

# NOVOS CONCEITOS DE PÓS-PROCESSAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE RUPTURA

POR ADILSON CALMONA DUTRA

As simulações computacionais estão cada vez mais presentes nas empresas de manufatura no mundo atual, e o segmento específico da estamparia não é uma exceção. Pensando nisso, este artigo tratará sobre a importância do pós-processamento dos resultados obtidos nas simulações dos processos de conformação de chapas metálicas.

É necessário ter em mente que não existe somente um procedimento para análise de pós-processamento, cada empresa adota seus softwares de preferência e uma maneira própria para aprovar uma simulação. Para permitir a avaliação adequada dos resultados das simulações de conformação de chapas os softwares de CAE trazem diversas funções para auxiliar na identificação de eventuais problemas como rupturas, rugas, corrida de chapa, análise da qualidade das superfícies, "springback", corrida de raio e etc. Neste texto serão abordadas especificamente as diferenças e os novos conceitos oriundos do Diagrama de Conformabilidade (*Formability Diagram* ou FLD) Avançado.

## ► CONCEITOS BÁSICOS

Antes de mostrar as diferenças entre o antigo gráfico FLD e o FLD avançado é importante explicar como os pontos que dão origem a este gráfico são gerados. O FLD é um diagrama do limite de conformabilidade do material determinado a partir do estado de estiramento da chapa. As medições para o levantamento dos pontos são feitas através do ensaio Nakajima, no qual são aplicadas marcações de circunferências aos corpos de prova as quais após sofrerem uma conformação se transformam em elipses, que permitem a

determinação do estiramento nas duas direções principais. Os dados coletados são determinados a partir dos diâmetros maior e menor destas elipses.

No exemplo abaixo pode-se ver os diferentes corpos de prova do ensaio Nakajima que produzem diferentes estados de deformação. Se o corpo de prova for conformado até que ocorra a verificação do início da ruptura um estado crítico de deformação pode ser determinado.

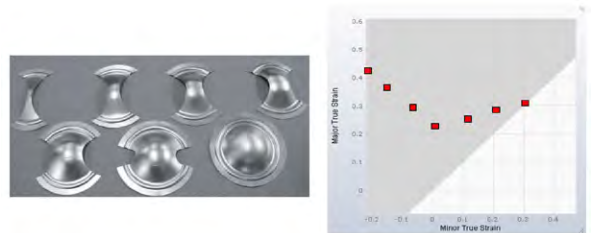


Figura 2: Levantamento da Curva Limite de Conformação

A curva ajustada entre estes pontos de falha (em preto) define o Diagrama Limite de Conformação, e qualquer ponto acima dela é mostrado em vermelho no pós-processamento realizado pelo software. Então, quando a simulação apresenta um ponto vermelho, deve-se interpretar que aquela região está sofrendo uma ruptura. Já a região abaixo da curva pode ser dividida em diversas áreas que representam diferentes estados de estiramento da chapa ainda não rompida.

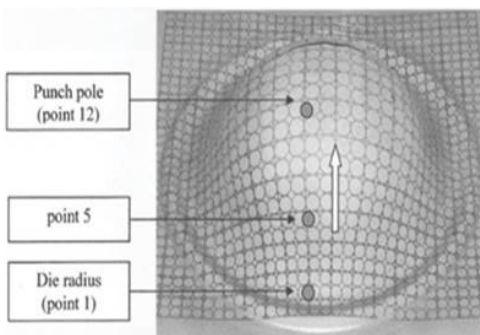


Figura 1: Corpo de prova para ensaio Nakajima

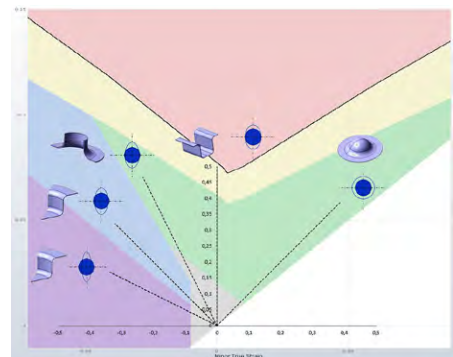


Figura 3: Diagrama FLD

# AutoForm

A tecnologia de ponta da AutoForm compreende toda a cadeia de processos de montagem de carrocerias brutas

