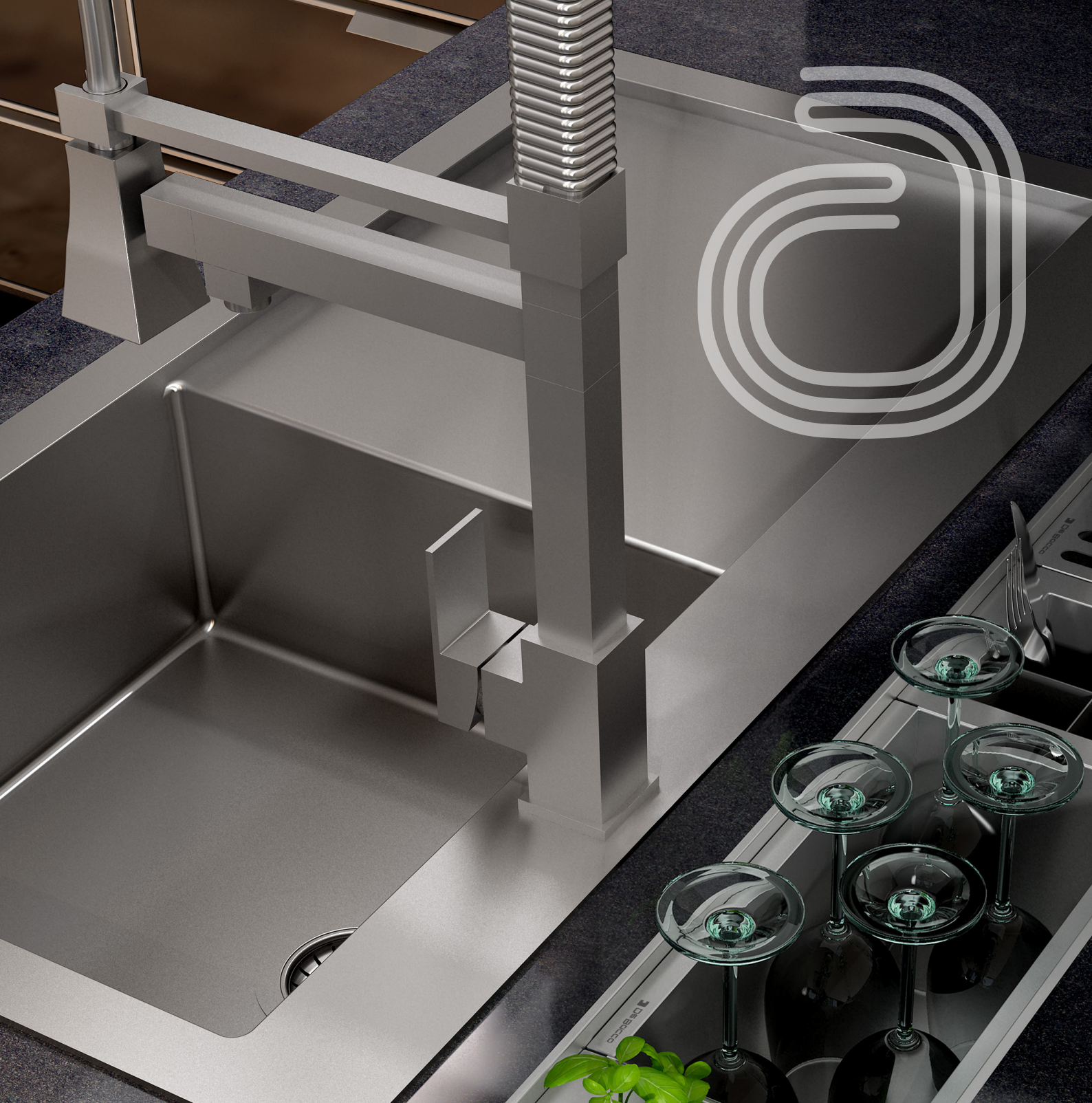




# Conformação

Processos: Estampagem por Embutimento e Estiramento

---

Cadernos Técnicos Aperam - volume 3

# Índice

## **Estampagem**

:: 1.1 Estiramento

:: 1.2 Embutimento

:: 1.3 Estampagem Combinada

:: 1.4 Conformabilidade

## **Principais características dos aços inoxidáveis na estampagem**

:: 2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

:: 2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

## **Propriedades Fundamentais x Estampabilidade**

:: 3.1 Efeito do alongamento uniforme na estampabilidade

:: 3.2 Efeito da anisotropia na estampabilidade

## **Conclusões**

## **Referências Bibliográficas**

## **Recomendações**



# Estampagem

O objetivo do processo de conformação é converter uma chapa metálica fina e plana na peça desejada, sem fratura ou afinamento local excessivo. Para isso, são utilizados um punção, uma matriz e um prensa-chapas.

