

# TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA ENGENHARIA: OS BENEFÍCIOS NA PRECISÃO DIMENSIONAL ATRAVÉS DA VIRTUALIZAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

(ENGINEERING DIGITAL TRANSFORMATION: THE DIMENSIONAL ACCURACY BENEFITS OF THE VIRTUALIZATION OF WELDING PROCESSES)

**João Roberto Ponse Júnior**  
**Aleksandro Antônio Carmo**  
**Osmar Luque Júnior**  
*General Motors Brazil*

**Gustavo Luiz Silveira e Silva**  
**Lucas Bertasso Mazieiro**  
**Marcel Antônio Roxin Júnior**  
*Aethra Automotive Systems*

**Luís Augusto Castilho Valdo**  
**Wesley Aparecido da Silva**  
*AutoForm Engineering*

## RESUMO

Na dinâmica operacional de uma empresa do setor automotivo, são empregados consideráveis esforços tanto virtuais quanto práticos, direcionados especificamente para a fabricação de peças estampadas e os processos de soldagem. Para garantir a conformidade com as especificações e alcançar um conjunto de alta qualidade em termos dimensionais, é fundamental levar em conta uma série de variáveis relacionadas à matéria-prima, aos processos e aos produtos. Como exemplo prático, consideremos o Front End Tie Bar de um veículo, conjunto composto por 24 peças estampadas. Embora as peças estampadas individuais tenham sido aprovadas em termos dimensionais e os dispositivos de soldagem estejam em condições nominais, o conjunto físico não atendeu totalmente aos requisitos dimensionais. Considerando a complexidade das variáveis envolvidas nos processos de soldagem, bem como os recursos (tempo e custo) necessários para intervenções físicas, optou-se por realizar uma análise virtual, utilizando o AutoForm Assembly, para embasar a tomada de decisão visando a melhoria do processo. Por meio das simulações realizadas, foi conduzido um projeto piloto visando a integração de toda a cadeia de processos, estabelecendo uma conexão eficiente entre as áreas de engenharia de processos, produção e qualidade.

Palavras-chave: Precisão dimensional, simulação, soldagem, transformação digital, indústria automobilística.

## ABSTRACT

During the development in the Automotive Industry, significant efforts, both virtual and practical, are directed specifically towards the manufacturing of stamped parts and welding processes. To ensure compliance with specifications and achieve a high-quality dimensional assembly, it is essential to consider a series of variables related to raw materials, processes, and products. As a practical example, let's consider the Front End Tie Bar of a vehicle, an assembly composed of 24 stamped parts. Although individual stamped parts have been approved dimensionally and welding devices are in nominal conditions, the physical assembly did not fully meet dimensional requirements. Considering the complexity of variables involved in welding processes, as well as the resources (time and cost) required for physical interventions, a decision was taken to conduct a virtual analysis, using AutoForm Assembly, to support decision-making aimed at process improvement. Through the simulations performed, a pilot project was conducted to integrate the entire process chain, establishing an efficient connection among process engineering, production, and quality areas.

Keywords: Dimensional accuracy, simulation, welding, digital transformation, automotive industry.

## INTRODUÇÃO

O presente estudo aborda a importância da transformação digital na engenharia, destacando sua influência na otimização de processos e na melhoria da eficiência em diversas aplicações. Este fenômeno, em evolução contínua, é impulsionado pela crescente adoção de recursos virtuais, os quais estão redefinindo a forma como os engenheiros concebem, constroem e gerenciam projetos. Os benefícios advindos desta transformação incluem uma maior eficiência, precisão e colaboração entre as equipes, com a virtualização de processos sendo um ponto crucial, a ser discutido detalhadamente ao longo deste estudo.

Destaca-se a busca pela precisão dimensional das peças e conjuntos soldados fabricados, com a virtualização dos processos de soldagem emergindo como uma estratégia fundamental para alcançar tal precisão. Além disso, discute-se as vantagens em termos de eficiência, produtividade e integração de toda a cadeia de processos, com exemplos práticos do conjunto Front End Tie Bar, Figura 1, ilustrando os ganhos em qualidade e conformidade com as especificações.

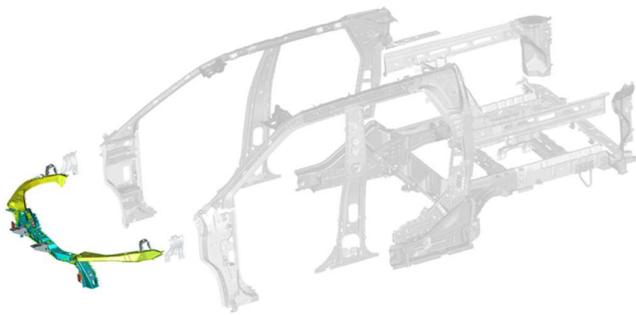


Figura 1. Front End Tie Bar.

Na literatura, são encontrados diversos estudos relacionados à transformação digital na precisão dimensional do setor automotivo, direcionados para o efeito de parâmetros de estampagem em componentes individuais, tais como cargas de sujeição, coeficiente de atrito, propriedades das matérias-primas e tamanho dos raios dos estampos [1,2]. A dissertação desenvolvida por Gösling [3] aborda a aplicação de diferentes estratégias de compensação de springback e de combinações de parâmetros de estampagem no controle de retorno elástico, demonstrando a alta complexidade e a necessidade de conhecimentos específicos para um resultado bem-sucedido. Estes trabalhos, como mencionado anteriormente, trazem informações relevantes quanto à robustez dos processos de conformação dos componentes individuais.

A virtualização de processos de componentes individuais tem sido empregada de maneira bem estabelecida na indústria automotiva há muitos anos, se expandindo recentemente para processos de montagem [4]. Diversas pesquisas envolvem simulação de processos de união, entretanto, apesar de relacionadas à indústria automotiva, são regularmente direcionadas a outras vertentes, como distribuição de temperatura, metalografia e

tensões residuais [5-6], entre outras. Embora a expansão esteja ocorrendo, ainda são escassas as pesquisas com foco no conjunto em grande escala. Como exemplo da aplicação da simulação de união, Tinti et al. [4] trazem o desenvolvimento da simulação de montagem de um conjunto de um capô em quatro estações de união. De maneira alternativa, soluções computacionais foram aplicadas ao conjunto da tampa externa, ou quinta porta, de outro veículo [7].

