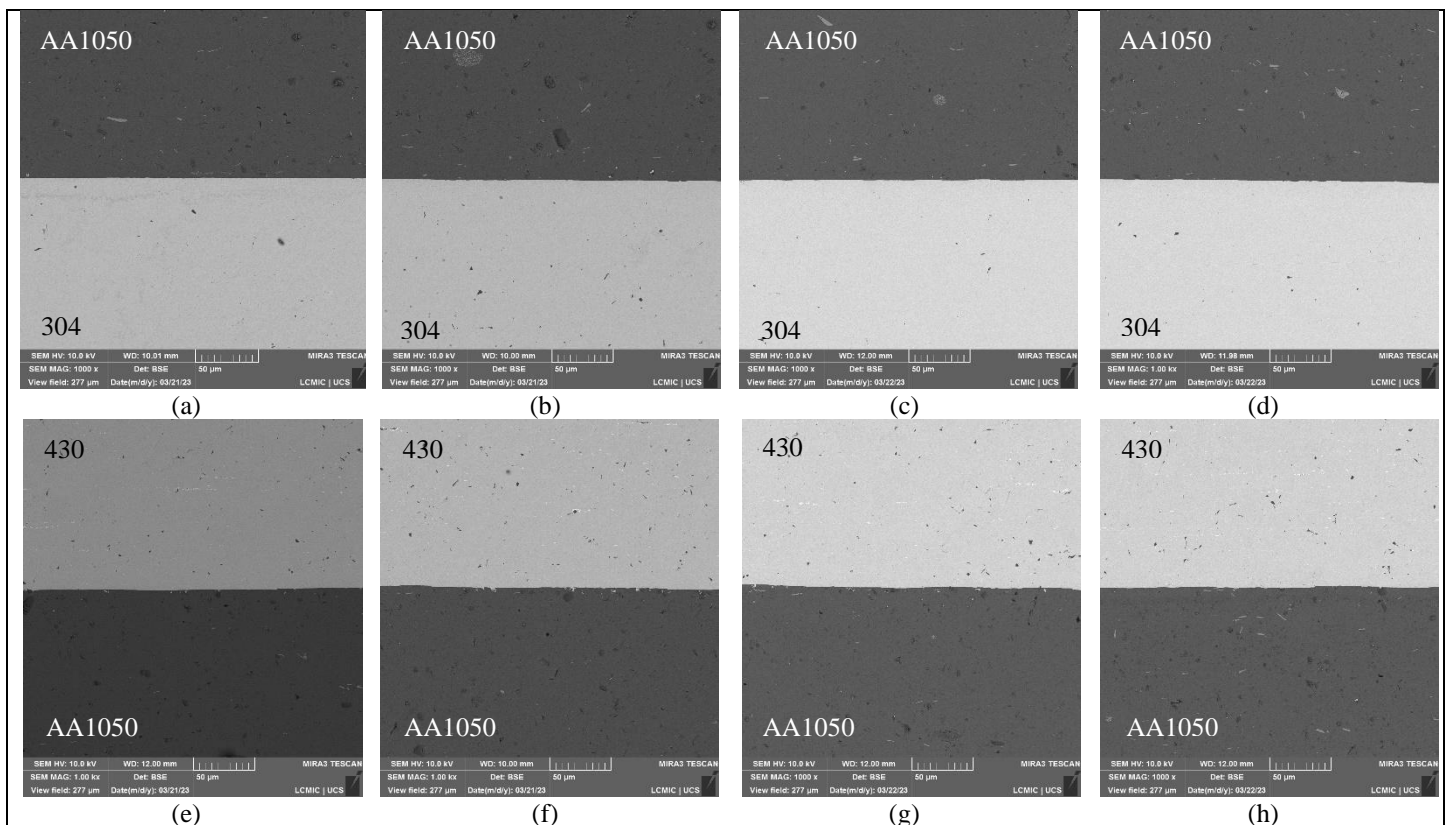
#### 5.4 AVALIAÇÃO DA REGIÃO DE INTERFACE

A região de interface foi analisada via MEV na seção transversal das chapas (Figura 23). Diferentemente da literatura, como é possível observar na Figura 23, não houve a formação

de uma camada de difusão de escala micrométrica em todas as condições do tratamento térmico (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016; KIM et al., 2004). Esse fenômeno pode ser explicado pelo reduzido tempo e baixas temperaturas de recozimento utilizado no presente estudo de no máximo 3 h a 450 °C, respectivamente, quando estudos anteriores utilizaram até 44 h a 550 °C (KIM; HONG, 2019), ou até 48 h a 600 °C (TORTORICI, 1998).

A importância deste estudo não se restringe apenas a sua aplicação em ambiente industrial devido à redução do gasto energético, proporcionadas pelas condições de baixa temperatura e reduzidos tempos do tratamento térmico. A ausência da camada de difusão micrométrica na interface do material multicamada é benéfico à conformabilidade do material (MANESH; TAHERI, 2003a). A determinação do tempo de 3 h e das temperaturas de 250, 350 e 450 °C foi baseada em parâmetros de processos industriais, que visam o aumento produtivo e economia nos insumos energéticos, mas que carece de investigação científica que avalie também a conformabilidade via a CLC. Embora sem avaliar a conformabilidade, estudos anteriores para duas chapas de dupla camada Al3003/STS439, também não detectaram a formação de uma camada de difusão micrométrica (JIN; HONG, 2014).

Figura 23- (a) e (e) amostras sem tratamento térmico, amostras tratadas termicamente (b) e (f) a 250 °C, (c) e (g) a 350 °C e (d) e (h) a 450 °C



