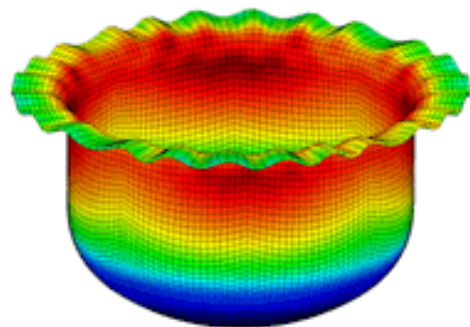


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

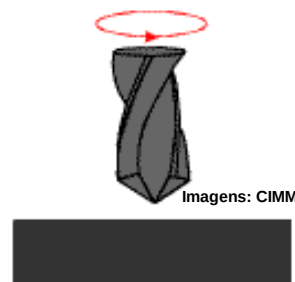
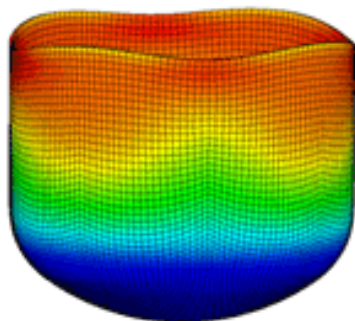
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Tópico:

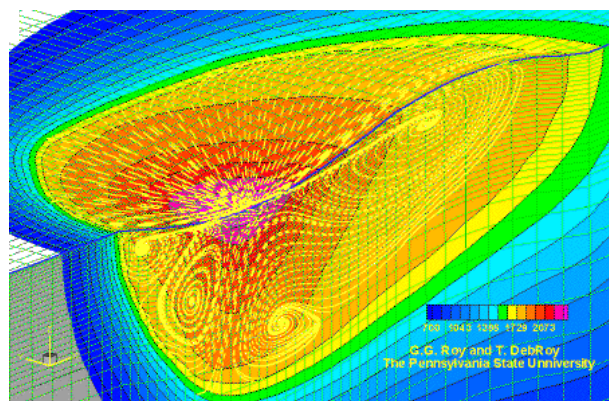
Introdução aos Processos de Fabricação dos Metais



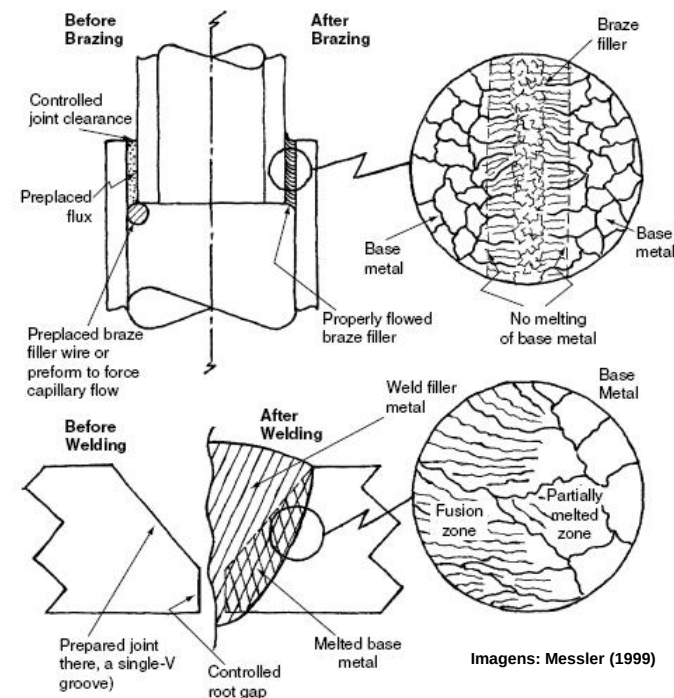
Imagens: CMNE (2011)



Imagens: CIMM



G. G. Roy and T. DebRoy
The Pennsylvania State University



Imagens: Messler (1999)

2013.2

✓ Conteúdo

Aspectos metalúrgicos da conformação plástica. Plasticidade Metalurgia da Conformação; Mecânica da Conformação; Classificação dos processos de conformação plástica; Ferramentas de Conformação. Introdução aos processos de Usinagem. Grandezas nos processos de usinagem. Mecanismos de formação do cavaco. Forças e potências de corte. Materiais e Desgaste de ferramentas. Usinabilidade dos materiais. Introdução aos processos de soldagem. Processos de soldagem por fusão e por pressão. Metalurgia e defeitos da soldagem.

✓ Referências básicas

CHIAVERINI, V.. Tecnologia Mecânica (Vol. 1 a 3); SCHAEFFER, Lirio. Conformação mecânica; WAINER, Emilio. Soldagem: Processos e metalurgia; FERREIRA, Ricardo. Conformação plástica: Fundamentos metalúrgicos e mecânicos; Machado, Álisson Rocha. Teoria da Usinagem dos Materiais; DINIZ, Eduardo. Tecnologia da usinagem dos materiais; MESSLER, R.. Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy; MACHADO, Ivan. Soldagem e técnicas conexas: Processos; ASM Handbook: Vol. 6, 14 e 16; MARQUES, Paulo Villani, Soldagem: Fundamentos e tecnologia; Kalpakjian, Serope. Manufacturing engineering and technology; Revista Soldagem & Inspeção; Revista Welding Journal; Revista Máquina e Metais; Revista Corte & Conformação de Metais.

Consultas/dúvidas: barra@ct.ufrn.br

a) Entidades associadas

Site da Soldagem (www.sitedasoldagem.com.br)

ABM (www.abmbrasil.com.br) / INMETRO (<http://www.inmetro.gov.br/>)

ABAL (www.abal.org.br) / ICZ (www.icz.org.br/)

Associação Brasileira de Soldagem - ABS (www.abs-soldagem.org.br)

American Welding Society - AWS (www.aws.org/) / University Cambridge (www.msm.cam.ac.uk/)

Centro de Informação Metal Mecânica - CIMM (www.cimm.com.br/portal/)

The International Institute of Welding - IIW (www.iiw-iis.org/)

The Welding Institute and Welding & Joining Society - TWI (www.twi.co.uk/)

NEI (www.nei.com.br/) / ABIMAQ (<http://www.abimaq.com/>)

ASM (<http://asmcommunity.asminternational.org/portal/site/asm/>)

Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM (www.ufrgs.br/ldtm/)

Labsolda UFSC (www.labsolda.ufsc.br) / ABNT (<http://www.abnt.org.br/>)

Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da UFMG (www.demet.ufmg.br)

Instituto Aço Brasil (www.acobrasil.org.br/) / WSA (www.worldsteel.org/)

Periódicos CAPES (www.periodicos.capes.gov.br.ez18.periodicos.capes.gov.br/)

Welding and Joining Institute – Aachen (www.isf-aachen.de/eng/index_en.html)

b) Revistas (básicas):

Corte & Conformação de Metais, Soldagem & Inspeção, Máquinas e Metais.

c) Congressos da área:

CONSOLDA; Congresso Corte & Conformação de Metais; USINAGEM; COBEF; COBEM, outros.

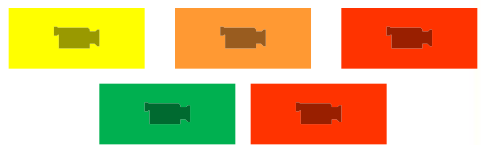
Quais as motivações para estudar os processos de fabricação dos metais?



Produto que, após a fabricação, demande resistência ao meio (abrasão)

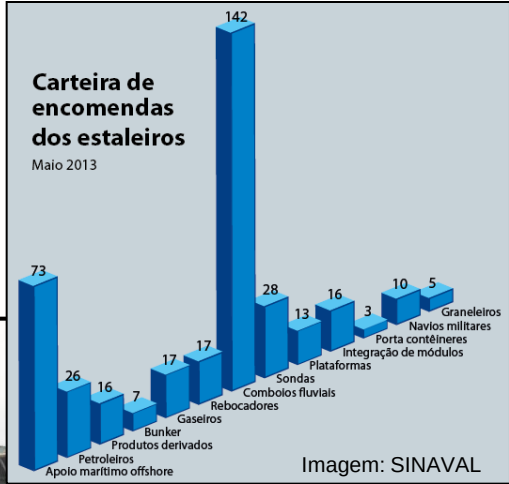


Produto fabricado com materiais dissimilares e elevado grau de acabamento (rugosidade)



Vídeos

All-Clad (combinação inox x cobre x alumínio)



Produto de grande porte e que envolve a fabricação de subcomponentes

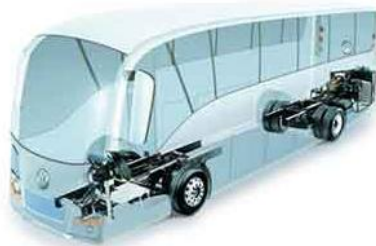
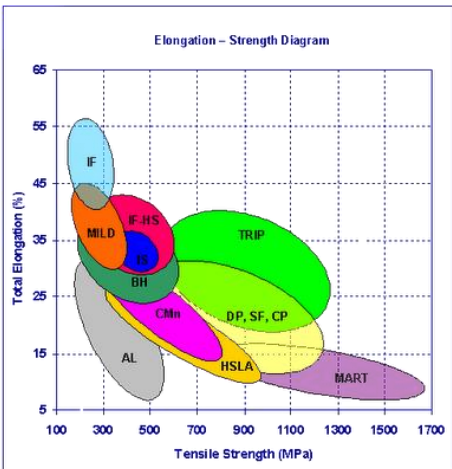


a) Compreender como o processo de fabricação influencia na **qualidade** final e no **preço** do produto (avaliar: rolo de moenda, relógio, cadeira, celular, carro, navio, avião, sapato e computador) e/ou serve para medir a condição econômica de um país;

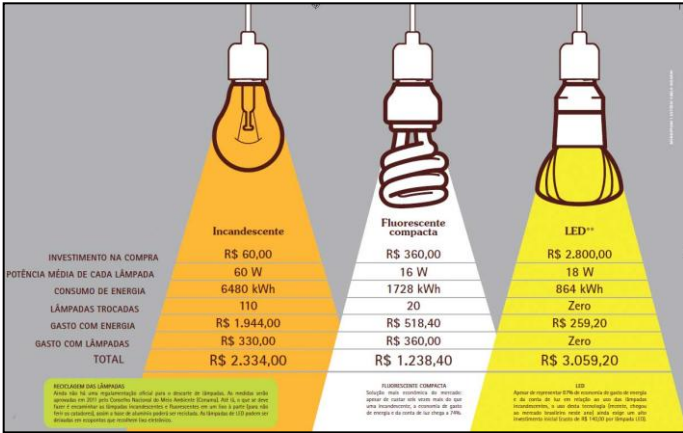
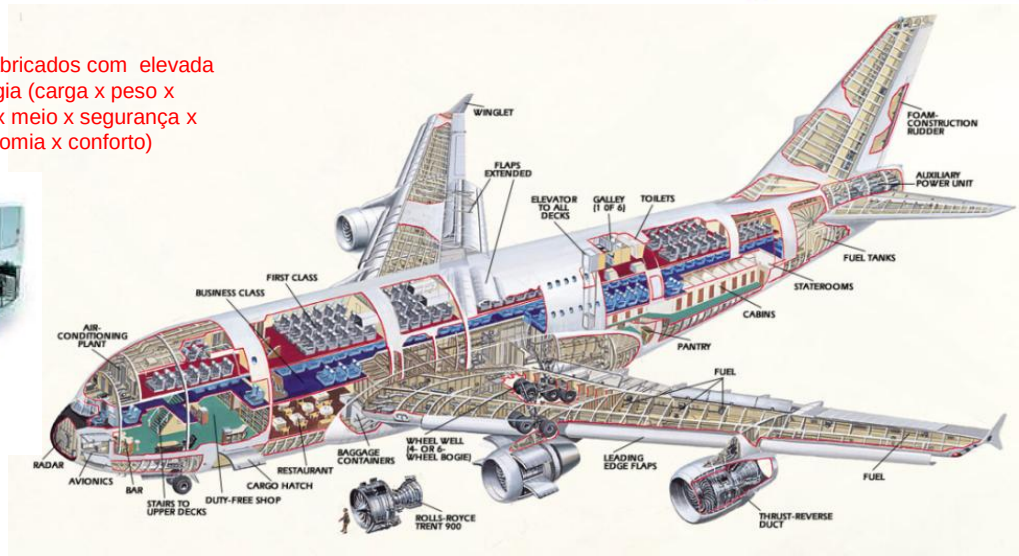
b) Avaliar as aplicações dos diferentes processos de fabricação e os possíveis empregos conjuntos (*projeto x custo x produtividade x mão de obra x cliente*);

c) Compreender os **limitantes** na relação *material x processos de fabricação* “**transformação**” (estrutura bruta de fusão, zona termicamente afetada, grua de deformação mecânica, meio – *rugosidade x formação de bactérias* “indústria alimentícia” e *pH x resistência à corrosão*);

Quais as motivações para estudar os processos de fabricação dos metais?



Produtos fabricados com elevada tecnologia (carga x peso x consumo x meio x segurança x autonomia x conforto)



Produtos com adequação ao avanço tecnológico (relação custo de produção x custo de operação x requisitos ambientais x expectativa do cliente)



Número de peças que constituem alguns produtos:
Avião 747 > 6.000.000
Parafuso, colher e clip 1
Carro ≈ 15.000
Grampeador ≈ 20



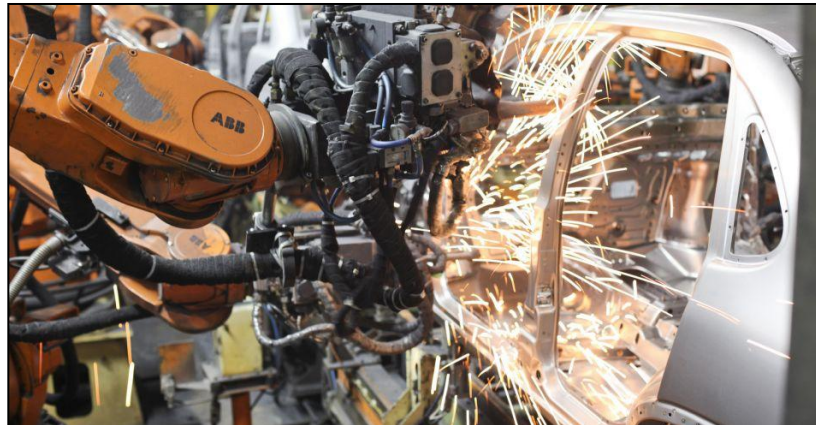
d) Entender os motivos da relação processo(s) de fabricação x critérios de segurança x vida em serviço (programação de “parada” de uma planta industrial e normas regulamentadoras).

Parte 1 – Introdução aos processos de fabricação

E o que vem a ser um **“Processo de Manufatura”** e qual a sua importância?

Origem do termo “manufatura”: manus (mão) e factus (feito)

Indústria de calçados



Indústria automobilística
 “Cerca de 80% das peças dos carros produzidos no Brasil são nacionais. Numa fábrica de carros, 70% do trabalho é realizado por máquinas e 30% por homens” (Fonte: UOL Economia) .

E para a indústria de calçados, qual a relação?

Tecnologia em que um valor é adicionado ao material quando este passa pelo processo de transformação geométrica, física e/ou química (fabricação).

Fonte: Black, 1996
 Groover, 2007

Processo de conversão da matéria prima em um produto. A manufatura, também, apresentará condições onde um produto manufaturado será empregado na manufatura de outros produtos.

Fonte: Kalpakjian, 2006

Condição básica para que um processo de manufatura “fabricação” seja aplicável:

$$\text{Custo material} + \text{Custo fabricação} < \text{Valor que o cliente está disposto a pagar (público alvo)}$$

Na sua opinião, existem outros critérios na definição do público/preço?



E o que vem a ser um **processo de fabricação** (conceito)?

“Produção” de uma ferramenta de corte pelo processo de fabricação por conformação mecânica



Imagem: Metallurgy for Dummies

Atividade em grupo:
Com base no seu dia-a-dia propor um conceito para “fabricação”.



Imagem: Caloi

“Produção” de uma bicicleta por meio do uso de diferentes processos de fabricação e grau de automação

São as operações empregadas para dar a forma desejada ao componente e/ou conjunto montado (envolvimento de diferentes fenômenos físicos: fusão, solidificação, remoção de material, deformação plástica, difusão, outros)

Adaptado de Bernardini (2008).



Prototipagem

São métodos pelos quais um determinado material é “manufaturado” em componentes que incorporarão um produto “utilizável”.

Fonte: Callister (2001).



Carro

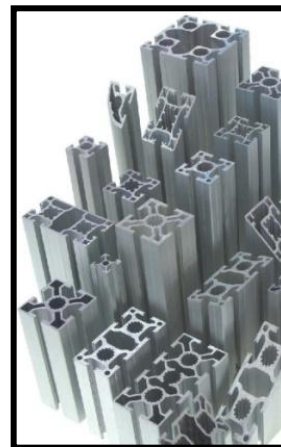
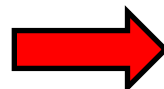
Sequência de “etapas projetadas” para, a partir da mudança desejada na forma e/ou estrutura e/ou volume, agregar valor e características previstas em projeto e não encontradas inicialmente na matéria prima ou no produto semi acabado.



Conformação

Exemplos da agregação de “valor” pela transformação:

Exemplo 1: Lingote de alumínio x perfil extrudado



PERFIS (necessidade de tecnologia de transformação x alto valor agregado ≈ US\$ 45,00/kg)

LINGOTE (eletrointensivo, impacto ambiental, baixo valor agregado ≈ US\$ 2,40/kg)

Pontos para pesquisa (Brasil) – trabalho individual

- a) Levantar as importâncias tecnológica, econômica e/ou histórica da manufatura;
- b) Classificação das indústrias de manufatura (setores), dando exemplos;
- c) Definições de produção e manufatura.

Exemplo 2: Minério x perfil extrudado

MINÉRIO DE FERRO
(impacto ambiental x baixo valor agregado ≈ US\$ 135,00/t)



PERFIS
(necessidade de tecnologia de transformação x alto valor agregado ≈ US\$ 1.970,00/t)



Qual a relação entre a atividade de “manufatura” e as demandas de mercado (quando é factível de aceitação)?

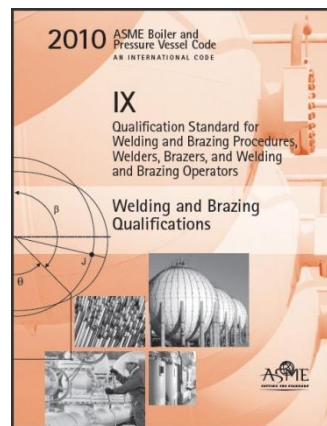
- a) Satisfazer requisitos de projeto, especificações e/ou normas; Fonte: Kalpakjian, 2006
- b) Garantir a qualidade nos diferentes estágios da fabricação (testes de qualidade por exemplo, ensaio de dureza, máxima rugosidade superficial, END, outros);
- c) Garantir baixo custo de produção e satisfazer requisitos ambientais;
- d) Permitir flexibilidade para **responder as mudanças na demanda de mercado** (taxa de produção, quantidade, tempo de entrega – **pós-venda?!);**
- e) Agregar continuamente novas tecnologias e métodos (por exemplo, integração via sistemas “computação”, eletrônica embarcada, novos processos de fabricação, outras);
- f) Manter diálogo com os fornecedores e clientes “feedback” visando melhoria continua do produto;
- g) Outros.



Imagem: Tork



Imagem: Physis SDA



Avaliar /comparar a seguinte condição de fabricação:

Produto - Veículo de passeio

- a) **Montadoras brasileiras** – soldagem a ponto por resistência elétrica
- b) **Montadoras europeias** – soldagem a laser

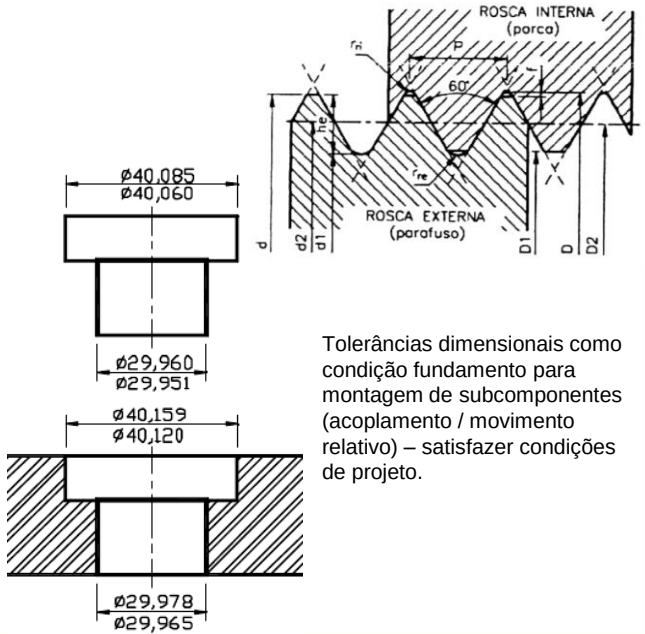
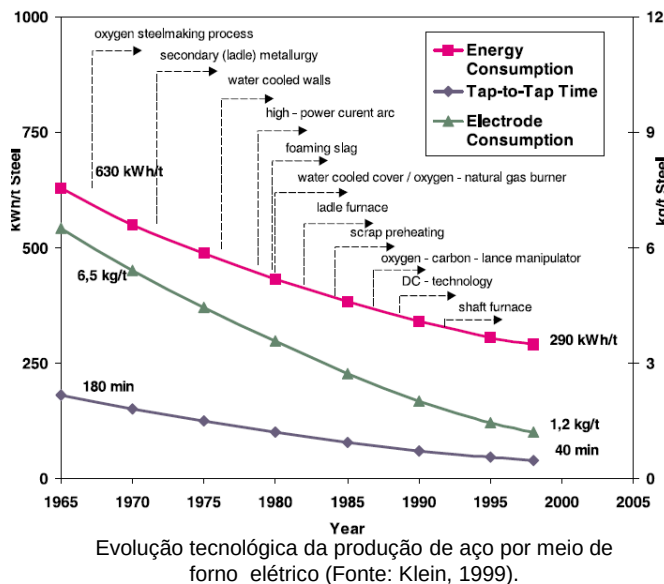


Imagem: R7

Parte 1 – Introdução aos processos de fabricação

O que um bom processo de “manufatura” deve considerar?

- a) **Taxa de produção** (matéria prima fluindo através da linha de produção – unidades/h; unidades/dia; unidades/ano) – produto **contínuo** ou **discreto**?!;
- b) **Tempo** (tempo destinado ao recebimento da matéria prima, tempo de produção do bem x tempo de produção de cada subcomponente – **carro, parafuso, navio**);
- c) **Custo** (matéria prima, mão de obra, ferramenta, equipamentos, transporte, impostos, outros – **torno mecânico x CNC, aço carbono x aço inox, outros**);
- d) **Qualidade** (nível de desvio aceito em relação ao projetado – **tolerância**).



