

ROBUSTEZ DA PRODUÇÃO DE ESTAMPADOS: O PAPEL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA A CONFORMAÇÃO DE CHAPAS — PARTE I

João Henrique Corrêa de Souza, TechnNova Consultoria em Engenharia e Inovação

Introdução

Quando o assunto é qualidade costuma-se pensar no resultado final do processo produtivo, ou seja, em características relativas ao produto. Em sistemas de produção modernos, porém, o conceito de qualidade, de um ponto de vista mais abrangente, está relacionado com o atingimento da máxima produtividade, à redução dos custos de produção e, finalmente, à qualidade do produto final. Na fabricação de produtos estampados pode-se verificar sem dificuldades que os três fatores mencionados anteriormente afetam um ao outro. Com efeito, um processo de produção não-robusto resulta em frequentes paradas de prensa, menor eficiência na estamparia (peças/ batida de prensa), alto número de peças rejeitadas, gerando mais sucateamento. Tempos de parada maiores levam ao aumento dos custos de produção. Portanto, é vital garantir a robustez do processo na conformação de chapas. Neste contexto, é de suma importância que os parâmetros de influência mais significativos para o resultado dos processos de fabricação sejam conhecidos já nas fases iniciais das etapas de desenvolvimento do produto.

O crescente uso de materiais de alta resistência traz consigo desafios adicionais em comparação com os materiais de baixa ou média convencionais, como por

exemplo custos maiores de ferramental e de manutenção. Devido à maior dificuldade de conformar materiais de alta resistência em comparação com os materiais convencionais, garantir uma maior robustez em todas as etapas do processo de fabricação é imprescindível para garantir a qualidade global do processo.

Hoje mais do que nunca, no planejamento da fabricação de componentes estampados a escolha do material a ser processado traz consigo consequências significativas nas tecnologias de processo que serão utiliza-

das para fabricá-lo, e conseqüentemente nos custos envolvidos. O tipo de material a ser conformado influencia todos os elos da cadeia de produção, como definição das etapas de fabricação e de conformação, projeto e fabricação das ferramentas e escolha das tecnologias de união e montagem de subconjuntos.

A importância da caracterização dos materiais na estampagem

A caracterização das propriedades das

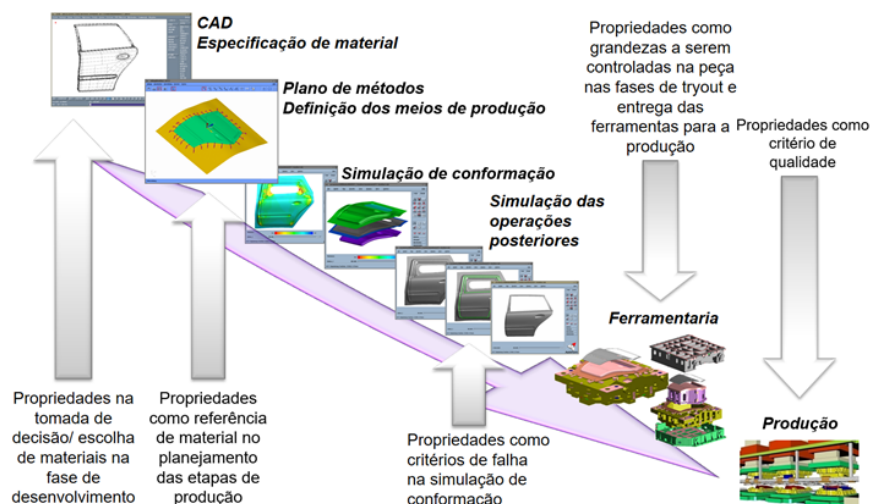


Figura 1. Diferentes funções das propriedades mecânicas das chapas durante as etapas do desenvolvimento de um componente estampado