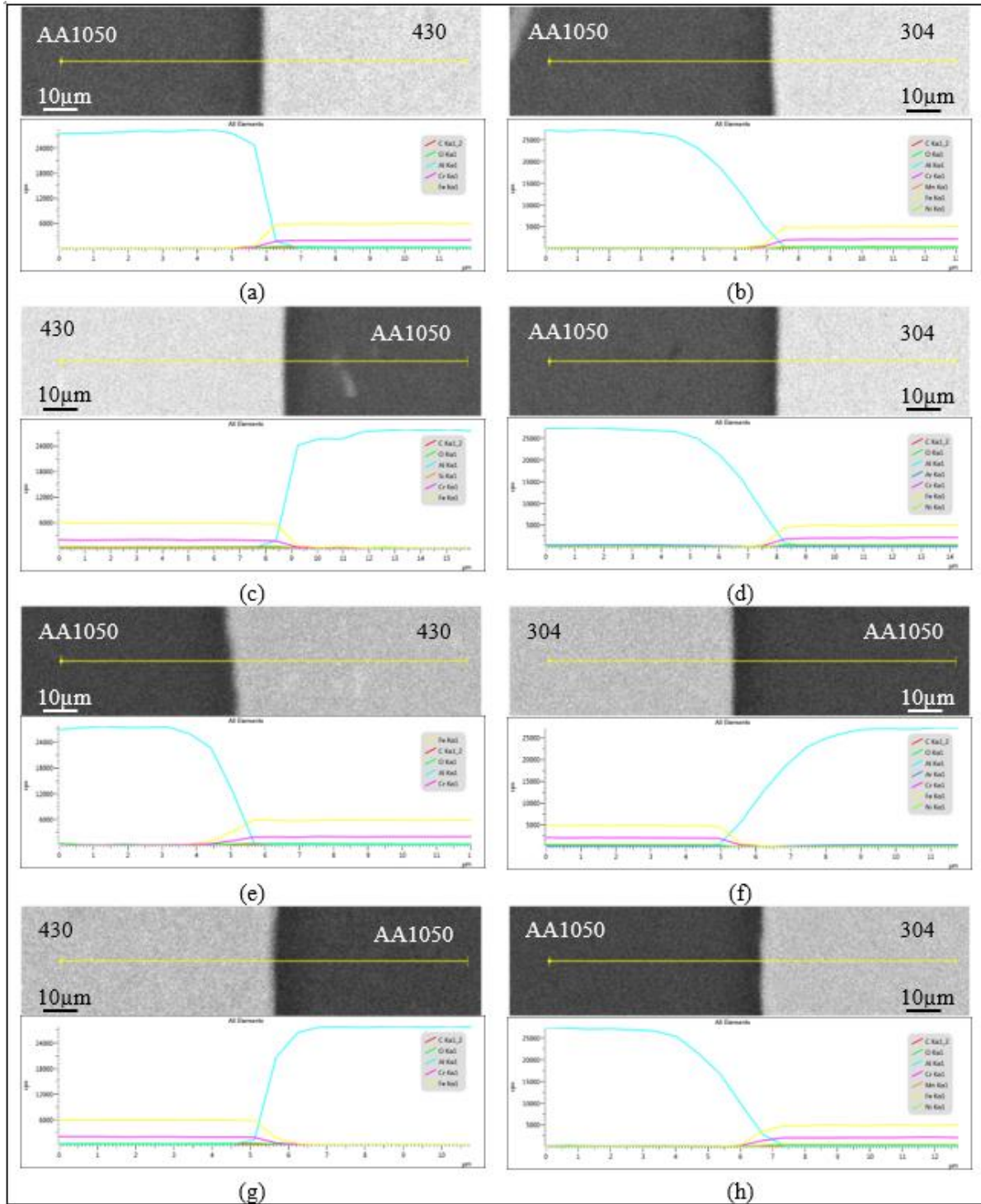
Fonte: o autor (2023).

A Figura 24 (a)-(h) mostra, via (EDS) em linha, a composição química elementar na região das interfaces da chapa multicamada. No espectro é possível identificar a faixa de transição dos materiais na interface. Os resultados revelaram uma faixa de transição com pequena variação entre as diferentes interfaces nas distintas temperaturas de tratamento térmico. Estes resultados são consistentes com as observações das imagens de MEV, que não indicaram uma camada de difusão micrométrica no material.

Entretanto, comparando a Figura 24 (e) e (f) com a Figura 24 (g) e (h), observa-se uma variação na declividade das curvas de concentração do Al e Fe. Esta alteração nas concentrações pode indicar o início da formação de uma camada nanométrica de intermetálicos na interface STS430/AA1050. Devido ao diâmetro do feixe (0,1 a 0,5 nm) de análise do EDS ser maior que a camada, não foi possível dimensionar o tamanho real da interface, no entanto pode-se afirmar que houve alteração nesta interface quando comparadas.

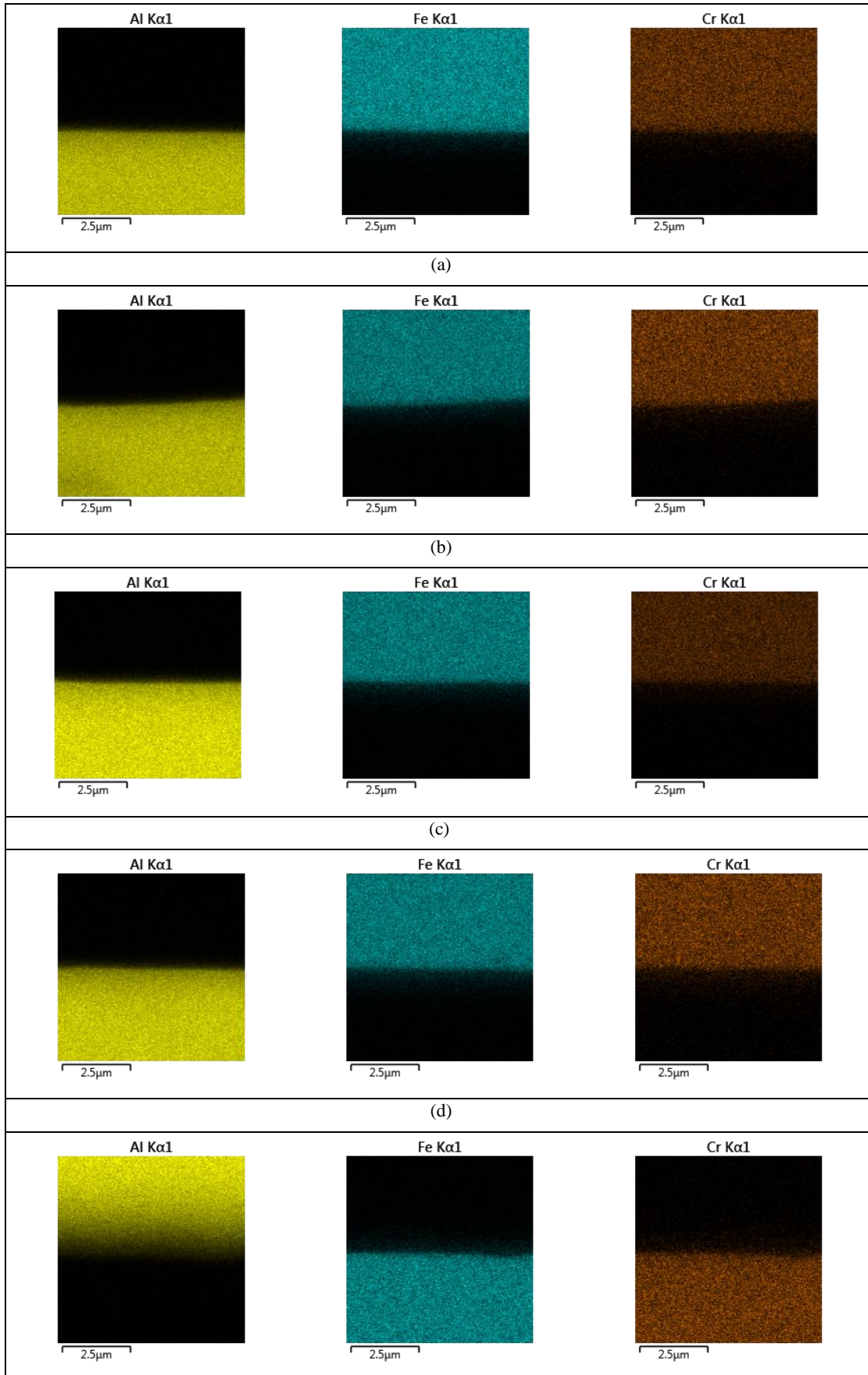
Um mapa de composição foi realizado na região da interface das chapas (Figura 25). O resultado obtido nos mapas corrobora com os demais ensaios realizados na interface do material. O qual reforça a ausência da camada de difusão, com espessura micrométrica entre os materiais. Os resultados obtidos discordam aos resultados dos estudos de KIM (2019) e Akramifard (2016), os quais obtiveram camadas de difusão com espessuras micrométricas. Essa ausência está diretamente ligada às condições de tempo reduzido e baixas temperaturas do recozimento empregados neste trabalho (AKRAMIFARD; MIRZADEH; HABIBI PARSA, 2016; KIM; HONG, 2019).

