

# APLICAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS AO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE *HOTFORMING*

POR LEANDRO GUIMARÃES CARDOSO

O avanço da aplicação de peças em aço martensítico produzidas pelo processo de *hotforming* na indústria automobilística coloca grandes desafios para os engenheiros e projetistas responsáveis pelo projeto destas peças e dos ferramentais utilizados para produzi-las. E as simulações computacionais são uma das mais importantes e eficientes ferramentas hoje disponíveis para enfrentar estes desafios.

Desde a década de 1980 a tecnologia de produção de peças em aço martensítico de ultra-alta resistência, obtido através do processo de conformação à quente e têmpera na ferramenta (conhecido como *hotforming*) está disponível para aplicação em peças estruturais de veículos automotivos. Desenvolvida inicialmente na Suécia, esta tecnologia começou a ser utilizada inicialmente de forma limitada em algumas peças, mas com o passar do tempo seu uso foi sendo expandido até compreender bem mais de um terço do peso da estrutura de alguns modelos atuais, como mostra a figura 1:

Contudo, devido às características próprias do processo de *hotforming*, que é afetado por diversos fenômenos físicos específicos que não atuam no caso da tradicional conformação de chapas à frio, a produção de componentes estampados utilizando esta tecnologia exige a adequação de diversos detalhes ao conceito, desde a concepção da geometria da peça em si até os passos de acabamento do produto final, passando pelo desenvolvimento de ferramentas com características

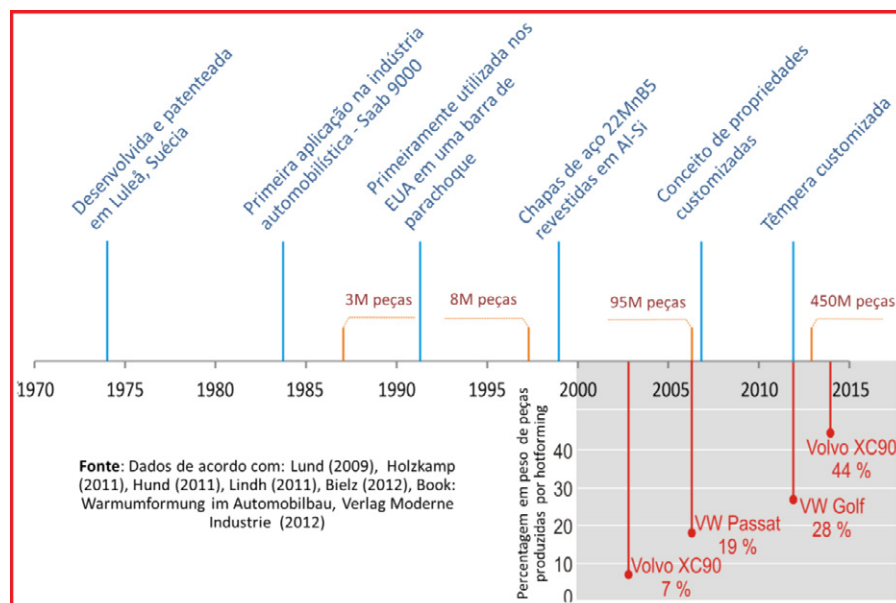


Figura 1: Histórico do desenvolvimento e da aplicação da tecnologia de *hotforming* na indústria automobilística mundial, desde a década de 1970 até hoje.

bastante especiais. Isto torna o projeto de peças em *hotforming* e o desenvolvimento de seu processo de fabricação mais complexo e difícil do que no caso de peças estampadas tradicionais, demandando maior conhecimento e

experiência dos especialistas envolvidos e a disponibilidade de recursos avançados que possam auxiliar na avaliação de potenciais dificuldades para a obtenção de peças que cumpram os requisitos esperados.