Qual a importância da relação *microestrutura x processamento* (fabricação) sobre a qualidade final do produto (componente)?

1º - O desempenho do componente dependerá da:

- a) **Solicitação em serviço** (tração, fadiga, fluência, corrosão, abrasão, temperatura);
- b) **Propriedade do material** (LR, LE, alongamento, resistência à fadiga, resistência à fluência, resistência à corrosão ou desgaste, densidade, condutividade, possibilidade de reciclagem, tenacidade, outros).



Imagem: Almeida et al. (2010)

2º - No entanto, a propriedade do material dependerá da:

- a) **Microestrutura** (tamanho e forma do grão, fases, precipitados, outros);
- b) **Composição química** (elemento químico e seu percentual na liga);
- c) **Processo de fabricação** (fundição, conformação, usinagem, soldagem, outros).



Imagem: Tork

Exemplo:
Fabricação de mola



Qualidades Equivalentes	Características	Aplicações
ABNT 5160; SAE 5160	Boa temperabilidade, alta resistência a tração e a fadiga e boas propriedades acima de 300 °C. Na condição temperado, sua dureza varia de 58 a 63 HRC. Retém a dureza após revenido.	Molas altamente solicitadas para indústria automobilística e ferramentas manuais. Aço para molas helicoidais enroladas a quente.
ABNT 9254; SAE 9254	Alta temperabilidade, boa forjabilidade e má soldabilidade.	Molas muito dúcteis e muito solicitadas. Aço para molas de pequenas dimensões conformadas a frio.

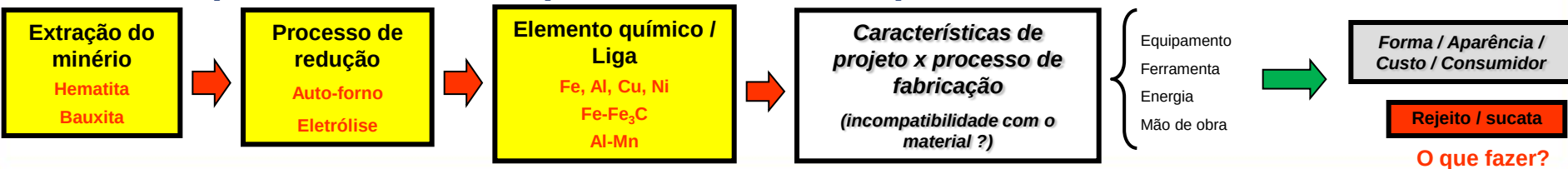
Fonte: Gerdau

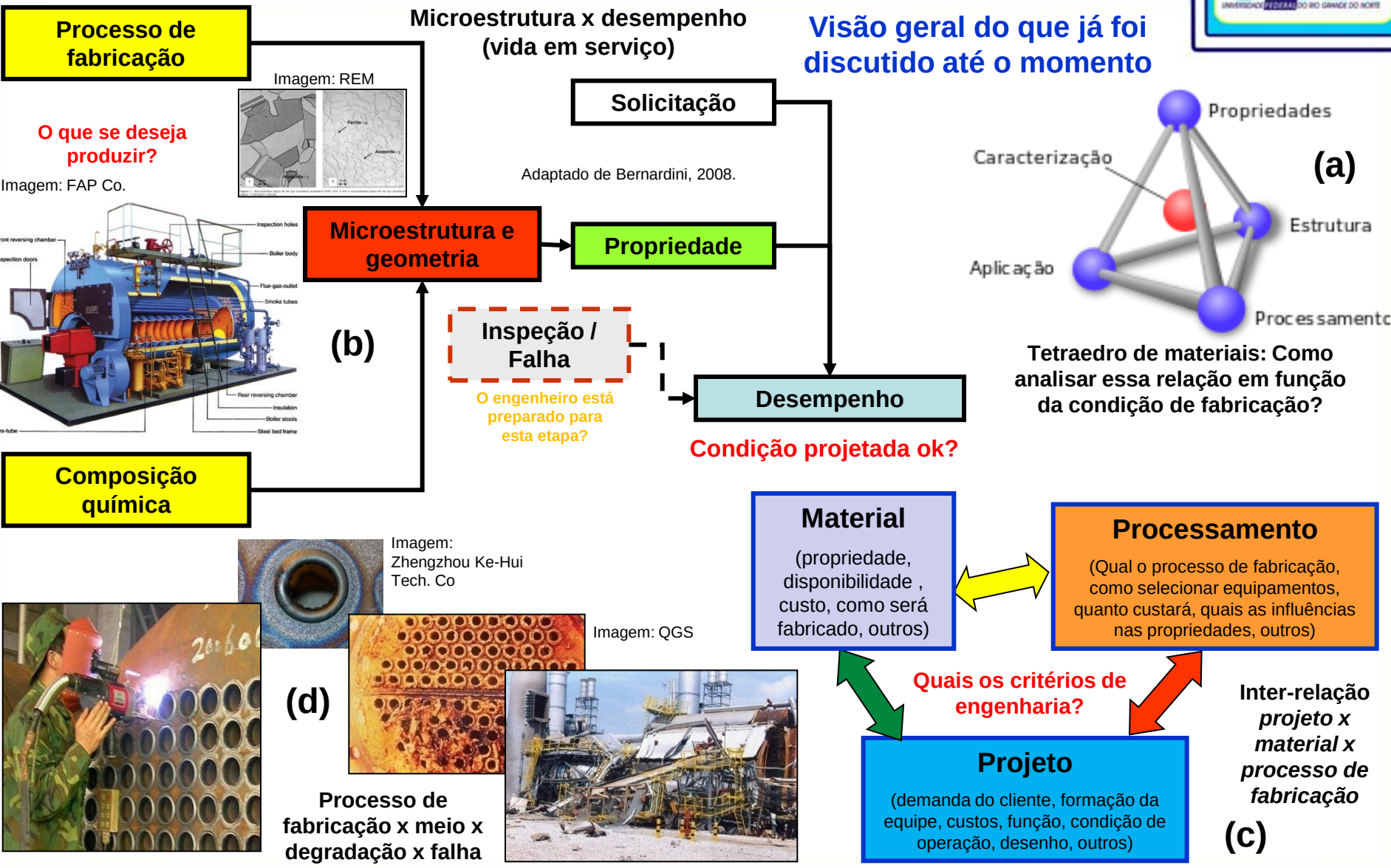
O que se espera?
Deformação x limite de resistência x resistência à fadiga x segurança x qualidade

SAE 5160 C - 0,56 - 0,64 Mn - 0,75 - 1,00 P _{máx} - 0,030 S _{máx} - 0,040 Si - 0,15 - 0,35 Cr - 0,70 - 0,90	SAE 9254 C - 0,51 - 0,59 Mn - 0,60 - 0,80 P _{máx} - 0,035 S _{máx} - 0,040 Si - 1,20 - 1,60 Cr - 0,60 - 0,80
--	--

Fonte: Arcelor Mittal

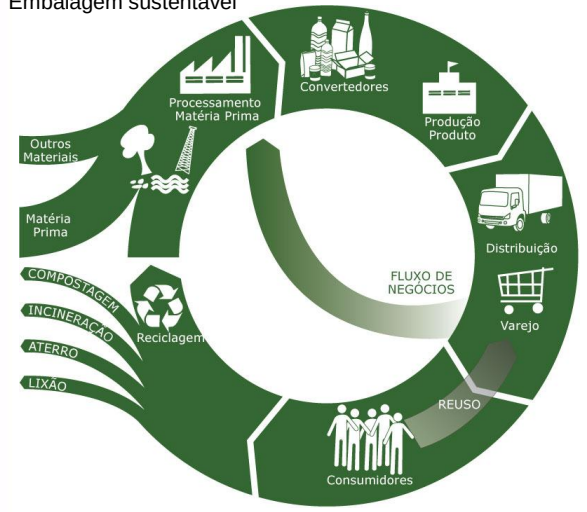
E como se produz a matéria prima utilizada no processo de “fabricação”?





Como prolongar a vida em serviço e reduzir possíveis impactos ambientais?

Imagem: Embalagem sustentável



Capacidade de reuso “sobrevida” / “reciclagem” x ciclo de vida



Indústria automobilística



Eixo de manivelas

Imagem: Retifica Laves

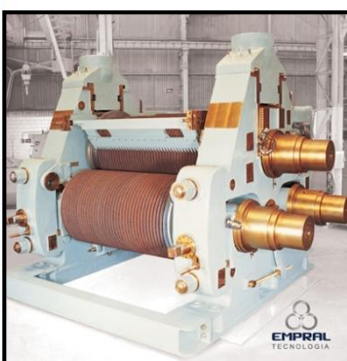


Processo de usinagem “retificação” do eixo de manivelas (submedidas)

Setor sucroalcooleiro



Camisa de rolo de moenda



Moenda

Imagens: SIMISA



Processo de moagem da cana de açúcar



Processo revestimento da camisa



Qual a demanda por processos de fabricação em termos de Brasil/mundo (qual o montante de matéria prima a transformada)?

Os dados consolidados do setor, referentes ao ano de 2010, estão disponíveis abaixo.

DADOS DE MERCADO

Parque produtor de aço: 28 usinas, sendo que 13 integradas (a partir do minério de ferro) e 15 semi-integradas (a partir do processo de ferro gusa com a sucata), administradas por 10 grupos empresariais.

Capacidade instalada: 44,6 milhões de t/ano de aço bruto **2009 = 42,1 milhões de t/ano**

Produção Aço Bruto: 32,9 milhões de t **2011 = 35,1 Mt de aço bruto**
2012 = 34,6 Mt de aço bruto

Produtos siderúrgicos: 31,8 milhões de t

Consumo aparente: 26,1 milhões de t

Número de colaboradores: 142.226

Saldo comercial: US\$ 337 milhões - 1,7% do saldo comercial do país

15º Exportador mundial de aço (exportações diretas)

7º Maior exportador líquido de aço (exp - imp): 3,1 milhões de t **China = 405 kg/habitante**

Exporta para mais de 100 países **2009 = 97 kg/habitante**

Exportações indiretas (aço contido em bens): 2,7 milhões de t

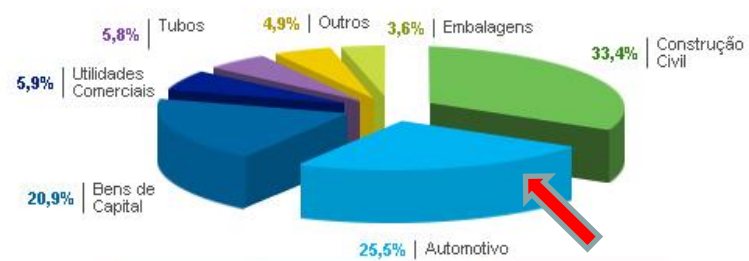
Consumo per capita de aço no Brasil: 152 quilos de aço bruto/habitante

Principais setores consumidores de aço: Construção Civil; Automotivo; Bens de capital, Máquinas e Equipamentos (incluindo Agrícolas); Utilidades Domésticas e Comerciais.

Atividade individual (casa):

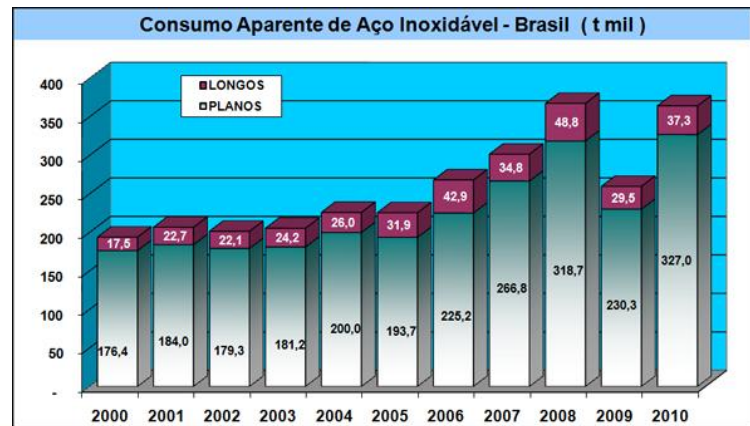
Fazer pesquisa e atualizar os dados para os anos de 2011 e 2012.

Produção e distribuição do consumo de aço no Brasil em 2010 (Fonte: Instituto Aço Brasil)

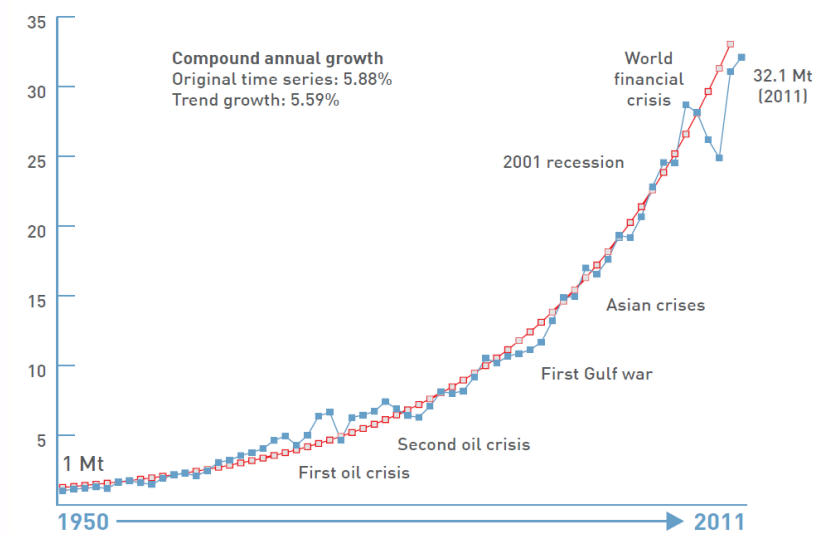


Sector	Construção Civil	Bens de Capital	Automotivo	Utilidades Comerciais	Total de Crescimento
% de crescimento	21,3	9,0	3,8	5,6	9,0

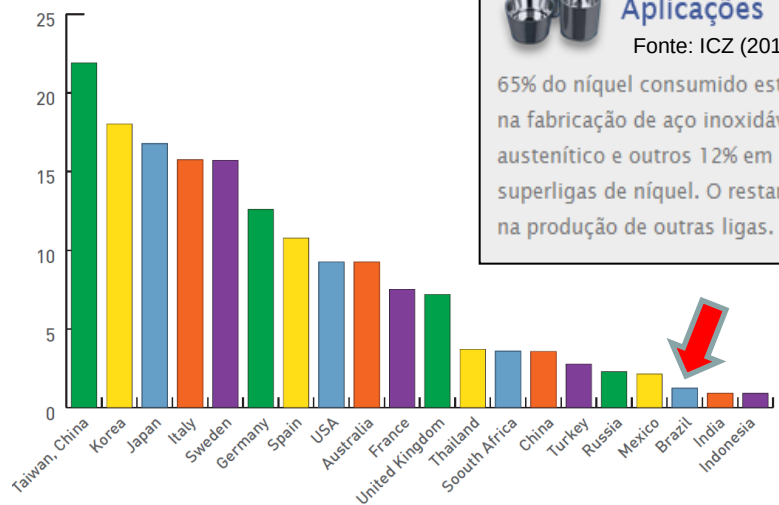
Produção de aço inoxidável no Brasil (Fonte: Núcleo Inox)



Qual a demanda por processos de fabricação em termos de Brasil (qual o montante de matéria prima a transformada)?



Evolução da produção mundial de aço inoxidável (1950-2011) e respectivo consumo por habitante (kg/habitante) no ano de 2005. Fonte: ISSF (2012)



Níquel
Aplicações

Fonte: ICZ (2013)

65% do níquel consumido está na fabricação de aço inoxidável austenítico e outros 12% em superligas de níquel. O restante na produção de outras ligas.

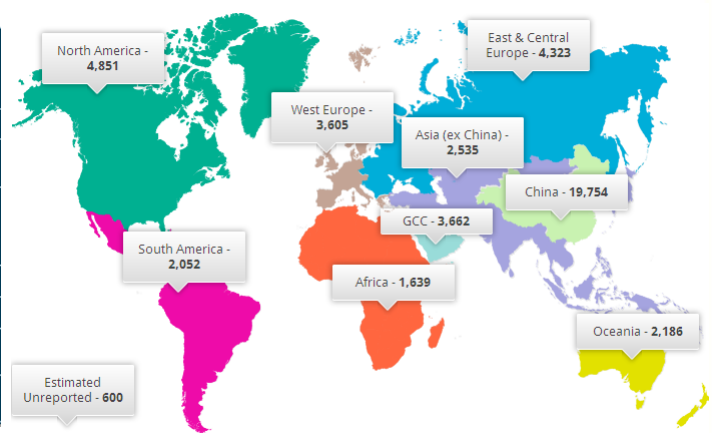
Produção de alumínio primário no Brasil 2010-12 (Fonte: ABAL)

Unidade: 1000 t

Empresas		2010		2011		Variação 2011/2010 (%)		2012	
		Dezembro	Jan-Dez	Dezembro	Jan-Dez	Dezembro	Jan-Dez	Jan	Ano
Albras	(PA)	38,7	451,1	38,9	458,1	0,5	1,6	39,1	446,7
Alcoa		29,7	350,2	29,1	350,5	-2,0	0,1	27,7	327,6
Poços de Caldas	(MG)	7,6	88,2	7,5	87,9	-1,3	-0,3	7,6	85,9
São Luís	(MA)	22,1	262,0	21,6	262,6	-2,3	0,2	20,1	241,7
BHP Billiton	(MA)	14,7	173,3	14,4	175,7	-2,0	1,4	13,4	160,7
Novelis		5,3	89,5	3,9	47,1	-26,4	-47,4	3,8	46,5
Ouro Preto	(MG)	4,2	48,6	3,9	47,1	-7,1	-3,1	38,3	454,9
Aratu	(BA)	1,1	40,9	-	-	-	-	122,3	1.436,4
Votorantim Metais - CBA	(SP)	38,7	472,0	38,1	409,0	-1,6	-13,3		
Total		127,1	1.536,1	124,4	1.440,4	-2,1	-6,2		

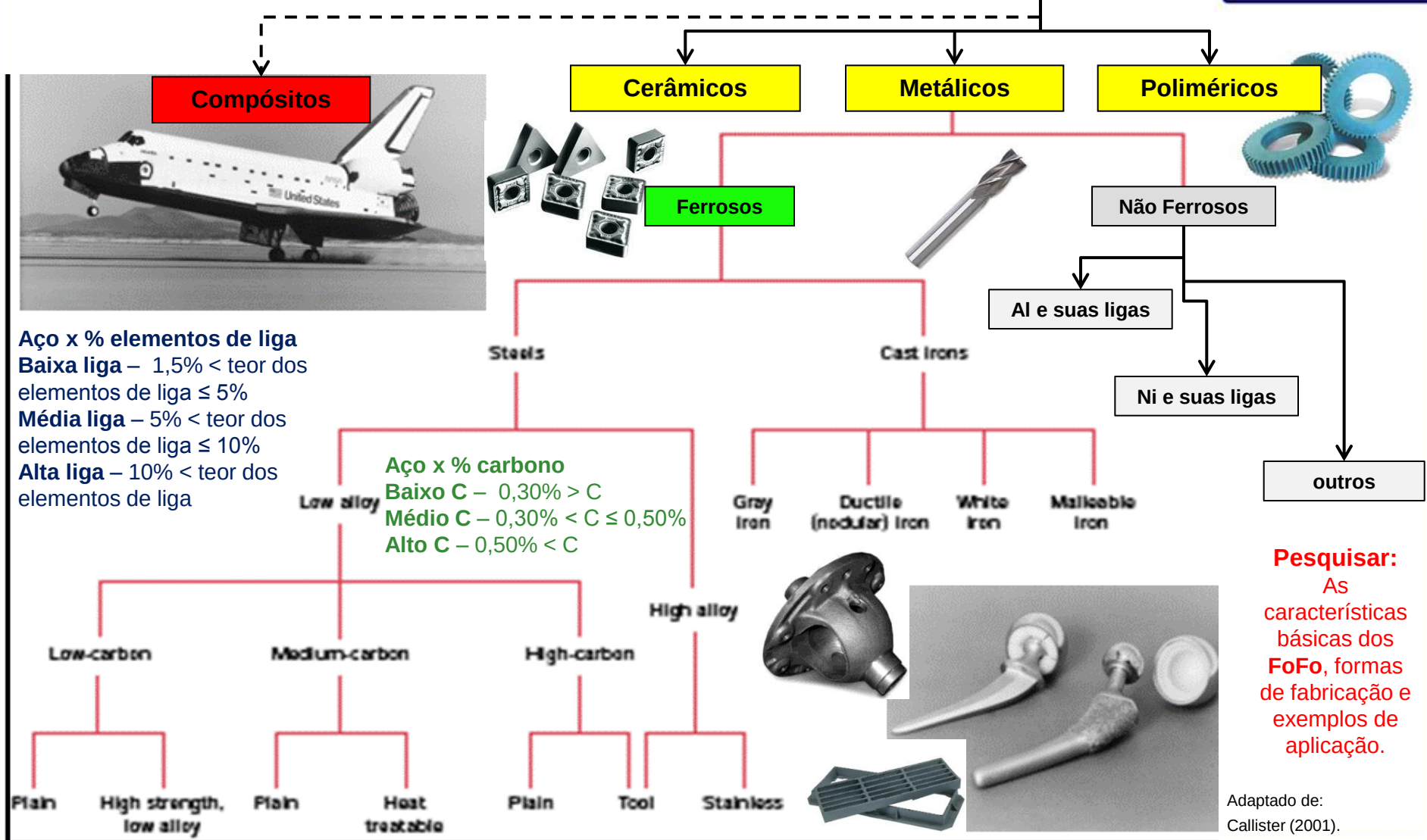
Fonte: Produtores Primários

2011 = 7,4 kg/habitante (3,2% do PIB industrial)