Devido às variações das propriedades do material de diferentes lotes e aos limites de precisão da própria medição durante a determinação da curva, os softwares utilizados para as simulações de conformação de chapas assumem uma margem de segurança, geralmente de 20% (valor que pode ser modificado pelos usuários) para a determinação do início da ruptura. Esta margem de segurança é representada pela cor amarela logo abaixo da curva FLD.

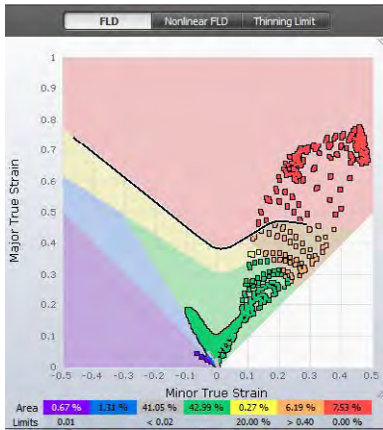


Figura 4: Pontos de Ruptura

## ► O DIAGRAMA FLD NÃO LINEAR

Contudo, nem todos os pontos de uma peça real apresentam o mesmo histórico de deformação que ocorre no ensaio Nakajima utilizado para o levantamento do Diagrama Limite Conformação. Dependendo da geometria da peça e dos detalhes do processo alguns pontos podem possuir um histórico de deformação não linear. Esses pontos não podem ser analisados usando o ensaio Nakajima padrão como referência, isto é, esses pontos podem possuir efeitos na estrutura do material que mudam, muitas vezes de forma radical, a resistência da chapa à ruptura.

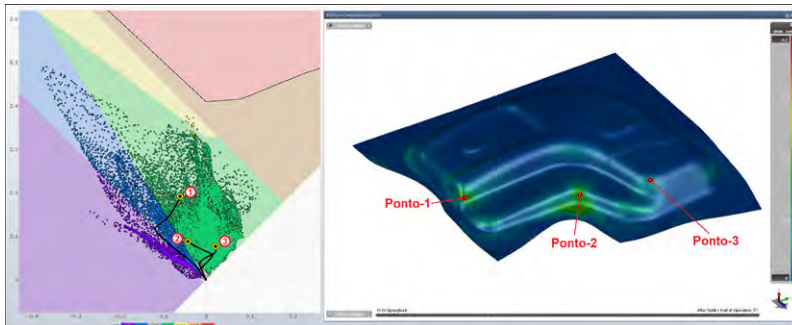


Figura 5: Comportamento não Linear

Esse comportamento já foi identificado pela maioria dos softwares de simulação, que incluíam ajustes para considerar a influência dos caminhos de deformação ao avaliar o início da ruptura. Alguns softwares nomeiam este tipo de análise de FLD não linear.

O levantamento dos dados para o ajuste desse diagrama se dá usando corpos de prova pré-deformados e do desenvolvimento de um algoritmo que prevê o comportamento do FLD no caso de deformações não lineares em função das propriedades básicas do material. Essas deformações não lineares não são previstas através do ensaio Nakajima padrão e é portanto necessário realizar um estudo da pré-deformação, que pode ser aplicada por exemplo através de estágios iniciais de repuxo com ferramentas de formas adequadas. Os corpos de prova então podem ser posteriormente cortados com as orientações necessárias para definir diversas combinações entre as deformações principais.

Alguns pesquisadores conseguiram através do seu trabalho definir matematicamente o comportamento não linear da curva FLD a partir dos dados destes ensaios, e isso permite prever um "FLD equivalente" para cada histórico de deformação.