# AutoForm

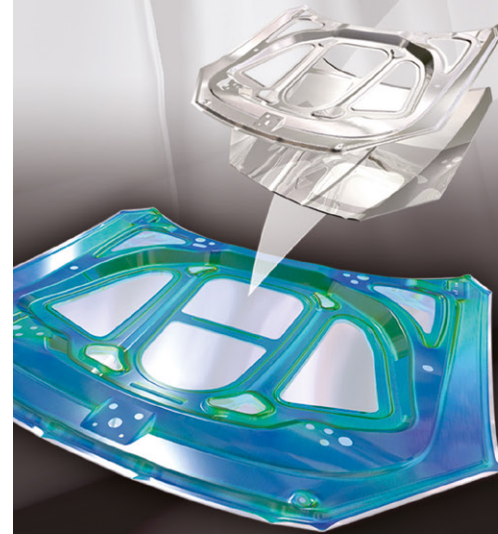
Soluções de Software para  
Conformação de Chapas Metálicas

## Você está interessado em:

- ▶ *Desenvolvimento de peças de chapas metálicas manufaturáveis?*
- ▶ *Um processo eficiente e seu planejamento de custos?*
- ▶ *Criação rápida e fácil de conceitos de ferramental e a validação final do processo de conformação?*
- ▶ *Um try-out eficiente e uma produção robusta e de alta qualidade?*

## Nós podemos ajudá-los com:

- ▶ *Soluções em software de alta qualidade, desenhadas para a sua realidade diária e com alto desempenho*
- ▶ *Todo o suporte técnico necessário para que você possa tomar as decisões corretas ao longo de toda a cadeia de desenvolvimento e produção dos processos de conformação em chapas metálicas*



E uma das principais ferramentas utilizadas neste caso é a simulação computacional, que permite visualizar antecipadamente eventuais dificuldades na conformação ou na têmpera das peças produzidas por hotforming permitindo a tomada de ações que resolvam ou minimizem os problemas encontrados antes da definição final da geometria da peça e do início do projeto detalhado das ferramentas.

Neste trabalho serão apresentados de forma geral os problemas que podem afetar o desenvolvimento de peças a serem produzidas pelo processo de *hotforming* e como a aplicação da simulação numérica pode ajudar a resolvê-los.

### CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DO PROCESSO DE HOTFORMING:

O processo de *hotforming* consiste basicamente a obtenção de peças em aço martensítico de ultra-alta resistência, o que permite a redução da espessura da chapa utilizada e conseqüentemente do peso final do componente. No entanto, em sua fase martensítica os aços são

demasiadamente duros e quebradiços para permitirem uma conformação significativa e, portanto, o processo na verdade consiste na conformação de ligas especiais que originalmente tem sua micro-estrutura composta por alguma outra fase mais macia (ferrita/perlita ou austenita) e na posterior têmpera da peça ainda na ferramenta, de forma a se alcançar a micro-estrutura martensítica pretendida. Os diagramas das figuras 2A e 2B mostram duas concepções que podem ser utilizadas neste tipo de processo:

O material utilizado neste processo é o aço 22MnB5, e a chapa inicialmente tem uma estrutura ferrítica/perlítica. Ela pode ser parcialmente conformada (processo indireto) ou não (processo direto), e depois é aquecida a temperaturas superiores a 800 graus de forma a que sua micro-estrutura é transformada para a fase de austenita. A chapa é então conformada a quente, enquanto ainda está austenitizada, e logo em seguida resfriada rapidamente para que a micro-estrutura seja convertida em martensita, de acordo com o diagrama de transformação da figura 3:

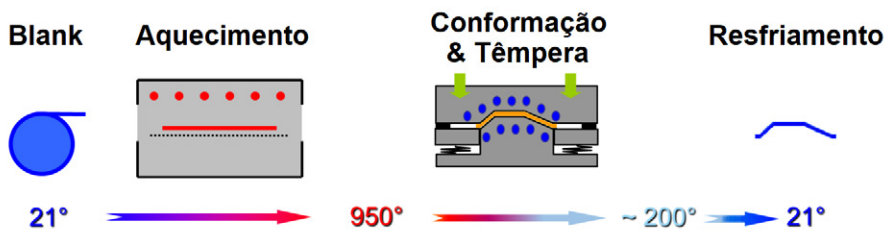


Figura 2A: Diagrama do processo de *hotforming* direto.