Figura 24- Espectro de EDS em linha das amostras (a) 430 sem tratamento térmico, (b) 304 sem tratamento térmico, (c) 430– 250 °C, (d) 304– 250 °C, (e) 430– 350 °C, (f) 304– 350 °C, (g) 430– 450 °C e (h) 304– 450 °C.

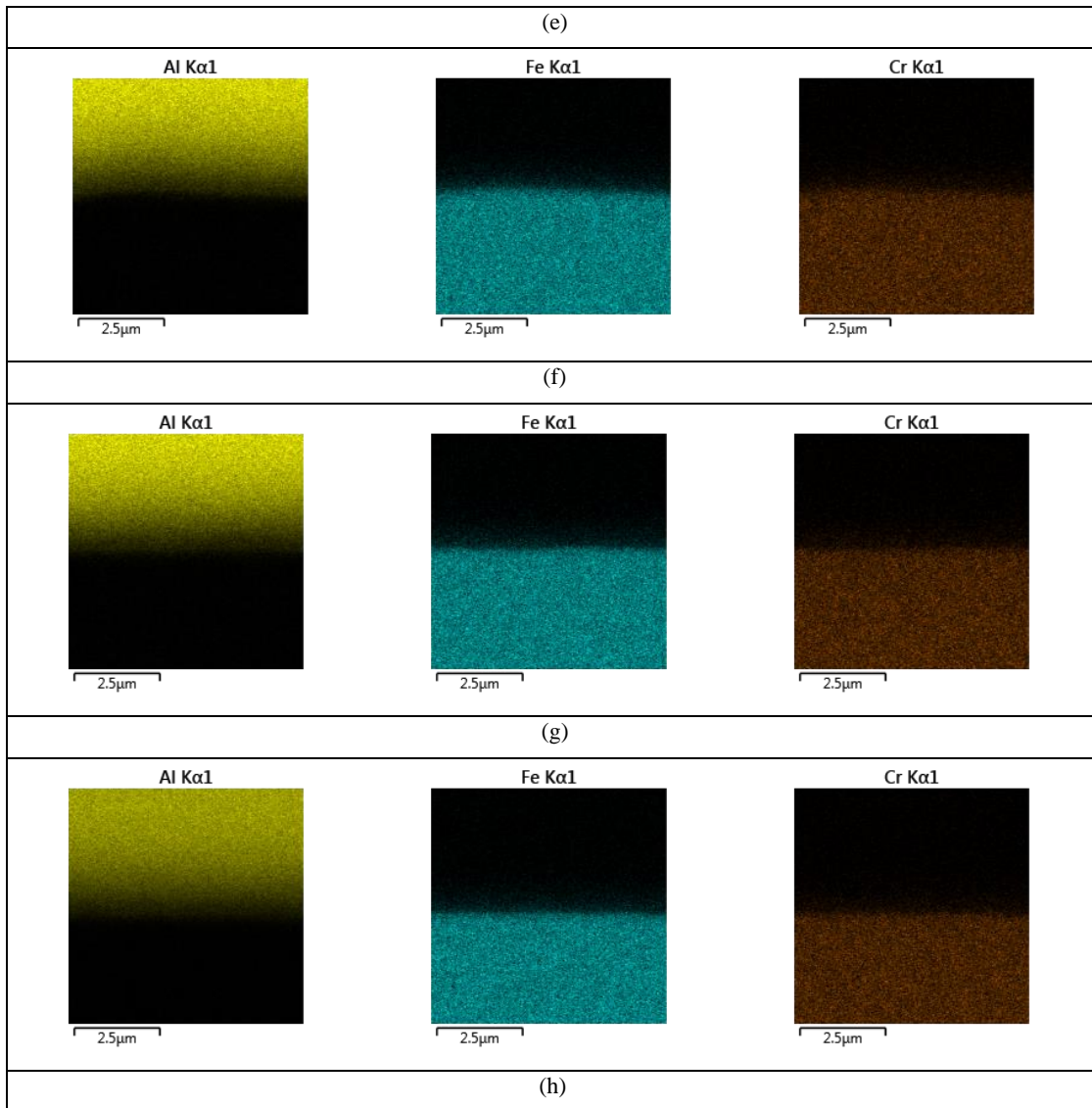


Fonte: o autor (2023).