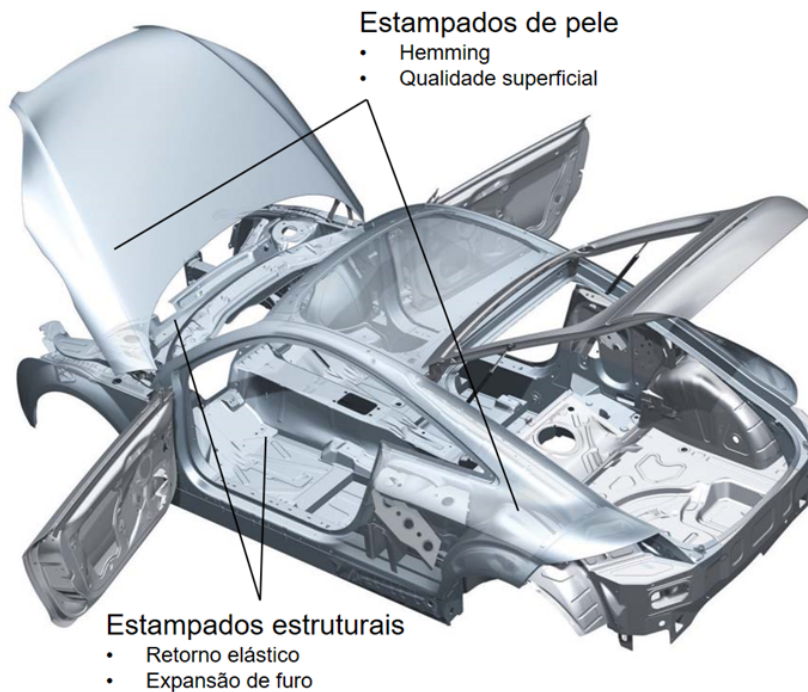


Figura 2. Elementos mais críticos na simulação de conformabilidade dos componentes estampados, onde a correta caracterização do material possui importância redobrada.

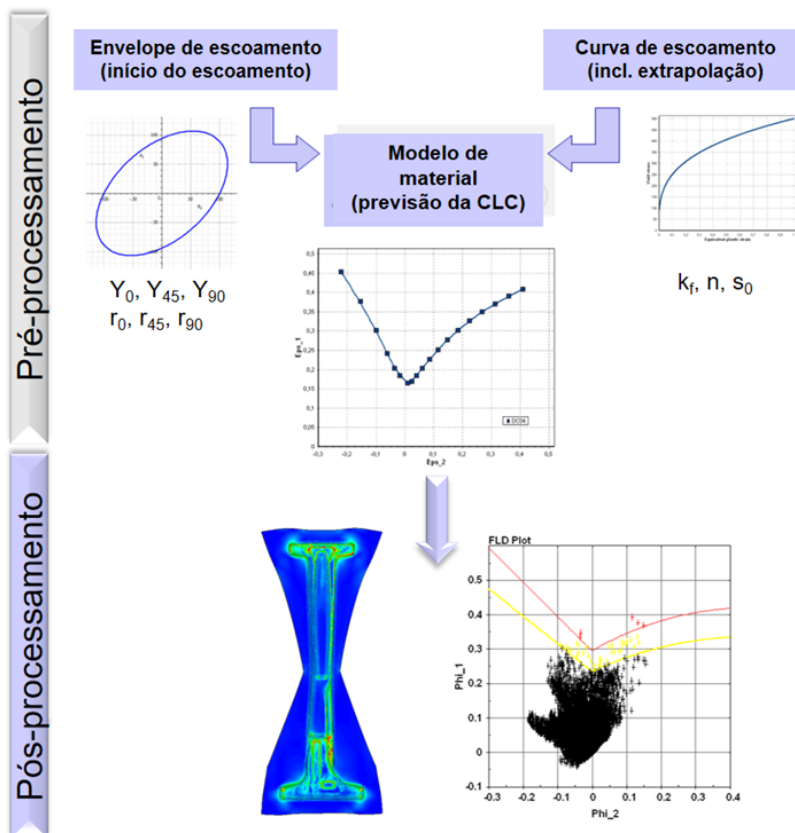


Figura 3. Utilização de modelos de materiais para a avaliação da conformabilidade de estampados

chapas costuma ser associado meramente ao seu comportamento durante a conformação, porém sua influência é muito mais ampla, como ilustrado na Figura 1.

Nas fases iniciais do desenvolvimento seu papel está relacionado principalmente às características de rigidez e resistência do produto final. Paralelamente, especificações geométricas relacionadas ao design do componente precisam ser consideradas. No primeiro caso as propriedades após a fabricação são relevantes, enquanto no segundo o foco está nos limites de conformabilidade dos materiais utilizados.

O Plano de Métodos define a sequência específica de etapas em um processo de produção. Ele lida com a forma (geometria) e o material (propriedades) do produto, de um lado, e as ferramentas e máquinas, do outro.