De modo geral, poucos dados a respeito do impacto da aplicação do calor e de forças mecânicas na união de grandes conjuntos de produtos estampados são encontrados na literatura. Estes fatores são usualmente negligenciados durante a fase de desenvolvimento dos processos de união [8]. A vivência empírica mostra que a união de partes individuais cujo dimensional é estável não necessariamente resulta em conjuntos de dimensional estável, conceito corroborado por Schuler, Liewald e Bezerra [8]. Os autores ainda propõem a otimização do fluxograma de processo, como descrito pela Figura 2, onde o número de loops de correções de estampos e dispositivos de soldagem são reduzidos ao se evitar esforços que não são efetivos para a conformidade dimensional do conjunto final.

A soldagem por resistência é uma forma de unir materiais metálicos. Neste processo, o calor é gerado quando a corrente elétrica flui através dos componentes a serem unidos, gerada pela diferença de potencial elétrico entre as pontas da pinça na região na qual foi fechada, criando uma poça de fusão que une os componentes após o resfriamento. Este processo, sobretudo no formato de solda a ponto, é o método de união dominante em processos de montagem automotivos [9], tendo a sua aplicação empregada em quantidade que chega a atingir a soma de todos os outros processos de união em veículos de luxo [6]. Também é utilizado em várias outras indústrias, incluindo aeroespacial e de construção, devido à alta velocidade e eficiência da união formada.

O estudo aborda os desafios enfrentados no contexto do conjunto Front End Tie Bar, que não atendeu plenamente aos requisitos dimensionais, apesar de muitas das peças individuais estarem dentro das especificações. São discutidas as variações relacionadas às matérias-primas, processos e complexidades dos produtos, bem como a aplicação da análise virtual como ferramenta para aprimorar o processo e buscar soluções para os desvios dimensionais. O projeto piloto, com foco na integração otimizada da cadeia de processos, é apresentado como uma estratégia para melhorar a qualidade e a conformidade do produto.

O fluxo de informações dentro das grandes corporações é algo valioso, principalmente para otimização de custo de operação. Dentro das áreas fabris, já é comum a existência de sistemas que conectam a produção a diversos departamentos, enviando dados dinamicamente sobre o status das linhas de produção, visando monitorar a fabricação dos lotes planejados e agilizar a tomada de decisão para solução de falhas que possam ocorrer.

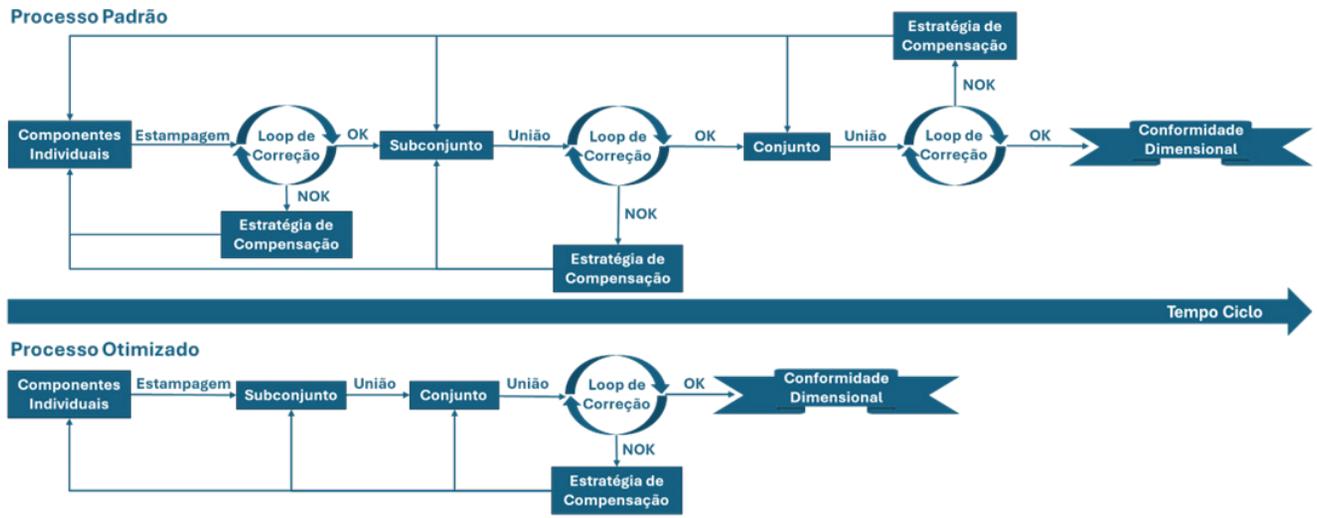


Figura 2. Proposta de otimização de fluxograma. Adaptado de [8].

Entretanto, pouco se fala sobre conectar departamentos na fase de desenvolvimento, buscando a sinergia entre eles para otimizar custos de produção. A indústria automotiva sempre esteve na vanguarda do desenvolvimento tecnológico, desafiando o status quo, como por exemplo no feito de Henry Ford [10], que revolucionou o sistema de produção ao proporcionar ganhos significativos de produtividade através do estabelecimento de funções repetitivas aos operários. E atualmente não poderia ser diferente: Buscando aprimorar os processos, as equipes estão trabalhando em modelos avançados de produção, como a Indústria 4.0, onde busca-se criar um sistema dinâmico, integrando departamentos e meios de produção, criando um fluxo claro e efetivo de informações e tarefas, eliminando os desperdícios e reduzindo cada vez mais a pegada de carbono.

Neste contexto, para se manterem competitivas, as empresas precisam estar conectadas ao ecossistema de forma a se adequarem às tendências mais modernas, tendo como objetivo extrair o máximo de suas fábricas, com qualidade e baixo custo. Mas, para implementar as mudanças, além de superar os paradigmas, é necessário tempo para estudo e ajustes dos métodos e processos. Por conta disso, visando otimizar a etapa de implementação, são oferecidas ferramentas digitais, recursos valiosos que permitem a previsão de falhas, a tomada de decisões mais assertivas e a eliminação do método de tentativa e erro. A Figura 3 ilustra a busca por excelência dimensional contra os desafios na redução de lead e custo.

Quebrar paradigmas é uma das tarefas mais complexas da transformação. O modelo fordista criou um sistema onde os departamentos e as pessoas executam suas funções objetivando apenas a entrega do seu próprio resultado. E esse modelo de operação criou um ambiente individualista e de pensamento em silos, o que traz alguns riscos e desperdício para as operações.



Figura 3. Otimização da qualidade contra redução de lead e custo.