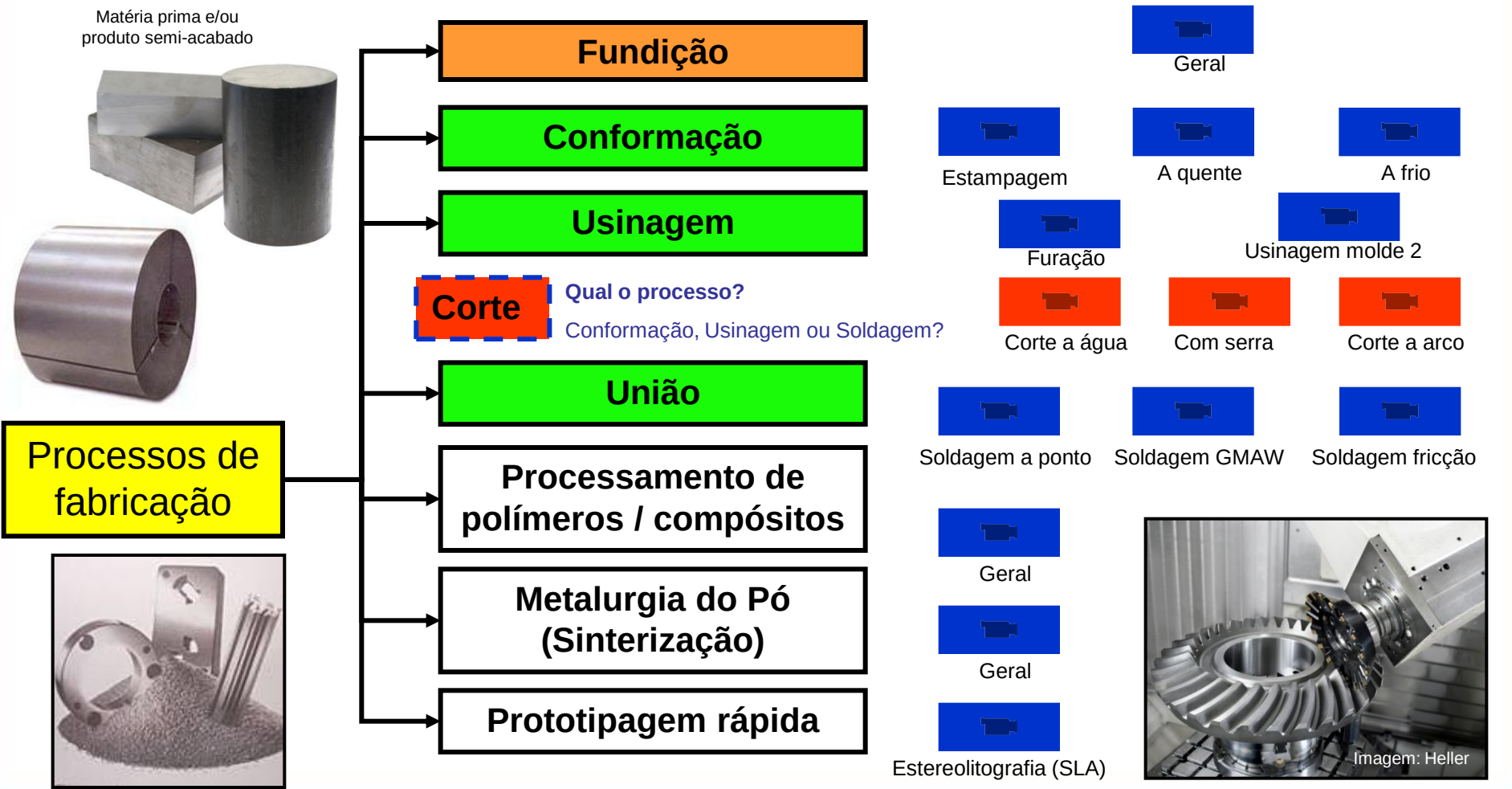
Produção mundial (10³ tonelada métrica) de alumínio primário em 2012 (Fonte: The International Aluminium Institute)

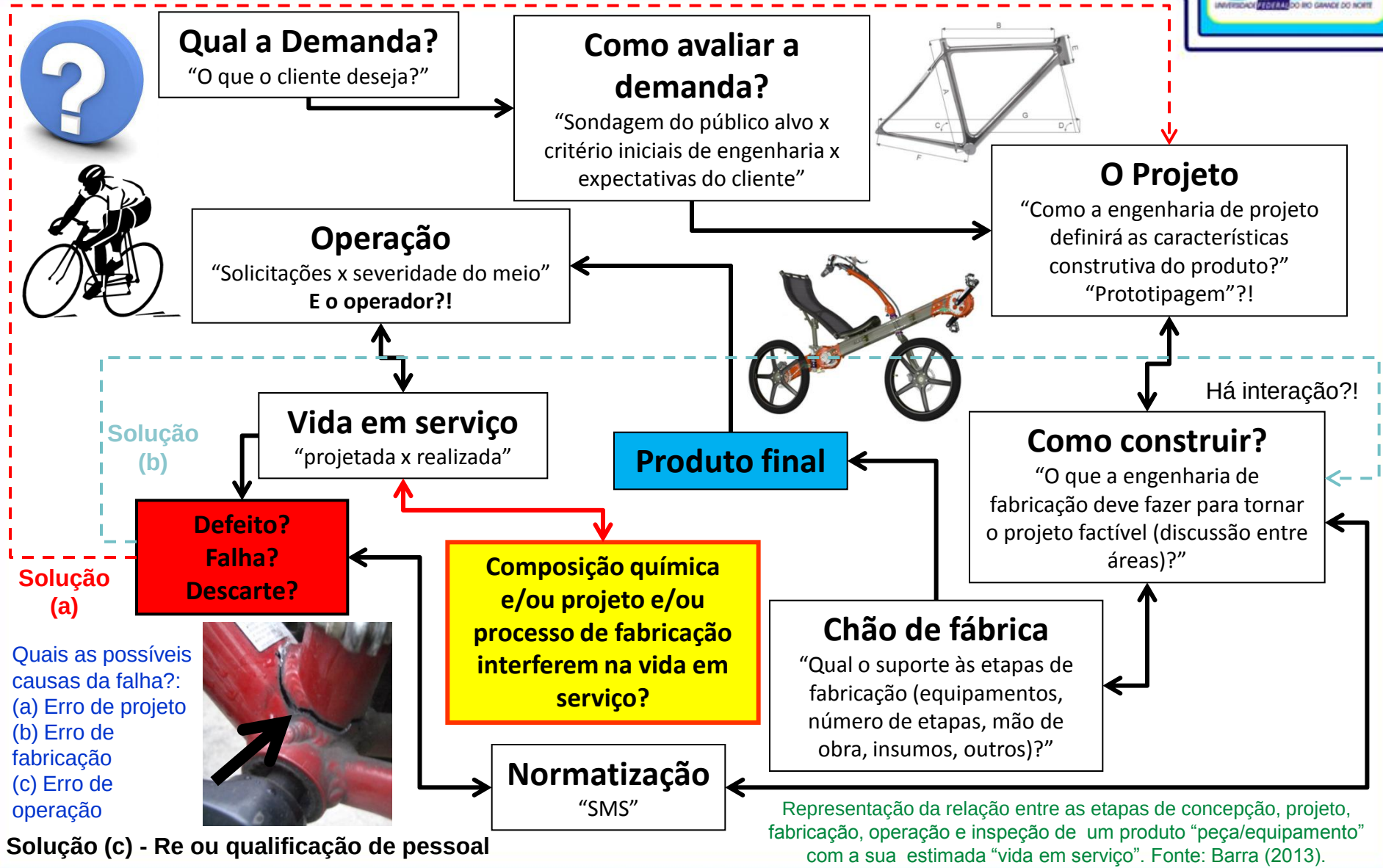
Como se classificam os materiais metálicos?



Como se classificam os processos de fabricação?

A partir do agrupamento os processos, tendo como base as relações: *Manutenção de volume/forma* x *propriedades do material* x *forma de montagem*





Qual a base para se classificar um processo de fabricação?

Utilizando as relações manutenção de volume/forma x propriedades do material x forma de montagem

a) Processos de fabricação que induzem mudança de forma no material

- ✓ Com remoção de material (usinagem, abrasivo, corte a chama ou a serra);
- ✓ Sem remoção de material (fundição, conformação, metalurgia do pó).



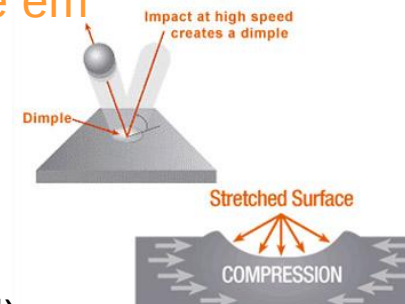
b) Processos de fabricação que induzem mudança de propriedade no material, mantendo-se a forma

- ✓ Tratamento térmico (tempera, recozimento, normalização, alívio de tensão);
- ✓ Acabamento superficial (pintura, polimento, fricção superficial, *shot peening*).



c) Processos de fabricação que permitem montagem de componente em diferentes níveis de permanência da união

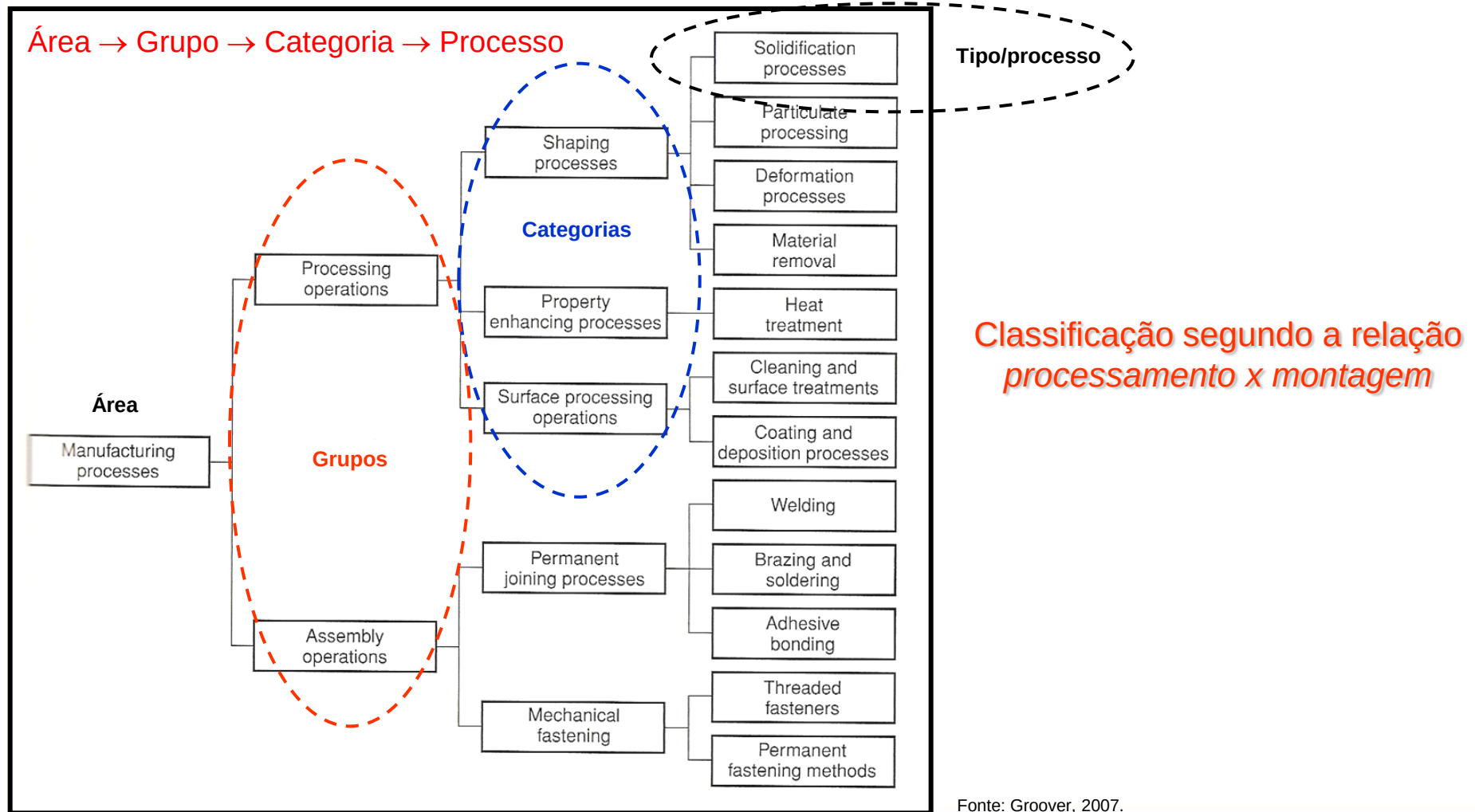
- ✓ Permanente (soldagem a ponto, MIG/MAG, TIG, ER, adesivo);
- ✓ Semi-permanente (brasagem, rebite, interferência);
- ✓ Não permanente (“união mecânica” parafuso, clipe, “amarração”).



Fonte: Black, 1996.

Fonte: Metal Improvement Company

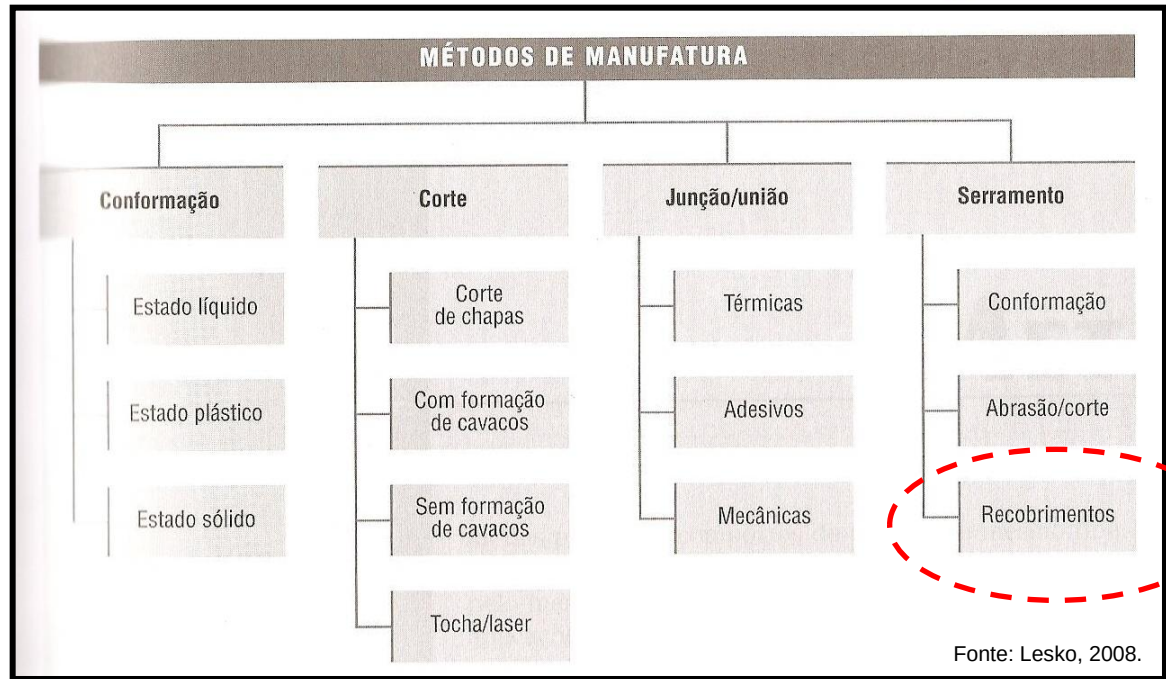
Quais as outras bases para se classificar um processo de fabricação?



Classificação segundo a relação
processamento x montagem

Fonte: Groover, 2007.

Outras formas de classificação dos processos de fabricação – cont.



Fonte: Gutowski,

1. Subtractive

– Material removal (**usinagem, corte, ataque químico**)

2. Additive

– Material addition, often in layers (**soldagem, prototipagem rápida, compósitos**)

3. Continuous

– Continuous output (wire, rod) (**trefilação, extrusão, laminação**)

4. Net shape

– Output is the same as (or near) final shape (**forjamento, fundição, metalurgia do pó**)

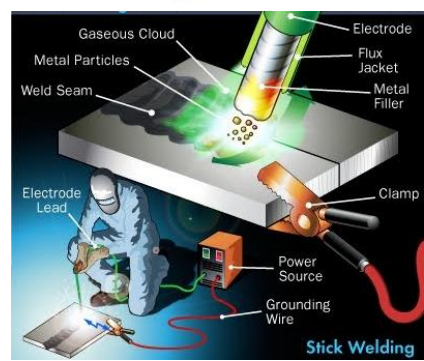
Atividade em grupo:
Discutir as diferenças entre as classificações propostas por Jim Lesko e Gutowski (conceituação).

Relação entre processo x equipamento x ferramenta (função)

Production equipment and tooling used for various manufacturing processes.

Process	Equipment	Special tooling (function)
Casting	^a	Mold (cavity for molten metal)
Molding	Molding machine	Mold (cavity for hot polymer)
Rolling	Rolling mill	Roll (reduce work thickness)
Forging	Forge hammer or press	Die (squeeze work to shape)
Extrusion	Press	Extrusion die (reduce cross-section)
Stamping	Press	Die (shearing, forming sheet metal)
Machining	Machine tool	Cutting tool (material removal) Fixture (hold workpart) Jig (hold part and guide tool)
Grinding	Grinding machine	Grinding wheel (material removal)
Welding	Welding machine	Electrode (fusion of work metal) Fixture (hold parts during welding)

^aVarious types of casting setups and equipment



Processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido (Fonte: howstuffworks).

Possíveis danos decorrentes do processo de fabricação (energia)

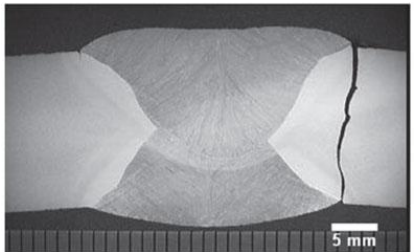
Forms of energy applied in manufacturing and the resulting possible surface and subsurface alterations that can occur.^a

Energy Form	Mechanical	Thermal	Chemical	Electrical
Damage	Residual stresses in subsurface layer Cracks—microscopic and macroscopic Plastic deformation Laps, folds, or seams Voids or inclusions Hardness variations (e.g., work hardening)	Metallurgical changes (recrystallization, grain size changes, phase changes at surface) Redeposited or resolidified material Heat-affected zone Hardness changes	Intergranular attack Chemical contamination Absorption of elements such as H and Cl Corrosion, pitting, and etching Dissolving of microconstituents Alloy depletion	Changes in conductivity and/or magnetism Craters resulting from short circuits during certain electrical processing techniques

^aBased on [2].

Fonte: Groover, 2007.

Usinagem
Formação de cavaco (cavaco1)



Trinca decorrente do processo de fadiga (Godoy, 2008).

Limites de tolerâncias possíveis x processo de fabricação aplicado

Process	Typical Tolerance Limits		Process	Typical Tolerance Limits	
	mm	inches		mm	inches
Sand casting			Abrasive processes:		
Cast iron	±1.3	±0.050	Grinding	±0.008	±0.0003
Steel	±1.5	±0.060	Lapping	±0.005	±0.0002
Aluminum	±0.5	±0.020	Honing	±0.005	±0.0002
Die casting	±0.12	±0.005	Nontraditional processes:		
Plastic molding:			Chemical machining	±0.08	±0.003
Polyethylene	±0.3	±0.010	Electric discharge	±0.025	±0.001
Polystyrene	±0.15	±0.006	Electrochem. grind	±0.025	±0.001
Machining:			Electrochem. machine	±0.05	±0.002
Drilling, diameter:			Electron beam cutting	±0.08	±0.003
6 mm (0.250 in)	+0.08, -0.03	+0.003, -0.001	Laser beam cutting	±0.08	±0.003
25 mm (1.000 in)	+0.13, -0.05	+0.006, -0.002	Plasma arc cutting	±1.3	±0.050
Milling	±0.08	±0.003			
Turning	±0.05	±0.002			

Compiled from [4], [5], and other sources.

Fonte: Groover, 2007.

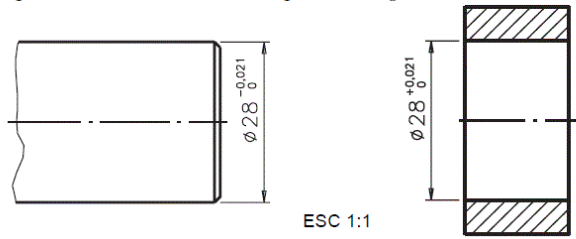
Rugosidade do componente x processo fabricação

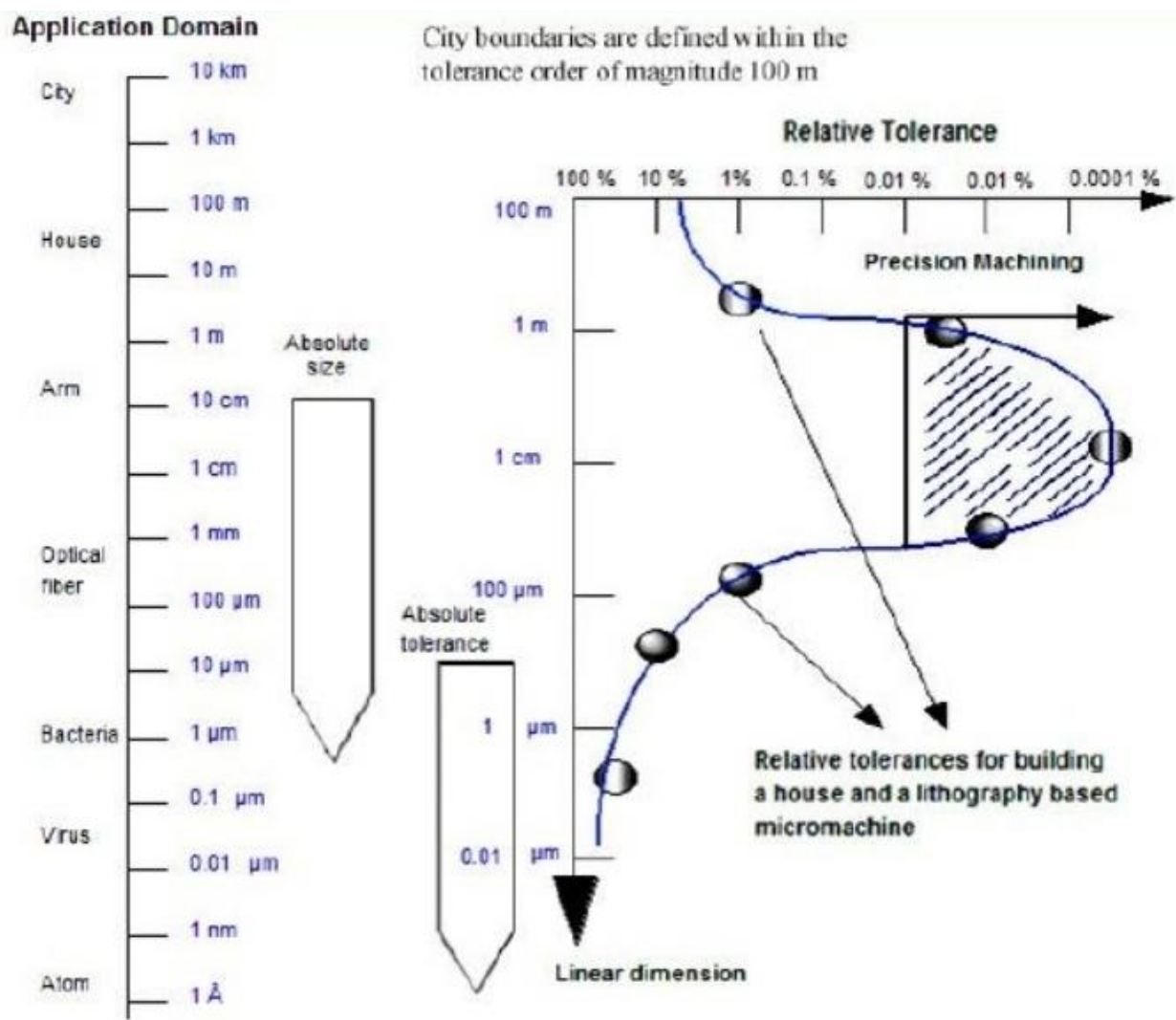
Process	Typical Surface Finish	Range of Roughness ^b	Process	Typical Surface Finish	Range of Roughness ^b
Casting:			Abrasive:		
Die casting	Good	1-2 (30-65)	Grinding	Very good	0.1-2 (5-75)
Investment	Good	1.5-3 (50-100)	Honing	Very good	0.1-1 (4-30)
Sand casting	Poor	12-25 (500-1000)	Lapping	Excellent	0.05-0.5 (2-15)
Metal forming:			Polishing	Excellent	0.1-0.5 (5-15)
Cold rolling	Good	1-3 (25-125)	Superfinish	Excellent	0.02-0.3 (1-10)
Sheet metal draw	Good	1-3 (25-125)	Nontraditional:		
Cold extrusion	Good	1-4 (30-150)	Chemical milling	Medium	1.5-5 (50-200)
Hot rolling	Poor	12-25 (500-1000)	Electrochemical	Good	0.2-2 (10-100)
Machining:			Electric discharge	Medium	1.5-15 (50-500)
Boring	Good	0.5-6 (15-250)	Electron beam	Medium	1.5-15 (50-500)
Drilling	Medium	1.5-6 (60-250)	Laser beam	Medium	1.5-15 (50-500)
Milling	Good	1-6 (30-250)	Thermal:		
Planing	Medium	1.5-12 (60-500)	Arc welding	Poor	5-25 (250-1000)
Reaming	Good	1-3 (30-125)	Flame cutting	Poor	12-25 (500-1000)
Shaping	Medium	1.5-12 (60-500)	Plasma arc cutting	Poor	12-25 (500-1000)
Sawing	Poor	3-25 (100-1000)			
Turning	Good	0.5-6 (15-250)			

^a Compiled from [1], [2], and other sources.