Os Softwares da AutoForm suportam toda a cadeia do processo de montagem de carrocerias desde sua análise de viabilidade inicial, passando pela engenharia de processos e toda a sua cadeia de produção. Usando o AutoForm Assembly é possível melhorar os processos de montagem, alcançando os níveis desejados de qualidade e repetibilidade da carroceria desde a fase inicial de sua cadeia de processos.

## Endereço:

Av. Francisco Prestes Maia, 275 – salas 11 e 12  
Centro de São Bernardo do Campo – SP  
Telefone: (11) 4121-1644  
E-mail: info@autoform.com.br

www.autoform.com

**AUTOFORM**  
Forming Reality

Esse trabalho científico foi incorporado ao estágio de pós-processamento do software utilizado para escrever esse artigo, isto é, neste software o diagrama principal continua tendo sua curva nominal oriunda do ensaio Nakajima padrão mas para cada ponto da peça é considerado o FLD equivalente. No exemplo abaixo a curva nominal é indicada pela cor vermelha, mas pode-se ver que para dois diferentes tipos de pré-deformação o FLD equivalente é diferente, indicando um resultado distinto.

Na versão anterior do software, por vezes um determinado ponto indicava ruptura quando era analisado pelo FLD convencional, mas podia-se notar que este ponto possuía um forte comportamento não-linear. Quando este mesmo ponto era analisado através da "FLD non-Linear", não mostrava ruptura. Esse tipo de avaliação é mais trabalhosa e pode levar a um resultado ambíguo.

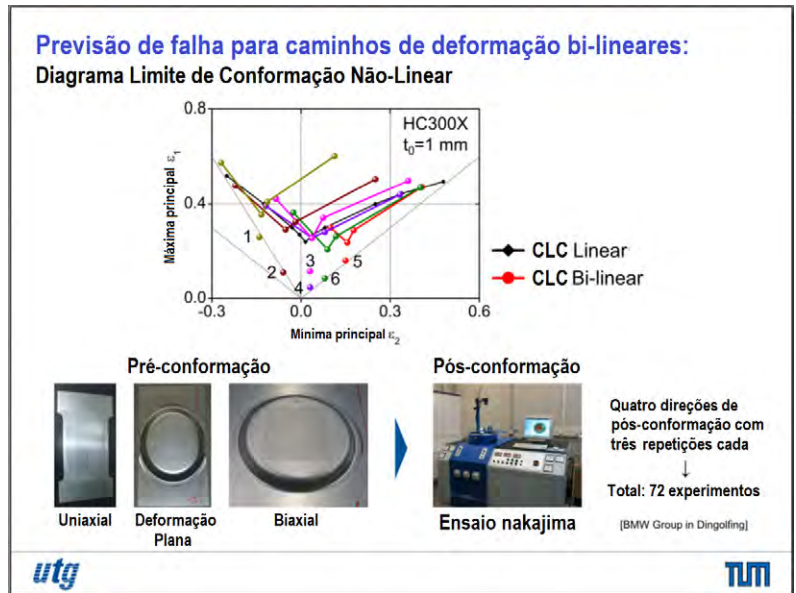


Figura 6: Ensaio para obtenção do Diagrama Limite de Conformação não-Linear

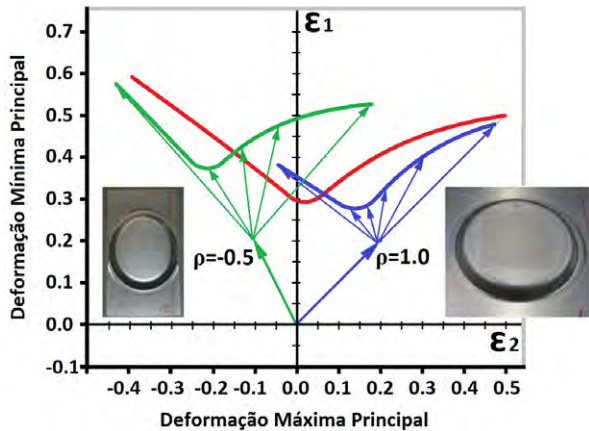


Figura 7: CLC Equivalente

Na nova versão do software a aplicação do Diagrama FLD Avançado torna a avaliação do comportamento da chapa ao estiramento mais simples e direta, mesmo no caso de históricos de deformações não lineares. Toda a informação necessária está disponível em um único diagrama de fácil interpretação.