Imagine, por exemplo, a montagem final de um veículo: Quantas etapas são necessárias para concluir esse processo? São várias pessoas, departamentos e fornecedores envolvidos, e, dentre as várias tarefas executadas, muitas estão interligadas e dependem umas das outras. Como no processo de armação de carroceria, no qual recebem as peças metálicas enviadas pela estamparia, e que por sua vez recebem os estampos da ferramentaria. Se cada departamento pensar isoladamente, a ferramentaria se esforçará para entregar o melhor estampo possível para a estamparia, que por sua vez entregará a melhor peça estampada para a armação de carrocerias, gastando esforços excessivos e que em alguns casos não significa que as entregas garantirão o melhor conjunto montado pela armação. A Figura 4 ilustra a proposta de processo para o ciclo de desenvolvimento de peças metálicas, onde com os recursos atualmente disponíveis pelo software outrora mencionado, é possível virtualizar e integrar grande parte do ciclo, desde a concepção da matéria-prima, até os processos de união.



Figura 4. Processo proposto para o ciclo de desenvolvimento de peças metálicas.

Se cada setor buscar sempre concluir com êxito os seus objetivos, seria a maneira mais efetiva? Os processos foram assertivos e com baixo custo, sendo realizado apenas o necessário para garantir a melhor qualidade do produto considerando a cadeia como um todo? O estampo que foi entregue para a estamparia foi construída pensando no ciclo de vida de produção do veículo? Afinal, a maior porcentagem dos custos, durante a vida de um produto, está na produção em série e não apenas nos eventos de aprovação. E mesmo estando dentro da tolerância e com todas as peças estampadas entregues para a armação, será isso o suficiente para garantir a montagem de todos os componentes e subcomponentes sem retrabalhos e ajustes?

Essas são questões que podem ser respondidas antecipadamente, por meio de recursos digitais, antes mesmo da construção de qualquer dispositivo de produção. Daí a importância da preparação do gêmeo digital do processo, uma das vertentes da Indústria 4.0 a ser executada pelas engenharias, como evidenciado na Figura 5. Esta prática possibilita prever os impactos e garantir uma maior assertividade nas entregas entre cada departamento, visando o melhor produto pelo menor custo.

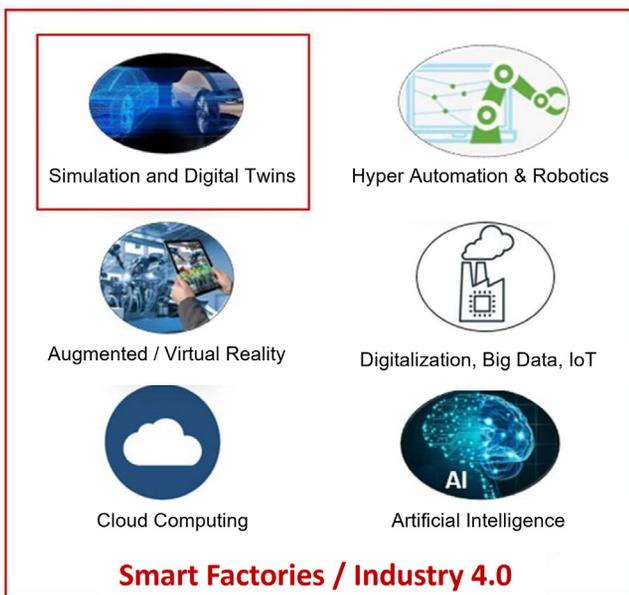


Figura 5. Gêmeo digital do processo no contexto da Indústria 4.0.

Destaca-se a importância da análise virtual na avaliação da precisão dimensional, utilizando o exemplo do conjunto Front End Tie Bar como estudo de caso. As decisões embasadas na análise virtual são discutidas em termos de seu impacto positivo em todo o ciclo de engenharia, produção, qualidade e suporte técnico. A inclusão de imagens representativas ilustra a evolução do processo e destaca os benefícios da abordagem digital na busca pela excelência dimensional no setor automotivo.

#### METODOLOGIA

Na metodologia proposta e objeto desse estudo, as discussões entre os diferentes setores já podem acontecer ainda na fase de engenharia, iniciando-se na definição do produto, conectada à engenharia de produto e manufatura. Ambas trabalham juntas para tornar o produto factível e menos complexo, tendo como consequência a redução dos custos de aquisição das ferramentas de estampo e dos dispositivos de grafagem e solda, além de minimizar eventuais custos de retrabalho, caso em alguma etapa tardia do processo seja identificado algum problema de manufatura que exija modificações que possam impactar etapas que já teriam sido concluídas.

Finalizada essa fase, a engenharia de manufatura conecta-se com a engenharia de desenvolvimento, e essa, por sua vez, recebe os dados da factibilidade do produto. Inicia-se o estudo de definição dos processos com foco na montagem e na produção em série, buscando otimizar as operações e garantir a repetibilidade da produção. Isso pode ser obtido através da criação de mapas de produção que auxiliarão os times de estampagem e grafagem. É importante notar que existe constante troca de informações entre as engenharias de estampo e armação, uma vez que obter os conjuntos dentro do dimensional (e não apenas cada peça individual) é o mais importante para garantir a montagem adequada do veículo completo.

Se faz necessário e de grande valia, durante todo desenvolvimento, o envolvimento dos colaboradores das áreas fabris, pois estes possuem vasto conhecimento e podem agregar informações muito úteis nas tomadas de decisões.

Além disso, têm a oportunidade de anteciparem o conhecimento sobre o processo que irão receber, já que fizeram parte da fase de engenharia, conheceram o que o gêmeo digital

do processo e, portanto, irão orientar e construir exatamente conforme planejado, minimizando as divergências entre o simulado e o real. E mesmo que ocorram desvios, existirá um canal de comunicação e abertura para o feedback direto entre a fábrica e a engenharia, fator relevante para aprimorar a metodologia, identificando as eventuais falhas ocorridas.

Considerando que diversas possibilidades de falhas podem ser identificadas e mitigadas durante o desenvolvimento, será permitido que a ferramentaria entregue peças para os eventos de aprovação com maior nível de qualidade e com menor tempo de tryout, garantindo a integridade dos estampos conforme projeto. Já na estamparia, após o home line tryout, a estabilidade e a repetibilidade dos processos serão garantidas, uma vez que eles foram desenvolvidos com base nos resultados das simulações nas quais se previam diferentes situações que poderiam ocorrer durante a produção, como por exemplo a variação das propriedades do material com a mudança do lote de fabricação. A Figura 6 ilustra a aplicação do gêmeo digital de processo no presente trabalho, uma vertente da Indústria 4.0, onde a busca pela excelência passa pela integração entre departamentos de análise virtual e de meios de produção.

O conceito do gêmeo digital se estende até a armação de carrocerias. Assim como na estamparia, onde processos de conformação das peças individuais são simulados em diferentes condições, para garantir que as primeiras amostras atenderão altos níveis de qualidade com menos ajustes, para armação.