Nesta fase é determinado com quais processos o produto deve ser fabricado. Nesta etapa são criadas as superfícies de referência para os vários estágios de conformação e realizadas estimativas de tempos e movimentos em todas as operações. Esta fase é crucial para a construção de um processo robusto de fabricação. A alteração ou correção de um plano de métodos deficiente é normalmente associada a investimentos não previstos, aumento dos custos com matéria-prima e ferramental, paradas frequentes de prensa e outras consequências indesejadas.

Nas etapas de simulação a correta caracterização da conformabilidade do material é elemento essencial, principalmente para a obtenção de resultados confiáveis em regiões críticas como hemmings, expansão de furo, retorno elástico, e devvvvfeitos de superfície (Figura 2). Os critérios de falha utilizados dependem do tipo de modelamento do processo que está sendo simulado, assim como a escolha das ferramentas de avaliação da conformabilidade disponíveis.

Após a fase de construção e montagem das ferramentas, é na fase de tryout que as propriedades dos materiais voltam ao foco. O sucesso das medidas e correções executadas no tryout dependem do conhecimento e controle da variabilidade das propriedades do material, de forma que a entrega para a produção tenha sucesso.

Finalmente, na produção, as propriedades do material são inseridas nos planos de

controle e monitoramento do sistema de qualidade da fábrica e permanecem sendo utilizados como importantes elementos de referência para a investigação e resolução de problemas de manufatura.

Métodos para caracterização de materiais para estampagem

Em relação à caracterização da conformabilidade de chapas, foram desenvolvidas diversas metodologias, principalmente ao longo dos últimos 50 anos. Estas permitem determinar as propriedades elasto-plásticas e modos de falha em estados de deformação uniaxial e/ou multiaxial. O ensaio de tração convencional é o método mais difundido, porém, quando se quer representar de forma controlada estados de tensão/ deformação específicos, outros tipos de testes podem ser utilizados. Indiferentemente dos métodos de obtenção das propriedades, o objetivo é um só: criar um modelo matemático que reproduza corretamente o momento de início do escoamento e posteriormente a evolução da curva de escoamento com a deformação, nas diferentes condições de tensão/ deformação que ocorrem durante a conformação.

Os modelos que buscam uma melhor caracterização dos materiais ganharam um forte impulso com a evolução das técnicas de simulação numérica. Na simulação o modelo criado para o material é utilizado na etapa de pré-processamento, sendo um dado de entrada imprescindível para a obtenção de resultados confiáveis. Além disso, é também utilizado posteriormente na etapa de pós-processamento dos resultados obtidos, principalmente na avaliação de criticidade das diferentes regiões da peça, como mostra a Figura 3.

Caracterização dos limites de conformabilidade de chapas

A caracterização dos limites máximos de conformabilidade é de suma importância não só para a simulação numérica do processo de conformação, mas também, como já mencionado anteriormente, para a garantia da segurança e sucesso do processo real nas estamparias modernas. A Curva Limite de Conformação – CLC (Forming Limit Curve – FLC)

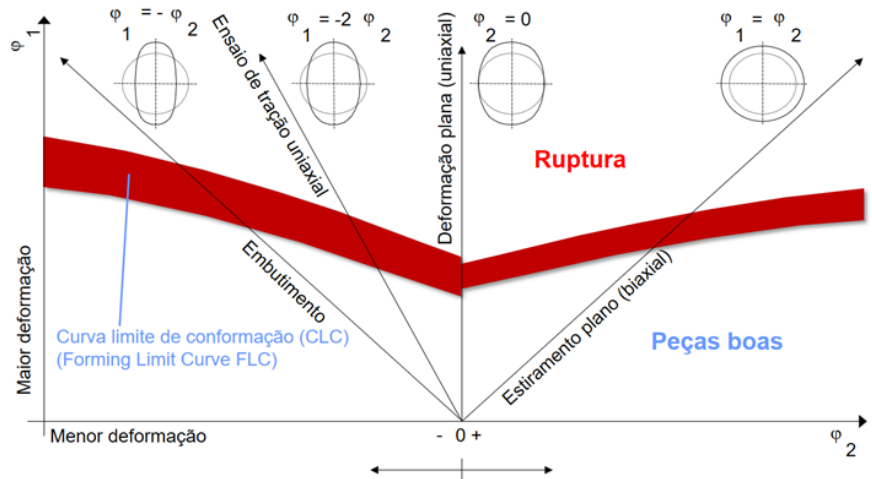


Figura 4. Representação do plano de deformações e da curva limite. A CLC é a principal ferramenta utilizada na avaliação de conformabilidade de estampados, tanto nas etapas de simulação quanto na avaliação da qualidade da peça pronta.