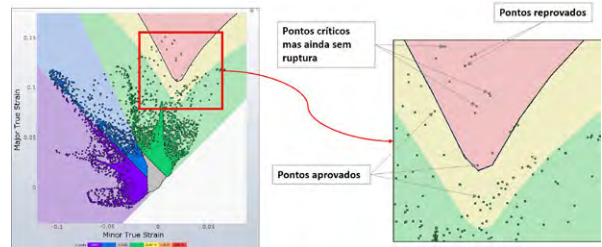


Figura 9: FLD avançado

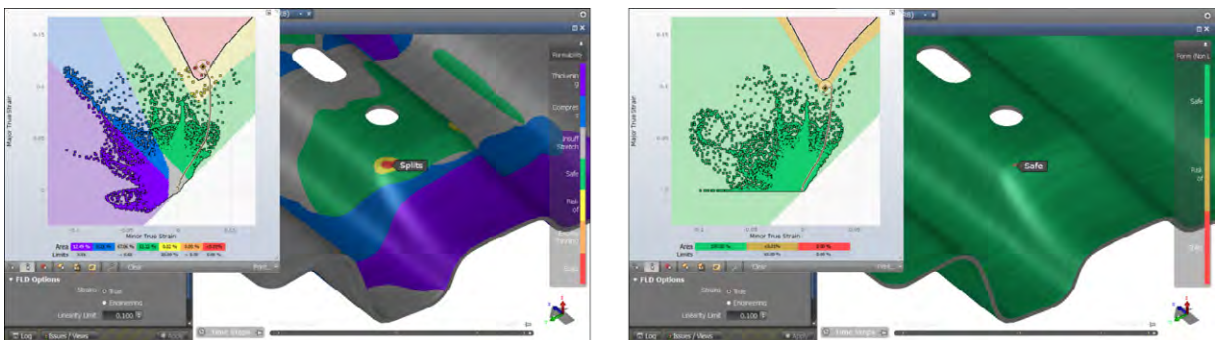


Figura 8: CLC Divergência FLD e FLD Non-linear

No Diagrama FLD Avançado o usuário passa a considerar a cor dos pontos em si como referência para o estado de estiramento da chapa, sendo a cor do fundo relativa apenas ao FLD nominal.

#### ▶ OUTROS CRITÉRIOS DE FALHA

O diagrama FLD avançado é focado em apontar o surgimento de falhas na chapa em função das deformações de estricção calculadas em sua superfície média, que é basicamente o que se pode detectar com o ensaio Nakajima. Para avaliar os outros tipos de falhas que podem acontecer durante o processo de conformação, outras ferramentas

estão disponíveis. Esses mecanismos adicionais de falha são a fratura de superfície, a falha por deformação uniaxial, a trinca por cisalhamento puro e a trinca de borda.

Estas outras formas de falha ocorrem quando a chapa é submetida a uma forte flexão, cisalhamento muito elevado no plano, trinca de borda ou compressão na direção da espessura. O *software* utilizado implementou o modelo de fratura tridimensional ampliado de Hosford-Coulomb para representar estes mecanismos de falha. Este modelo cobre os quatro casos citados acima, e para fins de simplificação e familiaridade são representados por sua projeção no plano de deformações principais usado pelo diagrama FLD.