As particularidades do processo também podem ser simu-

ladas para garantir qualidade do conjunto, considerando inclusive os resultados das simulações das peças individuais. Desta maneira, o objetivo da estamparia passa a ser a entrega das peças que atendam o dimensional do conjunto, ou seja, na fase de engenharia será previsto se os desvios dimensionais de cada peça afetarão o dimensional do conjunto, ou se alguma das peças deve ser deformada fora das condições nominais. Isso garantirá economia de tempo, retrabalho, custo e esforço desnecessários em ajustes no ferramental de estampo ou no dispositivo de solda. Para a implementação da transformação digital do processo, existem softwares que podem auxiliar, como o aplicado no presente trabalho para o segmento de peças e conjuntos metálicos. A proposta do software para armação é dividida em 4 etapas, sendo estas conhecidas como Use Cases (UC).

No Use Case 1, é realizado o estudo de factibilidade de processo e produto, onde são analisadas as condições iniciais de união das peças. Trabalha-se apenas com o CAD-0, ou seja, geometrias nominais de produto, o que permite verificar possíveis impactos na qualidade do conjunto gerados pelo processo ou por particularidade das peças. Já no Use Case 2, é efetuado o mapeamento do processo e são realizadas modificações para atender aos critérios de qualidade. Nesta etapa, se faz necessária a utilização de resultados das peças estampadas simuladas, para aproximar ainda mais o gêmeo digital do processo [11]. Neste momento, o foco maior está no dimensional do conjunto e qualidade de superfície.

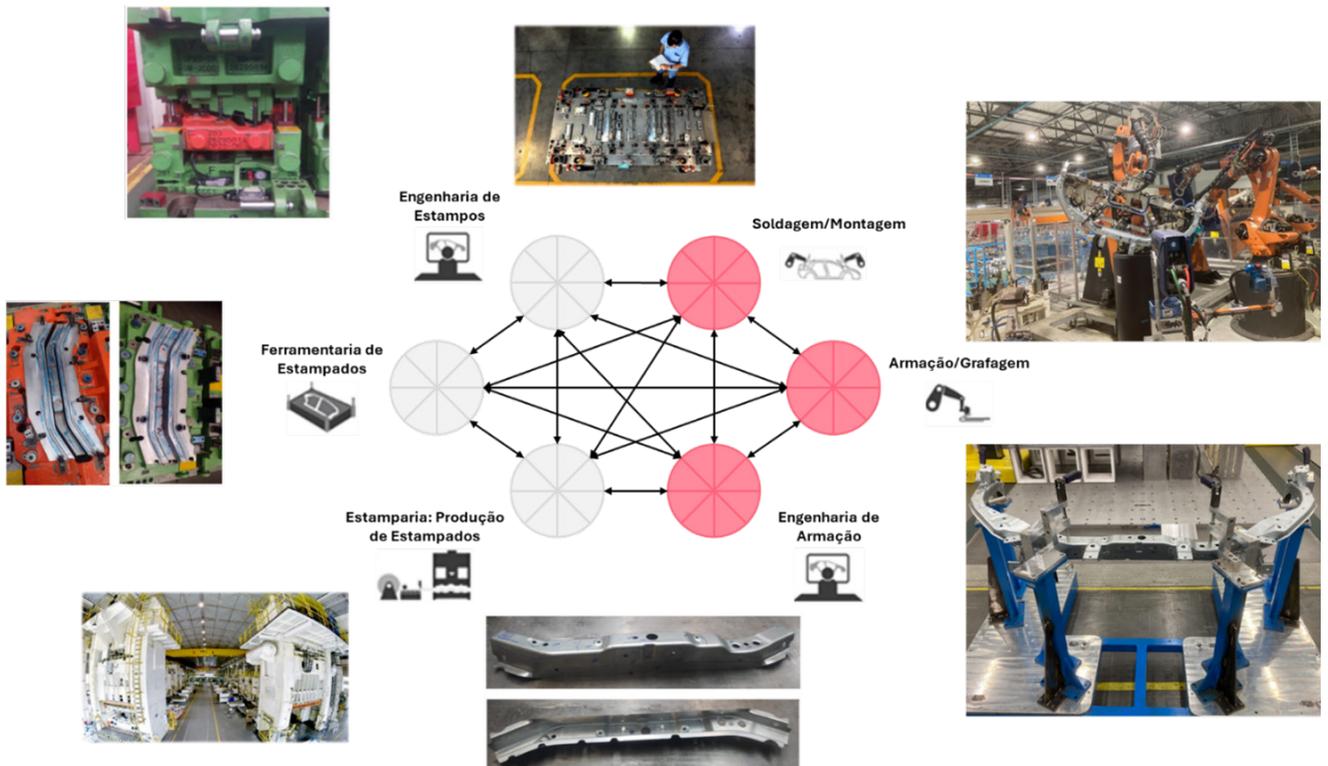


Figura 6. Aplicação do gêmeo digital do processo, uma vertente da Indústria 4.0.

Os Use Cases 3 e 4 são dedicados para as áreas fabris e a conexão com a engenharia, ou seja, caso algum problema ocorra em campo, é realizada a digitalização dos dispositivos de linha e das peças individuais, com o objetivo de ajustar o modelo digital ao processo real. Uma vez caracterizado o processo com as peças recebidas de tryout no Use Case 3, são realizados ajustes virtuais para solução do problema através do Use Case 4, minimizando desperdícios em produção. Estes ajustes podem se dar através da otimização da posição de calços, ou shims, sequenciamento de soldagem, posição de pilotos ou até mesmo da modificação de geometria de componentes individuais.

Durante as fases iniciais do projeto, na conjuntura da construção das ferramentas de estampagem e dispositivos de soldagem, o springback dos componentes foi estimado por prévias simulações através do cálculo por elementos finitos. Neste contexto, foi viabilizada a compensação do retorno elástico nos estampos, com o objetivo de garantir a conformidade geométrica dos produtos individuais. Os estampos nominais foram deformadas com base no retorno elástico calculado. Entretanto, o impacto do processo de união nos desvios dimensionais, força motriz para alocação de recursos neste interesse, se mantinha desconhecido até o desenvolvimento desta pesquisa. O objetivo do presente trabalho é estudar a digitalização do processo de união de um conjunto do Front End Tie Bar de um veículo através do software de simulação. Os produtos são de notável complexidade, portanto o springback desempenha um papel importante nos rigorosos requisitos dimensionais do conjunto.