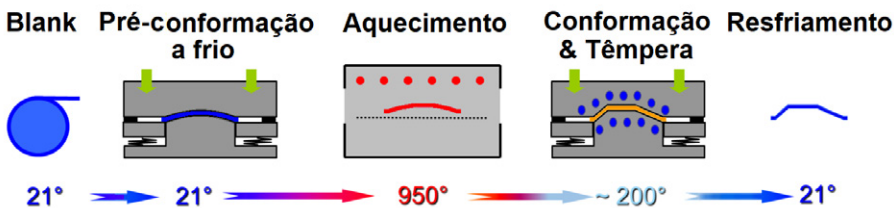


Figura 2B: Diagrama do processo de *hotforming* indireto.

Tel: +55 11 4121 1644  
info@autoform.com.br

www.autoform.com

**AUTOFORM**  
Forming Reality

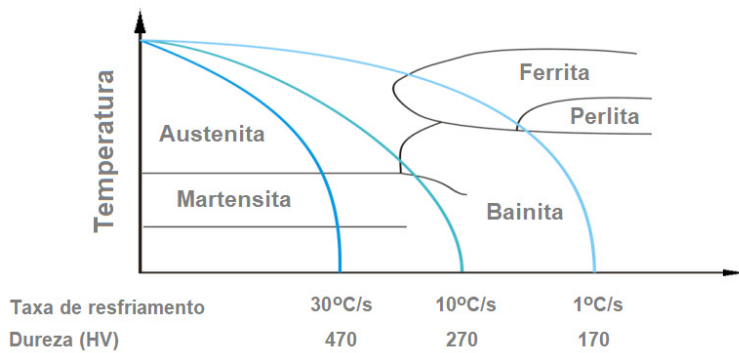


Figura 3: Diagrama de mudança de fase do aço 22MnB5 com a temperatura e a taxa de resfriamento.

A necessidade de se obter um resfriamento suficientemente rápido da chapa para garantir que ocorra a transformação total de sua micro-estrutura em martensita (processo conhecido como têmpera) exige que as ferramentas sejam refrigeradas por um fluxo de água fria e que um bom nível de pressão de contato entre as ferramentas e a chapa seja garantido durante o resfriamento, de forma a se obter um elevado coeficiente de troca de calor. Por isso a têmpera é efetuada com a prensa fechada e com uma força razoável aplicada à chapa, o que implica em um ciclo de processo mais longo.

Após a têmpera da peça ser efetuada a baixa conformabilidade e a grande dureza da martensita resultante não mais permitem que as peças recebam modificações em sua forma (como flangeamento, calibração dimensional e etc). Eventuais cortes e furos também só podem ser feitos mecanicamente com muita dificuldade e por isso em geral utiliza-se o corte a laser, que é bem mais lento e caro. Todos estes fatores implicam em uma série de restrições que devem ser cuidadosamente consideradas durante o desenvolvimento de processos de ho-

tforming. Além de cuidados no projeto das peças em si também os processos de estampagem e têmpera precisam ser definidos muito cuidadosamente, de forma a permitir que a peça seja conformada adequadamente apesar das limitações na restrição da corrida de chapa (pois em geral os blanks são pré-recortados, o que impede o uso extensivo de prensa-chapas e quebra-rugas comuns na conformação à frio), além de garantir que transformação martensítica seja completada dentro do tempo especificado para o processo evitando ciclos de fabricação demasiadamente longos que encareceriam o produto final. Especial cuidado deve ser então tomado no projeto dos pisadores internos e insertos móveis que impedem o enrugamento da chapa, bem como no dos canais de refrigeração das ferramentas que garantem o seu rápido resfriamento.