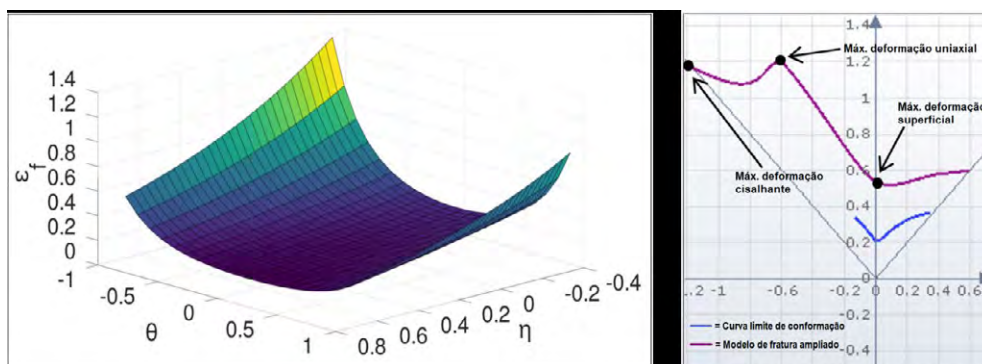
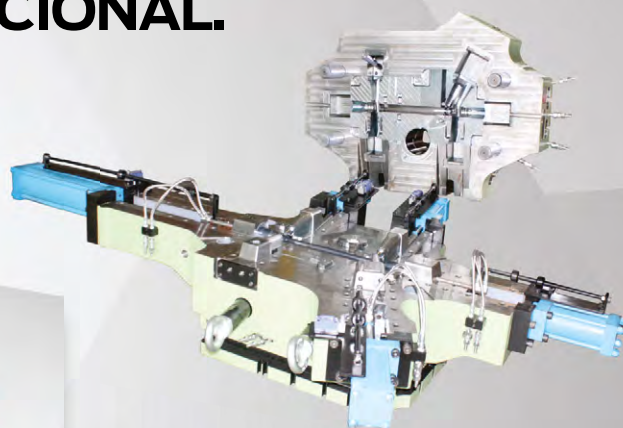


Figura 10: Modelo de Fratura Tridimensional de Hosford-Coulomb

## IMM. TECNOLOGIA COM CAPACIDADE OPERACIONAL.



**IMM**  
MOLDES E MATRIZES

+55 47 3402.3100  
[www.indmm.com.br](http://www.indmm.com.br)

Para que essas condições possam ser detectadas nas simulações, elas dependem das propriedades associadas aos materiais, e o software testado introduziu uma tabela de recomendação sobre quando se devem utilizar parâmetros medidos experimentalmente ou quando se pode utilizar uma aproximação calculada diretamente pelo gerador de material do próprio software.

Material Type	Bending ratio	Advanced Formability	Surface Failure
Aluminium	All ratios	Always	Estimate fracture curve and refine if necessary
Mild/Medium Strength steel ( $R_m < 500MPa$ )	$R/t > 1$		Not critical
Mild/Medium Strength steel ( $R_m < 500MPa$ )	$R/t \leq 1$		Mostly not critical. If necessary measure (at least) the bending limit. (Estimation not recommended)
High/Ultra High strength steel ( $R_m \geq 500MPa$ )	$R/t > 2$		Estimate fracture curve and refine if necessary
High/Ultra High strength steel ( $R_m \geq 500MPa$ )	$R/t \leq 2$		Critical for surface failure. Measurement of (at least) the bending limit recommended.

Figura 11: Tabela de recomendação

► FRATURA DE SUPERFÍCIE

A fratura de superfície geralmente ocorre quando a chapa é dobrada em um raio muito pequeno. Isto induz uma tensão de flexão muito elevada em sua superfície, o que produz uma trinca. Esta trinca pode se propagar e gerar uma ruptura da chapa ou levar a uma falha quando o componente estiver em operação. Para avaliação da tendência deste tipo de fratura no software testado o usuário deve definir a relação de flexão mínima permitida no arquivo de material, utilizando resultados de ensaios ou valores estimados.