O projeto piloto implementado é um plano de três etapas que integra a completa cadeia de processos de montagem de carroceria. Produtos foram estampados e unidos seguindo o fluxo comumente aplicado na indústria automotiva, anteriormente à criação do projeto piloto. Portanto, não foi possível aproveitar os recursos computacionais para suportar os engenheiros em termos de conjunto durante o seu desenvolvimento, embora tenham sido aplicados para os estampados individualmente. O primeiro passo aplicado foi avaliar o conjunto Front End Tie Bar quanto a seu dimensional ao simular seu processo com superfícies CAD-0 e dispositivos de soldagem, ou seja, superfícies e dispositivos nominais (Use Case 1). O objetivo desta primeira abordagem é determinar o impacto do processo de soldagem em casos em que os processos de estampagem atinjam perfeitas correspondências às geometrias nominais dos produtos.

Sequencialmente, as superfícies CAD-0 foram substituídas pelos resultados das simulações de estampagem, caracterizando a execução do Use Case 2. Este procedimento leva em consideração informações relevantes, como mudança de espessura e cálculo de retorno elástico, como decorrência das simulações. Contudo, um dos maiores desafios do processo de estampagem ainda era capaz de significante-

mente impactar na montagem da carroceria, que se trata de adquirir processos de manufatura robustos o suficiente para cobrir conformidade geométrica respeitando todas as possíveis variações de propriedades mecânicas da matéria-prima, assim como ruídos de processos relacionados a atrito, manutenção de estampos, entre outros.

O terceiro e último passo foi executado após o escaneamento das peças conformadas individualmente de maior desvio dimensional. A malha gerada pela digitalização de um produto real substituiu a atual geometria resultado de simulação de estampagem. Sobretudo para o presente trabalho, onde a simulação não foi aplicada durante o desenvolvimento dos dispositivos de montagem, este procedimento pode criar um gêmeo digital do processo de mais elevada precisão. Não obstante, a informação relativa ao afinamento de chapa foi projetada em cada produto digitalizado, fornecida pelos modelos em elementos finitos do segundo passo. Nesta etapa, foi aplicado um Use Case híbrido composto pelos casos 2, 3 e 4, onde houve a tentativa de virtualizar o que já ocorria em prática, apesar de, no momento de implementação, já haver algumas ações de correção com base em conhecimentos específicos dos times envolvidos. Alguns dos produtos, por não possuírem desvios dimensionais relevantes, não foram substituídos por resultados de digitalização de um produto real. Os resultados do terceiro passo mencionado foram comparados ao dimensional real do Front End Tie Bar.

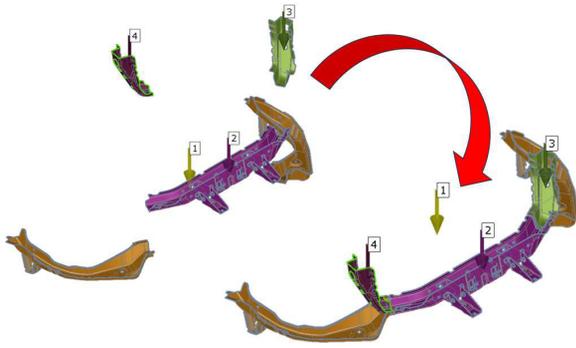
## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No exemplo prático mencionado e objeto de estudo do case, o conjunto Front End Tie Bar de um veículo apresentou resultados dimensionais reprovados, mesmo possuindo a maioria das peças individuais e dispositivos de soldagem dentro das especificações de normas e tolerâncias. A análise virtual, realizada no software, permitiu avaliar a complexidade das variáveis nos processos de soldagem. Essa abordagem virtual embasou decisões que melhoraram o processo e todo o ciclo que envolve os meios de engenharia, produção, qualidade e suporte técnico.

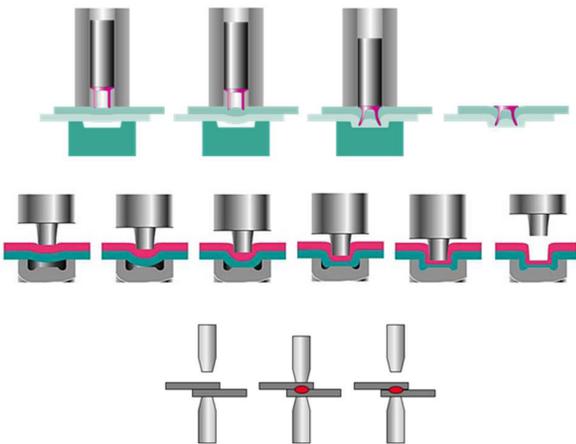
RESULTADOS OBTIDOS PELA AETHRA E GENERAL MOTORS - Verificou-se que a ferramenta do gêmeo digital de processos de soldagem permite analisar de maneira virtual todo o processo de montagem concebido pela engenharia, a fim de verificar os impactos dimensionais dessas escolhas. Com isso, no projeto em questão, através do Use Case 1, ou primeira etapa, foi possível validar e corrigir as sequências de montagem previamente concebidas em fase de engenharia e agora validadas por meio de simulação. A Figura 7 traz um exemplo de estação intermediária do processo de montagem do conjunto.

A sequência de pontos de solda também é um dado de entrada que pode interferir diretamente no dimensional do conjunto, tal efeito pode ser considerado numa simulação de

gêmeo digital do processo levando em conta o aporte térmico do ponto de solda e o tamanho da lentilha de soldagem (na literatura, é comum citar-se a resistência na interface entre as duas chapas, como sendo a resistência crítica no surgimento e crescimento da lentilha no RSW (Resistance Spot Welding) [12-14]. Além disso, é possível verificar outros processos como Riveting, Clinching (matriz fixa e móvel) e RSW vide Figura 8, de cima para baixo, respectivamente.



**Figura 7.** Exemplo de estação intermediária do processo de montagem do conjunto Front End Tie Bar.



**Figura 8.** Uniões por riveting, clinching e RSW, respectivamente.

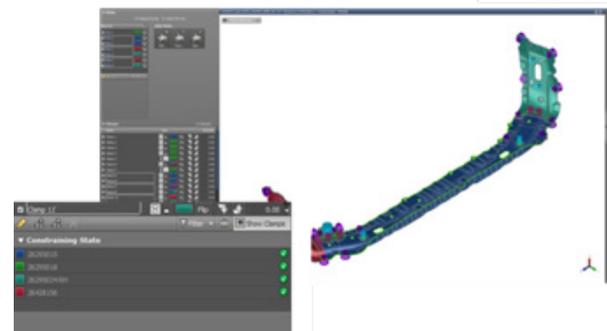
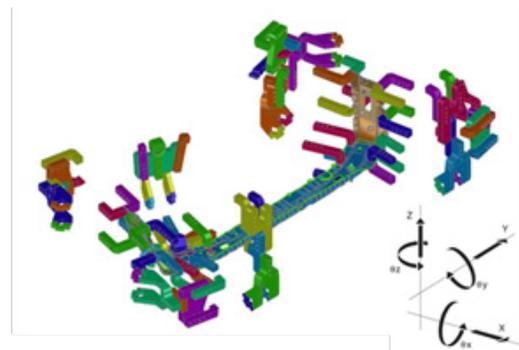
Numa simulação de montagem, a tensão exercida pelos pontos de solda, o seu aporte térmico (se existente), além da sequência dos pontos de solda, pode influenciar diretamente no resultado dimensional do conjunto. Levando em conta que muitas vezes a escolha pela sucessão de ponteamto se dá exclusivamente pela análise de tempo de ciclo e acesso de soldagem, a partir do desenvolvimento da simulação de processos, foi possível verificar a influência desta sequência no dimensional do conjunto. A Figura 9 mostra dois caminhos de solda, aplicados em uma estação de montagem. Se assim existirem problemas, pode-se alterar o sequenciamento de ponteamto e analisar o novo dimensional de conjunto.