Basicamente, os pontos listados abaixo devem ser cuidadosamente considerados:

- É necessário simplificar a geometria das peças, de forma a que possam ser produzidas através de uma única etapa de conformação.

- Deve-se evitar paredes verticais, de forma a permitir que a força da prensa seja convertida em uma pressão de contato suficiente entre as ferramentas e a chapa para garantir a rápida troca de calor necessária durante a fase de têmpera.
- É preciso minimizar as operações de corte a serem executadas após a têmpera, o que quase sempre implica no uso de *blanks* pré-recortados e um mínimo de furos. As tolerâncias de borda da peça, tanto no contorno quanto nos furos, devem ser ajustadas (mais abertas) para permitir esta condição.
- Por vezes é necessário delimitar áreas da peça onde não seja formada martensita, para garantir maior ductibilidade ou soldabilidade local. Nestes casos podem ser utilizados *blanks* soldados com regiões compostas por diferentes materiais (*tailored blanks*), ou ainda aquecimento/resfriamento localizados.
- Muitas vezes as peças são reforçadas localmente com chapas sobrepostas soldadas (*patchwork*) no *blank* inicial, para garantir máxima resistência com mínimo aumento do peso.

Todos estes fatores tornam o processo de *hotforming* consideravelmente mais complexo que a conformação de chapas tradicional à frio, implicando na necessidade de ferramentas de simulação numérica para garantir o seu desenvolvimento bem sucedido. E para que as simulações possam determinar acuradamente o comportamento da chapa ao longo de sua conformação à quente e sua posterior



**GARANTA O EQUILÍBRIO  
NECESSÁRIO NOS NEGÓCIOS.**  
CONHEÇA AS FORMAS INOVADORAS DE ANUNCIAR NO CIMM.





têmpera diversos fenômenos precisam ser avaliados simultaneamente, como a mudança dos coeficientes de troca de calor com o ambiente e as ferramentas em função da temperatura, distância e pressão de contato, as mudanças nas propriedades do material com a temperatura, a taxa de deformação e o tipo de micro-estrutura, bem como as mudanças de fase do material em função da temperatura e do tempo. A figura 4 mostra, a título de exemplo, algumas das curvas que caracterizam a propriedade da chapa em função dos parâmetros mencionados acima:

Felizmente, os *softwares* atuais utilizados nas simulações deste tipo de processo já estão bastante avançados e conseguem lidar com toda esta complexidade de forma adequada, efetuando todos os cálculos necessários para representar adequadamente estes fenômenos basicamente de forma transparente para o usuário.

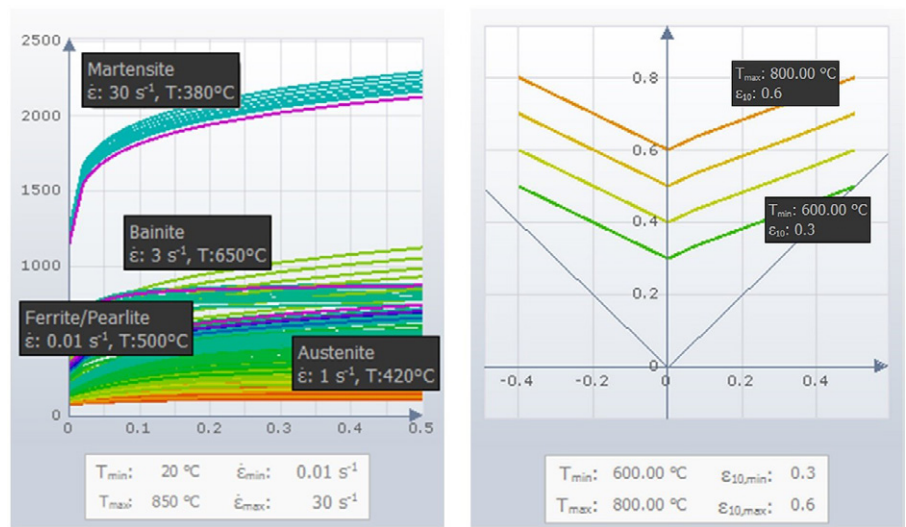


Figura 4: Curvas de caracterização de algumas das propriedades do material em função da temperatura, microestrutura e taxa de deformação.