Para alguns materiais a estrutura se altera quando a tensão superficial ultrapassa o limite da curva FLC, mesmo quando o raio de dobra não é demasiadamente pequeno, gerando o efeito conhecido como “casca de laranja”. Isso ocorre devido ao material estirar tanto no plano que começa a contrair na direção perpendicular à espessura, e como ele não é perfeitamente homogêneo a contração também não é, criando esses poros na superfície da chapa.

O critério *Surface Failure* do software indica a ocorrência de ambos os tipos de problema durante a conformação.

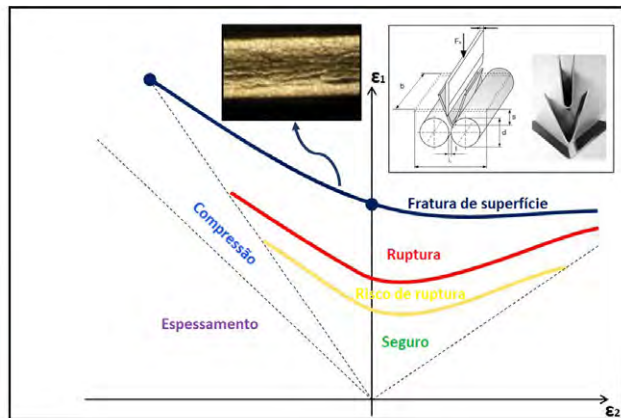
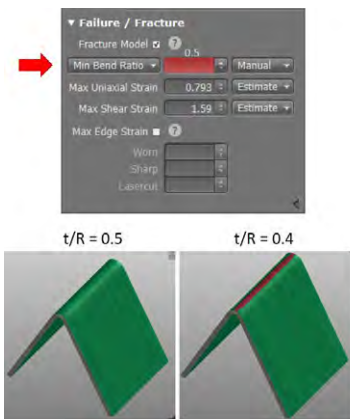


Figura 12: Raio mínimo de dobra

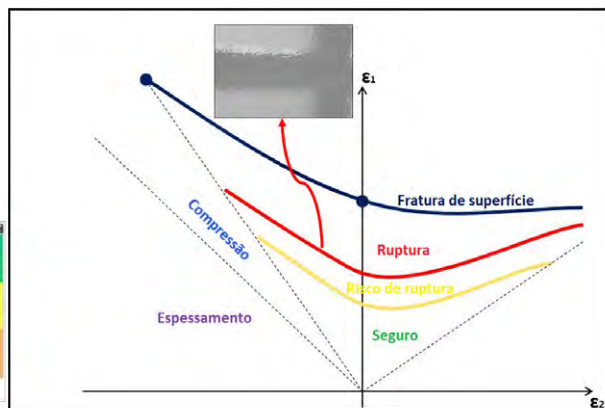
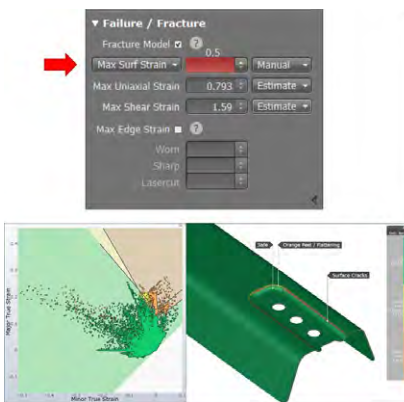


Figura 13: Max Surf Strain

► **DEFORMAÇÃO UNIAXIAL**

Outro critério é a falha por deformação uniaxial. Ela acontece nos casos onde a chapa é submetida a intensos esforços de flexão, o que estabiliza as deformações planas mudando o comportamento do material no diagrama FLD e levando ao aumento da sua resistência com relação aos esforços planos. Neste caso não se pode utilizar o diagrama FLD tradicional, pois a região em que acontece a deformação não se comporta mais como plana e sim como uma região de flexão e a chapa se rompe apenas ao atingir o limite de deformação uniaxial dado pelo modelo de fratura ampliado.