Em geral os processos de estampagem são altamente eficientes, assegurando uniformidade ao produto, além de alto índice de produtividade e de aproveitamento da matéria-prima. As operações de conformação são normalmente complexas, mas em geral, podem ser descritas como se ocorressem numa sequência de etapas básicas.

Existem vários processos de conformação de chapas finas de metal, entre os quais podemos citar o estiramento, o dobramento, a cunhagem e a estampagem profunda.

Quando uma variação de espessura é provocada, denomina-se estiramento, e quando há uma pequena variação de espessura, é comum designá-la como operação de embutimento. O dobramento é um processo de conformação extensamente empregado por ser simples e pode ser realizado por esforços, em geral, abaixo do limite de escoamento plástico do material. Já o processo de cunhagem é quando o material (chapa) é comprimido entre duas faces da matriz, até sofrer escoamento plástico.



Este caderno técnico se concentra, principalmente, no estiramento e no embutimento por serem as operações mais empregadas na estampagem de peças, sejam elas pequenas ou grandes. São também os processos mais utilizados na conformação dos aços inoxidáveis.

Durante a estampagem, o material se deforma plasticamente. A chapa tem que “vestir” o punção e/ou a matriz, de modo a produzir a peça. A rede cristalina da chapa de metal se move sob ação de tensões cisalhantes que não produzem alteração de volume: o volume da chapa e o da peça são o mesmo, a despeito das superfícies totais de um e de outro serem diferentes.

Em todos os modos de estampagem, com exceção da cunhagem, as tensões, sejam elas trativas ou compressivas, ocorrem no plano da chapa.



## 1.1. Estiramento

A estampagem por estiramento é caracterizada por um estado biaxial de deformação, promovido por tensões trativas que são perpendiculares entre si e que operam no plano da chapa.

O blanque é fixado pelo prensa-chapas com pressão suficiente para impedir o seu arraste, garantindo que a chapa seja submetida somente ao esforço de tração. Em muitos casos são utilizados prensa-chapas ranhurados para que o material não flua para dentro da matriz, ou seja, para assegurar que realmente ocorra a deformação por estiramento.

Para o material ter bom comportamento em processos de estiramento é necessário distribuir as deformações de forma homogênea, retardando ao máximo o início da estricção (afinamento localizado) que o levará à ruptura.

As operações de estampagem complexas sempre envolvem estiramento. Painéis externos de automóveis são um bom exemplo. Partes abauladas, reforços alongados e nervuras são, em geral, produzidos por estiramento.

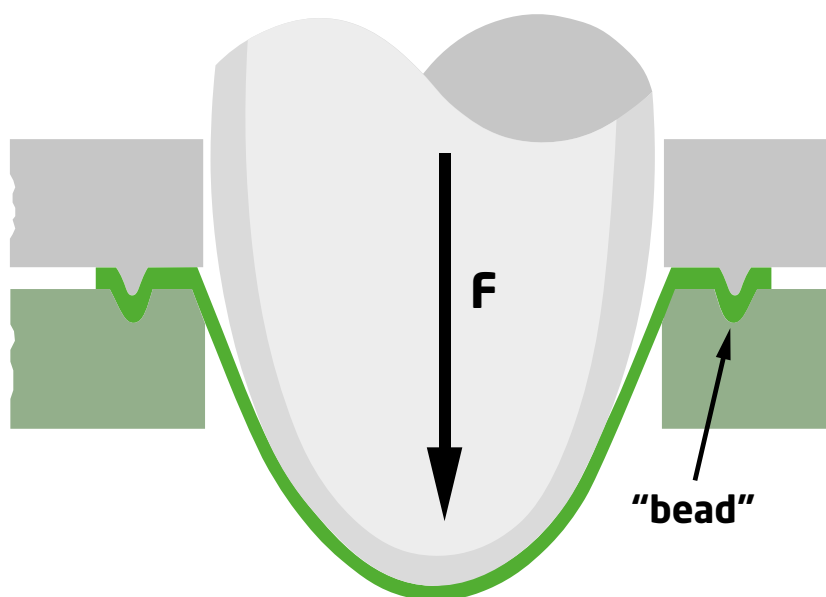


Figura 1 – Esquema de Estampagem por Estiramento



Exemplos de peças de aços inoxidáveis estampadas com os aços inoxidáveis austeníticos (3XX) e ferríticos (4XX).