Figura 25- Mapa de composição Al, Fe e Cr, (a) 430- sem tratamento térmico; (b) 430- 250 °C; (c) 430- 350 °C, (d) 430- 450 °C; (e) 304- sem tratamento térmico; (f) 304- 250 °C; (g) 304- 350 °C, (h) 304- 450 °C;







Fonte: o autor (2023).

## 5.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

No que diz respeito às análises das propriedades mecânicas do material multicamada, foram obtidos os valores de anisotropia ( $r$ ), anisotropia normal ( $\bar{r}$ ) e anisotropia planar ( $\Delta_r$ ), os quais são apresentados na Tabela 3. Observa-se que as amostras retiradas a  $45^\circ$  em relação ao sentido de laminação, tinha valores superiores de anisotropia ( $r$ ) em comparação com as outras direções de retiradas das amostras  $0$  e  $90^\circ$ . Os valores dos resultados próximos e até mesmo superiores à  $r=1,0$ , no caso das amostras tratadas termicamente a  $450^\circ\text{C}$ , demonstram que o tratamento térmico de recozimento aproximou o material da condição isotrópica.

Já os valores de anisotropia normal, com  $\bar{r} < 1,0$ , apontam que o material é anisotrópico, um indicador de baixa resistência biaxial a tração, o que promove uma redução maior na espessura da chapa em comparação com a largura. Para materiais utilizados em estampagem

profunda, é desejado que os valores de  $\bar{r}$  sejam superiores a 1,0, o que indica que a deformação da espessura será menor que a deformação na largura, favorecendo o embutimento profundo. Com tudo, o tratamento térmico realizado nas amostras também propiciou um aumento de  $\bar{r}$ , aproximando o material da condição isotrópica.

Tabela 3 - Valores de anisotropia do material de camada tripla conforme a temperatura de recozimento.

Tratamento Térmico	Direção de Laminação	$r$	$\bar{r}$	$\Delta_r$
Sem tratamento térmico	0°	0,63	0,77	-0,22
	45°	0,88		
	90°	0,70		
250 °C	0°	0,72	0,89	-0,21
	45°	0,99		
	90°	0,85		
350 °C	0°	0,78	0,88	-0,18
	45°	0,97		
	90°	0,81		
450 °C	0°	0,78	0,97	-0,33
	45°	1,14		
	90°	0,82		

Fonte: o autor (2023).

Para todas as amostras, os valores da anisotropia planar foram negativos, o que indica que o material pode apresentar falhas no embutimento, como por exemplo o orelhamento. A princípio, foi possível observar que, os materiais apresentaram um aumento no índice de anisotropia de acordo com o tratamento térmico utilizado, destes, os valores mais altos correspondem às amostras com maior temperatura de recozimento após a laminação. Contudo, foi perceptível que as tensões de escoamento foram maiores na direção de 45° em relação ao sentido de laminação. Este resultado corrobora com Kim e colaboradores (2010), que apresentaram valores da anisotropia para chapas de camada tripla similares aos estudados neste trabalho. Neste mesmo estudo os autores afirmam que para o material multicamada, a melhor condição de anisotropia é na direção de 45° em relação ao sentido de laminação (KIM, 2010).

A coleta dos dados para o cálculo da anisotropia do material foi a partir do ensaio de tração. Por meio deste, foi possível também obter a porcentagem de alongamento ( $\epsilon$ ) [%], tensão de escoamento ( $S_e$ ) [MPa] e tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) [MPa], cujos valores são mostrados na Tabela 4, em que também são mostrados os valores do coeficiente de encruamento  $n$  [-] e da constante do material ou coeficiente de resistência  $K$  [MPa].

Tabela 4 - Valores da tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, alongamento, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência, obtidos por meio do ensaio de tração do material de camada tripla conforme a temperatura de recozimento e direção de retirada da amostra a partir do sentido de laminação.

Temperatura do Tratamento Térmico	Direção	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$S_e$ [MPa]	Alongamento $\epsilon$ [%]	n [-]	K [MPa]
Sem Tratamento Térmico	0°	279,00	241,00	39,50	0,102	389,00
	45°	273,00	256,00	37,50	0,096	392,82
	90°	279,00	258,00	35,50	0,132	371,75
	<b>Média</b>	<b>277,00</b>	<b>251,67</b>	<b>37,50</b>	<b>0,110</b>	<b>384,52</b>
250 °C	0°	261,00	199,00	47,00	0,139	394,21
	45°	258,00	210,00	43,50	0,125	378,98
	90°	259,00	209,00	48,00	0,130	384,19
	<b>Média</b>	<b>259,33</b>	<b>206,00</b>	<b>46,17</b>	<b>0,131</b>	<b>385,79</b>
350 °C	0°	262,00	186,00	55,40	0,154	406,80
	45°	257,00	191,00	49,00	0,139	387,36
	90°	256,00	189,00	57,80	0,146	390,67
	<b>Média</b>	<b>258,33</b>	<b>188,67</b>	<b>54,07</b>	<b>0,146</b>	<b>394,94</b>
450 °C	0°	261,00	178,00	54,40	0,154	406,20
	45°	258,00	182,00	53,80	0,144	392,82
	90°	259,00	179,00	55,80	0,154	402,41
	<b>Média</b>	<b>259,33</b>	<b>179,67</b>	<b>54,67</b>	<b>0,151</b>	<b>400,48</b>