^b Subjective description and typical range of surface roughness values are given, μm ($\mu\text{-in}$). Roughness can vary significantly for a given process, depending on process parameters.

Tolerâncias dimensionais



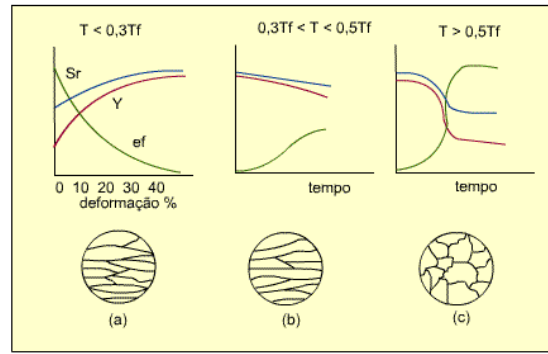
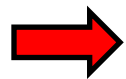
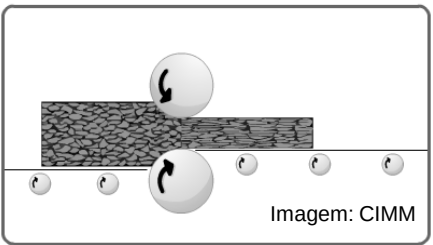


Relação entre as regiões de aplicação (domínios) dimensões dos componentes fabricados x tolerância realtiva esperada (precisão do acabamento)

Exemplos da relação processo x microestrutura x propriedade

Processo de fabricação / condição	Microestrutura	Propriedade
Conformação / a frio $(T < 0,3 T_m)$	Encruada (alta densidade de discordâncias) Grãos alongados (orientados) Trinca / delaminação	Elevada resistência mecânica Aumento da dureza Baixa ductilidade Grande anisotropia
Conformação / a quente $(T > 0,5 T_m)$	Recristalizada (baixa densidade de discordância) Grãos refinados e equiaxiais Descarburização / oxidação	Ausência de tensões residuais Moderada resistência Elevada ductilidade Pequena anisotropia
Usinagem	Tensão residual na superfície da peça Possibilidade de mudança de fase Possibilidade de trinca superficial Precipitação de fases (sensitização)	Grau de acabamento x resistência à fadiga Induz pequena anisotropia Redução de resistência à corrosão
Fundição ou soldagem / sem tratamento térmico ou mecanismo de refino de grão	Estrutura dendrítica Grãos colunares e/ou equiaxiais Baixa densidade de discordâncias Presença de segregação (zoneamento) Presença de tensões residuais Pode haver formação de poros e/ou ZTA Contração (rechupe)	Baixa resistência Moderada ductilidade Moderada anisotropia Variação de dureza

Adaptado de: Bernardini, 2008; Das, 1997.



E o que é conformação mecânica?

É o processo mecânico de fabricação onde se obtém peças semi-acabadas ou acabadas através da compressão de metais sólidos, a temperatura controlada, com ou sem molde/matriz, utilizando a deformação plástica da matéria prima para obter a forma desejada.

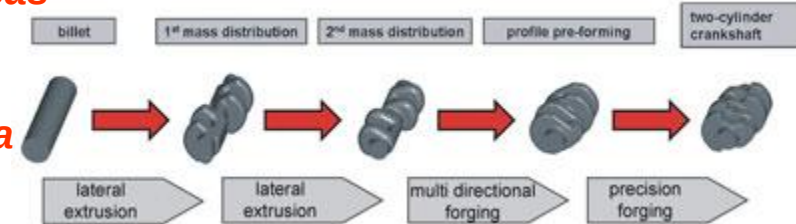


Imagem: Forging Magazine

E o que é conformabilidade (trabalhabilidade)?

É a capacidade de uma peça e/ou componente ser fabricado, por deformação plástica “sem ruptura”, a partir de um determinado processo de conformação, mantendo-se as propriedades do material almejadas em projeto.

Quais as características básicas dos processos de conformação?

- Alteram a geometria inicial (*força x ferramenta*);
- Trabalham a frio ou a quente (encruamento, recristalização, ductilidade, outros);
- Alteram as propriedades mecânica e/ou a rigidez do componente;
- Agrega valor (matéria prima em produto acabado);
- Possibilidade de utilização com outros processos de fabricação para obtenção da forma final do componente (usinagem, fundição, outros);
- Fatores limitadores: material a ser conformado “*dutibilidade*”, custos relacionados, tamanho, quantidade, tolerância, outros.

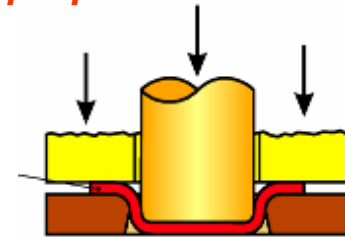
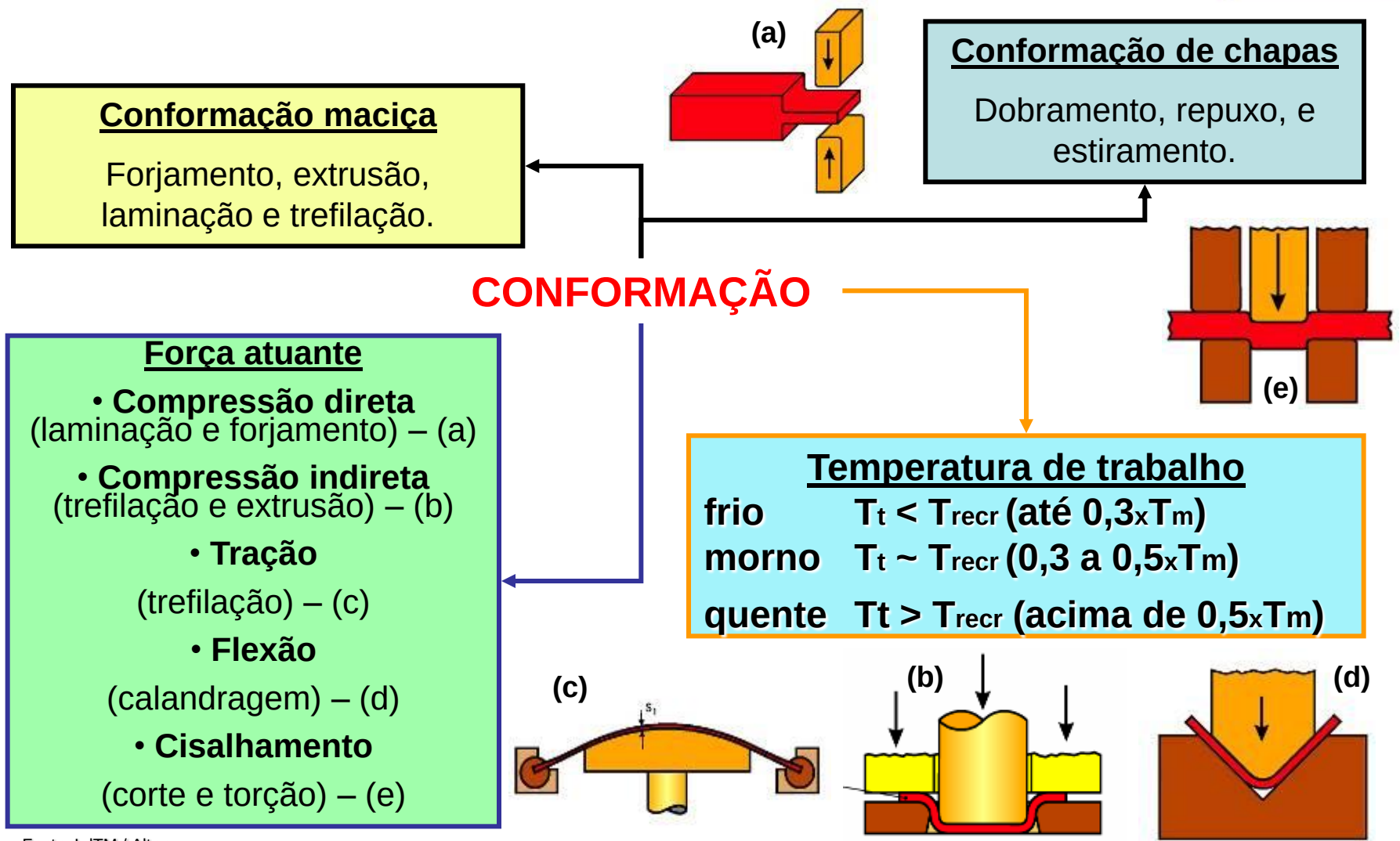


Imagem: LdTM / Altan

Como se classificam os processos de conformação?



Fonte: LdTM / Altan

E o que é fundição?

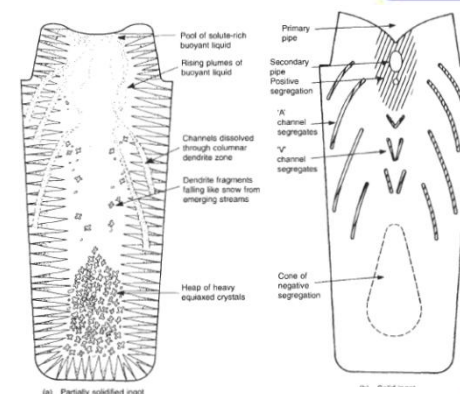
É o processo de fabricação onde se obtém peças através do preenchimento, com material líquido, de uma cavidade (molde) apresentando a forma desejada (final ou próxima da final).

E o que é fundibilidade?

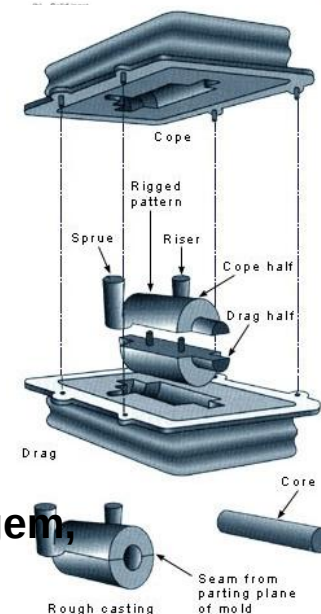
É o capacidade de uma peça e/ou componente ser fabricado por um determinado processo de fundição, considerando as propriedades do material a ser fundido.

Quais as características básicas dos processos de fundição?

- Possibilidade de obtenção de peças com geometrias complexas;
- Processo mais barato na fabricação de peças complexas (!);
- Permite reprodutibilidade da peça projetada;
- Possibilidade de fabricação com aplicação ou não de pressão;
- Agrega valor (matéria prima em produto acabado);
- Possibilidade de utilização com outros processos de fabricação (usinagem, conformação, outros);
- Fatores limitadores: material a ser fundido, custos relacionados, tamanho, quantidade, tolerância, critérios ambientais, outros.



Fonte:
Campbell, 2003.



O que são processos de usinagem?

São processos de fabricação que dão forma, dimensão e acabamento às peças através da remoção de cavacos.



Imagem: CIMM

E o que são cavacos?

Cavacos são porções de material, de forma irregular, removidas da peça como resultado da ação de uma ferramenta de corte.

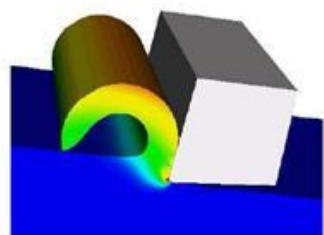


Imagem: CIMM

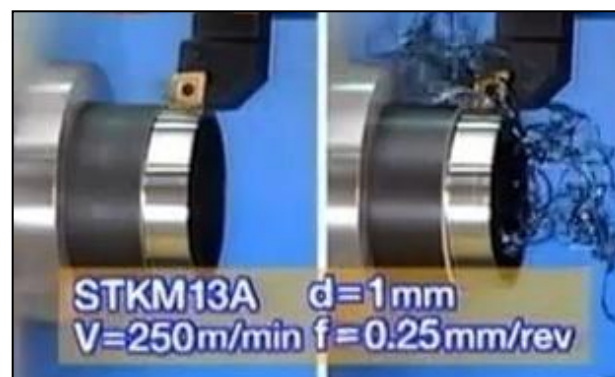


Imagem Kyocera

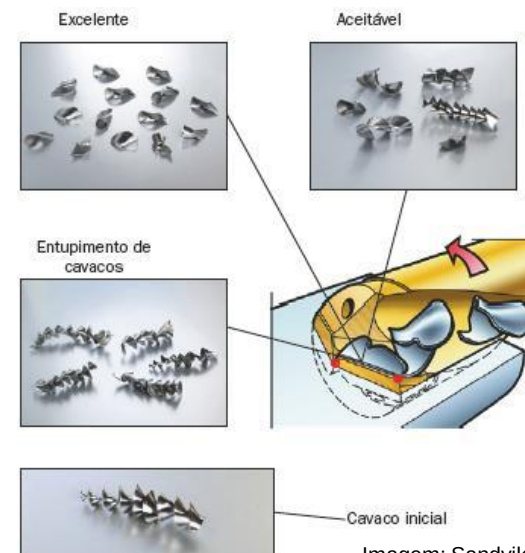


Imagem: Sandvik

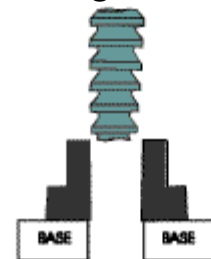
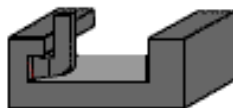
E o que é usinabilidade?

É a capacidade de uma peça e/ou componente ser fabricado por um determinado processo de usinagem, considerando as propriedades do material selecionado.

Usinagem – continuação...

Quais as características básicas de um processo de usinagem?

- Capacidade, quase irrestrita, com relação aos materiais possíveis de serem trabalhados;
- Capacidade quase irrestrita com relação às formas e dimensões das peças fabricadas;
- Precisão dimensional e de forma de média a alta (até micrométrica);
- Acabamento e integridade das superfícies de boa a excelente com rugosidade apresentando valores até submicrométricos);



Imagens: CIMM

- Remoção de cavacos;
- Utilização de ferramentas constituídas de uma ou mais cunhas corte, ou de grãos abrasivos aglomerados ou dispersos;
- Movimento relativos entre ferramenta e peça que propiciem uma ação invasiva da ferramenta e, com isso, a remoção dos cavacos de forma contínua;
- Formação dos cavacos provocada pela falha do material da peça por uma ação de cisalhamento localizado imposta pela ferramenta;
- Solicitação da ferramenta por cargas mecânicas e térmicas que impõem a ela um desgaste relativamente acelerado.

Contribuição: Prof. Guilherme Oliveira (Cimatec).

Onde o processo de fabricação pode afetar a vida planejada no projeto?

Erros possíveis de originar “falha em serviço” do componente:

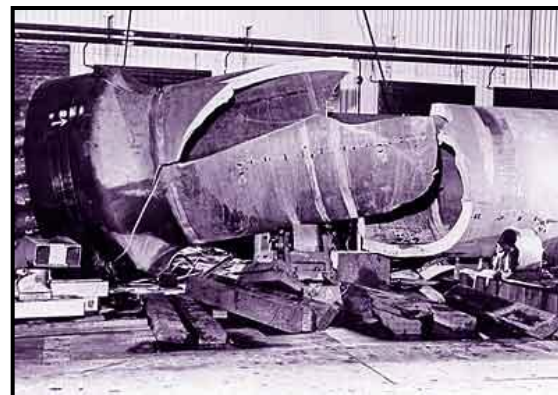
- a) **Projeto:** erro na especificação da condição real de operação (**material x seção resistente x meio**) – uso de “*pacotes fechados x desconhecimento da demanda real*”;
- b) **Imperfeição no material (como recebido):** trinca, porosidade, zoneamento químico, outros;

c) Decorrentes do processo de fabricação: soldagem induzindo ZTA, usinagem produzindo canto vivo “entalhe” (erro no raio de curvatura), inadequado tratamento térmico produzindo não dissolução de fase, desalinhamento de componentes durante furação, conformação a frio induzindo encruamento, outros;

d) Degradação em serviço: mudança no pH do meio corrosivo; severidade do processo erosivo (cavitação / abrasão), variação da temperatura, carregamento, outros.

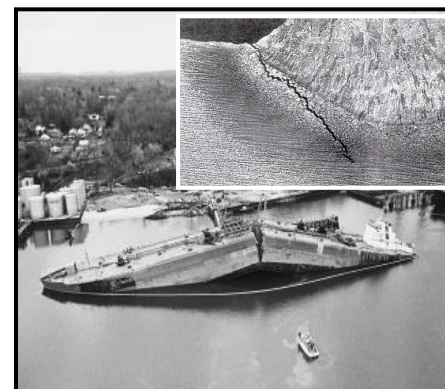
Consequências da falha: parada não programada (perda de produção), vida colocada em risco e insatisfação do cliente.

E se houver um plano de inspeção!?



“New pressure vessel that failed during its hydrostatic test. The vessel had been stress relieved, but some parts of it did not reach the required temperature and consequently did not experience **adequate tempering**.”

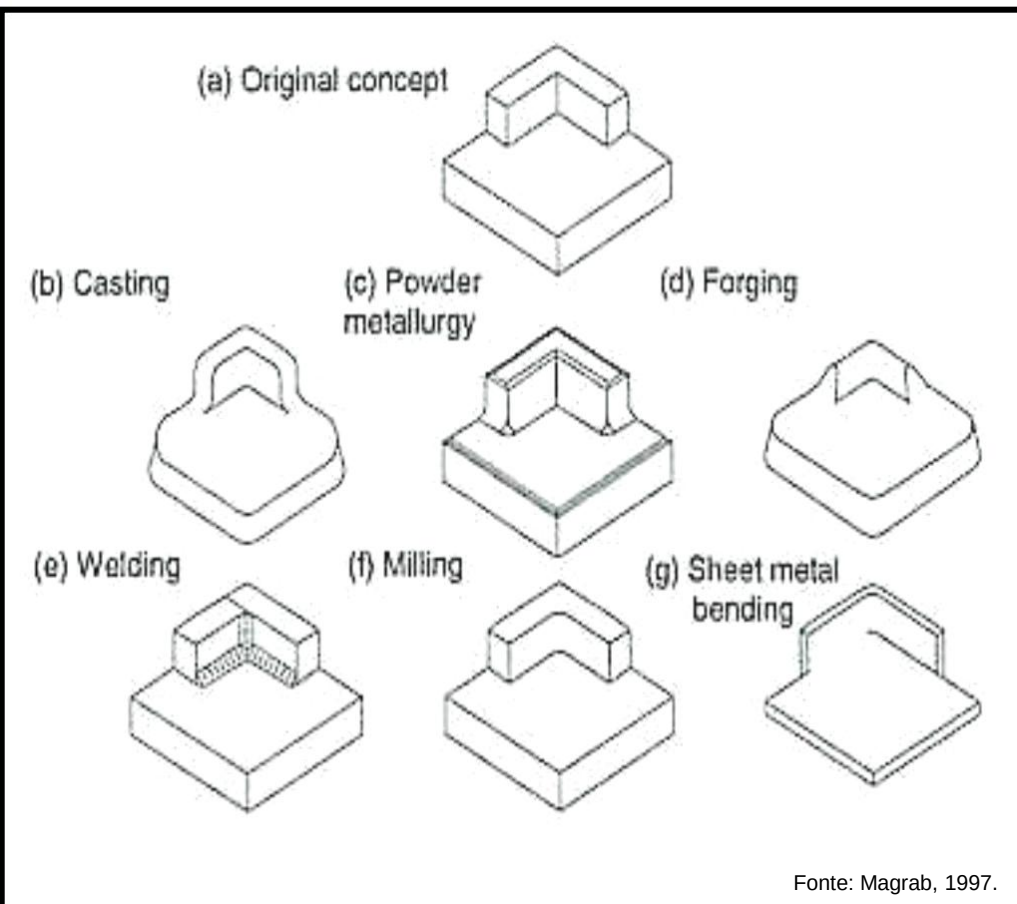
Fonte:
Donghao Stainless Steel Pipe Co.



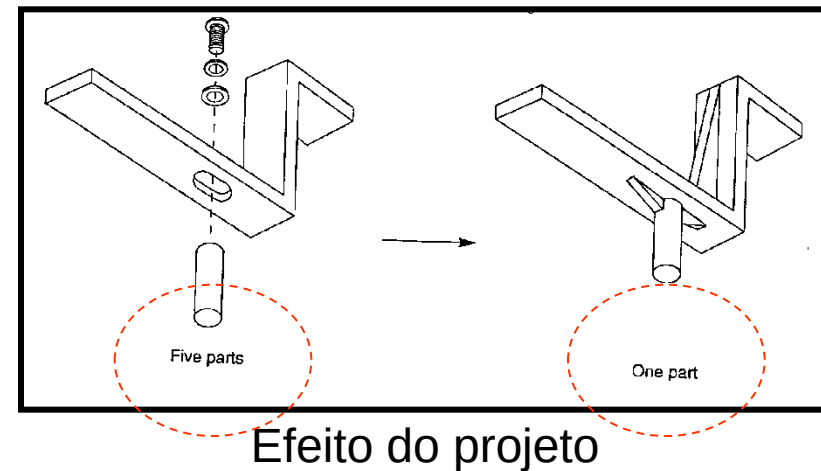
Fontes: D'Oliveira (UFPR); Callister (2001); Metassoc (2012).