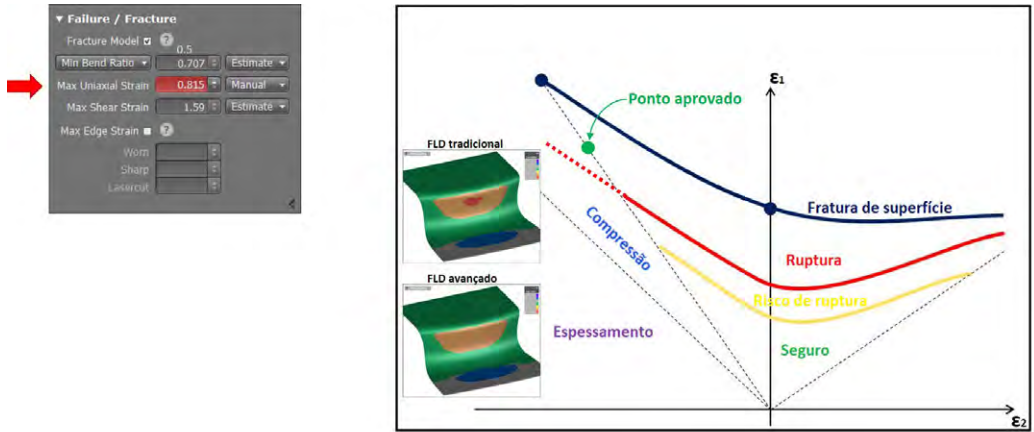


Figura 14: Deformação máxima uniaxial

► **FALHA POR CISALHAMENTO**

A falha por cisalhamento ocorre quando, por exemplo, temos a borda do produto e não há nenhuma tensão ou deformação no sentido perpendicular a ela pela ausência de material. Desta forma acontece uma tração unidirecional apenas no sentido tangencial à borda, levando a chapa a sofrer um cisalhamento puro, o que pode gerar uma trinca. Essa falha pode ser prevista pelo parâmetro “Max Shear Strain”.

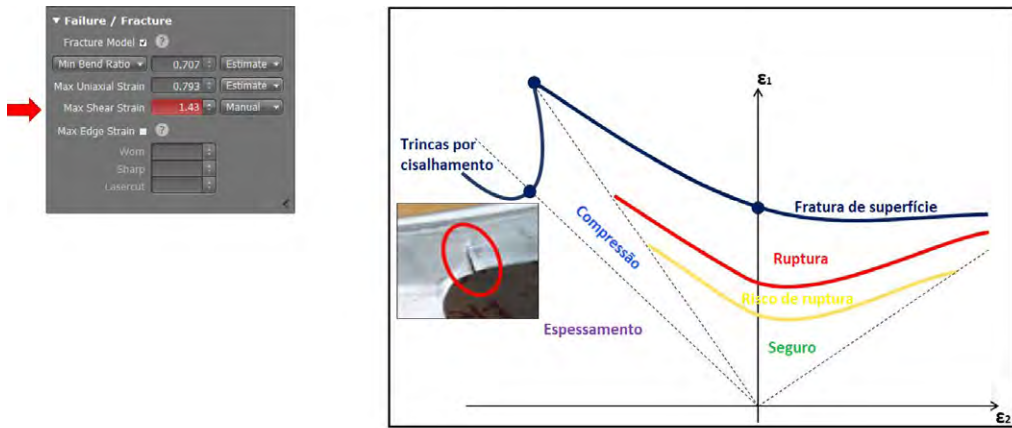


Figura 15: Deformação máxima de cisalhamento

Ainda dentro da análise de ruptura, muitos usuários precisam avaliar eventuais trincas geradas pela conformação da própria borda da chapa efetuada após o corte, trincas estas que são resultantes do estado de deformação uniaxial que se desenvolve na borda da chapa após a conformação e da própria qualidade do corte em si. Um corte irregular leva ao surgimento de micro trincas ou rachaduras na borda do corte, que produzem concentrações locais de tensões levando à ocorrência da falha um pouco mais cedo do que o indicado pelo diagrama FLD.