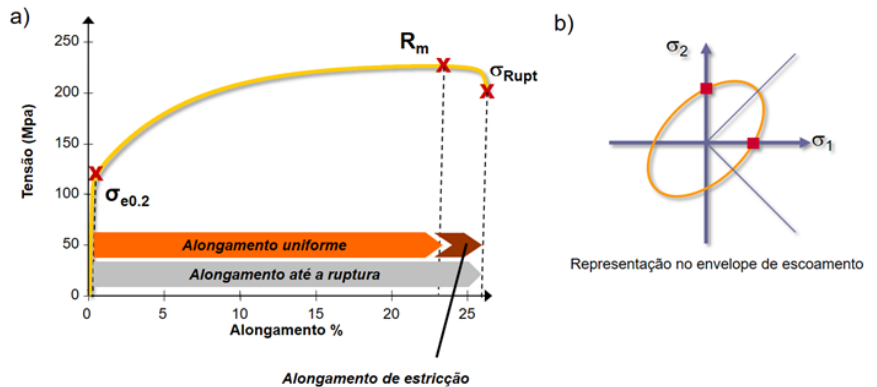


Figura 5. a) Curva do ensaio de tração e seus pontos importantes. b) Locais no envelope de escoamento que são representados pelo ensaio de tração.

Diagram – FLD) representa os limites de conformabilidade como consequência de estrição e instabilidade em um espaço plano de deformações, como mostra a Figura 4.

A região direita do plano de deformações representa situações onde a chapa está sendo submetida a tração nos dois sentidos do plano (ϕ_1 e ϕ_2 positivos). A região esquerda descreve casos onde uma das deformações é de compressão (ϕ_1 positivo e ϕ_2 negativo). A CLC é uma das ferramentas de visualização mais importantes para o desenvolvimento de processos de estampagem, pois permite visualizar o quão distante as diferentes regiões da peça estão em relação aos limites de conformabilidade do material (faixa vermelha

da Figura 4). A técnica para determinação da CLC é padronizada pela normas:

- ISO12004-1:2020 Materiais metálicos - Determinação das curvas limite de conformação para chapas e tiras - Parte 1: Medição e aplicação de diagramas de limite de conformação na estamparia.
- ISO12004-2:2021 Materiais metálicos - Determinação das curvas limite de conformação para chapas e tiras - Parte 2: Determinação das curvas limite de conformação em laboratório.

É importante ressaltar que a CLC só considera caminhos de deformação lineares.

No caso de caminhos de deformação não lineares os limites da curva podem ser significativamente alterados.

Além da ISO12004, outros ensaios práticos foram desenvolvidos ao longo do tempo na tentativa de representar diferentes posições no plano de deformações da CLC, e podem ser utilizados para a caracterização dos limites de conformabilidade de chapas. Os mais conhecidos estão listados abaixo:

- Ensaio de tração convencional
- Ensaio de tração com restrição lateral
- Ensaio de tração-compressão
- Ensaio de compressão empilhada
- Ensaio de cisalhamento (corpo de prova Pöhlandt)
- Ensaio de tração com corpo de prova Yoshida
- Ensaio Bulge
- Ensaio Nakajima (ISO12004)
- Ensaio Marciniak ((ISO12004)
- Ensaio de tração em corpo de prova em cruz
- Ensaio de dobramento

Nos capítulos que seguem os ensaios mencionados acima são explicados com mais detalhes, assim como o que cada um deles pode nos dizer sobre a conformabilidade das chapas.

Ensaio de tração convencional

A determinação das propriedades mecânicas através do ensaio de tração convencional (no Brasil padronizado pela ABNT NBR ISO 6892-1:2018) é a forma mais utilizada para caracterizar a conformabilidade de chapas, devido a sua facilidade e baixo custo de realização. As propriedades são utilizadas como base para simulação, projeto de componentes e avaliação de qualidade de fornecimento de chapas para a produção.

As propriedades que são normalmente obtidas através do ensaio de tração são (ver Figura 5a):

- Tensão de escoamento $\sigma_{e0,2}$
- Limite de resistência (ou resistência à tração) R_m

- Tensão de ruptura σ_{Rupt}
- Alongamento uniforme
- Alongamento de estricção
- Alongamento na ruptura
- Encruamento
- Anisotropia
- Módulo de elasticidade

Na Figura 5b é são mostrados os pontos correspondentes ao ensaio de tração em um plano de tensões, onde pontos sobre os eixos σ_1 e σ_2 representam estados de tensão uniaxiais.