Outras homologações possíveis de se executar são as validações de fixação das peças nos dispositivos de soldagem, levan-

do em conta a atuação da gravidade e do peso próprio de cada uma. A sequência de inserção delas também é considerada, a fim de verificar instabilidades que podem também incorrer em desvios dimensionais nos 6 graus de liberdade possíveis (rotação e translação). Estas verificações são realizadas na interface virtual, conforme Figura 10. Dependendo da etapa em questão, pode-se ainda otimizar os dispositivos de soldagem, excluindo torres excedentes que não influenciam na fixação das peças e foram posicionadas em excesso.



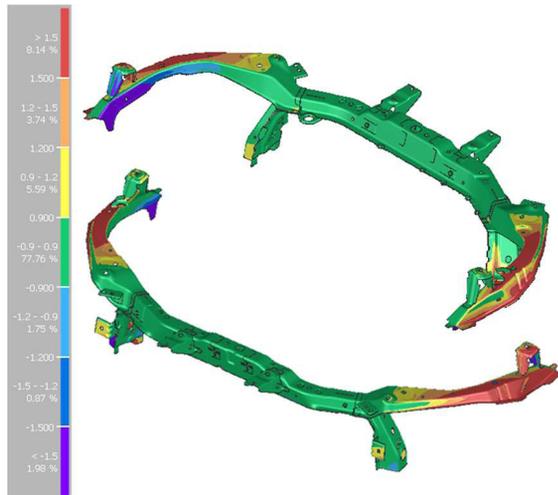
**Figura 9.** Diferentes caminhos de sequenciamento de solda aplicados à simulação de montagem.



**Figura 10.** Reprodução de dispositivo de solda no software de simulação.

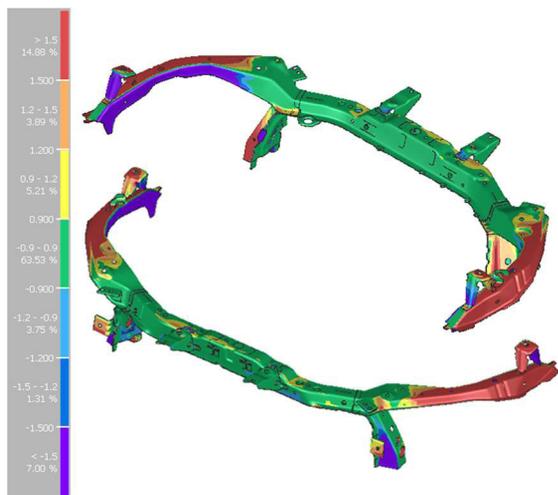
Partindo destas premissas mencionadas, obteve-se então um estudo preliminar de montagem levando em conta todas as principais variáveis de processo e, mesmo trabalhando com engenharia reversa (devido ao fato do conjunto já estar em produção), obteve a primeira análise do conjunto, que demonstrou áreas com desvios cuja tendência eram similares ao que ocorre

na prática. Sendo tais áreas conforme os pontos destacados na Figura 11.



**Figura 11. Desvios dimensionais encontrados para o Use Case 1, em milímetros.**

Como mencionado na metodologia, trabalhou-se a partir de então com objetivo de trazer mais informações ao processo, evoluindo para o Use Case 2. Com isso, as simulações passaram agora a ter um desvio dimensional superior, pois desvios dimensionais de produtos individuais foram adicionados, somados a dados de tensões, afinamentos e springback. Nota-se um agravante dimensional nas áreas já mencionadas no case anterior e o surgimento de novas pequenas áreas fora do dimensional, consequências diretas dos resultados alimentados a partir da simulação de estampagem das peças individuais. A conformidade geométrica de forma, representada pelas áreas em verde, caiu de 77,76%, no Use Case 1, para 63,53% no Use Case 2. Os resultados do segundo passo estão representados pela Figura 12.



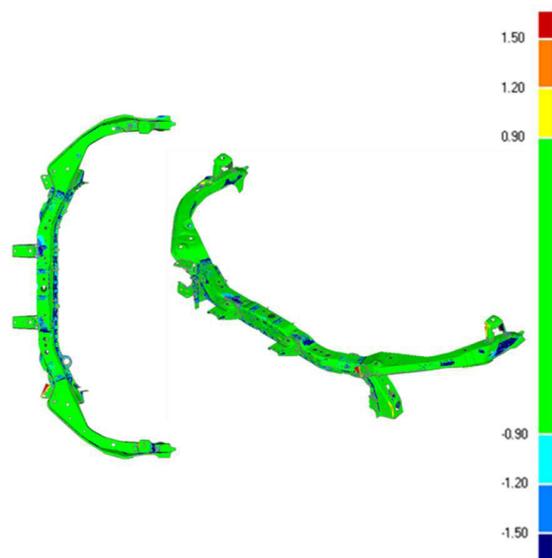
**Figura 12. Desvios dimensionais encontrados para o Use Case 2, em milímetros.**

Como resultado da simulação do Use Case 2, observase um aumento considerável nos desvios dimensionais de conjunto e

um agravamento das áreas de mating ou áreas de acoplamento. Mais uma vez, isso ocorre, pois desde a simulação do Use Case 1, adicionou-se ao processo mais erros ou desvios que foram somados ao estudo inicial.

Entretanto, em nenhum momento se propôs uma melhoria de processo até então. Por este fato, não se obteve melhoras com a evolução das simulações e sim um agravamento dos desvios de conjuntos.