Efeito do tipo de fabricação (processo) e do projeto (design) sobre a forma final do produto



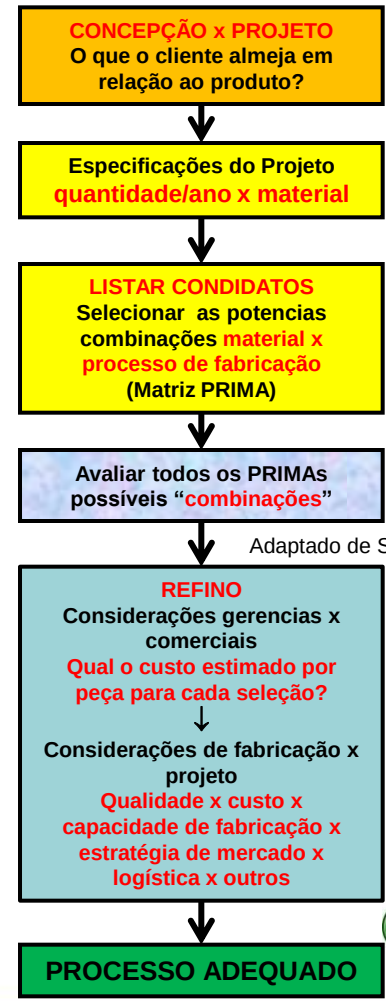
Efeito do processo de fabricação



Como se define quais os potenciais processos de fabricação a serem utilizados?

Avaliando-se as seguintes características (Mapa de Informação do Processo - **PRIMA**):

- a) Aspectos de **projeto** (como funcionará, geometria, carregamento, deformação, meio de operação, outros);
- b) Quais e as descrições do **processos** (fundamentos – conhecer como funciona);
- c) Quais os **materiais** possíveis de aplicação no produto (ferrosos, não ferrosos, outros);
- d) Possíveis **variações do processo** (grau de automação, temperatura de trabalho, tipo de corrente, outros);
- e) Considerações **econômicas** (taxa de deposição, número mínimo de peças “ano”, mão de obra - HH, HM, outros);
- f) Quais as **aplicações típicas** do produto (petroquímica, alimentos, automobilística, naval, outros);
- g) Aspectos de **qualidade** (acabamento, defeitos, limpeza, outros).



Qual o objetivo do PRIMA?

Fornecer dados detalhados sobre as **características** e a **capacidades** de cada **processo de fabricação**, seguindo particularidades padronizadas, incluindo: a adequação ao material, as considerações do projeto, requisitos de qualidade, o limite econômico e fundamentos do processo, bem como suas possíveis variações.



Como se define quais os potenciais processos de fabricação a serem utilizados? – Continuação ...



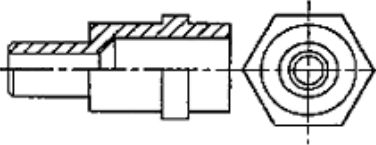
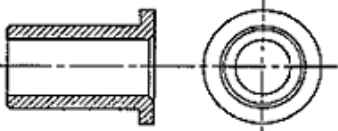
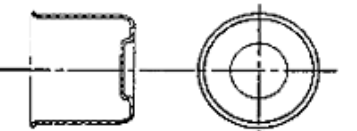
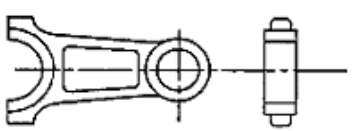
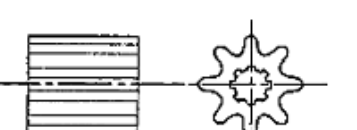
Estratégia para a seleção do(s) processos(s) de fabricação:

- a) Estimar a **produção** (diária, mensal, anual, outros);
- b) Escolha do **material** a ser utilizado (aço, alumínio, polímero, compósito, outros);
- c) Selecionar os **potenciais candidatos** (processos de fabricação – soldagem, usinagem, conformação, fundição, outros);
- d) Fazer a **análise crítica do PRIMA** considerando **engenharia x custos x SMS** (processos e suas variações, compatibilidade do material, considerações geométricas do componente, critério de segurança “normatização”, tolerâncias e acabamento superficial) ;
- e) Comparar os **custos** do componente em função dos potenciais processos;
- f) Revisar a escolha do processo considerando **aspectos gerenciais** (estratégia da empresa – orçamento disponível, tempo para o lançamento do produto, outros).

O importante é que o potencial(is) processo(s) seja(m) selecionado(s) ainda na etapa de projeto “concepção do produto”!

Atividade em equipe: Aplicar o PRIMA para definir, de forma simplificada, quais os processos de fabricação potencialmente empregados na produção diária de: 500 grampeadores, 50 engrenagens, 2.000 lapiseiras, 500 cadeiras, 50.000 parafusos, 1.500 carrinhos de brinquedo, outros.

Exemplo da relação *peça x material x produção x custo relativo*:

Component	Material	Number Per Annum	Manufacturing Process	Relative Economic and Technical Merits	Relative Cost
 Plug Body	Low Carbon Steel	1,000,000	Machining	High waste Low to medium production rates Poor strength	4.1
			Cold Forming	Little waste Very high production rates High strength	1
 Plain Bearing	Bronze	50,000	Machining	High waste Low to medium production rates Non-porous properties	2.2
			Powder Metal Sintering	No waste High production rates Porous product	1
 Cover	Alum. Alloy	5,000	Spinning	High labour costs Low production rates Limited detail and accuracy	1.8
			Deep Drawing	Low labour costs High production rates High detail and accuracy	1
 Connecting Rod*	Medium Carbon Steel	100,000	Closed Die Forging	Long lead times High tooling costs High equipment costs	1.3
			Sand Casting	Short lead times Low tooling costs Low equipment costs	1
 Pump Gear	Low Carbon Steel	5,000	Machining	High waste Low to medium production rates Poor strength	2.6
			Cold Extrusion	Little waste Very high production rates High strength	1

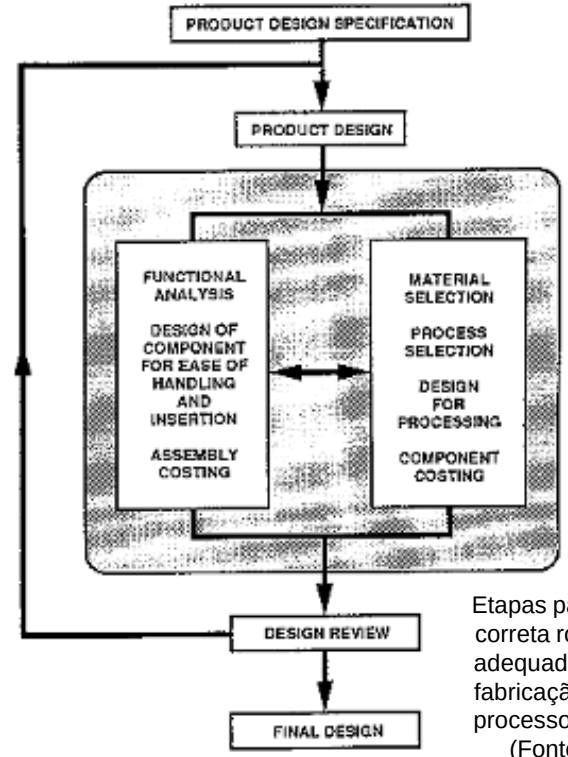
Comparação entre diferentes possibilidades "rotas" de fabricação de um componente (considerando méritos técnicos e econômicos e avaliando o custo relativo) (Fonte: Swift).

O que observar?

A adequação ao material, considerações de design "geometria x tolerâncias", qualidade "conformidade", a economia permissível e os fundamentos dos processo de fabricação e suas variações.

Cuidado!

- Necessária equipe multidisciplinar x experiência;
- Casos de informações incompletas de catálogos.



Etapas para prever a correta rota para um adequado projeto de fabricação, incluindo processo de seleção (Fonte: Swift).



PRIMA: Matriz de seleção do(s) potencial(is) processo(s) de fabricação

Note - The PRIMA selection matrix cannot be regarded as comprehensive and should not be taken as such. It represents the main common industrial practice but there will always be exceptions at this level of detail. Also, the order in which the PRIMAs are listed in the nodes of the matrix has no significance in terms of preference.

MATERIAL QUANTITY	IRONS	STEEL (carbon)	STEEL (tool, alloy)	STAINLESS STEEL	COPPER & ALLOYS	ALUMINIUM & ALLOYS	MAGNESIUM & ALLOYS	ZINC & ALLOYS	TIN & ALLOYS	LEAD & ALLOYS	NICKEL & ALLOYS	TITANIUM & ALLOYS	THERMOPLASTICS	THERMOSETS	FR COMPOSITES	CERAMICS	REFRACTORY METALS	PRECIOUS METALS
VERY LOW 1 TO 100	[1.5] [1.6] [1.7] [4.M]	[1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5] [5.6]	[1.1] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5] [5.6] [5.7]	[1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5] [5.6]	[1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1]	[1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.6] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.1] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5] [5.6]	[1.1] [1.6] [3.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.5] [5.6] [5.7]	[2.5] [2.7]	[2.5] [5.7]	[2.2] [2.8] [5.7]	[1.5] [5.1] [5.5] [5.6] [5.7]	[1.1] [5.7]	[5.5]
LOW 100 TO 1,000	[1.2] [1.5] [1.6] [1.7] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.1] [1.2] [1.7] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [5.6] [5.7]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.2] [1.5] [1.7] [1.8] [3.5] [3.10] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4]	[1.2] [1.5] [1.7] [1.8] [3.7] [3.10] [4.M] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.6] [1.7] [1.8] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.1] [1.7] [1.8] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.1] [1.7] [1.8] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M] [5.5]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.1] [1.6] [3.7] [3.10] [4.M] [5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [5.6] [5.7]	[2.3] [2.5] [2.7]	[2.2] [2.3] [2.8] [5.7]	[2.2] [2.3] [5.3] [5.5] [5.6] [5.7]	[5.1] [5.5] [5.6] [5.7]	[5.7]	[5.5]
LOW TO MEDIUM 1,000 TO 10,000	[1.2] [1.3] [1.5] [1.6] [1.7] [3.11] [4.A] [5.2]	[1.2] [1.3] [1.5] [1.7] [3.1] [3.3] [3.10] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.1] [3.4] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.1] [3.3] [3.7] [3.10] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.2] [1.3] [1.5] [1.8] [3.1] [3.3] [3.10] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4]	[1.2] [1.3] [1.5] [1.8] [3.1] [3.3] [3.7] [3.10] [3.11] [4.A] [5.3] [5.4] [5.5]	[1.3] [1.6] [1.8] [3.1] [3.3] [3.4] [3.10] [4.A] [5.5]	[1.3] [1.8] [3.3] [3.10] [4.A] [5.5]	[1.3] [1.8] [3.3] [3.10]	[1.3] [1.8] [3.3] [3.10]	[1.2] [1.3] [1.5] [1.7] [3.1] [3.3] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5] [3.10]	[3.1] [3.7] [3.10] [3.11] [4.A] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5]	[2.3] [2.5] [2.6] [2.7]	[2.2] [2.3] [2.8] [5.7]	[2.1] [2.2] [2.3] [5.2] [5.3] [5.4] [5.5]	[5.2] [5.3] [5.4] [5.5]		[5.5]
MEDIUM TO HIGH 10,000 TO 100,000	[1.2] [1.3] [3.11] [4.A]	[1.9] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.11] [3.12] [4.A] [5.2] [5.5]	[3.1] [3.4] [3.5] [3.1] [3.11] [4.A] [5.2]	[1.9] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.11] [3.12] [4.A]	[1.2] [1.4] [1.9] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.11] [3.12] [4.A]	[1.2] [1.3] [1.4] [1.9] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.11] [3.12] [4.A] [5.5]	[1.3] [1.4] [1.8] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.12] [4.A]	[1.3] [1.4] [3.3] [3.4] [3.5] [3.12] [4.A]	[1.3] [1.4] [3.3] [3.4] [3.5] [3.12] [4.A]	[1.3] [1.4] [3.3] [3.4] [3.5] [3.12] [4.A]	[3.1] [3.3] [3.5] [3.4] [3.11] [3.12] [4.A] [5.2] [5.5]	[3.1] [3.4] [3.10] [3.12] [4.A] [5.2] [5.5]	[2.1] [2.3] [2.5] [2.6] [2.9]	[2.1] [2.3] [2.5] [2.9]	[2.1] [2.3] [2.8] [5.7]	[3.11] [3.12]	[3.12]	[3.5]
HIGH 100,000+	[1.2] [1.3] [3.11] [4.A]	[1.9] [3.1] [3.2] [3.3] [3.4] [3.5] [3.12] [4.A]	[4.A]	[1.9] [3.2] [3.3] [4.A]	[1.2] [1.3] [1.4] [3.2] [3.3] [3.4] [3.5] [3.7] [3.8] [3.11] [3.12] [4.A]	[1.2] [1.3] [1.4] [1.9] [3.1] [3.2] [3.3] [3.4] [3.5] [3.8] [3.12] [4.A]	[1.3] [1.4] [3.1] [3.3] [3.4] [3.5] [3.8] [3.12] [4.A]	[1.4] [3.2] [3.3] [3.4] [3.5] [4.A]	[1.4] [3.3] [3.4] [4.A]	[1.4] [3.2] [3.3] [3.4] [4.A]	[3.2] [3.3] [4.A]	[4.A]	[2.1] [2.6] [2.9]	[2.1] [2.3] [2.4] [2.9]		[3.7] [3.11]		[3.5]
ALL QUANTITIES	[1.1]	[1.1] [1.6] [3.6] [3.8] [3.9]	[1.6] [3.6]	[1.1] [1.6] [3.6] [3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6] [3.8] [3.9] [5.5]	[1.1] [1.6] [3.6] [3.8] [3.9]	[1.1] [3.6] [3.8] [3.9]	[3.6] [3.8] [3.9]		[3.6]	[1.1] [1.6] [3.6] [3.8] [3.9]	[3.8] [3.9]				[5.5]	[1.6]	[1.6]

KEY TO MANUFACTURING PROCESS PRIMA SELECTION MATRIX:

CASTING PROCESSES [1.1] SAND CASTING [1.2] SHELL MOULDING [1.3] GRAVITY DIE CASTING [1.4] PRESSURE DIE CASTING [1.5] CENTRIFUGAL CASTING [1.6] INVESTMENT CASTING [1.7] CERAMIC MOULD CASTING [1.8] PLASTER MOULD CASTING [1.9] SQUEEZE CASTING	PLASTIC & COMPOSITE PROCESSING [2.1] INJECTION MOULDING [2.2] REACTION INJECTION MOULDING [2.3] COMPRESSION MOULDING [2.4] TRANSFER MOULDING [2.5] VACUUM FORMING [2.6] BLOW MOULDING [2.7] ROTATIONAL MOULDING [2.8] CONTACT MOULDING [2.9] CONTINUOUS EXTRUSION (PLASTICS)	FORMING PROCESSES [3.1] CLOSED DIE FORGING [3.2] ROLLING [3.3] DRAWING [3.4] COLD FORMING [3.5] COLD HEADING [3.6] SWAGING [3.7] SUPERPLASTIC FORMING [3.8] SHEET-METAL SHEARING [3.9] SHEET-METAL FORMING [3.10] SPINNING [3.11] POWDER METALLURGY [3.12] CONTINUOUS EXTRUSION (METALS)	MACHINING PROCESSES [4.A] AUTOMATIC MACHINING [4.M] MANUAL MACHINING <i>(THE ABOVE HEADINGS COVER A BROAD RANGE OF MACHINING PROCESSES AND LEVELS OF CONTROL TECHNOLOGY. FOR MORE DETAIL, THE READER IS REFERRED TO THE INDIVIDUAL PROCESSES.)</i>	NTM PROCESSES [5.1] ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) [5.2] ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM) [5.3] ELECTRON BEAM MACHINING (EBM) [5.4] LASER BEAM MACHINING (LBM) [5.5] CHEMICAL MACHINING (CM) [5.6] ULTRASONIC MACHINING (USM) [5.7] ABRASIVE JET MACHINING (AJM)
---	--	---	--	---

Fonte: Swift

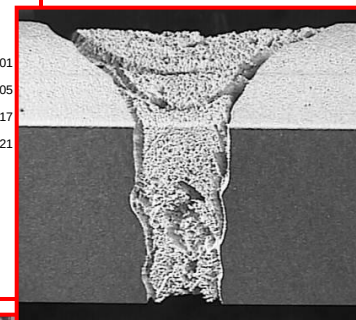
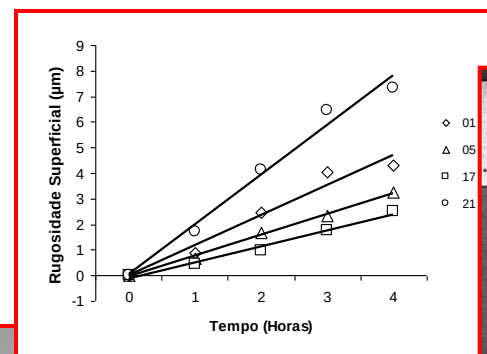
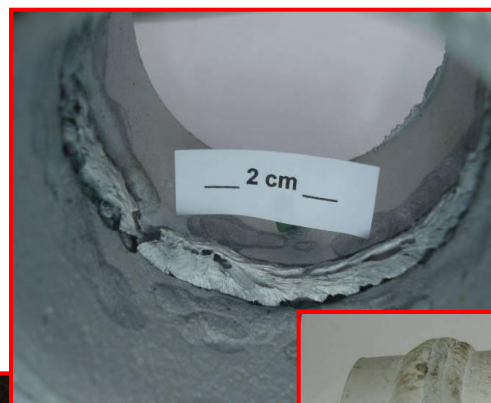


Estudos de casos da seleção x aplicação dos processos de fabricação

Exemplo 1: Construção / manutenção de nitroduto (transporte de HNO_3)

O que se deve levantar a respeito do problema?

- a) Como funciona cada processo aplicável à união (parafusagem, soldagem ou colagem) ?
- b) Qual o material da tubulação (ferroso ou não ferroso)?
- c) Qual o grau de automatização (manual, semi ou automatizado)?
- d) Qual o valor dos encargos (HH, impostos, outros)?
- e) Já houve aplicação similar do processo?
- f) Qual a pressão e temperatura de trabalho?
- g) Quais os tipos e níveis aceitáveis de defeitos?



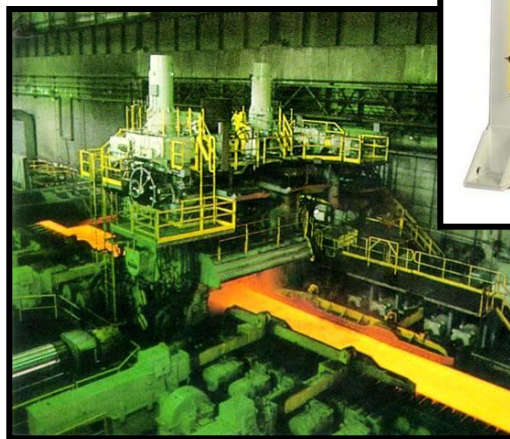
Exemplo 2 – Fabricação: Peças estampadas

Critérios: Tamanho e forma, valor da matéria prima, tolerâncias dimensionais, aparência e acabamento superficial, propriedade física, quantidade a ser produzida e custo de produção.

Processo de
fabricação 1
FUNDIÇÃO



Processo de
fabricação 2
LAMINAÇÃO



Processo de
fabricação 3
ESTAMPAGEM



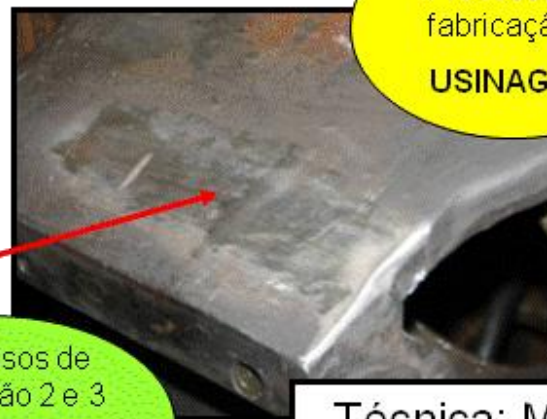
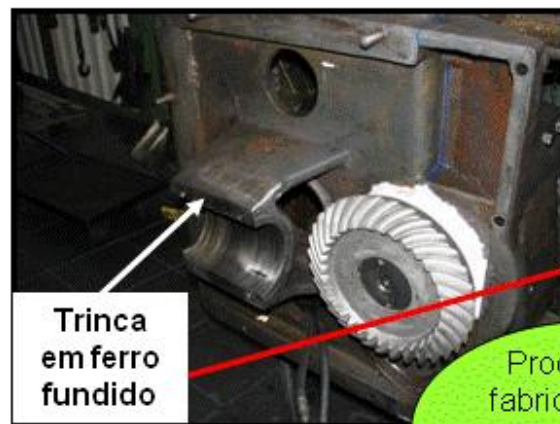
**Produto
final**



Os produtos são concebidos envolvendo a combinação de um **número elevado** de peças, com **formas complexas**, e diferentes **requisitos de fabricação**. Mais de 30% do esforço de desenvolvimento do produto pode ser desperdiçado em retrabalho (custo de qualidade igual a 25% do valor de venda).

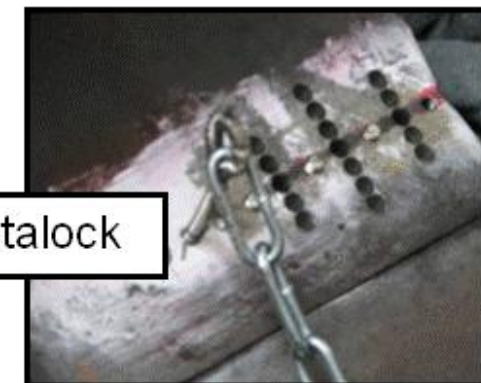
Fonte: Swift (2003).