## Peças estampadas em aço Inox

aperam



3XX



4XX



## 1.4. Conformabilidade

Para atingir elevada conformabilidade, o material deve poder:

- redistribuir a deformação o mais uniformemente possível;
- atingir altas deformações sem fraturar ou rasgar;
- suportar tensões compressivas (no plano) sem formar rugas;
- reter a forma após remoção da matriz;
- reter bom acabamento superficial na estampagem.

Ou seja, um material de boa conformabilidade ou deformabilidade é capaz de acomodar os diversos estados de deformação sem falhar (rasgar ou fraturar).





# Principais características dos aços inoxidáveis na estampagem

Nem todas as famílias de aços inoxidáveis se prestam às operações de estampagem com a mesma eficiência. Por suas propriedades mecânicas, os mais indicados são os aços austeníticos e os ferríticos.

## 2.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e, quando submetidos a algum tipo de conformação a frio, têm a capacidade de alterar sua estrutura cristalina, promovendo a formação de uma estrutura martensítica.

Essa alteração estrutural ocorre em todos os aços inoxidáveis austeníticos submetidos à deformação a frio. A taxa de formação da martensita, entretanto, varia em função da estabilidade da austenita apresentada em cada liga. Os aços inoxidáveis que apresentam menor estabilidade possuem elevadas taxas

de formação de martensita, o que pode acarretar, em muitos casos, uma perda de sua capacidade de conformação, principalmente pelo encruamento excessivo nos primeiros estágios de deformação, elevando as cargas de estampagem, sendo que em algum ponto a deformação irá superar a carga suportada pelo material, levando-o à ruptura.

Para corrigir essa perda na capacidade de conformação, os aços inoxidáveis austeníticos de maior estabilidade recebem a adição de certos elementos de liga. Essa operação resulta em aços de maior estabilidade, que apresentam uma taxa de formação de martensita induzida por deformação a frio mais adequada para estampagem mais profunda e complexa.

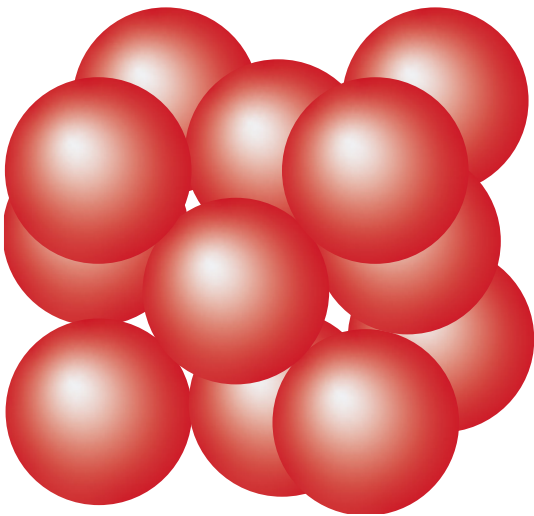


Figura 4 – Arranjo Estrutural CFC

## 2.2. Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma estrutura cristalina do tipo cúbica de corpo centrado (CCC). Diferentemente dos aços inoxidáveis austeníticos, os processos de conformação a frio não produzem alteração na estrutura cristalina dos ferríticos, o que confere a estes aços uma forte dependência de sua textura cristalográfica para se deformarem. Esta dependência fica mais evidente para processos de estampagem onde há o predomínio do embutimento.