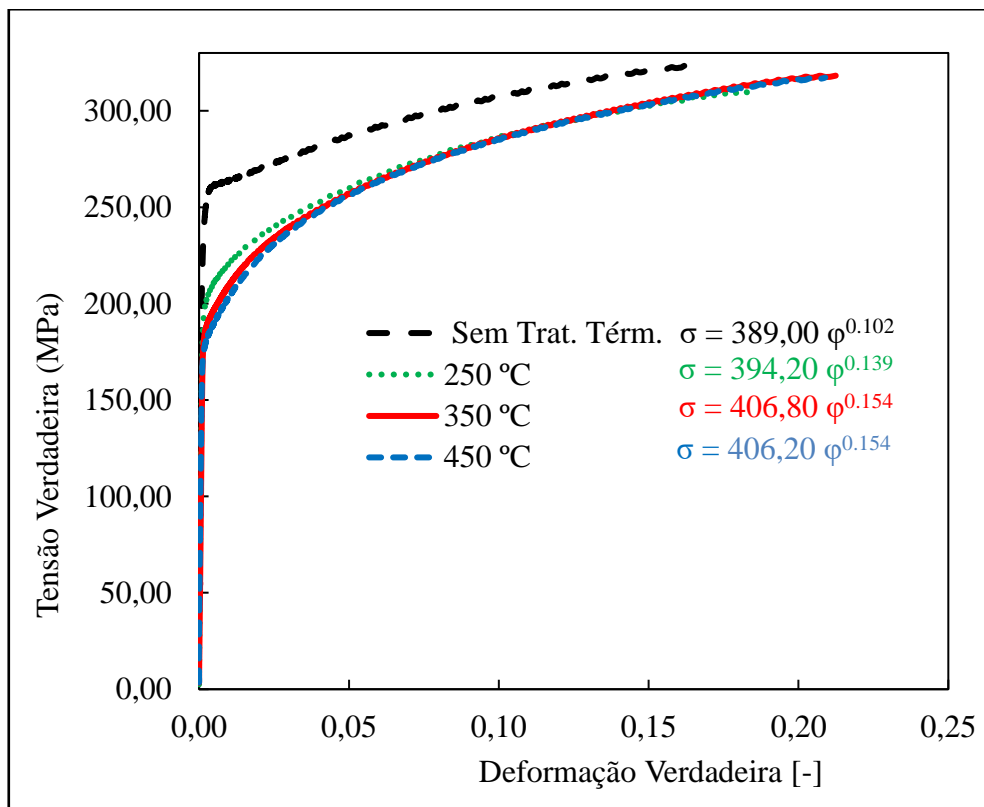
Fonte: o autor (2023).

Os valores obtidos por meio do ensaio de tração mostram que as tensões de ruptura e de escoamento juntamente com o módulo de elasticidade apresentaram redução em seus valores com o aumento das temperaturas de recozimento. Em contrapartida, a deformação, o índice de encruamento e o coeficiente de resistência do material tiveram um aumento em seus valores, isso pode ser causado pela recristalização que o alumínio AA1050 sofreu no tratamento térmico de recozimento posterior à laminação. Contudo, como se pode ver na Figura 26, o material sem tratamento térmico apresentou uma maior resistência ( $\sigma_{m\acute{a}x} = 277,00$  MPa) ao mesmo tempo apresentou uma redução em sua ductilidade ( $\epsilon = 37,50$  %). Este resultado acabou sendo influenciado pelo alívio de tensões no material, o que reduziu o endurecimento por encruamento gerado no trabalho a frio, diminuindo a resistência e aumentando a ductilidade conforme o aumento da temperatura do tratamento térmico.

A determinação do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K) do material foi feita a partir dos gráficos de tensão *versus* deformação verdadeira. Assim, foi selecionada uma faixa de 0,05 a 0,15 [-] de deformação do ensaio, o que garantiu que o comportamento do material estivesse na região plástica. Dessa forma, foram determinados os coeficientes da reta que compunham a equação de Holloman ( $\sigma = K\phi^n$ ). Com base nos valores obtidos, é possível observar o aumento no n à medida que a temperatura do tratamento térmico aumentou (YLAN TAYLAN ALTAN; TEKKAYA, 2012). Este aumento de n, indica

que na condição de tração uniaxial, o material apresentou uma maior capacidade de deformação  $\epsilon$ . Entretanto o valor de  $n$  ficou abaixo do alumínio Al1050 recozida. Já  $K$  e as propriedades mecânicas ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ,  $S_e$ ,  $\epsilon$ ) apresentaram valores intermediários entre o do alumínio AA1050 e dos aços 304 e 430 recozidos (Tabela 5). Comportamento similar a outros trabalhos com chapas multicamadas de diversos outros materiais que também apresentaram este comportamento (JIN; HONG, 2014; KIM; HONG, 2019).

Figura 26- Gráfico do ensaio de tração, tensão x deformação verdadeira, amostras retiradas no sentido de laminação.



Fonte: o autor (2023).

A partir da comparação dos valores das propriedades mecânicas obtidos para as chapas multicamadas com os valores dos materiais individuais, obtidos a partir da literatura, é possível perceber que a tensão de máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) do presente estudo foi superior à apresentada na literatura para o alumínio AA1050 e inferior aos valores para o 304 e o 430. Este fator pode explicar os valores baixos obtidos para o índice de encruamento apresentados pelo material multicamada no ensaio de tração. Quando a tensão é aplicada, o alumínio AA1050 inicia o seu alongamento e, automaticamente, o encruamento, passando à zona de tensão de máxima suportada (159 MPa). Então, a falha inicia-se no alumínio AA1050 que acaba se propagando para o 304 e o 430, provocando a falha dos aços inoxidáveis por conta de um concentrador de

tensões, mesmo abaixo da tensão máxima suportada (567,0 MPa) para o 304 e 525,0 MPa para o 430 (GARCIA; SPIM; DOS SANTOS, 2010).

Esses fatores corroboram com o estudo de LIU (2018), que aponta que para chapas de camada tripla, compostas de cobre nas camadas externas e um aço de baixa resistência na parte interna, as trincas acontecem no material com menor resistência, formando assim vazios entre as camadas que geram então concentradores de tensões fazendo com que o material tenha uma resistência menor (LIU et al., 2018). Essa ocorrência também foi evidenciada no estudo de Koseki (2014), que se focou no desenvolvimento de materiais multicamadas e observou o comportamento da resistência e ductilidade dos mesmos (KOSEKI; INOUE; NAMBU, 2014).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais de forma individual.

Material	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$S_e$ [MPa]	Alongamento $\epsilon$ [%]	n [-]	K [MPa]
304	1006	269	63	0,367	1227
AA1050	91	53	29	0,151	120
430	477	337	30	0,236	973

Fonte: o autor (2023)

Com o objetivo de avaliar o comportamento das chapas no embutimento de acordo com o tratamento térmico, foi realizado o ensaio Nakajima. Com uma inspeção visual inicial, foi possível perceber que as fraturas ocorreram de acordo com o esperado, na região central dos corpos de prova. Com o início da trinca, durante o ensaio e de forma abrupta, surgiam as fraturas as quais, em algumas amostras, causaram a ruptura total, conforme apresentado na Figura 27.