Este então não tem a necessidade de se preocupar com todos os detalhes dos modelos físicos e matemáticos envolvidos nas simulações, e pode se concentrar especificamente nos aspectos puramente tecnológicos do

problema de desenvolver uma peça factível e um ferramental adequado para a sua produção, pensando apenas nos fatores que ele precisa considerar no mundo real, como a geometria da peça e os detalhes do processo.



Conheça de perto a MATRIZ DA PEÇA ORIGINAL acessando

[www.gama.ind.br](http://www.gama.ind.br)

[www.gama.ind.br](http://www.gama.ind.br)





A figura 5 mostra um exemplo de processo real de *hotforming*. Note-se a elevada temperatura da peça ainda em processo, e os cortes e furações principais já aplicados, detalhes que precisam ser definidos pelos responsáveis pelo desenvolvimento da peça e da ferramenta:

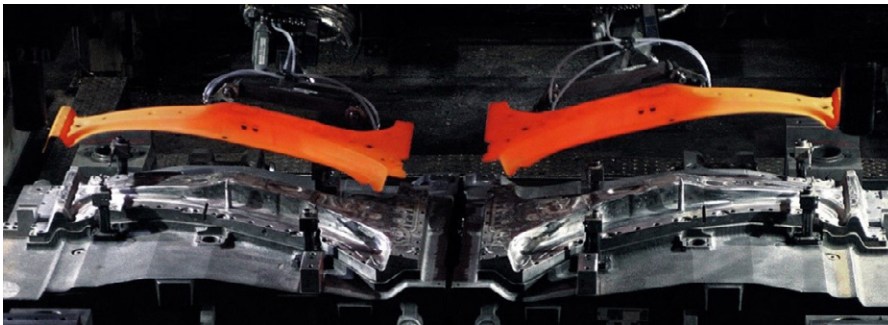


Figura 5: Coluna B em produção pelo processo de *hotforming*.

do modelo de simulação, além do uso de parâmetros do solver que permitam a realização mais rápida dos cálculos matemáticos mesmo abrindo mão de um certo grau de acurácia, estão o uso de ferramentas com temperatura constante pré-determinada, a realização da análise em ciclo único

desconsiderando o aquecimento progressivo das ferramentas e modelos mais simples de troca de calor (por exemplo, desprezando-se as variações do coeficiente de troca de calor entre as ferramentas e a chapa em função da folga entre elas). O que se busca neste estágio é a identificação de problemas críticos de estampagem como rugas, rupturas, desvios dimensionais e etc, que devem ser identificados e corrigidos. As figuras 6A, 6B e 6C mostram alguns dos problemas que podem ser abordados nesta fase:

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE HOTFORMING – PRIMEIRA FASE:**

O uso das simulações computacionais do processo de *hotforming* pode ser dividido em duas fases, a serem aplicadas em etapas distintas do desenvolvimento da peça e do processo com diferentes objetivos.

Em uma primeira etapa é necessário que a peça seja projetada de forma a tornar viável a sua produção por meio desta tecnologia de fabricação, e para isso é utilizada a simulação do processo idealizado para identificar e resolver problemas potenciais através de modificações da geometria tanto do produto quanto das ferramentas, além de se definir o ajuste mais adequado dos parâmetros do processo em si. Nesta primeira etapa o modelo de simulação utilizado pode ser simplificado visando-se ganhar agilidade e economizar tempo de cálculo, permitindo a execução de uma maior quantidade de testes necessária para se desenvolver o melhor processo uma vez que a quantidade de testes e consequentemente de simulações realizadas pode chegar às dezenas para cada projeto.