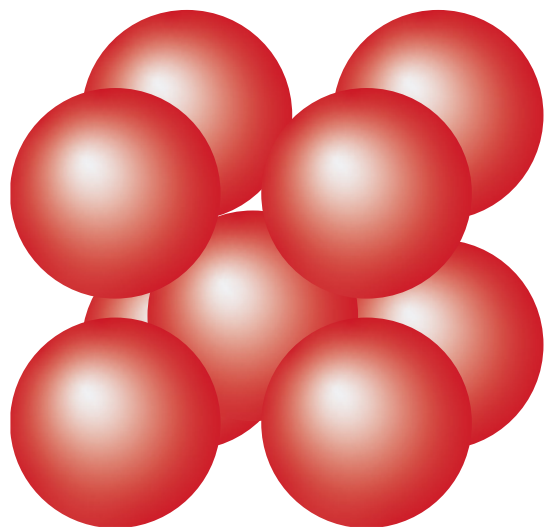
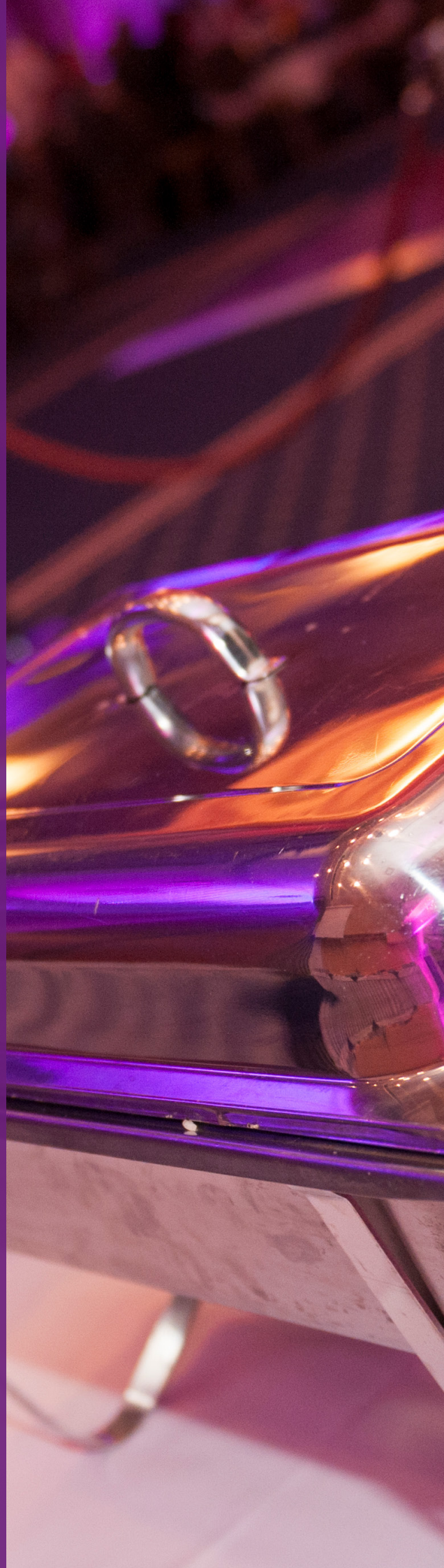


Figura 5 – Arranjo Estrutural CCC

# Propriedades Fundamentais X Estampabilidade

A influência das propriedades mecânicas do material na estampagem depende do modo de conformação. Ou seja, algumas propriedades têm um efeito muito mais pronunciado em um determinado modo de conformação do que em outro.

Por exemplo, o valor de anisotropia normal tem um efeito muito pronunciado no embutimento, enquanto o alongamento uniforme tem um efeito nítido no estiramento e menos pronunciado no embutimento.