A geometria da curva do ensaio fornece diversas informações e permite a comparação entre diferentes materiais. Por exemplo, materiais com patamar de resistência mais elevado (Figura 6a) normalmente apresentam uma conformação mais difícil, já que tensão de escoamento e limite de resistência são maiores (mais força é necessária), e outros parâmetros também são com isso alterados. Porém, a conformabilidade em si normalmente não é afetada. Como já mencionado, as forças de prensagem serão maiores. Muito importante é o retorno elástico que aumenta junto com a resistência. A ductilidade geralmente cai, já que maiores níveis de resistência estão associados a maior sensibilidade a trincas em regiões de borda. Em relação à performance do produto final, materiais de maior resistência apresentam maior potencial para redução de peso das estruturas veiculares, razão pela qual seu uso é crescente na indústria da mobilidade.

O aumento no alongamento uniforme representa maior conformabilidade (Figura 6b) e/ ou que o material possui uma maior reserva de alongamento, o que representa uma janela de processo ampliada em relação a um material com menor alongamento. O processo de conformação se torna mais seguro. É importante salientar aqui que o valor do alongamento após o início da estricção não deve ser levado em conta, já que o aparecimento de afinamentos na peça já significa que a qualidade está comprometida.

A capacidade de encruamento do material, ou seja o aumento da resistência mecânica que ocorre como consequência da deformação plástica, é representado pela inclinação da curva de escoamento

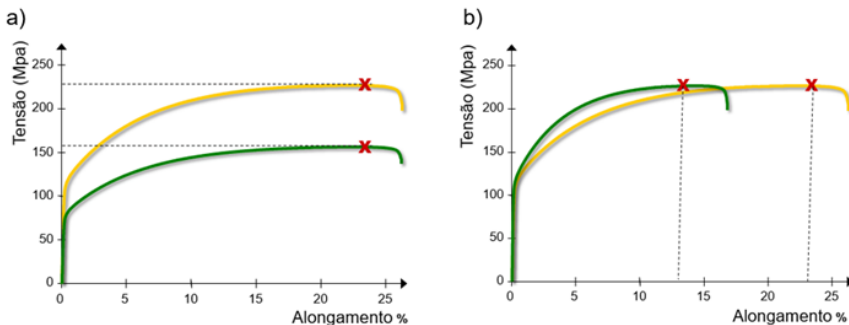


Figura 6. a) Materiais com alongamentos iguais e resistências diferentes. b) Materiais com resistências iguais e alongamentos diferentes

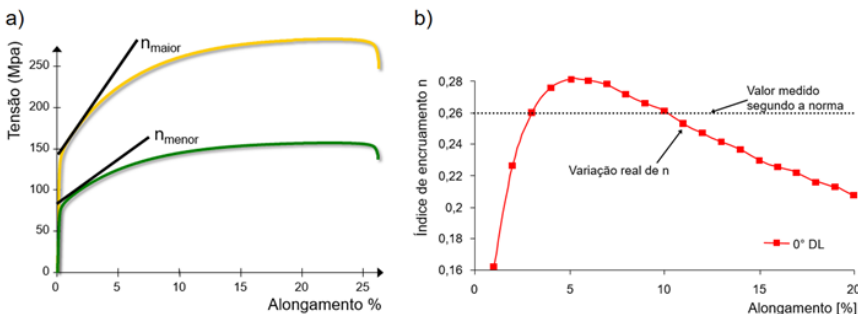


Figura 7. a) Dois materiais com diferentes índices de encruamento. b) variação real de n com alongamento


no ensaio de tração, como mostra a Figura 7a. O índice de encruamento exerce um efeito significativo na conformabilidade das chapas, permitindo uma melhor conformação principalmente em peças onde o modo dominante de deformação é o estiramento. É importante mencionar que apesar de se associar um valor de n único para cada material, em realidade ele varia com o alongamento, como mostra o exemplo da Figura 7b. Portanto, é importante quando se vai comparar materiais certificar-se que a norma utilizada é exatamente a mesma.

Indicadores da capacidade de encruamento do material são o índice de encruamento n e a diferença entre tensão de escoamento e limite de resistência (razão

$\sigma_e/2/R_m$). Um alto n resulta em uma maior migração da frente de deformação através da geometria da peça, além de uma distribuição mais homogênea das deformações (ver Figura 8). Também a tendência à formação da estrição é reduzida.