Entre as simplificações possíveis

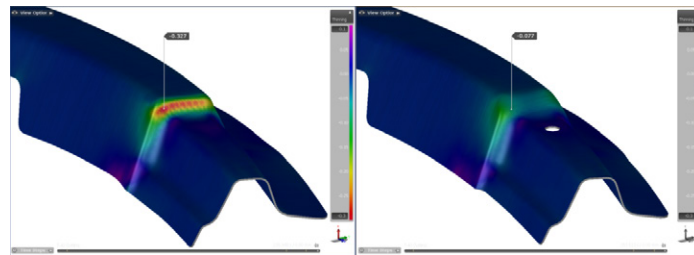


Figura 6A: Afinamento excessivo corrigido através de modificação da geometria do produto.

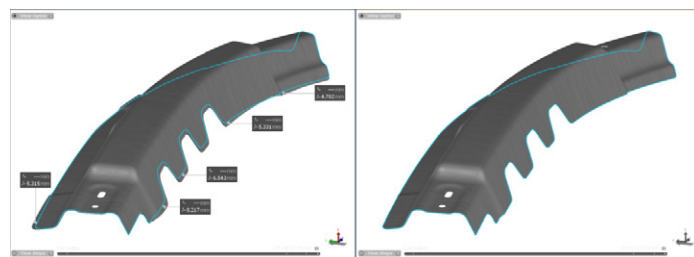


Figura 6B: Desvios dimensionais corrigidos com ajuste do contorno do blank.

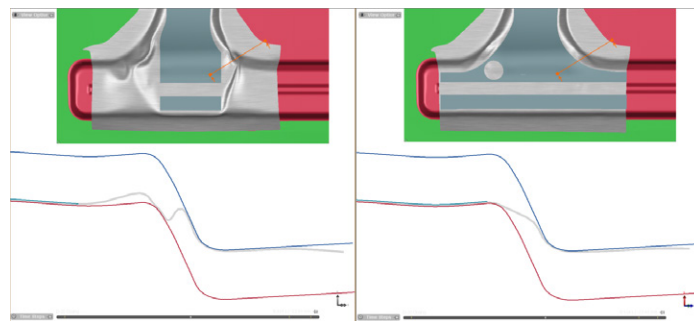


Figura 6C: Enrugamento da chapa corrigido através de modificação do pisador interno.

# ABC 2020

## 2º ABINFER BUSINESS CENTER FEIRA FEIMEC 2020

SÃO PAULO / SP  
5 A 9 DE MAIO DE 2020



Convite exclusivo para **ferramentarias**

**280 m<sup>2</sup>**

de área total

**20**

células de negócios

**6 m<sup>2</sup>**

de área por célula

Venha participar do **2º ABINFER Business Center – ABC 2020** em uma ampla área de 280 m<sup>2</sup> com a participação de ferramentarias e fornecedores da cadeia de fabricantes de ferramentais.

O evento será realizado no período de **5 a 9 de maio de 2020**, no São Paulo Expo Exhibition & Convention Center, na cidade de **São Paulo, SP**, onde estão confirmadas mais de 1.000 marcas expositoras e estima-se a presença de um público superior a 65 mil visitantes do Brasil e do exterior.

Não perca essa oportunidade de fortalecer ainda mais nossa cadeia produtiva e projetar um Brasil rumo a maturidade empresarial no setor ferramenteiro nacional e mundial.