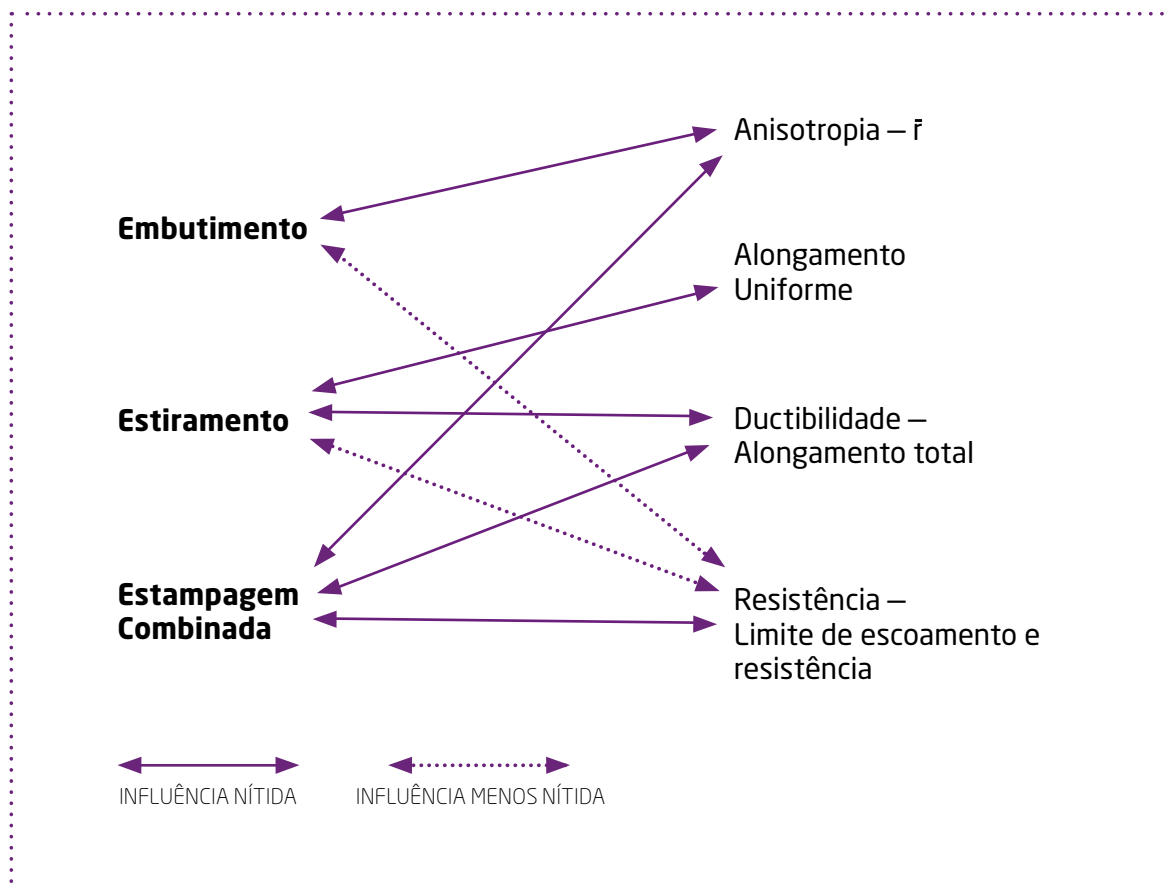


Figura 6 - Propriedades Fundamentais X Modo de Conformação

### 3.1. Efeito do alongamento uniforme na estampabilidade

A estampagem por estiramento provoca um aumento da área do **blanque** situada sob o raio do punção, através de um **estado biaxial de tração**. Isso significa que haverá necessariamente redução de espessura.

Então a capacidade do material de resistir à perda de espessura sem que ocorra instabilidade plástica, ou seja, estrição, vai determinar a altura da peça estampada sem fratura. De acordo com a teoria da plasticidade, quanto maior for o valor do alongamento uniforme maior será a possibilidade de se obter uma peça de maior profundidade / complexidade.

O alongamento uniforme pode ser obtido facilmente através da curva tensão x deformação que é obtida a partir do ensaio de tração. Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova padronizado a uma força trativa uniaxial (ou seja, que ocorre num único sentido da chapa), aumentando-a gradualmente até a ruptura do material. (FIG. 7)