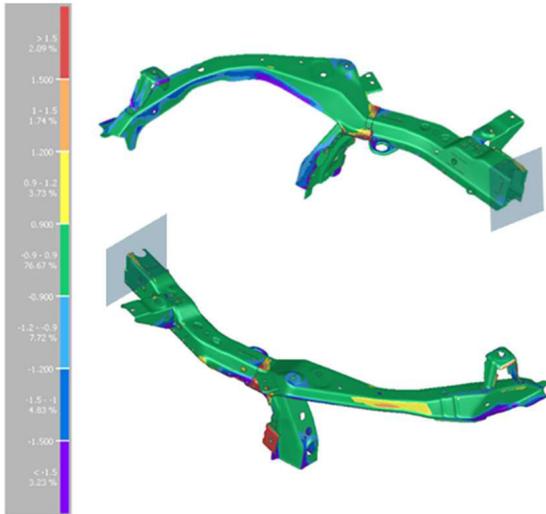
Por final, calculou-se a simulação híbrida composta pelos Use Cases 2, 3 e 4, onde buscou-se trazer o Scan (escaneamento digital dos desvios de springback) das peças individuais de maior desvio dimensional individual e os resultados das peças simuladas a fim de alimentar a simulação com dados de tensões, afinamentos e springback reais e que estão conforme os processos em produção. A partir desta etapa, por se tratar de um processo de engenharia reversa, se faz necessário trazer os pontos de apoio conforme dispositivos de solda reais, onde já foram feitos todos os pontos de correção que foram obtidos através de processo iterativo de aprendizado prático, por meio de loops de tryout reais durante diversos setups diferenciados. O dimensional real adquirido, Figura 13, mostra a força das equipes envolvidas nos trabalhos práticos, uma vez que se observa a enorme maioria das áreas de forma em conformidade geométrica. Ao mesmo tempo, alerta para a urgente necessidade de virtualização do trabalho de montagem, com o intuito de se reduzir os esforços vinculados aos loops de tryout reais.



**Figura 13 Desvios dimensionais reais do Front End Tie Bar**

Os resultados de simulação obtidos estão ilustrados na Figura 14, com correlação real x virtual apresentada na Figura 15. Observa-se um desvio inferior a 0,3 mm em grande parte da geometria. Entretanto, algumas regiões pontuais mostraram desvio superior a 0,6 mm. Neste momento, se busca obter virtualmente o resultado que já ocorria em prática, caminho contrário ao que usualmente é aplicado quando o processo vem da engenharia

para áreas fabris. Se faz necessário um trabalho investigativo a respeito destes pontos divergentes, passando pela análise de matéria-prima até mesmo na melhor calibragem de parâmetros de equações que determinam a deformação gerada pelo processo de soldagem. Este trabalho não foi objeto de estudo deste paper.

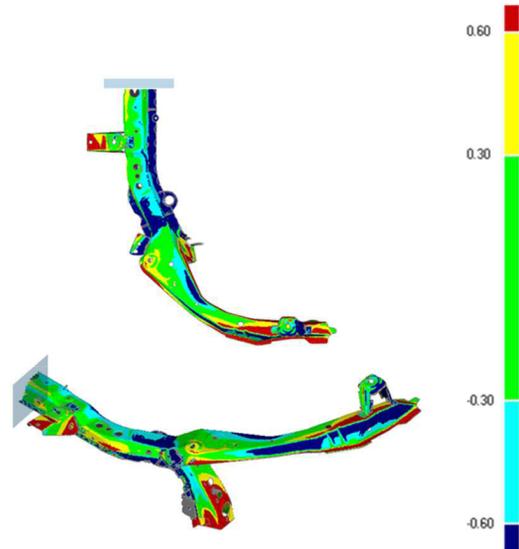


**Figura 14.** Desvios dimensionais encontrados para o lado esquerdo, considerando a simulação híbrida entre os Use Cases 2, 3 e 4, em milímetros.

Para obter maior correlação, seria necessário um nível de dados de entrada maior, ou seja, além de digitalizar as peças individuais, seria necessário soldar esses mesmos componentes e realizar a digitalização do conjunto composto pelos mesmos componentes anteriormente digitalizados. Além disso, para garantir a rastreabilidade da matéria-prima utilizada em cada componente, demanda-se também informações das propriedades mecânicas de cada chapa utilizada. Com isso, haverá o ponto comum nesta etapa, passando-se a fazer os tryouts de maneira 100% digital, alterando, se necessário, sequências de pontos de soldagem, posição de pontos de fixação (calços e pilotos) e melhorando aos poucos os desvios dimensionais de conjunto.

O tryout virtual de conjunto permite uma evolução significa-

tiva em reduções de custo, scrap, perda e paradas de produção, fazendo com que loops de correções sejam feitos totalmente de maneira virtual e possam ser replicados somente quando as posições ideais forem encontradas. Tal tratativa permite uma maior integração entre departamentos, pois permite que análises e cenários de correção sejam criados e que informações sejam trocadas de maneira a retroalimentar os dados de departamentos anteriores. Todas estas correções podem ser realizadas de maneira virtual. Isso fica mais evidente na Figura 16, onde se demonstra a possibilidade de correção de processo e interligação retroativa deles, conforme fluxograma proposto. Inclusive, é possível criar uma geometria matemática ótima, conhecida como VAR (Virtual Assembly Reference), que permite que o conjunto todo seja aperfeiçoado através de uma proposta de correção da estamparia. Por meio desta abordagem, é executada a compensação de componentes individuais de modo que, atendendo ou não às próprias especificações, atenda às especificações do conjunto.



**Figura 15.** Correlação real x virtual para o lado esquerdo do Front End Tie Bar.



**Figura 16.** Correção virtual de causa raiz através da integração entre departamentos.

## CONCLUSÃO

O gêmeo digital do processo permite que as variações encontradas no conjunto após o processo de soldagem/grafagem sejam corrigidas, por meio de ajuste no dispositivo de montagem ou até mesmo, se necessário, na ferramenta de estampados, levando em conta variações não lineares. Isso é possível, pois conectando-se o ecossistema desde a definição da matéria-prima, passando então pela criação dos produtos, manufatura de estampados e montagem, é possível identificar potenciais falhas que poderão ocorrer ao longo da produção, prevenindo desperdícios, aumentando a produtividade e alinhamento com as políticas ESG (série de políticas ambientais, sociais e de governança), como redução de poluentes.

No estudo realizado utilizando o CAD-0 para simulação de soldagem, foi possível identificar a tendência dimensional do conjunto imposta pelo processo. Analisando o resultado do Use Case 1, Figura 11, considerando a tolerância geral de  $\pm 0,9$  mm, foi alcançado 77,76% de área dimensional aprovada, ficando apenas as extremidades da peça acima de 1,2 mm. Importante ressaltar que os dados de entrada utilizados nessa etapa foram: A geometria das peças, matéria-prima, espessura e os pontos de apoio e localização dos dispositivos de solda/medição. Com isso, conclui-se que o Use Case 1, para fase de desenvolvimento, será fundamental para definição dos pontos de apoio, pontos de solda e sequência de montagem, com foco na estabilidade dimensional e otimização de custo para aquisição de meio de produção e operacional.