A anisotropia do comportamento plástico de um material, ou seja, sua dependência em relação à direção na qual se realiza o ensaio, é medida através da anisotropia normal, que é representada pela letra r . No ensaio de tração, r pode ser calculado como o quociente entre deformação na largura e deformação na espessura do corpo de prova (Figura 9a). Ou seja, a anisotropia normal é um indicador da tendência de uma chapa a perder ou reduzir sua espessura durante a deformação.

É desejável que o valor de r seja maior que 1. Na prática, isso significa que o material tende a fluir da largura e não da espessura, ou seja, tem uma menor tendência a redução de espessura, melhorando a conformabilidade do mesmo.

Outro parâmetro importante é a anisotropia planar, representado por Δr . Ela quantifica a variação de r no plano da chapa (ver Figura 9b). É desejado que Δr seja o mais próximo de zero possível, do contrário existe uma tendência maior ao chamado orelhamento (chapa flui mais para dentro da ferramenta em determinadas direções). Além disso as propriedades em geral da chapa terão diferenças maiores em relação à direção de laminação, o que é prejudicial ao processo (Figura 9c). 

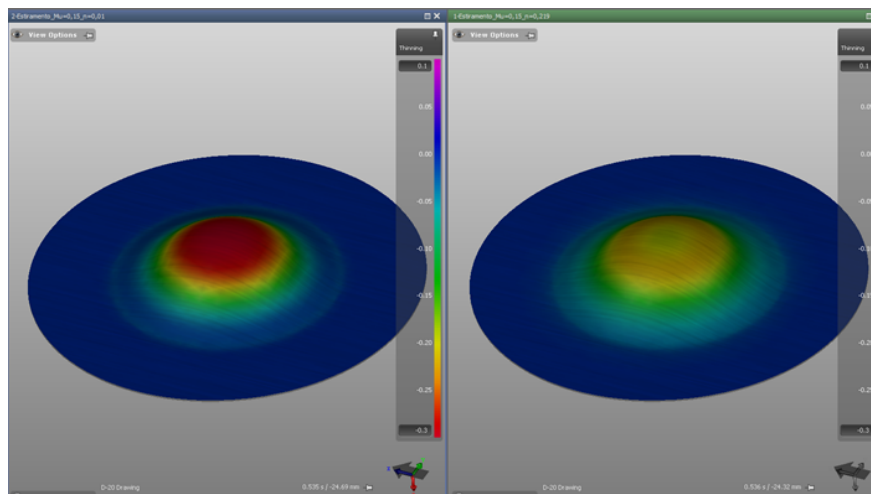


Figura 8. Modelo de simulação mostrando uma região em estiramento puro, à esquerda com $n=0,01$ e à direita $n=0,219$. As cores representam o afinamento sofrido na chapa

No próximo capítulo do artigo serão abordados os demais ensaios listados acima, bem como aspectos relativos a variabilidade das propriedades e sua influência nos resultados da simulação.

João Henrique Corrêa de Souza
TechnNova Consultoria em Engenharia e Inovação
www.technnova.com.br

a)

$$r = \frac{\varphi_{largura}}{\varphi_{espessura}}$$

b)

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

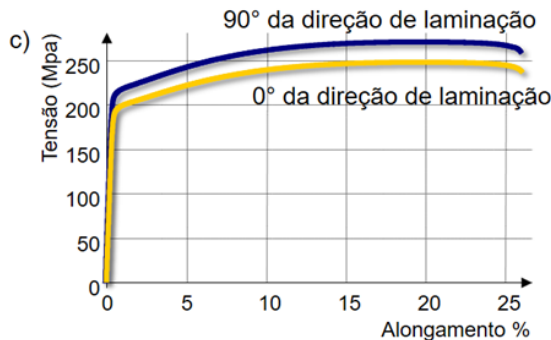


Figura 9. a) Definição de anisotropia normal, b) definição de anisotropia planar e c) diferenças nas propriedades da chapa quando medidas em diferentes direções.

LEIA ONLINE

INDUSTRIAL HEATING

BRASIL



A revista Industrial Heating é disponibilizada gratuitamente na área de PUBLICAÇÕES no site Portal Aquecimento Industrial, junto dos Artigos e Colunas mais relevantes sobre a indústria no Brasil e no mundo.

ACESSE

E CONFIRA ÀS PUBLICAÇÕES



Portal Aquecimento Industrial aquecimentoindustrial.com.br/publicacoes/