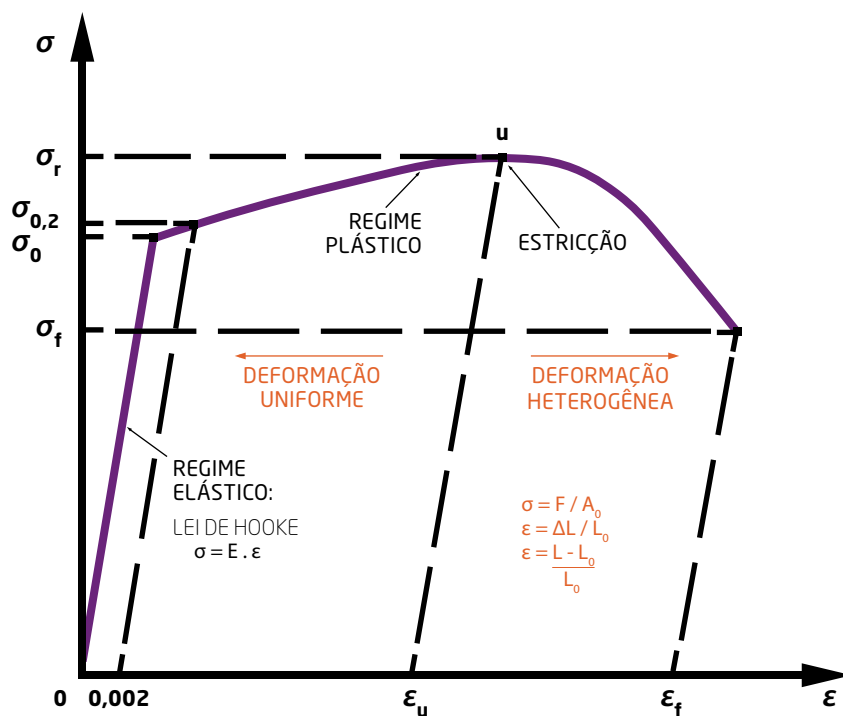


Figura 7 – Curva Tensão x Deformação

As diferenças entre os ferríticos e os austeníticos ficam patentes na comparação entre as curvas Tensão x Deformações obtidas para esses aços inoxidáveis. Nota-se que o limite de resistência dos austeníticos é bem superior ao dos aços inoxidáveis ferríticos, por isso é necessário utilizar prensas de maior capacidade para estampá-los.

O melhor desempenho dos aços inoxidáveis austeníticos em processos de estampagem por estiramento também provoca grandes diferenças no alongamento uniforme na comparação com os ferríticos.

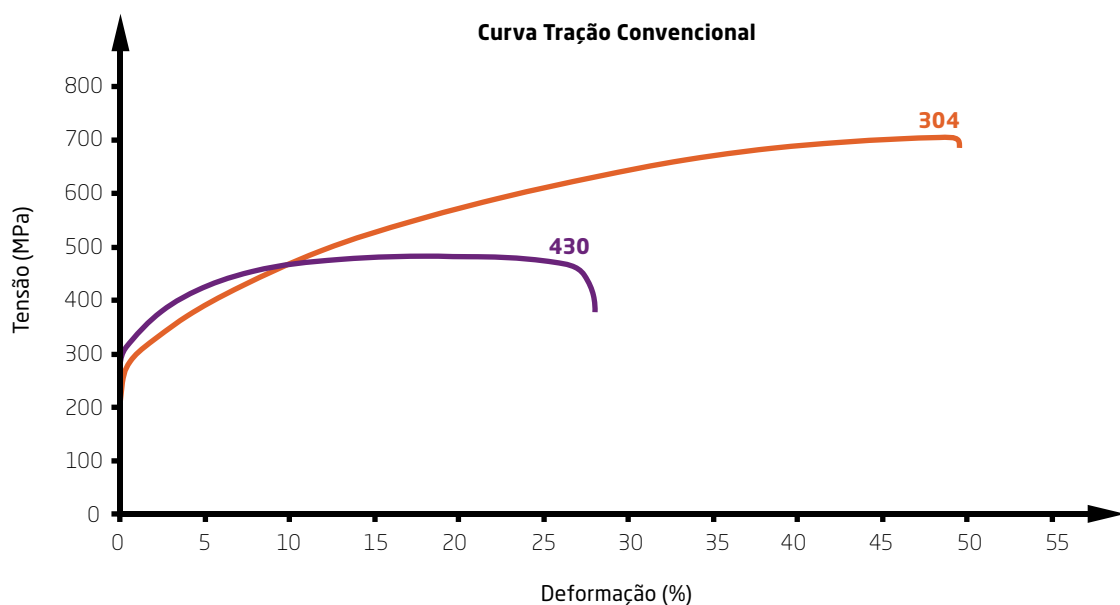


Figura 8 – Diferença entre a Curva Tensão x Deformação dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.

**Tabela I – Efeito do Alongamento Uniforme na Estirabilidade do Material**

A tabela I apresenta os valores típicos de alongamento uniforme de cada aço, relacionando-o com sua capacidade de estiramento. Quanto maior o valor de alongamento uniforme melhor será a característica deste material em processos de estiramento.

| Aço             | Cr(%) | Ni(%) | C(%)  | Nb(%) | Ti(%) | Cu(%) | Au(%) | At(%) | Estirabilidde |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 304l (Standard) | 17,7  | 8,0   | 0,040 | -     | -     | -     | 60    | 65    | ↑↑↑ ↑↑↑       |
| 304N (DDQ)      | 18,0  | 8,0   | 0,030 | -     | -     | 1,5   | 65    | 70    | ↑↑↑ ↑↑↑       |
| 409 (409H)      | 11,0  | -     | 0,008 | -     | 0,20  | -     | 25    | 40    | ↑↑↑ ↑         |
| 430A (Standard) | 16,0  | -     | 0,050 | -     | -     | -     | 18    | 30    | ↑             |
| 430F (DDQ)      | 16,0  | -     | 0,020 | 0,4   | -     | -     | 20    | 35    | ↑↑            |
| 430H (DDQ)      | 16,0  | -     | 0,015 | -     | 0,10  | -     | 19    | 32    | ↑↑            |
| 439 (439A)      | 17,0  | -     | 0,010 | 0,2   | 0,15  | -     | 23    | 38    | ↑↑↑           |
| 441 (441A)      | 17,6  | -     | 0,010 | 0,4   | 0,15  | -     | 21    | 35    | ↑↑↑           |

Observações:

a) Composição Química típica.

b) Os valores de Alongamento Uniforme (Au) e Alongamento Total (At) são resultados de ensaios de tração realizados em laboratório.

c) Valores de referência para espessura na faixa de 0,6 a 1,2 mm.