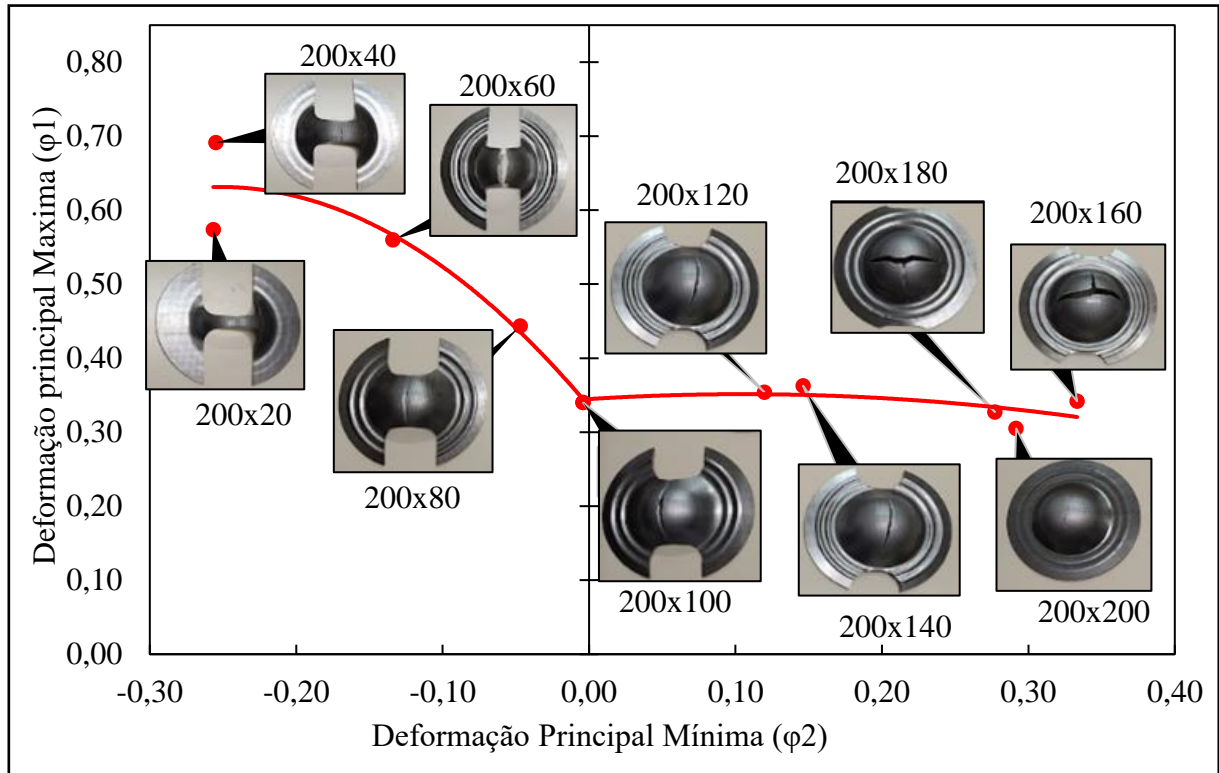
Figura 27- Corpos de prova após o ensaio Nakajima.



Fonte: o autor (2023).

Após a inspeção visual das amostras, foram selecionados os pontos nos quais seriam realizadas as medições. A partir destes valores, foi possível plotar o gráfico apresentado na Figura 28, em que o eixo x é a deformação principal mínima ( $\phi_2$ ) e o eixo y a deformação principal máxima ( $\phi_1$ ). Com base na Figura 29 foi possível identificar o ponto limite de conformação de cada uma das distintas geometrias das amostras.

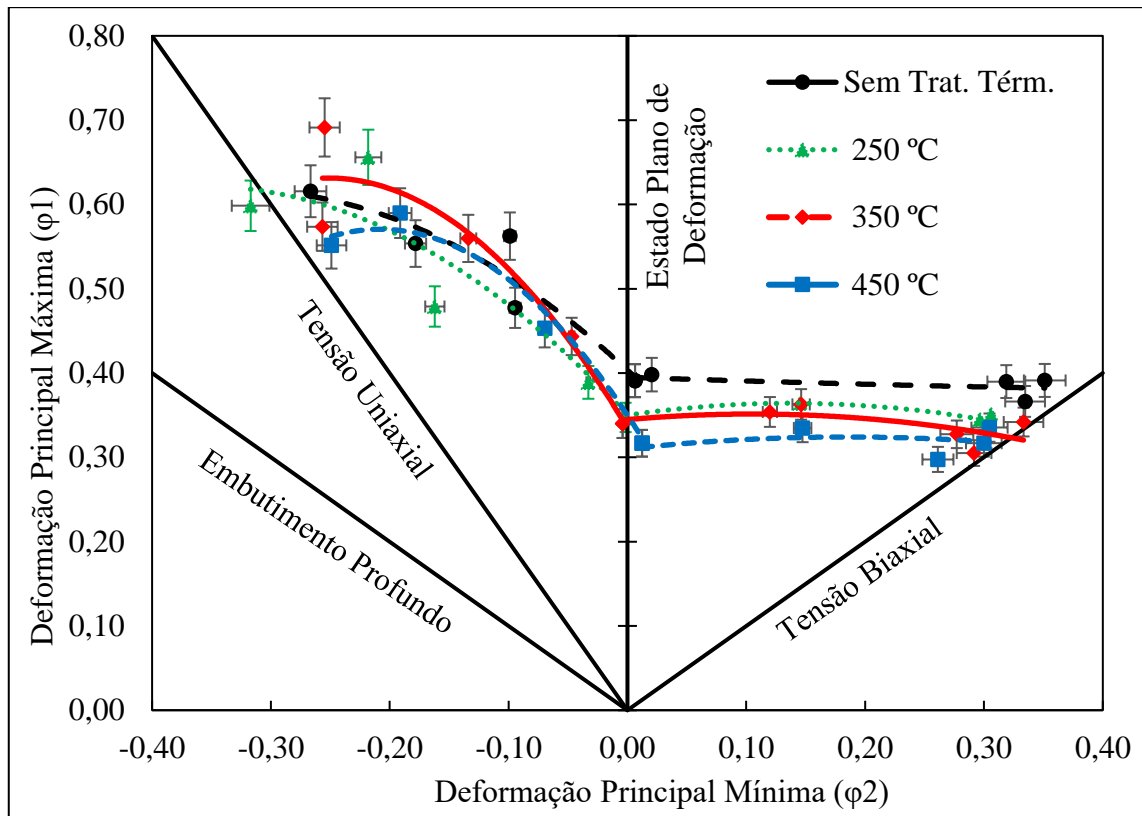
Figura 28- Curva CLC com indicação de qual ponto representa cada uma das diferentes geometrias das amostras.