ENTRE EM CONTATO

[relacionamento@abinfer.org.br](mailto:relacionamento@abinfer.org.br)

+55 47 3227-5290



Arena com sistema  
multimídia para 35  
participantes

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE HOTFORMING – SEGUNDA FASE:**

Após terminada a primeira fase, com os detalhes da peça e do processo já bem definidos, é necessário desenvolver o projeto detalhado da ferramenta dando especial atenção à operação de têmpera. É preciso garantir o resfriamento rápido e homogêneo da chapa de forma a se obter a transformação completa da micro-estrutura em martensita enquanto a prensa ainda está fechada, o que não apenas permite que se obtenha a resistência adequada da peça como também evita eventuais distorções devidas à contração diferencial das outras fases do aço, como a perlita e a bainita, antes do resfriamento final. Para isso parâmetros de processo como a pressão de contato e a duração do ciclo de têmpera precisam ser definidos com muito cuidado, assim como a distribuição mais adequada dos canais de refrigeração da ferramenta.

Nesta etapa, portanto, as simulações precisam ser efetuadas com o máximo de cuidado, utilizando os parâmetros de cálculo que garantam a maior acurácia possível do solver e considerando todos os detalhes relativos aos coeficientes de atrito, forças aplicadas pela prensa, ciclos de aquecimento, distribuição de temperaturas nas ferramentas e dimensões e posicionamento dos canais de refrigeração. Isso, é claro, implica em maiores tempos de cálculo para cada simulação, mas como o conceito do ferramental já foi definido na etapa anterior em geral a quantidade de simulações necessárias até o término do projeto será bem menor e o maior tempo de cálculo das simulações nesta etapa final não costuma ser um impedimento para seu uso.

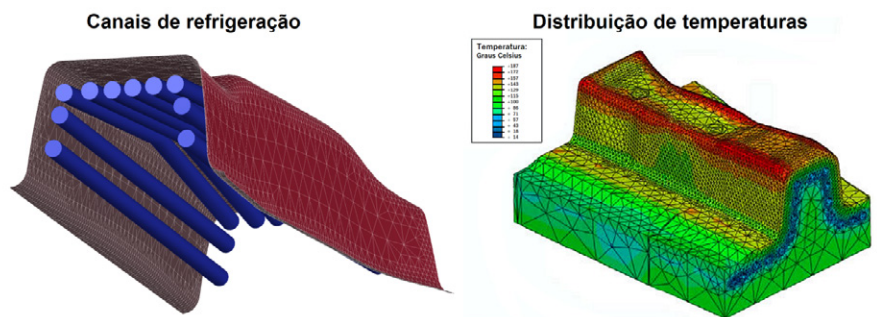
Os principais resultados que se procura nesta etapa são relativos à micro-estrutura da chapa após a têmpera, e para isso a distribuição dos canais de refrigeração deve ser definida de forma a garantir que esta micro-estrutura seja martensítica em todas as áreas deseja-

das da peça. Para se garantir a acurácia deste cálculo é fundamental a consideração da distribuição da temperaturas nas superfícies das ferramentas, que é um dos fatores a definir a taxa de troca de calor destas com a chapa e consequentemente a velocidade de resfriamento desta. Os ciclos de aquecimento e resfriamento também devem ser considerados, principalmente entre a ativação inicial da linha e o ponto em que se atinge equilíbrio e as temperaturas passam a variar de forma estável. Tudo isso exige a utilização de uma malha de elementos finitos sólida para as ferramentas no modelo de simulação, em contraposição à malha de elementos planos das ferramentas dos modelos mais simplificados em que a temperatura das superfícies é especificada ao invés de calculada (a malha da chapa é sempre plana). As imagens da figura 7 mostram exemplos de modelos com os canais de refrigeração conforme defini-