## 3.2. Efeito da anisotropia na estampabilidade

A estampagem profunda provoca, simultaneamente, deformações de tração e compressão.

A estampabilidade, nessas situações, é melhorada reduzindo-se as deformações perpendiculares à espessura e, portanto, aumentando as deformações na largura. A relação de deformação "r" é definida como a relação entre deformações na largura e espessura da chapa.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)}$$

Onde:

$\epsilon_w$ ,  $\epsilon_t$  = deformação verdadeira (na largura e na espessura respectivamente);

w, w<sub>0</sub> = largura (instantânea e inicial respectivamente);

t, t<sub>0</sub> = espessura (instantânea e inicial respectivamente).

As relações de deformação são usualmente medidas em um ensaio de tração uniaxial em corpos de provas extraídos paralelamente à laminação e a 45° e 90° em relação à direção de laminação, e são designadas como r<sub>0</sub>, r<sub>45</sub> e r<sub>90</sub>, respectivamente. Definem-se o coeficiente de anisotropia planar  $\Delta r$  e o coeficiente de anisotropia normal r<sub>N</sub> como sendo:

$$r_N = 0,25 \times (r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

$$\Delta r = 0,5 \times (r_0 + r_{90} - 2r_{45})$$

A anisotropia planar  $\Delta r$  mede a variação de r entre a direção de laminação (DL) e a direção transversal (DT). Este fator é um indicador do "orelhamento" que ocorre na estampagem das peças.

Já a anisotropia normal r<sub>N</sub> é assim chamada porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa, ou seja, a capacidade do material de resistir ao afinamento.



Um coeficiente  $r = 1$ , indica que existe igualdade entre a resistência à deformação na largura e na espessura. Quando  $r > 1$ , significa que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura. O que se deseja para um aço de boa embutibilidade é que este tenha um elevado  $r$  (alta preferência de deformar-se no plano da chapa e pouco na espessura) e um  $\Delta r$  próximo de zero (mínimo de variação planar). Estes dois parâmetros  $r_N$  e  $\Delta r$  são importantes na definição do comportamento de um material em estampagem profunda.

Os aços inoxidáveis ferríticos convencionais, como o 430, possuem valores de  $r$  próximos de 1. Seu comportamento em processo de embutimento é, portanto, similar ao dos aços inoxidáveis austeníticos. Já outros aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao nióbio e/ou titânio possuem elevados coeficientes de anisotropia normal,  $r_N$ , o que explica seu melhor desempenho em processos de embutimento, quando comparado com os aços inoxidáveis austeníticos.

Portanto, a característica básica do embutimento é permitir a conformação da chapa com menor variação da espessura. Outra característica é a formação de "orelhas" ou protuberâncias no flange ou na peça final. Pelo processo de embutimento de um copo ideal obtido de um blank circular e sem qualquer variação de espessura, pode-se obter a seguinte relação:

$H_{max} = dp/4 [(LDR)^2 - 1]$ , onde  $H_{max}$  é altura máxima (profundidade de estampagem),  $dp$  = diâmetro do punção e  $LDR$  ( $D_{max} / dp$ ) chamada de "razão limite de estampagem" sendo  $D_{max}$  o diâmetro do maior blank embutível sem fratura.

Como o volume do material é constante, as superfícies externa do blank e do copo devem também ser iguais, daí resultando esta relação.