O critério chamado “Edge Cracks” auxilia na análise destas rupturas por trincas de borda. Ele permite que sejam analisadas trincas produzidas por três tipos de condições de corte: A laser, por cisalhamento com ferramenta afiada e com ferramenta já desgastada. Para determinar os fatores de correção para estas três condições deve-se levar em conside-

ração como referência o limite de conformação à tensão uniaxial. Essa tensão pode ser encontrada prolongando a fronteira entre a região segura e a de compressão até o FLD e interceptar a curva CLC, tomando-se então o valor no eixo y. Esse valor deve ser multiplicado pelos fatores apresentados na tabela abaixo da imagem (valores apenas sugestivos, devem ser calibrados com resultados práticos).

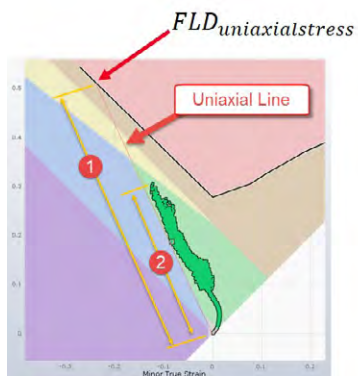


Figura 16: Levantamento FLD uniaxial

► **CONCLUSÃO**

O novo Diagrama de Conformabilidade Avançado incorporou em uma única curva os critérios de estampabilidade para caminhos de deformação lineares e não-lineares, tornando mais direta, simples e rápida a avaliação das condições de estiramento da chapa nas mais diversas condições do processo. A nova Curva de Conformabilidade Avançada também inclui a consideração dos efeitos de flexão da chapa na estabilização das deformações, tornando-se mais assertivos os resultados da avaliação mesmo em situações de estiramento que incluam fortes componentes de flexão.

A implementação da Curva de Fratura Ampliada permite agora identificar de forma simples e efetiva os efeitos de borda e das deformações fora do plano médio da chapa, tornando mais abrangente a gama de efeitos da conformação da chapa que podem ser fácil e rapidamente avaliados durante o pós-processamento e trazendo assim maior assertividade à avaliação dos resultados das simulações da conformação de chapas metálicas.

Corte a Laser:	0,95 x FLD uniaxial
Corte com Ferramenta Afiada:	0,85 x FLD uniaxial
Corte com Ferramenta Desgastada:	0,50 x FLD uniaxial

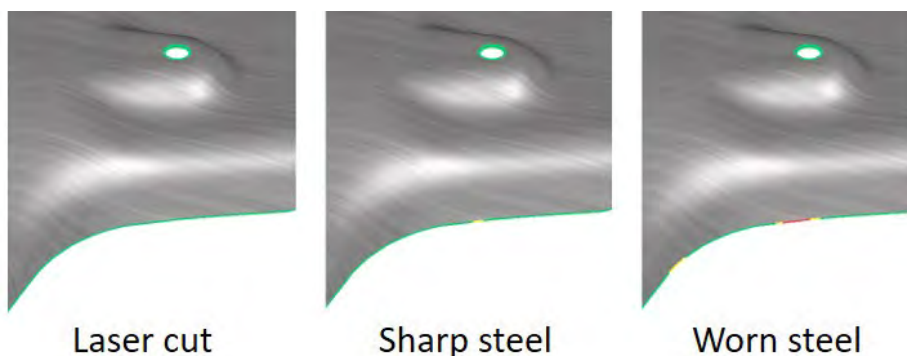
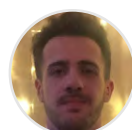


Figura 17: Edge Cracks



**Adilson Calmona Dutra**

Engenheiro Mecânica formado no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), membro da equipe técnica da AutoForm, atuando no suporte Técnico e com projetos de implementação da tecnologia.  
adilson.calmona@autoform.com.br