Exemplo 3 – Recuperação: Trinca em um redutor de ferro fundido (combinações de diferentes processos de fabricação)



Processo de fabricação 1
USINAGEM

Processos de fabricação 2 e 3
CONFORMAÇÃO e SOLDAGEM

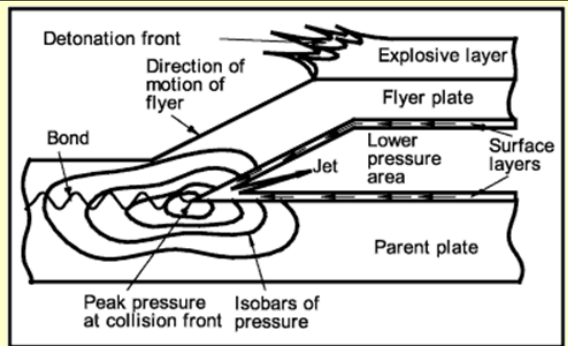


Processo de fabricação 3
USINAGEM



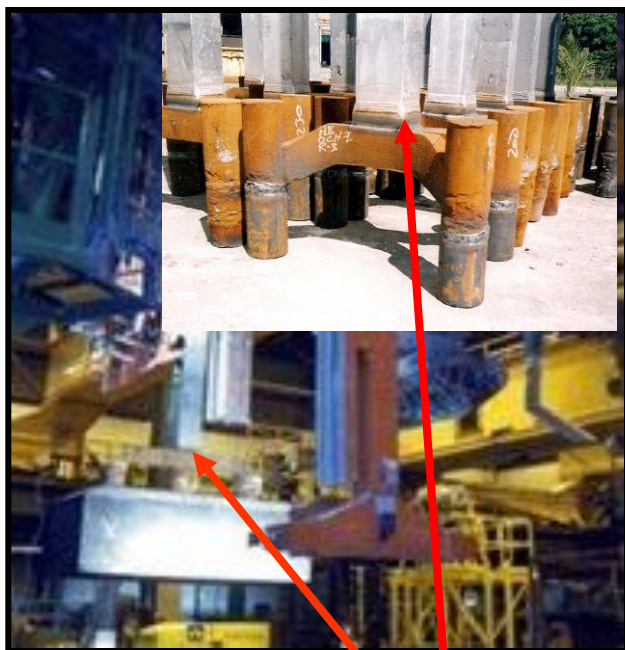
Exemplo 4 – Fabricação e/ou recuperação de barramentos (ânodos de redução da Al_2O_3) – indústria do alumínio

Problema: Necessidade de aliar resistência mecânica (aço) com condutividade elétrica (Al).

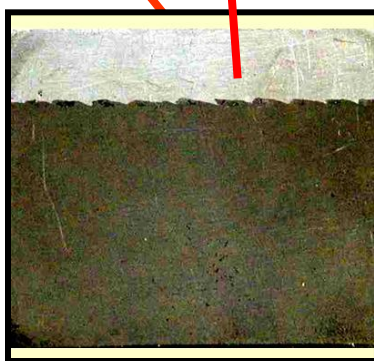


Explosive	Detonation velocity , m/s
RDX (Cyclotrimethylene trinitramine, $C_3H_6N_6O_6$)	8100
PETN (Pentaerythritol tetranitrate, $C_5H_8N_{12}O_{20}$)	8190
TNT (Trinitrotoluene, $C_7H_5N_3O_6$)	6600
Tetryl (Trinitrophenylmethylnitramine, $C_7H_5O_8N_5$)	7800
Lead azide (N_6Pb)	5010
Detasheet	7020
Ammonium nitrate (NH_4NO_3)	2655

Características do processo de união por explosão

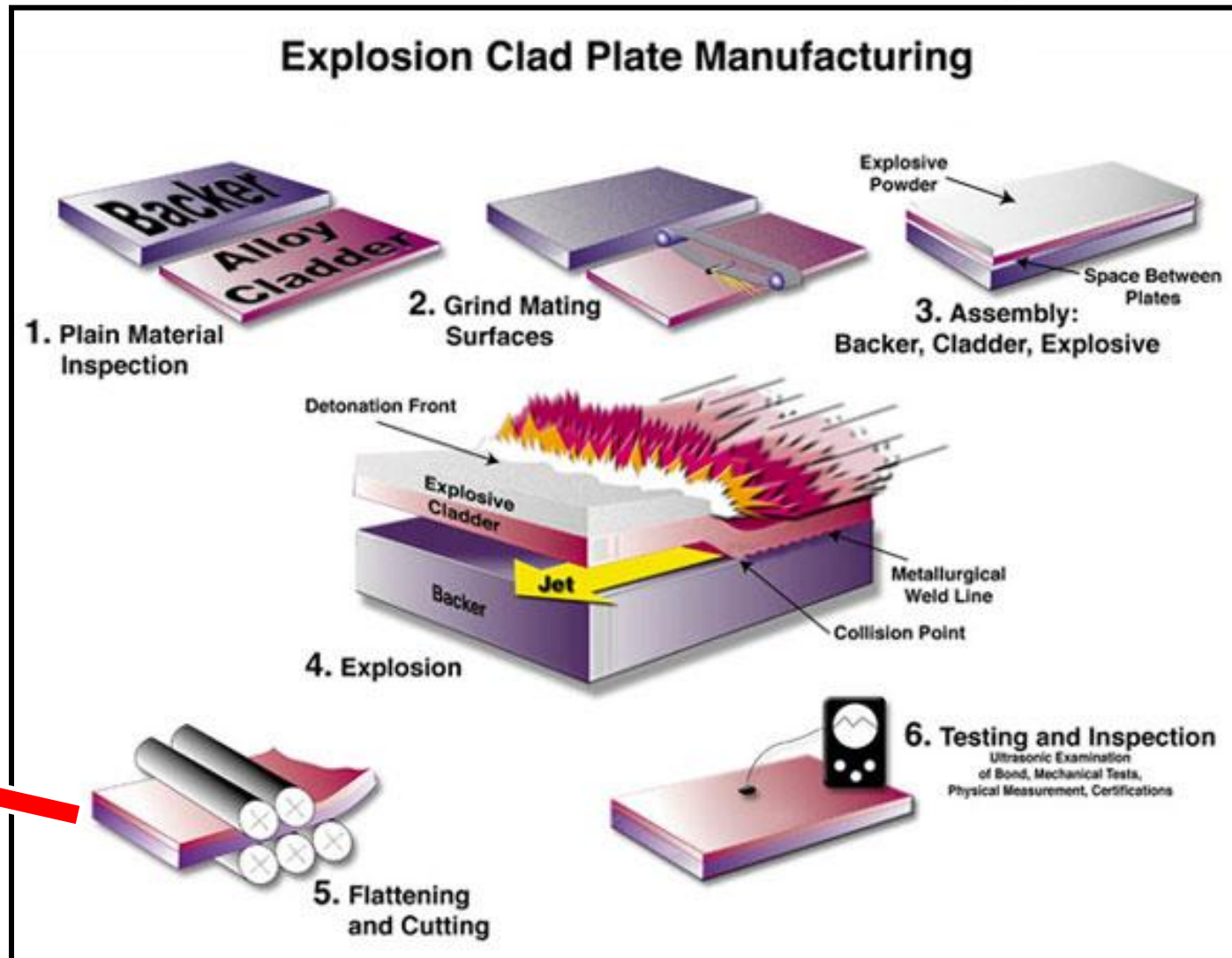


Detalhe da região de ligação da união por explosão



Processos envolvidos: Fundição, conformação, usinagem e soldagem.

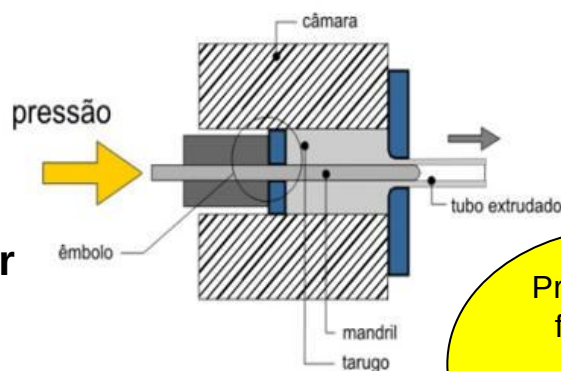
Representação esquemática do processo de soldagem por explosão



Exemplo 5 – Fabricação de tubo com e sem costura

✓ Sem costura

Conformação a quente, a partir de tarugos de aço, por processos de mandrilagem ou extrusão



Processos de fabricação

Fundição,
conformação
e usinagem



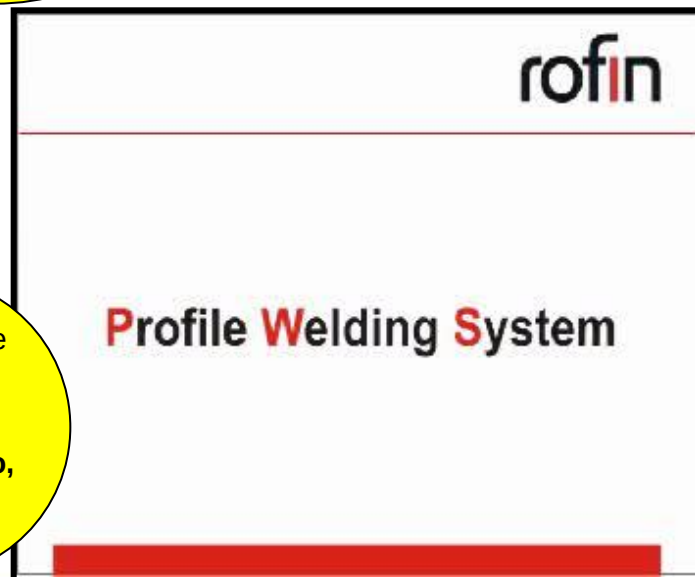
✓ Com costura

Tiras de aço que são dobradas (perfiladas) na forma cilíndrica por meio de uma matriz e em seguida soldadas as extremidades em todo o seu comprimento



Processos de fabricação

Fundição,
conformação,
soldagem e
usinagem



Correta seleção do processo de fabricação – Continuação...

E se acontecer a situação onde **mais de um processo** seja **aplicável** na produção do bem “peça/equipamento” (**o que fazer?**)

- a) Avaliar qual a **qualidade pretendida** para o produto (cliente x acabamento);
- b) Avaliar **custo dos equipamentos** (investimento inicial x depreciação);
- c) Avaliar **tempo de produção** (tempo gasto na fabricação de um componente ou do conjunto);
- d) Avaliar **qualificação e quantidade** de HH envolvida (e o Brasil?);
- e) Avaliar necessidade e **custo de manutenção/operação** (pós-venda);
- f) Avaliar **custo e disponibilidade** de consumíveis (tubos pirólise / HNO_3);
- g) Avaliar a **forma, dimensão e tolerância** do componente a ser produzido;
- h) Avaliar necessidade de **pré e/ou pós-preparação** do processo;
- i) Avaliar **legislação ambiental** (resíduos x reciclagem);
- j) Avaliar **ambiente de operação** (umidade, pH, H_2S , CO_2 , variação de temperatura, poluição, presença de abrasivo, salinidade “cloretos”, SO_2);
- k) Outros.



Quadro geral das possíveis aplicação dos processos de fabricação

Métodos de manufatura		Conformação			Corte				União				Acabamento		
		Estado líquido	Estado plástico	Estado sólido	Corte de chapas	Com formação de cavacos	Sem formação de cavacos	Chama/ térmico	Soldagem fraca/ brasagem	Soldagem	Adesivo	Mecânico	Conformação	Corte	Revestimentos
Metais	Ferrosos	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Não-ferrosos	●	●	●	●	●	□	●	●	●	●	●	●	●	●
Plásticos	Termofixos	●	▣	▣	●	●	◐	◐	▣	▣	●	●	●	□	●
	Termoplásticos	●	●	□	●	●	◐	◐	▣	●	●	●	●	●	●
Borrachas e elastômeros	Termofixos	●	▣	▣	●	◐	◐	◐	▣	▣	●	●	●	◐	◐
	Termoplásticos	●	●	●	●	◐	◐	◐	▣	●	●	●	●	◐	◐
Materiais de engenharia	Carbono manufaturado	●	▣	▣	▣	●	◐	▣	▣	▣	□	□	◐	◐	◐
	Vidro	●	●	▣	●	◐	□	▣	◐	●	□	□	●	◐	◐
	Vitrocerâmicos	●	□	▣	▣	◐	▣	▣	▣	▣	●	□	●	□	□
	Metais duros refratários	●	●	▣	▣	□	□	□	●	▣	◐	◐	◐	●	◐
Materiais naturais	Fibras	●	□	●	●	●	▣	◐	▣	▣	□	●	◐	◐	◐
	Produtos em madeira	◐	◐	▣	●	●	◐	◐	▣	▣	●	●	◐	●	●

● todos os processos □ a maioria dos processos ◐ alguns processos ▣ nenhum processo

Fonte: Lesko (2008).

Fabricação x Normatização – Importância

O que são normas técnicas?

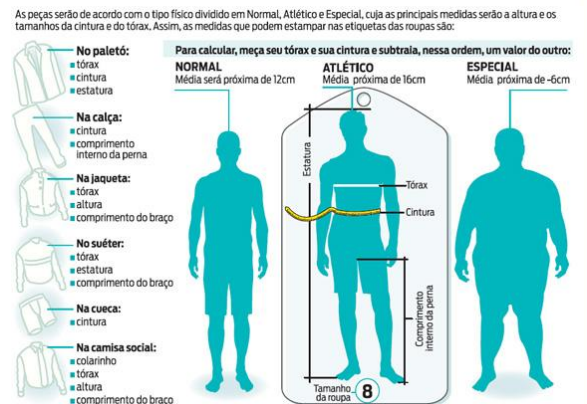
“As *normas técnicas* referem-se, em geral, à *classificação, especificação, método de ensaio, procedimento, padronização, simbologia e terminologia*. A *normatização* proporciona uma série de *vantagens* aos *fabricantes, comerciantes e consumidores*, que vão desde a *eliminação de barreiras comerciais à segurança do usuário*.” Fonte: SEBRAE

A indústria deve entender a normatização, num processo fabril, como um critério para o incremento “conjunto” da produção, simplicidade e da competitividade, de forma a garantir produtos de qualidade, seguros e ambientalmente adequados.

Como se dividem as normas técnicas?

- Internacional (ISO, IEC, outras)
- Regional (AMN, CEN);
- Nacional (ABNT “NBR”, MTE “NR”, ANVISA, DIN, BS, outras)
- Associações (ASME, API, AWS, ASTM, outras)
- Empresarial (Petrobras; FORD, outras).

“A Normalização proporciona os meios necessários para a troca adequada de informações entre clientes e fornecedores, com vista a assegurar a confiança e um entendimento comum nas relações comerciais”. Fonte: Odílio Baptista (ABNT)



Exemplo da importância da normatização:
As etiquetas do vestuário masculino agora vão além do P, M e do G. O tamanho M, por exemplo, ganhou três opções: **M convencional, M para pessoas atléticas e M especial.**
(Fonte: Jornal Hoje / Jornal Nacional / NBR 16060)

Exemplos:

ASME Seção IX – Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators

Petrobras N-1738 – Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados

API Specification 6A/ISO 10423 – Specification for Wellhead and Christmas

NBR 14842 – Critérios para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem

ANSI/API 1104 – Welding of pipelines and related facilities

Petrobras N-2033 – Inspeção de Fabricação: Qualificação de Pessoal

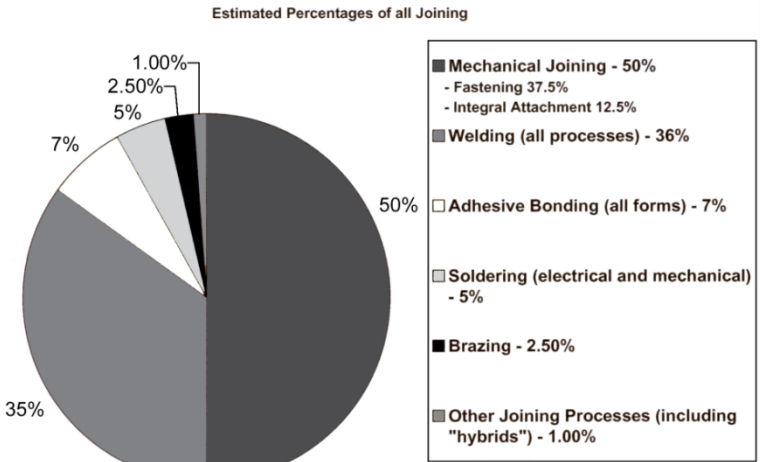


Quais os processos de união utilizados industrialmente?

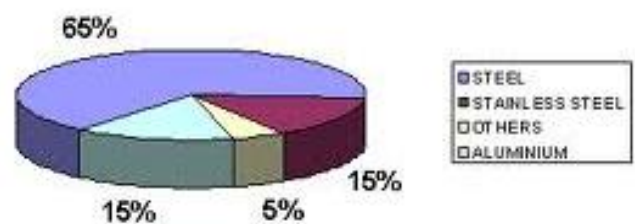
- ❑ Soldagem (soldagem/brasagem);
- ❑ Colagem (adesão);
- ❑ União mecânica (fixação/união/ligação mecânica).



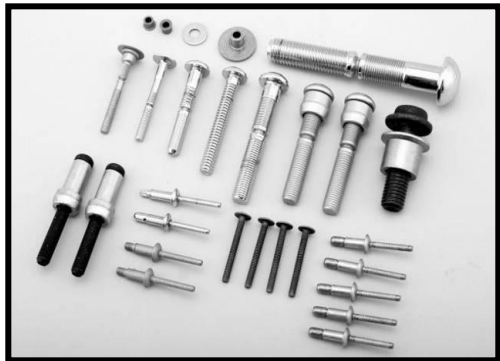
Mechanical joining and adhesive bonding undoubtedly had their origins with dawn of humankind ... and maybe even earlier!



Fonte: Messler (2003)



Metais comumente soldados (percentual de representação)



Quais os critérios que definem os potenciais processos de união?

- a) Funcional (grau de permanência, tipo de carga e resistência);
- b) Técnico (tipo de material, projeto da junta e condições de operação);
- c) Espacial (espessura, área, peso, acesso, complexidade de formas e posições de montagem);
- d) **Econômico** (quantidade a ser produzida, facilidade de automação, valor HH e HM, disponibilidade do equipamento).

Classificação dos requerimentos para união. (Fonte: Adaptado de Swift, 2003).

Categoria		Critério avaliado	Descrição
Tecnológica	Funcional	• Grau de permanência (permanente, semi e não permanente) • Tipo de carregamento (estático, cíclico, impacto) • Resistência	Requisitos funcionais definem as características de trabalho da união.
	Técnica	• Configuração da junta • Temperatura de operação • Tipo de material • Precisão	Necessidades específicas dos componentes a serem unidos são classificadas pelo “requerimento técnico da junção”.
	Espacial	• Espessura • Tamanho e peso • Geometria (complexidade)	Características geométricas da junção são descritos “requerimentos espaciais”.
	Outros	• Flexibilidade (montagem/manutenção) • Segurança • Acessibilidade à junta • Qualidade	Outras importantes características não consideradas anteriormente.
Econômica		• Quantidade e taxa a ser produzida • Disponibilidade de equipamentos • Qualificação necessária da mão de obra • Facilidade à automação • Custos	Relação entre as necessidades do produto x o processo de união x características do mercado.

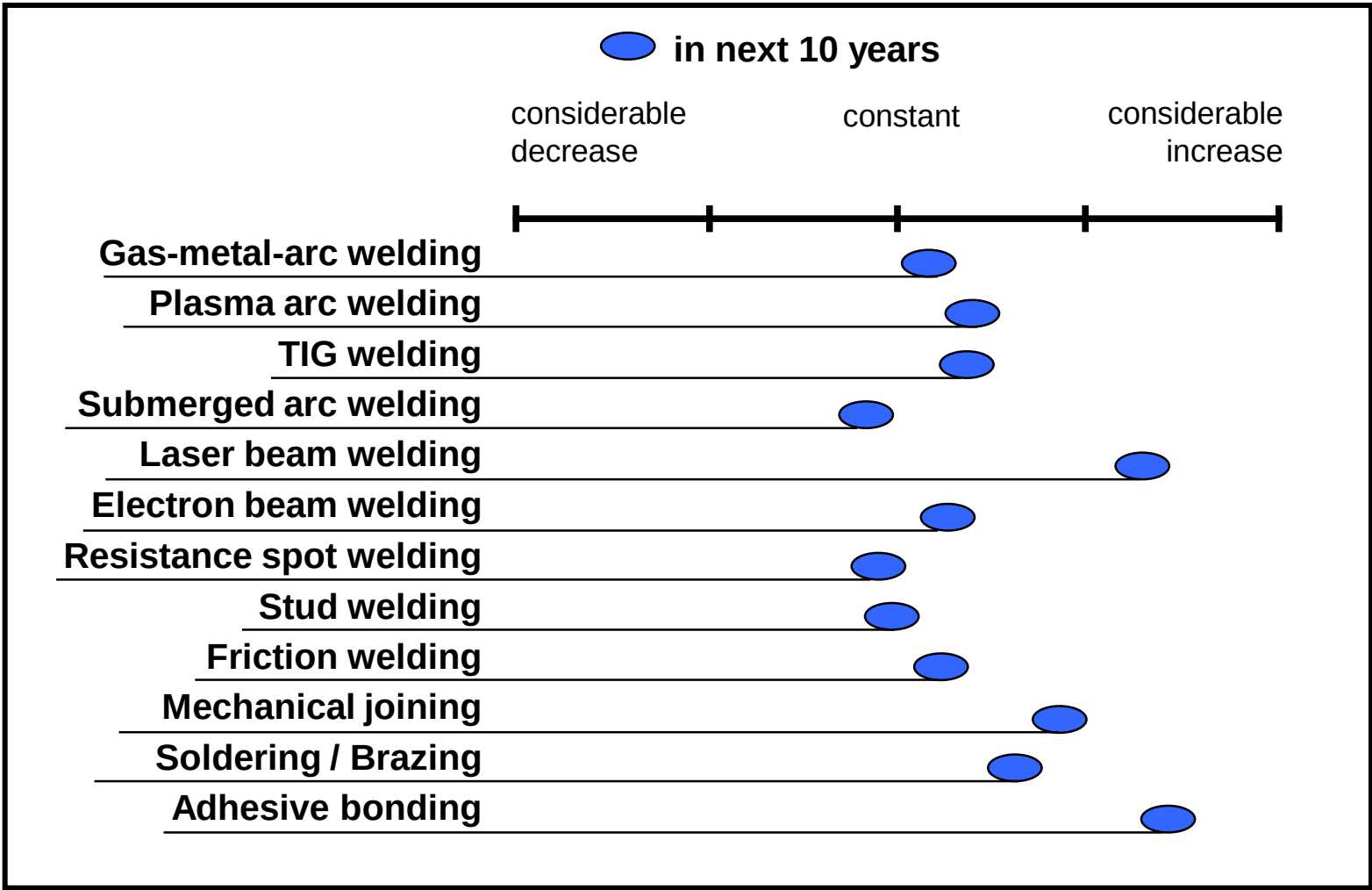
Características gerais apresentadas pelos processos de união