**Tabela II – Efeito do Coeficiente de Anisotropia Normal na Embutibilidade do Material**

A tabela II apresenta os valores típicos de coeficiente de anisotropia normal dos principais aços inoxidáveis produzidos pela Aperam, relacionando-os com o valor de Razão de Estampagem (LDR, sigla em inglês para “Limit Drawing Ratio”). Este Índice mede a capacidade dos materiais em processos de estampagem por embutimento. Quanto maior for o seu valor, melhor será o comportamento do material nestes processos.

| Aço             | Cr(%) | Ni(%) | C(%)  | Nb(%) | Ti(%) | Cu(%) | rN  | LDR   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 304I (Standard) | 17,7  | 8,0   | 0,040 | -     | -     | -     | 1,0 | ↑     |
| 304N (DDQ)      | 18,0  | 8,0   | 0,030 | -     | -     | 1,5   | 1,0 | ↑↑    |
| 409 (409H)      | 11,0  | -     | 0,008 | -     | 0,20  | -     | 1,9 | ↑↑↑↑↑ |
| 430A (Standard) | 16,0  | -     | 0,050 | -     | -     | -     | 1,1 | ↑     |
| 430F (DDQ)      | 16,0  | -     | 0,020 | 0,4   | -     | -     | 1,5 | ↑↑↑   |
| 430H (DDQ)      | 16,0  | -     | 0,015 | -     | 0,10  | -     | 1,7 | ↑↑↑↑  |
| 439 (439A)      | 17,0  | -     | 0,010 | 0,2   | 0,15  | -     | 1,8 | ↑↑↑↑  |
| 441 (441A)      | 17,6  | -     | 0,010 | 0,4   | 0,15  | -     | 1,8 | ↑↑↑↑  |

Observações:

- a) Valores de referência para espessura na faixa de 0,6 a 1,2 mm.
- b) Aço 304N (DDQ) com adição de cobre (Cu) tem menor limite de resistência e um menor nível de encruamento pelo seu baixo MD30 (menor formação de martensita induzida por deformação a frio), proporcionando cargas de estampagem mais baixas, o que favorece a uma melhor capacidade de embutimento frente a um aço 304 padrão.
- c) Composição química típica.
- d) Os valores de rN e LDR são resultados de ensaios de laboratório.
- e) Para a obtenção do parâmetro de estampagem LDR, foi realizado o Ensaio Swift, com diâmetro de punção de 33 mm.

# Conclusões

O sucesso das operações de conformação das peças em aço inoxidável vai depender do processo e das condições de estampagem (ferramental, lubrificação, pressão, etc.) e do próprio material (suas propriedades).

Em geral, a forma da peça e a resposta do material é que vão ditar a melhor escolha do processo de estampagem e do projeto do ferramental.

Deve-se explorar o que cada família de aços tem de melhor, sendo que os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são os que têm as propriedades mais adequadas para os processos de estampagem usuais por estiramento e embutimento.

As propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos são mais favoráveis aos processos de estiramento, enquanto nos aços inoxidáveis ferríticos elas são melhores para o embutimento.

A evolução tecnológica, particularmente nos aços inoxidáveis ferríticos, tem propiciado um avanço de propriedades destes aços em domínios antes apenas atendidos com êxito pelos inox austeníticos.

Além disto, os aços ferríticos têm uma maior competitividade de custo frente aos austeníticos, devido à ausência de níquel, o que vem aumentando a versatilidade de sua aplicação em peças estampadas em vários segmentos do mercado.



# Referências Bibliográficas

1. GIOSA, J. A. Comportamento em prensa - ACESITA, 2003.
2. MESQUITA, Alvares. Estampagem dos aços inoxidáveis, 1997.
3. SWIFT, H.W.. Cup drawing from a flat blank.
4. PLAUT, Ronald Lesly. Estampagem dos aços ao carbono, Ouro Preto, 2002.
5. DUTRA, J.C. Notas de metalurgia física.
6. COELHO, Emerson Nunes. Avaliação da anisotropia em chapas de aços ABNT 430 e ABNT 430 estabilizado ao nióbio e nióbio-titânio. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2000. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
7. MESQUITA, Alvares. Conformação dos aços inoxidáveis, 1997.
8. GUIDA, Roberto Bamenga. Conformação dos aços inoxidáveis, 2004.
9. Fundamentos de Conformação de Chapas Metálicas. Carlos Sergio da Costa Viana, PhD (Grupo de Textura Cristalográfica e Conformação; Instituto Militar de Engenharia - IME).

Obs.: Todas as ilustrações apresentadas foram retiradas de materiais próprios da Aperam South America.

# Recomendações

As informações aqui contidas resultam de ensaios de laboratórios e de referências bibliográficas tradicionais e respeitáveis.

O comportamento dos aços inoxidáveis pode sofrer alterações devido a variações de processo. Por estas razões, as informações desta publicação devem ser utilizadas como referência inicial para ensaios ou para uma especificação final por parte do comprador.



aperam