Fonte: o autor (2023).

A Figura 29 mostra a CLC das amostras sem tratamento e tratadas nas diferentes temperaturas. É possível observar que na região de estiramento biaxial as temperaturas mais elevadas de tratamento térmico causam uma redução na conformabilidade do material. Para a condição de estiramento biaxial, foi observada na literatura uma redução da conformabilidade para tempos de 3h para tratamentos térmicos em temperaturas de 450 a 525 °C, com a técnica de embutimento Erichsen sobre chapas de aço revestidas com Al (AA1050/St37). Esse fenômeno foi atribuído pelos autores ao envelhecimento por deformação estática da chapa de aço revestida com Al a temperaturas de recozimento abaixo de 525 °C (MANESH; TAHERI, 2003a, 2003b).

Figura 29- Curva limite de conformação (CLC) com amostras tratadas termicamente em diferentes temperaturas.



Fonte: o autor (2023).

Na condição de deformação plana é possível observar que a temperatura de 450 °C apresentou valores mínimos da deformação principal máxima ( $\phi_1$ ), o que indica uma menor conformabilidade. Também foi possível observar que, dentro das incertezas experimentais, não houve diferenças significativas entre as condições de tratamento térmico a 250 e 350 °C. Esse comportamento também pode ser observado para a condição deformação biaxial. É possível verificar que a condição sem tratamento térmico apresentou maior conformabilidade nas condições de tensão plana e biaxial comparativamente as amostras tratadas termicamente. Entretanto, nas amostras sem tratamento térmico foi observado deslocamento entre as camadas da chapa multicamada devido à baixa adesão evidenciada no ensaio de descolamento. Essa condição inviabiliza sua aplicação industrial para conformação em estampagem profunda (LIU et al., 2018; WANG et al., 2019).

Em estados de deformação complexos, a deformação é limitada por uma instabilidade, assim como em um ensaio de tração. Pode ser observado que a fratura do material (fissuração, rasgamento) sempre começa com o desenvolvimento de um estreitamento local, assim como no ensaio de tração (EMMENS, 2011). Observando a Figura 30 na região de tensão uniaxial, o tratamento a temperatura de 350 °C apresentou um deslocamento da CLC no sentido positivo

do eixo de  $\phi 1$ . Este deslocamento demonstra maior conformabilidade nesta condição de tensão. Tais resultados corroboram com os resultados obtidos nos ensaios de tração e com as propriedades mecânicas das chapas multicamadas.

Portanto, apesar do tratamento a 450 °C apresentar melhor adesão entre as camadas, esta condição de tratamento térmico, apresentou menor conformabilidade em todas as regiões da CLC. Estes dados são concordantes com as imagens do ensaio de MEV e análise EDS que indicaram o início da formação de uma camada de intermetálicos frágeis que diminui a conformabilidade (MANESH; TAHERI, 2003a). Por outro lado, acredita-se que o uso da temperatura de a 450 °C em processos produtivos em comparação a 350 °C, implicaria no aumento do consumo energético na fabricação das chapas multicamadas.



## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitiram entender o efeito das temperaturas de 250, 350 e 450 °C do tratamento térmico de recozimento nas propriedades mecânicas como tensão de escoamento, tensão máxima, coeficiente de encruamento, força de adesão e mesmo a interação entre as camadas que compunham a chapa multicamada, de alumínio AA1050, aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável ferrítico AISI 430.

Para o recozimento das amostras em temperaturas mais altas, como a de 550 °C, deve-se efetuar um processo de rampa de aquecimento para que não ocorra o deslocamento das amostras ainda nesta etapa do processo. O aumento da temperatura do tratamento térmico aumenta a adesão entre as camadas e promoveu a recristalização apenas da camada de AA1050 alterando a anisotropia média de 0,74 para 0,91 das chapas multicamadas. O alongamento aumenta de 37 para 55 % e o coeficiente de encruamento aumenta de 0,102 para 0,154. Já a tensão de máxima e de escoamento tem os seus valores reduzidos. Dentro das incertezas experimentais, entre 350 a 450 °C há uma estabilização nos valores das propriedades mecânicas. No tratamento a 450 °C, há uma alteração nas interfaces, com o início da formação de um composto intermetálico frágil que altera a conformabilidade do material multicamada conforme a CLC.

Conclui-se também, que dentre as amostras tratadas, o tratamento a 350 °C apresenta o melhor equilíbrio entre as propriedades mecânicas, adesão entre as camadas e melhor desempenho da CLC. Além disso, julga-se que o tratamento a 350 °C permitiria a redução do consumo de energia comparado ao tratamento a 450 °C. Sob o ponto de vista industrial, julga-se também que este estudo permitiria definir a temperatura de tratamento térmico que alie propriedades mecânicas, adesão entre as camadas e conformabilidade com as condições produtivas de menor consumo energético na fabricação das chapas de camada tripla.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa apresentou resultados relevantes e satisfatórios no que se refere a análise da influência do recozimento em chapas multicamadas, no entanto destaca-se a importância de aprofundar-se com relação aos tempos de tratamento térmico e a sua influência na interface dos materiais e também nas propriedades mecânicas. Além disso, sugere-se fazer uma análise mais aprofundada apenas de caracterização dos materiais multicamadas, de modo a unir estas caracterizações com análises numéricas de modo a permitir simulações computacionais do comportamento nos processos industriais. Outro ponto que também permite a evolução de estudos é a realização da análise termodinâmica envolvendo a difusão entre os materiais de forma analítica, propiciando uma parametrização de processos de forma conceitual e não empírica. Ainda, é possível aprofundar os conhecimentos no tratamento térmico com temperaturas mais elevadas, possibilitando o entendimento de forma mais ampla do deslocamento das camadas ainda nesta fase da produção do material compósito. Além das altas temperaturas pode-se ter uma ampliação nos conhecimentos com temperaturas mais baixas, visando uma melhor otimização dos processos produtivos e um menor consumo energético.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABEDI, R.; AKBARZADEH, A. Bond strength and mechanical properties of three-layered St/AZ31/St composite fabricated by roll bonding. **Materials and Design**, v. 88, p. 880–888, 2015.
- AKRAMIFARD, H. R.; MIRZADEH, H.; HABIBI PARSA, M. Microstructural Evolution of Roll Bonded Al-Clad Stainless Steel Sheets at Elevated Temperatures. **International Journal of Iron & Steel Society of Iran**, v. 13, p. 38–44, 2016.
- ALTAN, YLAN T.; TEKKAYA, A. E. E. **Sheet Metal Forming**. United States of America: ASM International, 2012.
- BALESTRIN, A.; VERSCHOORE, J. **Redes de Cooperação Empresarial:- Estratégias de Gestão na Nova Economia**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- BRANDES, E. A.; BROOK, G. B. Smithells Metals Reference Book: Seventh Edition. **Smithells Metals Reference Book: Seventh Edition**, p. 1–1800, 1992.
- BUNGE, H. J. AND PÖHLANDT, K. AND TEKKAYA, A. E. AND BANABIC, D. **Formability of Metallic Materials Plastic**. [s.l: s.n.]. v. 53
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Estruturas e Propriedades das Cerâmicas. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**, 2008.
- CHANDLER, H. **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. [s.l.] ASM International, 1994.
- CHAUDHARI, G. P.; ACOFF, V. Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 10, p. 1667–1675, 2009.
- CHHIKARA, S. et al. Review on Sheet Metal Formability. **International Journal of Advance Research and Innovation**, v. 8, n. 2, p. 138–143, 2020.
- CHIARINI, T.; VIEIRA, K. P. Universidades como Produtoras de Conhecimento para o Desenvolvimento Econômico: Sistema Superior de Ensino e as Políticas de CT&I. **Revista Brasileira de Economia**, v. 66, n. 1, p. 117–132, 2012.
- DE SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.
- EMMENS, W. C. **Formability A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal**. Berlin: Springer, 2011.
- FORSTER, J. A.; JHA, S.; AMATRUDA, A. The processing and evaluation of clad metals. **Jom**, v. 45, n. 6, p. 35–38, 1993.

- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GILLESPIE, L. K. **Design for Advanced Manufacturing: Technologies, and Processes**. [s.l.] McGraw Hill Professional, 2017.
- HWANG, Y.-M.; HSU, H.-H.; LEE, H.-J. Analysis of sandwich sheet rolling by stream function method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 37, n. 3, p. 297–315, 1995.
- JIN, J. Y.; HONG, S. I. Effect of heat treatment on tensile deformation characteristics and properties of Al3003/STS439 clad composite. **Materials Science and Engineering A**, v. 596, p. 1–8, 2014.
- KAKANDIKAR, G. M.; NANDEDKAR, V. M. **Sheet metal forming optimization: Bioinspired approaches**. [s.l.: s.n.].
- KIM, D. K. B. K. H. Y. S. L. J. H. K. M. Anisotropic Properties of Stainless Steel—Clad Aluminum Sheet. **AIP Conference Proceedings**, v. 1252, n. 1, p. 357–360, 2010.
- KIM, J. K. et al. Evolution of strain states and textures during roll-cladding in STS/Al/STS sheets. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 16–17, p. 5371–5374, 2004.
- KIM, Y. K.; HONG, S. I. Influence of interface structure and stress distribution on fracture and mechanical performance of STS439/Al1050/STS304 clad composite. **Materials Science and Engineering A**, v. 749, p. 35–47, 11 mar. 2019.
- KOSEKI, T.; INOUE, J.; NAMBU, S. Desenvolvimento de aços multicamadas para melhores combinações de alta resistência e alta ductilidade. **Transações de materiais**, v. 55, n. 227–237, 2014.
- LEE, J. E. et al. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 546–549, 2007.
- LENARD, J. G. **Primer on Flat Rolling**. Waltham, USA, 2007.
- LESUER, D. R. et al. Mechanical behaviour of laminated metal composites. **International Materials Reviews**, v. 41, n. 5, p. 169–197, 2012.
- LI, L.; NAGAI, K.; YIN, F. Progress in cold roll bonding of metals. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 9, n. 2, 2008.
- LIU, B. X. et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of copper clad steel plates. **Vacuum**, v. 154, p. 250–258, 2018.
- LOW, M. **Determinação do estágio inicial da recristalização em ligas de alumínio por difração de raios-X**, 2000.

- MANESH, H. D.; TAHERI, A. K. Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 361, n. 1–2, p. 138–143, 2003a.
- MANESH, H. D.; TAHERI, A. K. The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet. **Materials and Design**, v. 24, n. 8, p. 617–622, 2003b.
- MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇO. **Informações gerais: exportações, importações e balança comercial.** Disponível em: <<https://balanca.economia.gov.br/balanca/comex-vis//BrasilGeral/brasil062021.html#section.>>. Acesso em: 22 jun. 2021.
- MORI, K. I. et al. Joining by plastic deformation. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 2, p. 673–694, 2013.
- OYA, T. et al. Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 14, p. 1926–1933, 2010.
- POP, L. D. **Research on the Optimal Regime of Recrystallization in 1050 Aluminium Alloy.** Procedia Manufacturing. **Anais...Elsevier B.V.**, 2019.
- RAY, S. **Principles and applications of metal rolling.** [s.l.] Cambridge University Press, 2016.
- RHEE, K. Y. et al. Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics. **Materials Science and Engineering A**, v. 384, n. 1–2, p. 70–76, 2004.
- SAITO, Y. et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (arb) process. **Acta Materialia**, v. 47, n. 2, p. 579–583, 1999.
- SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica.** 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- STEINLAGE, G. A.; BOWMAN, K. J.; TRUMBLE, K. P. A comparison of three mechanical models for cold roll bonding metal laminates. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 199–229, 1996.
- TORTORICI, P. C. ; D. Formação de fases e interdifusão em aços inoxidáveis Al-clad 430. **Ciência e Engenharia de Materiais: A**, v. 244, n. 2, p. 207–2015, 1998.
- WANG, Y. et al. Effect of heat treatment on bonding mechanism and mechanical properties of high strength Cu/Al/Cu clad composite. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 801, p. 573–580, 15 set. 2019.
- WRIGHT, K. P.; SNOW, A. D.; TAY, K. C. Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling. **Metals Technology**, v. 5, n. 1, p. 24–31, 1978.
- YAHIRO, A. et al. Development of Nonferrous Clad Plate and Sheet Rolling with Different Temperature of Materials. **ISIJ International**, v. 3, n. 6, p. 647–654, 1991.

YLAN TAYLAN ALTAN; TEKKAYA, A. E. E. **Sheet Metal Forming**. [s.l.] ASM International, 2012.