Para o Use Case 2, Figura 12, onde as peças individuais foram importadas com o resultado da simulação de conformação, ou seja, as informações de afinamento, tensão residual e dimensional de cada item foram calculadas e carregadas na simulação de soldagem, o que garante maior precisão para o modelo e possibilitou a verificação da influência das peças estampadas na tendência dimensional do conjunto, sendo o resultado de 63,53% de área total aprovada. Conclui-se, uma vez que cada componente estampado possui dimensional proveniente do processo de conformação e que impacta diretamente nas regiões de montagem, mesmo estando em sua maioria conforme tolerâncias especificadas, no caso  $\pm 0,6$  mm. Estes desvios podem afetar a região de montagem e gerar uma distância entre peças e contra peça de 1,2 mm, se as peças vierem nos extremos opostos de tolerância.

No resultado, foi possível notar que a região central do conjunto se manteve estável, com exceção dos dois componentes que estão na parte inferior do conjunto, que sofreram maior desvio. Fazendo um comparativo com o CAD-0, mostra que a região de montagem desses componentes é crítica e que seria mandatório o maior controle dessa região. O mesmo se aplica para os braços laterais, que apre-

sentaram maior desvio dimensional no comparativo.

Na última fase do projeto, onde buscou-se a correlação da tendência dimensional entre a simulação e o resultado real, utilizando a simulação híbrida entre os Use Cases 2, 3 e 4, Figura 14, unindo os resultados da etapa anterior, Use Case 2, com os resultados do escaneamento de peças individuais conformadas. A área dimensional aprovada foi de 76,67% para o lado esquerdo do conjunto, resultado satisfatório, embora haja pontos de menor correlação com o resultado prático. O trabalho de evolução na simulação para melhoria da correlação não foi objeto de estudo deste paper e será investigado posteriormente. Outra maneira de considerar esses fatores, seria utilizando a análise de robustez nas peças individuais conformadas, onde a variação nas propriedades da matéria-prima seria considerada e, por consequência, os impactos dimensionais. Esses resultados seriam carregados para simulação de assembly, onde o conjunto é analisado levando em consideração a variação dimensional dos componentes conformados.

Conclui-se com o trabalho que, para melhor representação do gêmeo digital do processo, a qualidade e o nível de detalhe dos dados de entrada são cruciais para precisão do modelo, principalmente pontos de apoio, grampos, pontos de solda, sequenciamento do processo de ponteamento de solda, sequência de montagem e robustez das peças conformadas. No presente estudo, além de acessar virtualmente, pela primeira vez, os impactos do processo de soldagem no dimensional do conjunto, o foco foi a correlação entre o processo real e virtual. Não foi levada em consideração a análise de robustez das peças individuais e que o conjunto escaneado não foi o mesmo referente às peças individuais escaneadas, podendo gerar divergências devido a variações em propriedades de matérias-primas. O resultado foi satisfatório para o estudo, embora para engenharia reversa, em projetos futuros, seja necessário maior tempo para coletar e inserir essas informações na simulação. Para um novo desenvolvimento, as etapas do processo já estão descritas, seguindo os Use Cases 1 e 2. A robustez da peça individual e as informações dos pontos de apoio, grampos, localizadores e pontos de soldas da simulação serão exportados para que o time de projeto, ferramentaria e produção possam utilizar para construção do dispositivo, trazendo maior assertividade para o processo.

## REFERÊNCIAS

- [1] DE SOUZA, T.; ROLFE, B.F. Understanding robustness of springback in high strength steels. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 68, p. 236-245, 2013.
- [2] CHEN, P.; KOC, M.; WENNER, M.L. Experimental investigation of springback variation in forming of high strength steels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 130, 2008.

[3] GÖSLING, M.J. *Metamodell unterstützte simulation und kompensation von rückfederungen in der blechumformung*. 2010. Dissertação. Technische Universität Dortmund, 2010.

[4] TINTI, F.; FONTANA, M.; SCINTILLA, L.D.; MIRABILE, A.; CARLEER, B. *Assembly simulation development and validation project with industrial applications*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1238, 2022.

[5] BÉZI, Z.; BAPTISZTA, B.; SZÁVAI, S. *Simulation and Validation of Welded Joints of High Strength Steel Sheets*. 6th International Conference: Scientific Computing to Computational Engineering, 2014.

[6] PRÉM, L.; BÉZI, Z.; BALOGH, A. *Development of Complex Spot Welding Technologies for Automotive DP Steels with FEM Support*. Vehicle and Automotive Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering, p. 407-423, 2017.

[7] VALEŠ, M.; HAVELKA, J.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.; TATÍČEK, F.; NOVÁK, V. *Production and assembly of car body fifth door with use of dual-phase steel hct500x*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1178, 2021.

[8] SCHULER, F.; LIEWALD, M.; BEZERRA, D.M. *New compensation strategy for car bonnet assemblies*. Procedia Manufacturing, v. 29, p. 552-559, 2019.

[9] DONDEERS, S.; BRUGHMANS, M.; HERMANS, L.; TZANNETAKIS, N. *The Effect of Spot Weld Failure on Dynamic Vehicle Performance*. Sound and Vibration, p. 16- 24, 2005.

[10] JESSOP, BOB. *Fordism*. Encyclopedia Britannica, 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/money/Fordism>> Acesso em 09 mai. 2024.

[11] AMTHIOU, HANAN & ARIOUA, MOUNIR & BENBARRAD, TAJEDDINE. (2023). *Digital Twins in Industry 4.0: A Literature Review*. ITM Web of Conferences, v. 52, 2023.

[12] SONG, Q.; ZHANG, W.; BAY, N. *An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding*. Welding Journal, USA, v. 84, n.5, p. 73-76, 2005.

[13] RESISTANCE WELDING MANUAL. 4 ed. rev., RWMA, Philadelphia, 2003.

[14] ASLANLAR, S. *The Effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in Electrical Resistance Spot Welding of Sheets Used in Automotive Industry*, Materials and Design, v. 27, p. 125-131, 2006.

CONTATOS

João Júnior	joao.junior@gm.com
Aleksandro Carmo	aleksandroantonio.carmo@gm.com
Osmar Júnior	osmar.luque@gm.com
Gustavo Silveira	gustavo.silveira@aethra.com.br
Lucas Mazieiro	lucas.mazieiro@aethra.com.br
Marcel Roxin	marcel.roxin@aethra.com.br
Luis Valdo	luis.valdo@autoform.com.br
Wesley Silva	wesley.aparecido@autoform.com.br