<i>Joint characteristics</i>	<i>Mechanical joints</i>	<i>Brazing and soldering</i>	<i>Welding</i>	<i>Adhesive bonding</i>
Permanent	No	Semi	Yes	Yes
Appearance	Normally visible bolts, but some clips can be hidden	Good	Normally acceptable can be polished to improve appearance	Almost invisible
Temperature tolerance	Normally high	Limited by filler material	Very high	Poor
Stress distribution	Local points of high stress	Good distribution	May need stress relieving	Good distribution, but poor peel resistance
Preparation	Varies, often drilling and tapping	Normally need to apply flux	Edge preparation for thick edges	Cleaning
Post processing	None	Remove corrosive fluxes	Varies, none, heat treat, polish.	Normally none
Capital cost	Low	Manual cheap, furnace brazing expensive	Varies, manual gas cheap, EBW expensive	Normally low
Consumable cost	Relatively expensive	Varies	Low	Quite expensive for structural adhesives
Production time	Including preparation, quite slow	Automated systems quite fast	Varies, can be fast	Very variable according to adhesive
Inspection	Simple for bolted joints	Difficult	Various NDT methods available	Limited NDT methods

Correlação entre característica da junção x consequência na seleção do processo de união

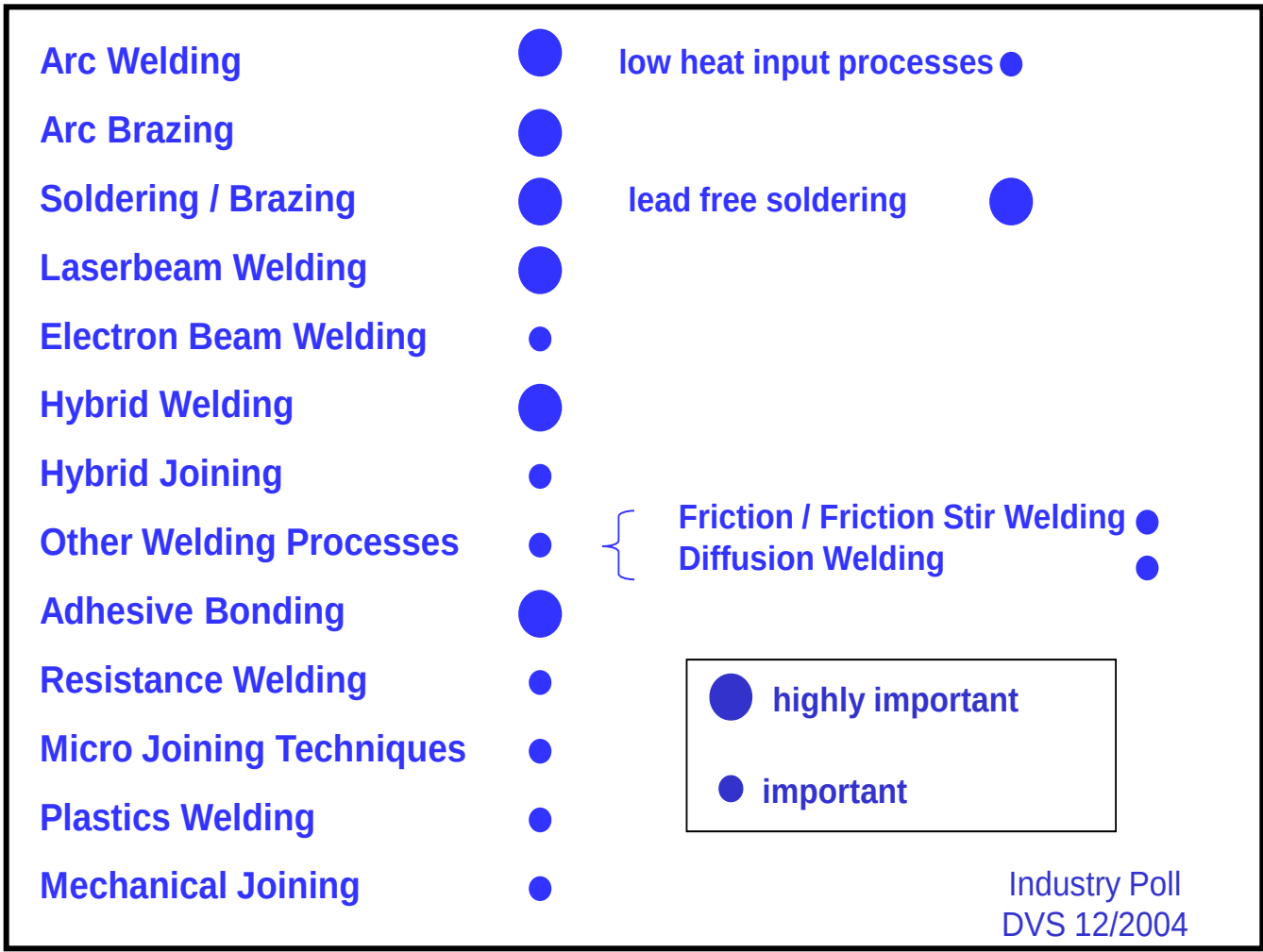
Fonte: Black, 1996.

Previsão de desenvolvimento/aplicação dos processos de união



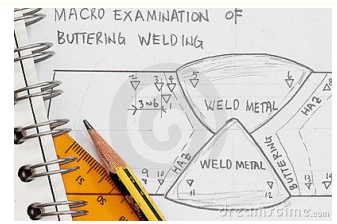
Fonte: Schuler (2008)

Nível de importância das pesquisas desenvolvidas em diferentes processos de união.



E o que vem a ser soldagem?

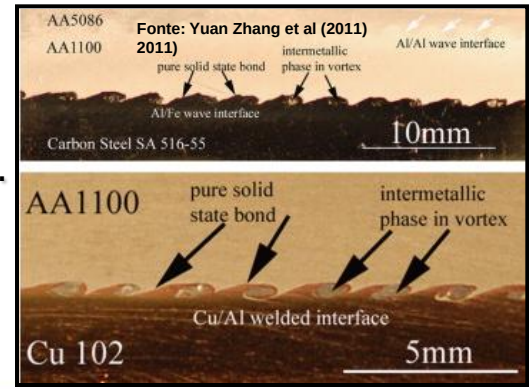
✓ Ato ou efeito de soldar (Dicionário Aurélio).



- ✓ **União** localizada de **metais ou não-metais**, produzida ou pelo **aquecimentos** dos metais até a **temperatura** de soldagem, com ou sem a **aplicação de pressão**, ou pela aplicação de pressão somente, com ou sem uso de **metal de adição** (AWS, 1987).
- ✓ Processo que visa a **união localizada** de materiais, similares ou não, de forma **permanente**, baseada na ação de **forças em escala atômica** semelhantes às existentes no interior do material e é a forma mais importante de união permanente de peças usadas industrialmente (Wikipédia).
- ✓ É um processo de fabricação, do grupo dos processos de união, que visa o revestimento, a manutenção e/ou a união de materiais, em escala atômica, com ou sem o emprego de pressão e/ou com ou sem a aplicação de calor. Nesse caso, sempre que a **ideia** se refira a **operação** (preparação, execução e/ou avaliação), o termo correto a ser utilizado é soldagem (Site da Soldagem).

O que se entende por solda (definição)?

✓ Região gerada pela operação de soldagem (por exemplo: **ZF + ZTA**).



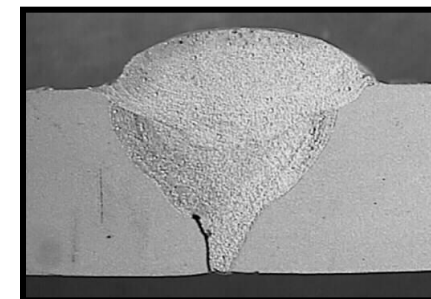
Projeto de estrutura soldada – união/revestimento (critérios)

O que se espera de um adequado projeto?

- a) Executar **funções almejadas**;
- b) Garantir **segurança e confiabilidade**;
- c) Garantir **capacidade de fabricação** (configuração x acesso), inspeção, transporte e operação com **menor custo**.

Por sua vez, o **custo final** do componente fabricado compreenderá:

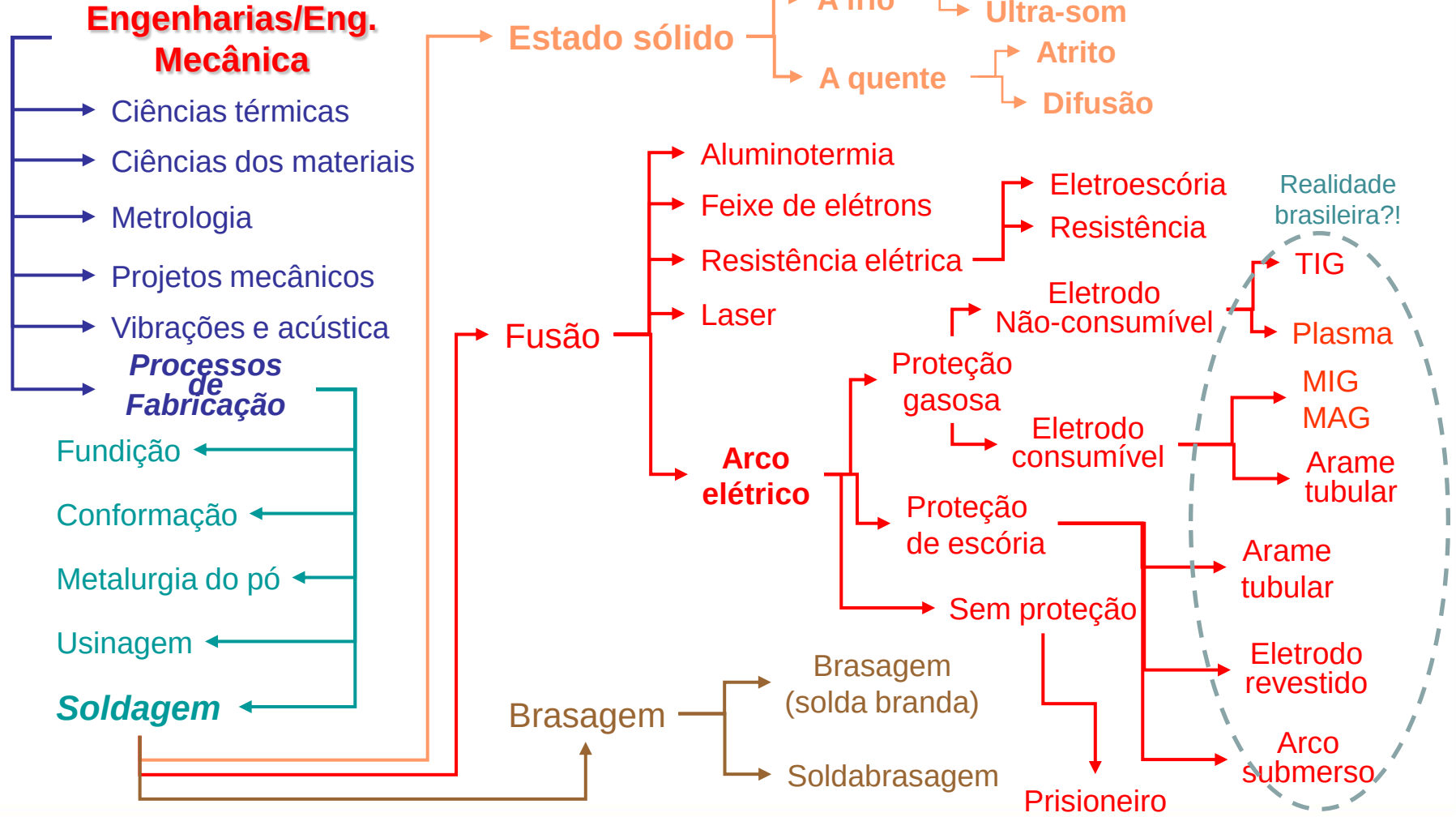
- i. Custo de Projeto;
- ii. Custo de Materiais;
- iii. Custo de Fabricação;
- iv. Custo de Montagem;
- v. Custo de Inspeção;
- vi. Custo de Operação;
- vii. Custo de Reparo;
- viii. Custo de Manutenção.



Observação: Um conjunto soldado deve seguir as normas de fabricação/segurança, ter custo acessível, apresentar microestrutura e formato apropriado para transferir a aplicação das cargas, resistir ao meio e permitir fabricação por um determinado processo de soldagem (soldabilidade).

Qual a área de conhecimento onde a tecnologia de soldagem é inserida e como se dividem os processos?

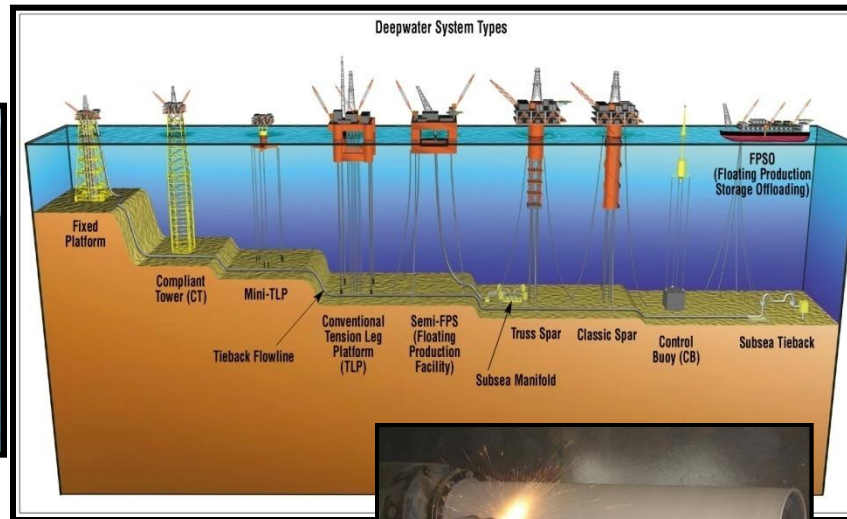
Exemplo:



Áreas de aplicação e importância econômica da indústria /setor de soldagem



Naval



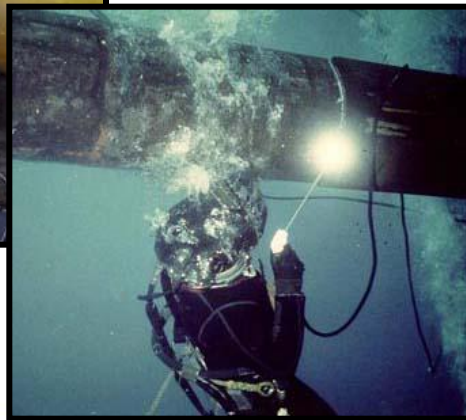
Off-shore



Química/Petroquímica



Montagem e/ou
recuperação metálica



Construção civil



Automobilística

Áreas de aplicação e importância econômica da indústria / setor de soldagem (continuação)

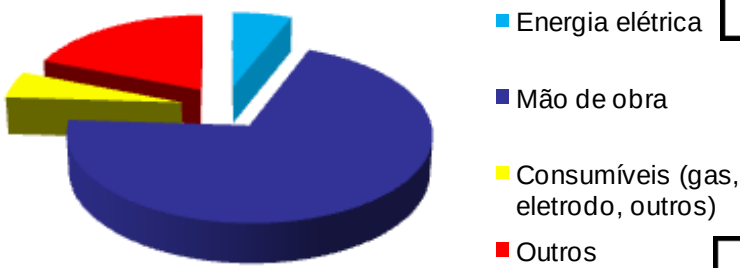


Mechanical Engineering
60 Billion EUR
Welding Industry 4 %



Metal Construction
55 Billion EUR
Welding Industry 6 %

Como se divide o custo associado a operação de soldagem (estimativa)?



Observação:
No setor naval, aproximadamente 23% do custo final da obra equivale a aquisição do metal de base.



Vehicle Construction
50 Billion EUR
Welding Industry 5 %

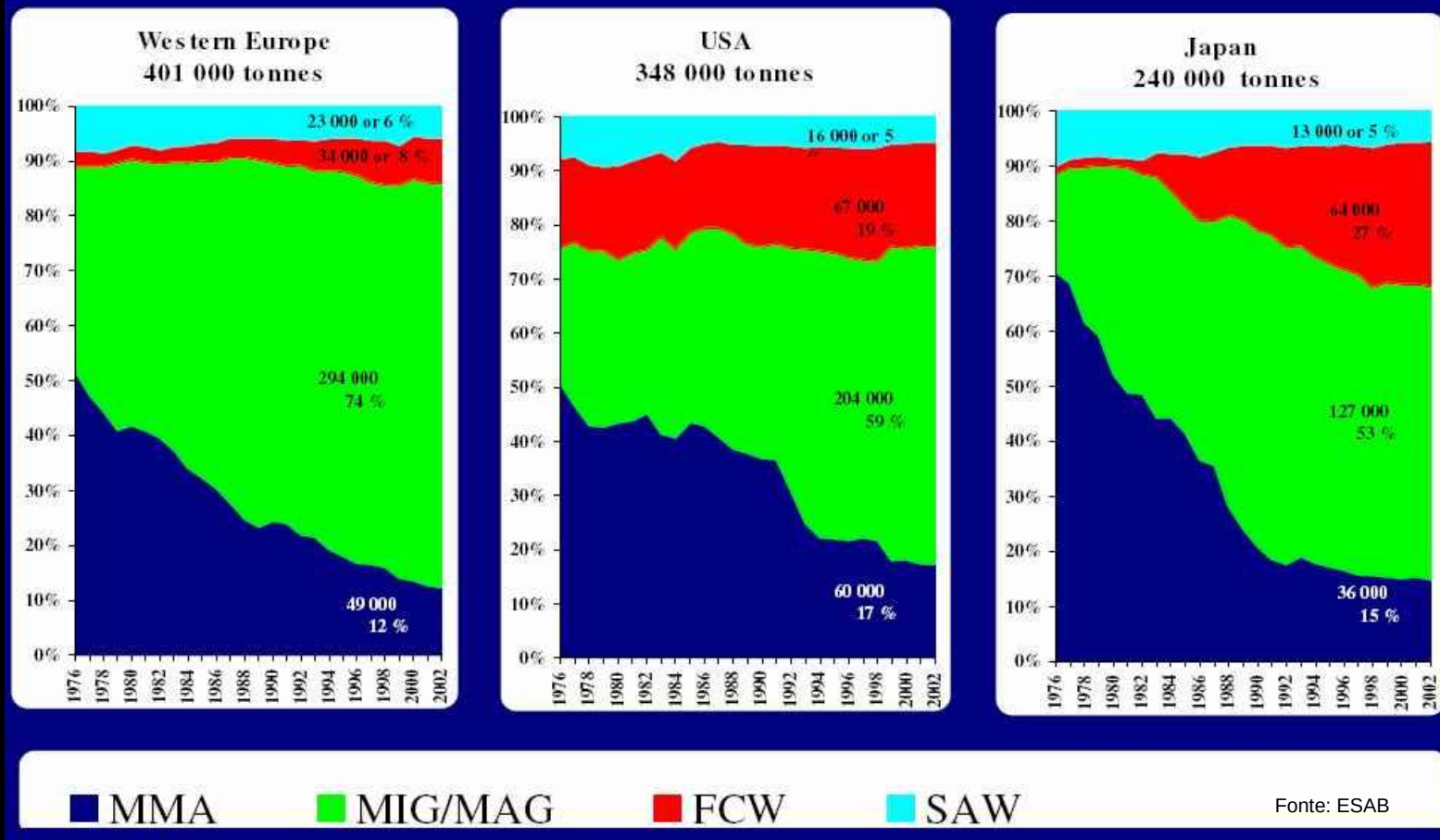
Fonte: Schuler (2008)



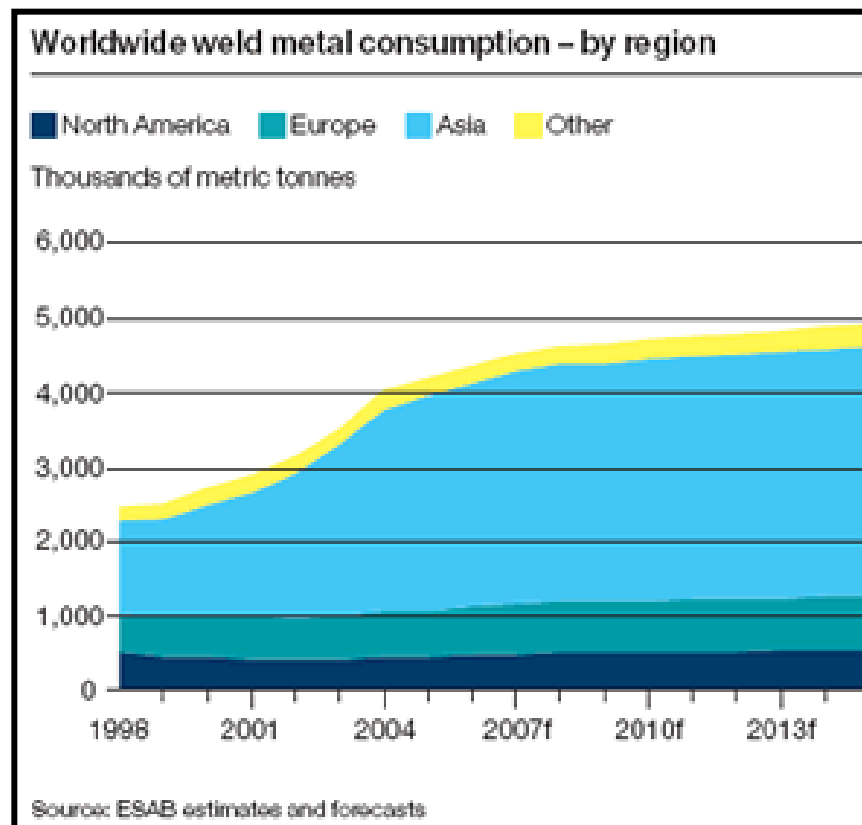
Aero Space and Aircraft Construction
Shipbuilding
8-Billion. EUR
Welding Industry 5 %

Perspectivas do consumo de eletrodos x processos

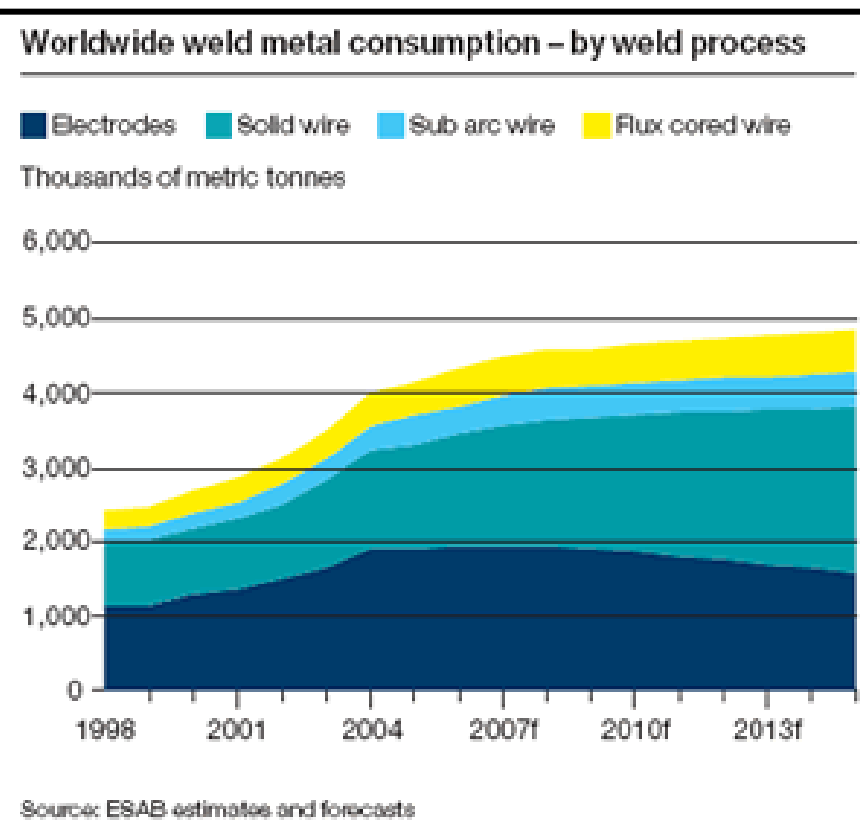
Weld Metal Deposited 1976-2002



Estimativa de demanda mundial por metal de adição e por processo de soldagem ao arco elétrico



Por continente



Por processo

Fonte: production.investis.com/charter/esab

Características gerais dos processos de soldagem por fusão

Joining process	Operation	Advantage	Skill level required	Welding position	Current type	Distortion*	Cost of equipment
Shielded metal-arc	Manual	Portable and flexible	High	All	ac, dc	1 to 2	Low
Submerged arc	Automatic	High deposition	Low to medium	Flat and horizontal	ac, dc	1 to 2	Medium
Gas metal-arc	Semiautomatic or automatic	Most metals	Low to high	All	dc	2 to 3	Medium to high
Gas tungsten-arc	Manual or automatic	Most metals	Low to high	All	ac, dc	2 to 3	Medium
Flux-cored arc	Semiautomatic or automatic	High deposition	Low to high	All	dc	1 to 3	Medium
Oxyfuel	Manual	Portable and flexible	High	All	—	2 to 4	Low
Electron-beam, Laser-beam	Semiautomatic or automatic	Most metals	Medium to high	All	—	3 to 5	High
* 1, highest; 5, lowest.							