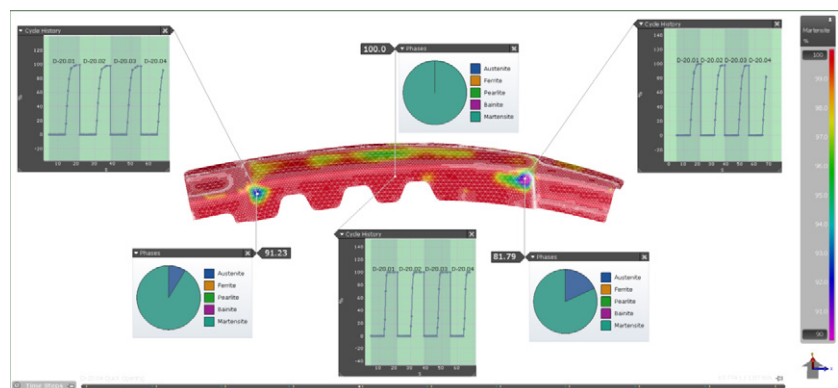
dos pelo usuário, bem como da malha sólida utilizada para representá-los e a distribuição de temperaturas obtida após o cálculo.

Este tipo de modelo está disponível em diversos *softwares* de simulação, sendo que nos mais avançados sua geração e o cálculo dos efeitos do escoamento do líquido refrigerante são transparentes para o usuário. Um exemplo do resultado final obtido com estas simulações mais completas é apresentado na figura 8. Ela mostra a porcentagem de martensita obtida em cada região da peça ao longo de sucessivos ciclos de conformação e têmpera.

Os resultados estas análises finais permitirão confirmar a adequação do conceito do ferramental definido no projeto, incluindo a distribuição e diâmetro dos canais de refrigeração, fornecendo informações fundamentais para a realização do projeto final detalhado das ferramentas.



**Figura 7:** Modelos avançados de simulação do processo de hotforming, incluindo canais de refrigeração e cálculo da distribuição de temperaturas das ferramentas.



**Figura 8:** Porcentagem de martensita na micro-estrutura da peça final após a têmpera, em sucessivos ciclos de conformação subsequentes à partida da linha.



Vimos então neste trabalho que o processo de *hotforming* possui características que o tornam consideravelmente mais complexo do que a conformação tradicional à frio, devido às influências da temperatura e das diferentes fases pelas quais o material passa durante sua conformação, das limitações com relação à aplicação de cortes e da necessidade de se garantir um resfriamento rápido na etapa de

têmpera. Por isso o desenvolvimento de ferramentas para este tipo de processo pode ser bastante difícil, e o uso de simulações computacionais passa a ter importância fundamental.

E a aplicação das simulações de forma adequada, dividindo o trabalho em duas fases sucessivas e complementares com diferentes abordagens, permite uma aplicação mais prática e objetiva dos recursos disponíveis

nos softwares de simulação, facilitando a obtenção dos resultados mais importantes em cada etapa do desenvolvimento do ferramental de forma rápida e eficaz. Esta forma de trabalho possibilita a otimização das ferramentas de *hotforming* de forma sistemática, enfrentando os potenciais problemas na sequência em que eles precisam ser resolvidos com o mínimo dispêndio de tempo e recursos.



**Leandro Guimarães Cardoso:** Engenheiro mecânico formado pela Universidade de Brasília com pós-graduação em análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos na UFRJ-COPPE, com 30 anos de experiência na área de engenharia de desenvolvimento de produtos, implantação de sistemas CAD/CAE/CAM, análise estrutural, simulação de processos de manufatura e de linhas discretas de produção, tendo utilizado pessoalmente e supervisionado a implementação e aplicação destas tecnologias em diversas empresas dos setores automotivos, de autopeças e outros. Trabalha atualmente na AutoForm do Brasil como supervisor da área técnica, responsável pelas atividades de pré-venda, treinamentos e suporte técnico aos usuários dos programas da empresa.

## A melhor solução para proteção contra corrosão e abrasão

Camada uniforme dispensando retrabalho posterior  
 Dureza até 68 hrc  
 Camada de 1 até 150 micras  
 Auto Lubrificante

Níquel Duro - Químico  
 Níquel - Lub  
 Anodização Dura  
 Níflon



**Super Finishing**



ageproducao



Níquel Duro Químico Níquel Eletrolítico