Relação entre tipo de processo x custo de equipamento x nível de distorção x qualificação da mão de obra x outros

Comparação entre os processos de união

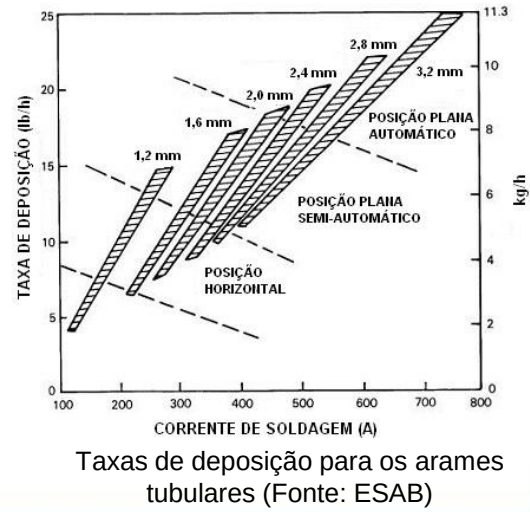
União por soldagem ao arco elétrico (relação entre custo relativo x posição de soldagem x valor de Is x taxa de deposição “estimada”)

	Eletrodo Revestido	TIG	MIG MAG	Plasma	Arco Submerso	Eletrodo Tubular
Tipo de operação	Manual	Manual e automática	Automática e Semi	Manual e automática	Automática e Semi	Automática e Semi
Custo	1	1,5	3	5 a 10	10	3
Posição	Depende mat.	Todas	Todas	Todas	Plana ou Hor.	Plana ou Vertical
Faixa de corrente	50 a 300 A	10 a 300 A	60 a 400 A	1 a 500 A	até 400 A	150 a 1000 A
Taxa de deposição	0,5 a 5 kg / h	0,2 a 1,5 kg / h	1 a 15 kg / h	0,5 a 2,5 kg / h	kg / h	2 a 9kg / h

Method	Characteristics								Cost
	Strength	Design variability	Small parts	Large parts	Tolerances	Reliability	Ease of maintenance	Visual inspection	
Arc welding	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Resistance welding	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brazing	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Bolts and nuts	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Riveting	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Fasteners	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Seaming, crimping	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adhesive bonding	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Note: 1. very good; 2. good; 3. poor.

Comparação entre as características obtidas por diferentes processos de união (resistência mecânica x tamanho do componente x custos x outros).



Quais os estudos na área de soldagem (importância C&T)?



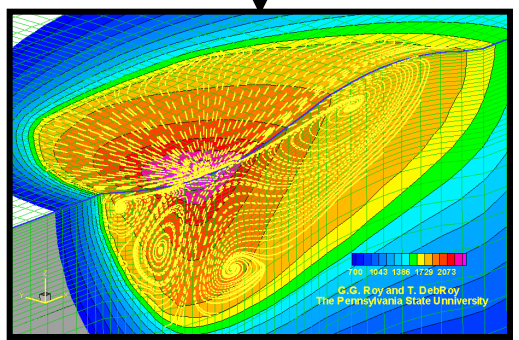
Definição do processo e do procedimento (variáveis)



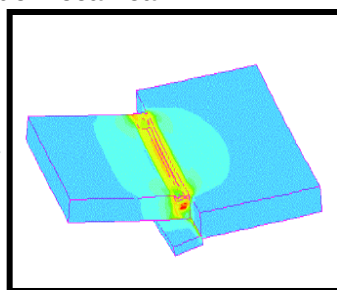
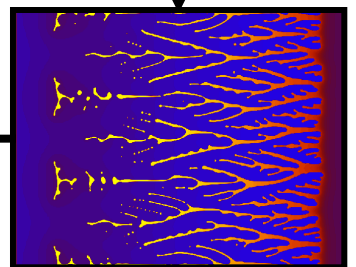
Como o processo forma a região do arco e agita a poça de fusão



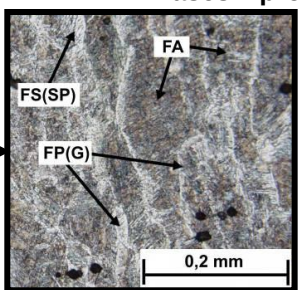
Relação entre a agitação da poça x campos de temperatura e velocidade



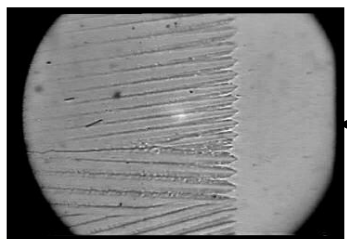
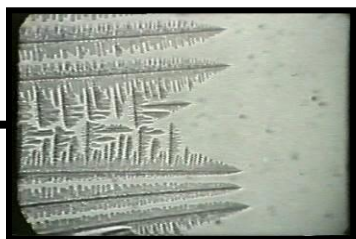
Modo de solidificação



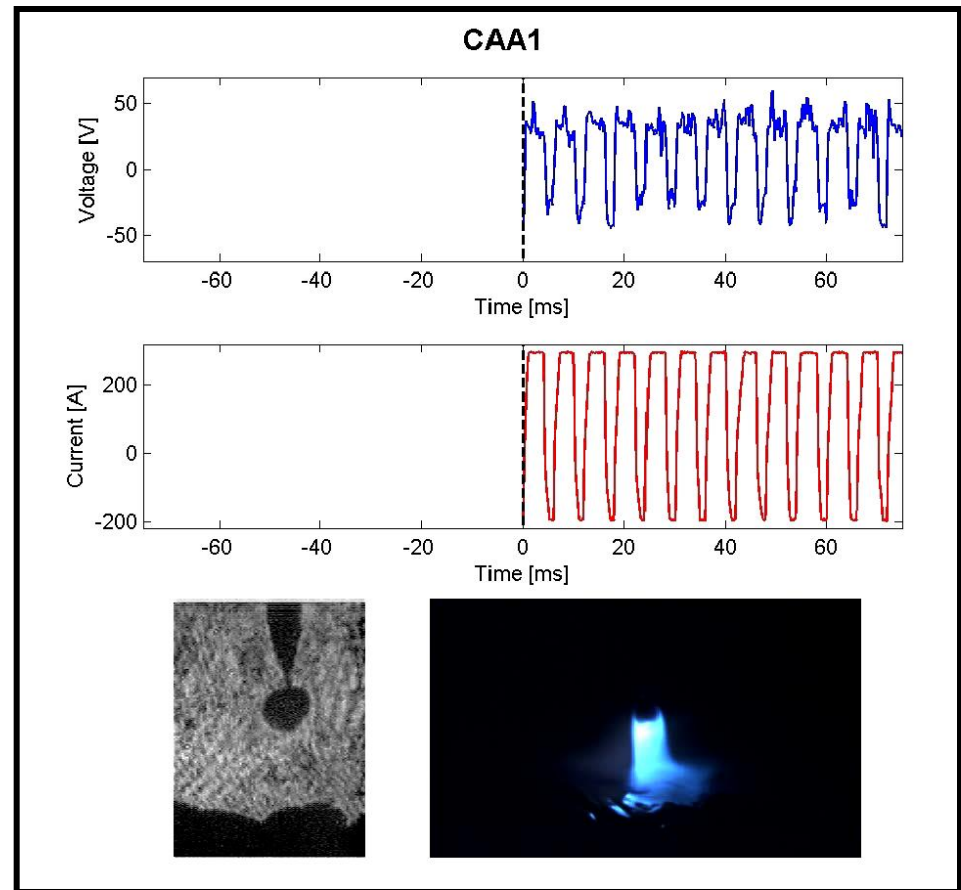
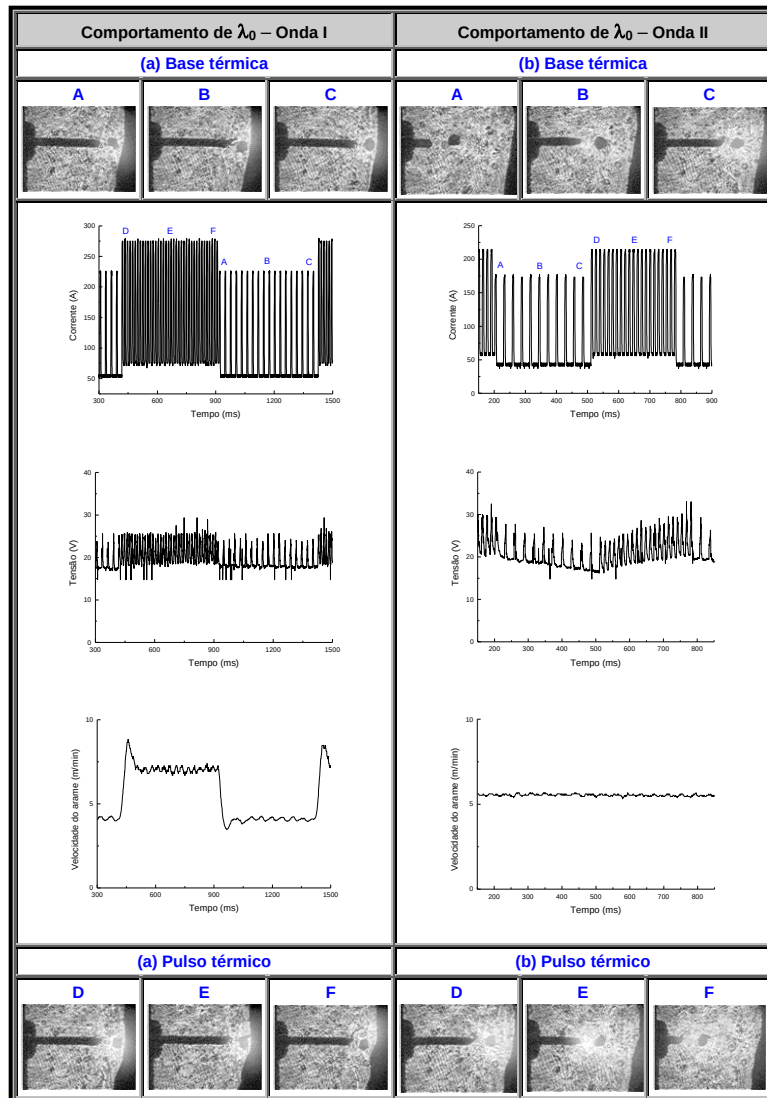
Relação entre granulometria x imperfeições x fases x propriedade mecânica



Geometria x ZF x ZTA x ZR

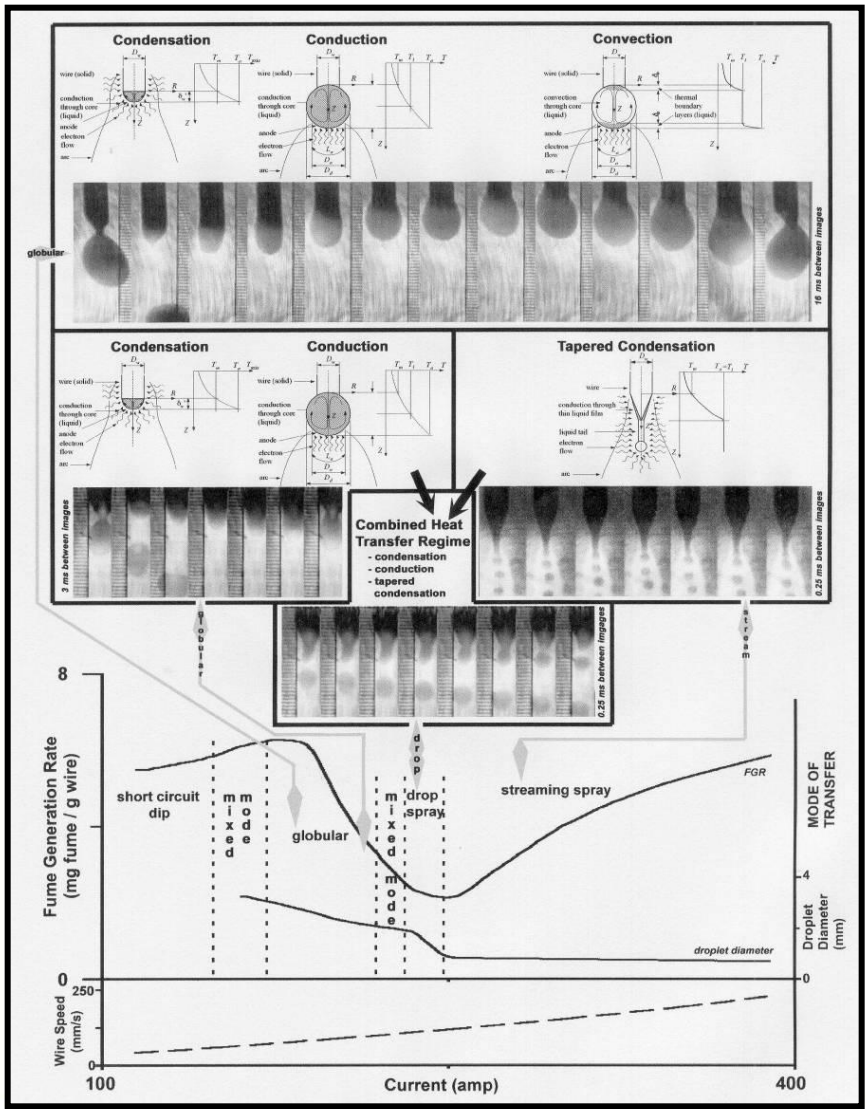


Estudo da estabilidade do arco elétrico (processo)



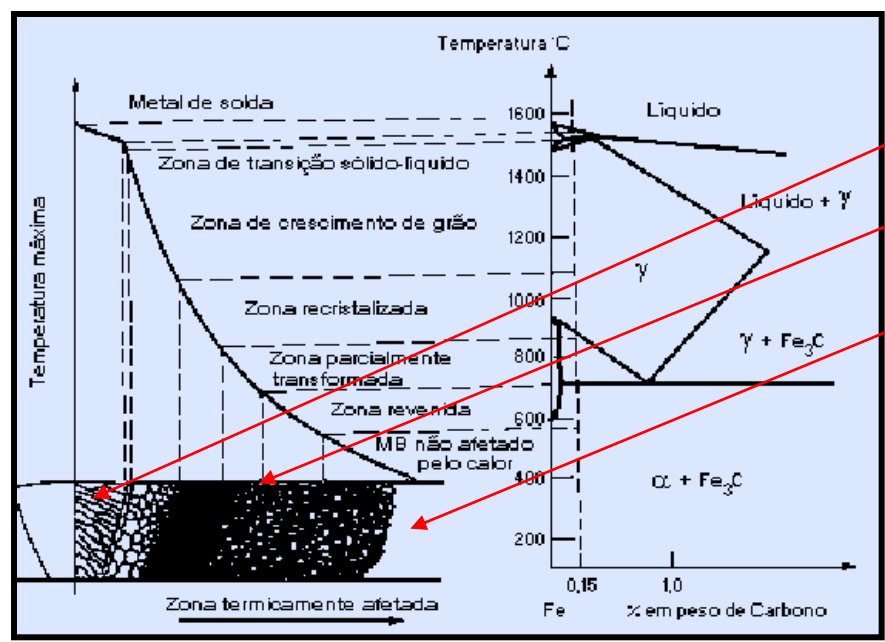
Forma de onda x estabilidade do arco x realimentação x agitação da poça x propriedade mecânica (Barra, 2003; Laprosolda, 2008)

Estudo da estabilidade do arco elétrico (*processo x física do arco*)



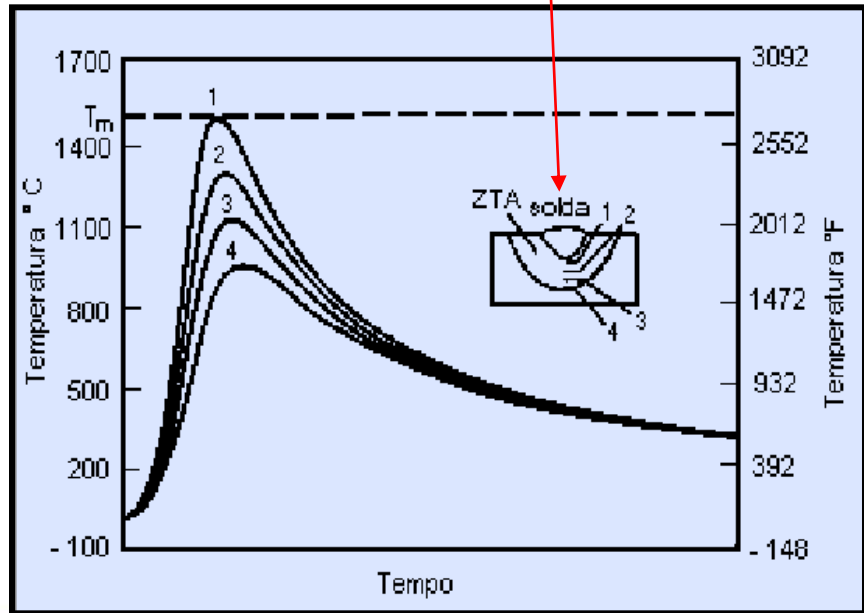
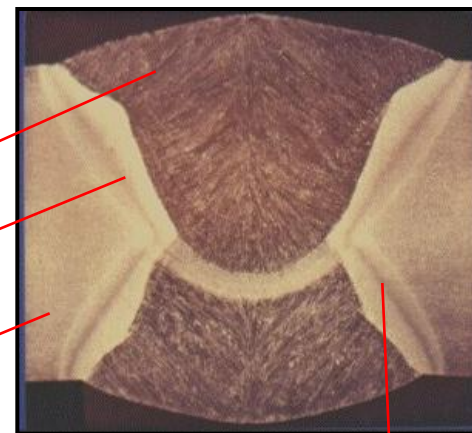
Relação entre os modos de condução de calor x forma de transferência metálica x geração de fumos

Estudo do efeito do aquecimento e do resfriamento experimentados pelo depósito



Partição térmica
(temperatura x distância)

Ciclo térmico
(temperatura x tempo)



Áreas possíveis para estudo/pesquisa em soldagem:

- a) Aplicação do mapeamento e controle do processo de soldagem via *rede neural, lógica fuzzy, algoritmo genético, outros*;
- b) Desenvolvimento de softwares (aplicações acadêmicas / comerciais);
- c) Simulação do perfil da zona fundida (ZF) e/ou ZTA;
- d) Maximização, via simulação, das propriedades mecânicas da ZF durante a soldagem multipasse;
- e) Simulação e validação experimental do perfil de tensão residual;
- f) Simulação e validação experimental da *partição térmica* ($T \times d$) e *ciclo térmico* ($T \times t$);
- g) Avaliação metalúrgica da ocorrência de falhas/degradação em regiões soldadas (corrosão, fratura; defeitos, fases, outros);
- h) Estudo da gestão do processo de fabricação por soldagem (custo / logística);
- i) Normatização (*EPS x RQPS x Normas x maximização da vida em serviço*);
- j) Desenvolvimento e/ou maximização de propriedades de revestimentos protetores;
- k) Soldabilidade dos aços, ferros fundidos e ligas não ferrosas
- l) Soldagem de aços baixa/média liga sem tratamento térmico posterior,
- m) Outras.

Referências complementares

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering.

AWS. Welding Handbook: Welding Processes.

AWS. Welding Handbook: Welding Science & Technology.

GROOVER, M. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process and Systems.

MACHADO, Ivan. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.

BLACK, R. Design & Manufacture / KOU, Sindo. Welding Metallurgy.

EASTERLING, Kenneth. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding.

GRONG, Oystein. Metallurgical Modelling of Welding.

SVENSSON, Lars-Erik. Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welding.

SWIFT, K. G. Process Selection: from design to manufacture. 2th Edition. Butterworth-Heinemann.

LEE, J. Modern Manufacturing: Mechanical Engineering Handbook.

FOLKHARD, Erich. Welding Metallurgy of Stainless Steels.

PALMA, José. Ciencia y Tecnica de la Soldadura.

WAINER, Emílio. Soldagem: Processos e Metalurgia.

LESKO, J. Design Industrial: Materiais e Processos de Fabricação.

MAGRAB, Edward. Integrated Product and Process Design and Development.

DAS, A. Metallurgy of Failure Analysis.

Revista Máquinas e Metais (www.arandanet.com.br/midiaonline/maquinas_metais/)

Revista Corte & Conformação de Metais (www.arandanet.com.br/midiaonline/corte_conformacao/)

Revista Soldagem & Inspeção (abs-soldagem.org.br/s&i/)

Revista Fundição e Serviços (www.arandanet.com.br/midiaonline/fundicao_servicos/)

Consultas/dúvidas:

barra@ct.ufrn.br

Apoio:

