

Elaboração Industrial do vidro

Mauro Akerman
mauro.akerman@gmail.com
Novembro 2020

Apresentação

Engenheiro metalúrgista e doutor eng. materiais – Poli USP

Saint Gobain Vidros (30 anos)

**Diretor da Associação Brasileira de Cerâmica e secretário da
Comissão de Vidro**

**Consultor nas áreas de elaboração do vidro e formação técnica
vidreira**

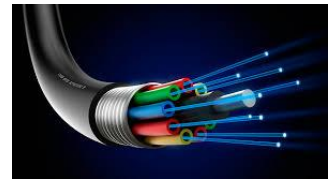
**Professor convidado do departamento de Engenharia de Materiais
da Escola Politécnica da USP**

Objetivo

Apresentar operações e fenômenos envolvidos no processo vidreiro industrial.

Vidros industriais mais comuns: Vidros Silicatos

Sílica Vítreo



Sodo-Cálcicos



Ao Chumbo



Borossilicatos



Alumino-Borossilicatos



Vidro Sodo-Cálcico

> 95% do volume produzido

Composição (peso)

SiO_2	69,0 a 72,0%
Na_2O	13,0 a 16,5%
CaO	9,5 a 16,5%
Al_2O_3	0,9 a 2,3%



Entendendo o processo vidreiro 1

Produção intensiva – grandes volumes

Produções típicas

Embalagens – 400t/dia $\approx 1,9 \times 10^6$



www.verallia.com.br

Vidro Plano – 1000t/dia $\approx 90.000 \text{ m}^2$ com 4mm de espessura
(Densidade = 2,5)

Entendendo o processo vidreiro 2

Processo contínuo.

O vidro é elaborado e conformado na sequência

O vidro é viscoso:

Difícil de homogeneizar.

Propriedades dependem da composição química

Entendendo o processo vidreiro 3

O forno constitui de uma grande piscina de vidro

uma carga errada pode contaminar todo o lastro e comprometer dias de produção

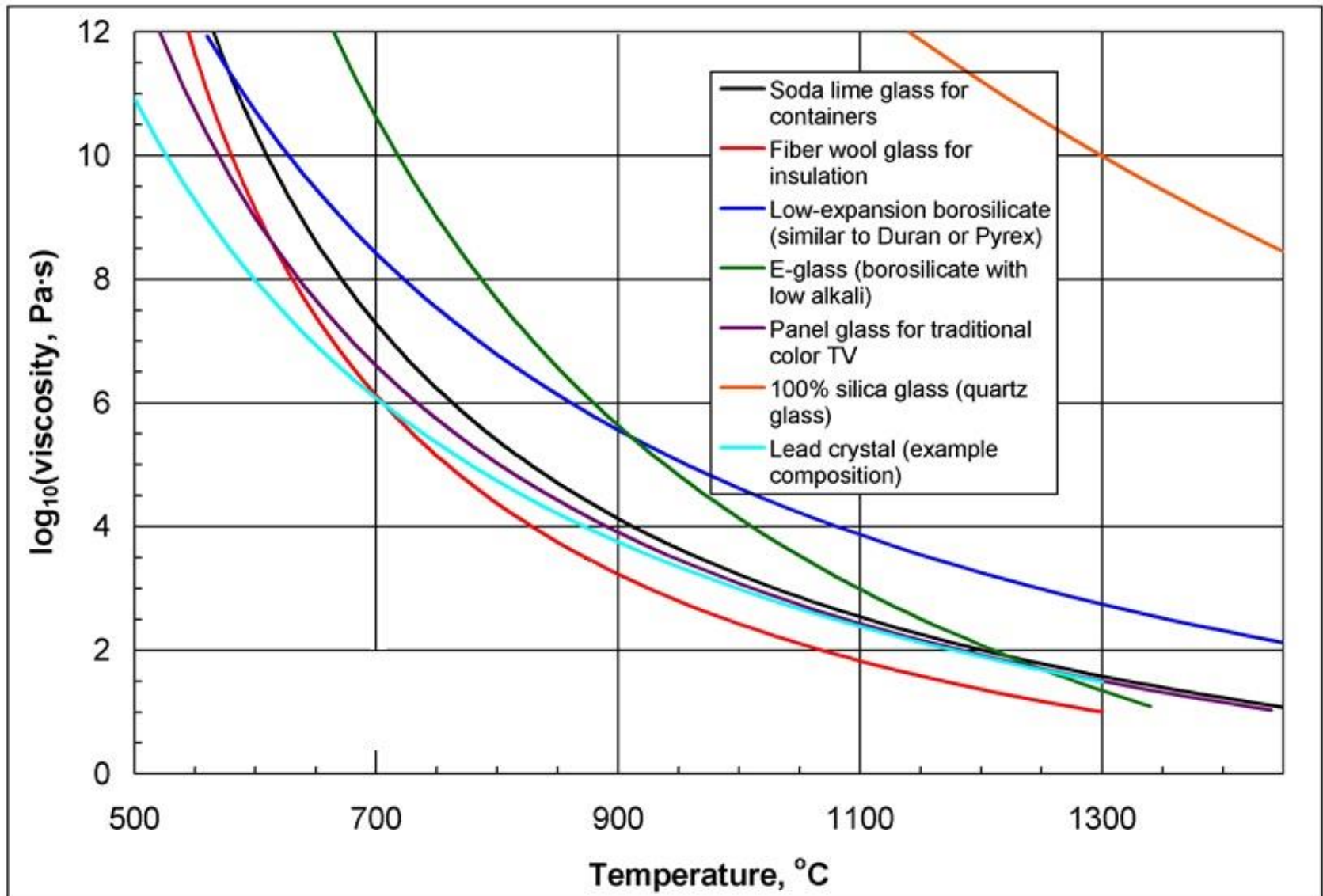
Todas as fase do processo influem:

uma má matéria-prima pode não só dar um produto defeituoso mas abreviar a vida do forno, aumentar consumo, poluir, etc.

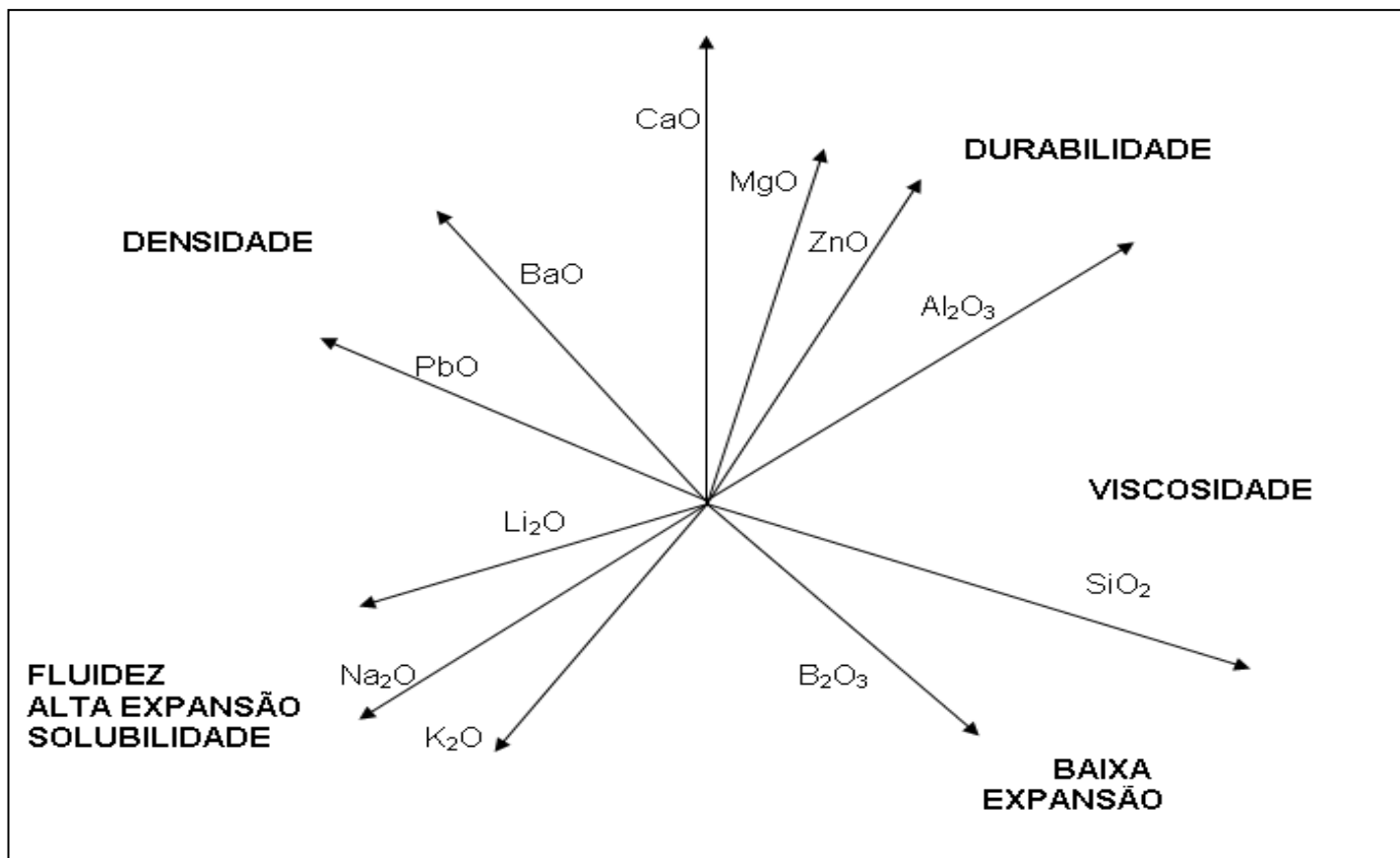
Idem refratários / condução do forno / manutenção / combustão / etc.

“Tudo que se vê não é
Igual ao que a gente viu há um segundo
Tudo muda o tempo todo no mundo”
Como uma onda – Lulu Santos

Viscosidade



Propriedades X composição química

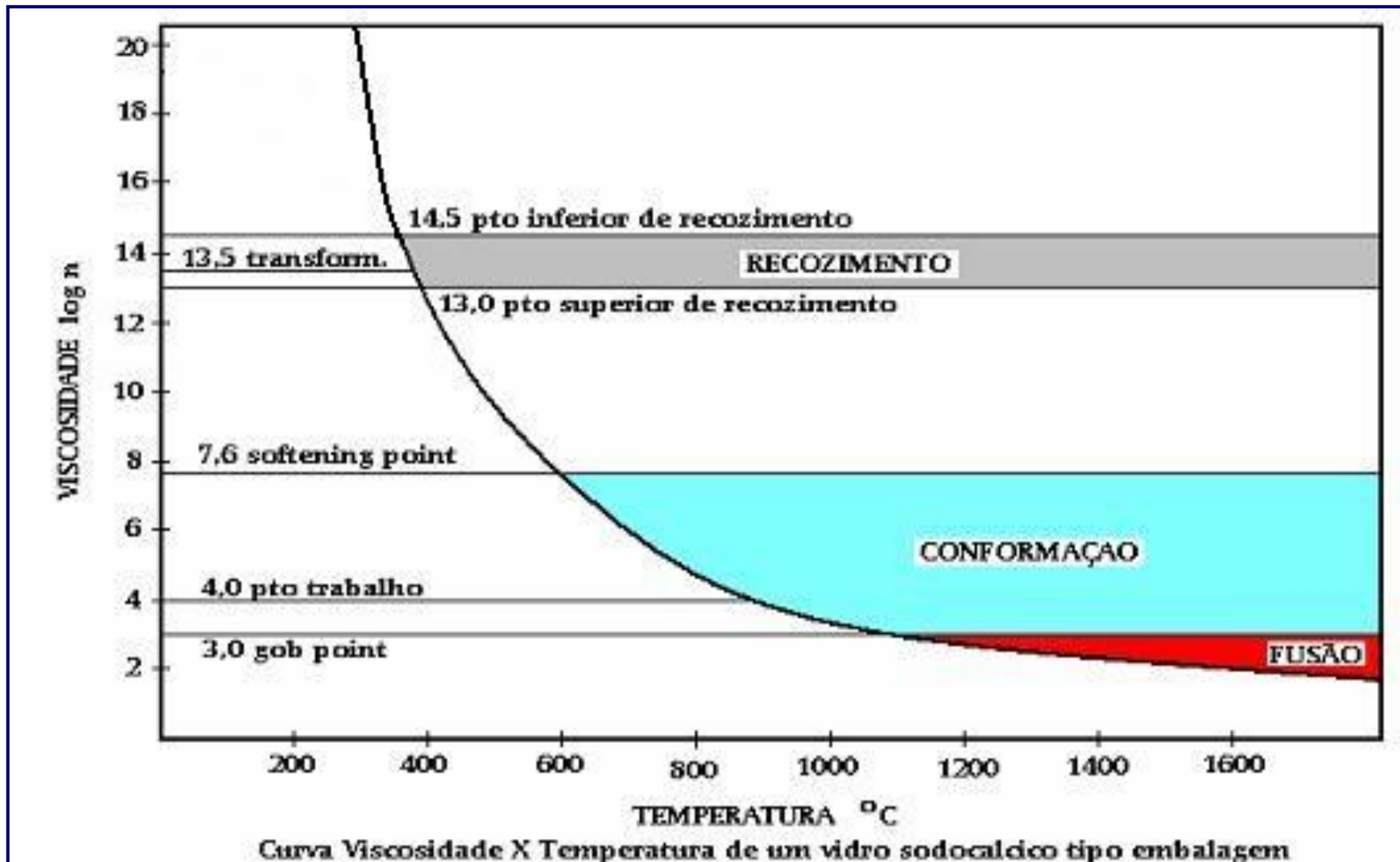


Adaptado de: Scholes S.R.- Modern Glass Practice-Cahners Books, Bostom, 1975

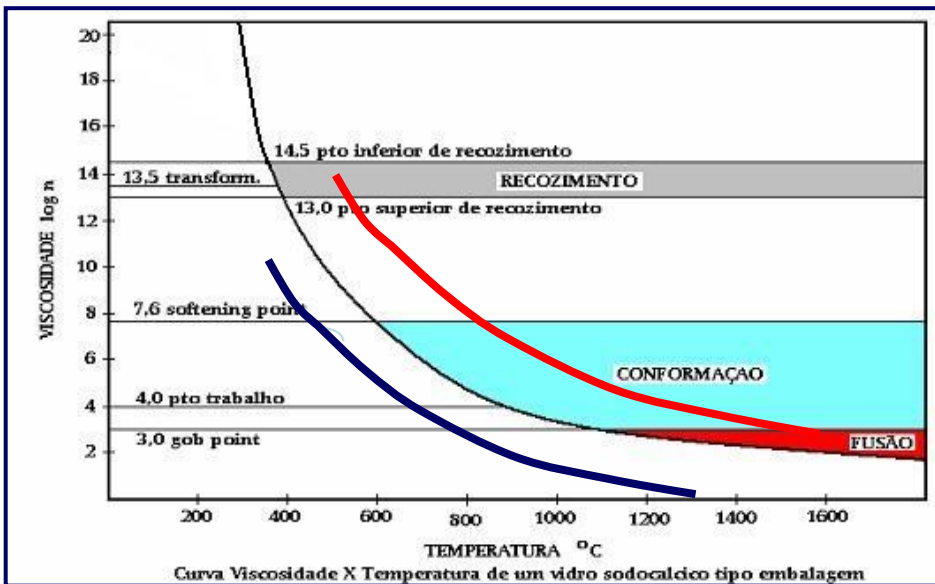
Cálculo teórico de ppddes a partir da compo química – ex:

<http://www.glassproperties.com/>

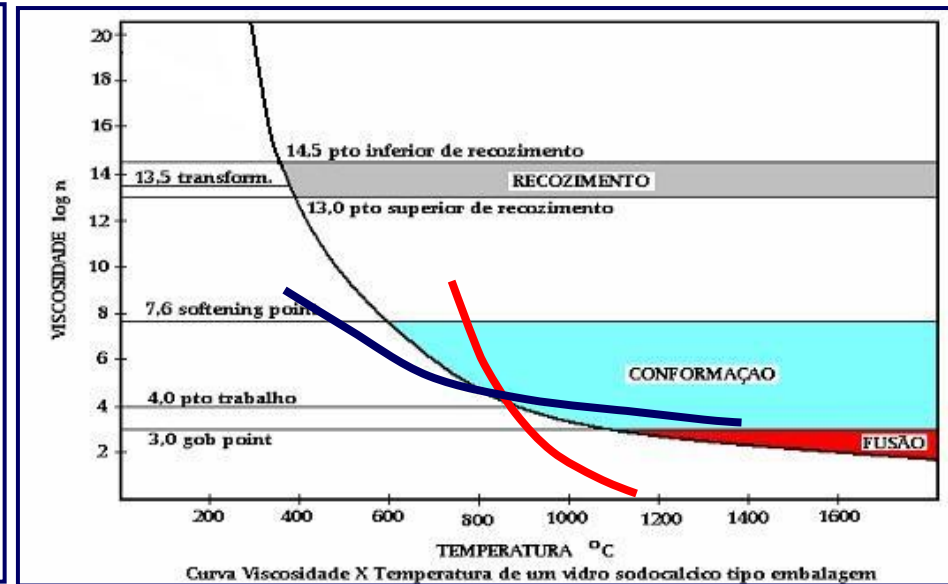
Viscosidade



Viscosidade – ajuste ao processo de conformação

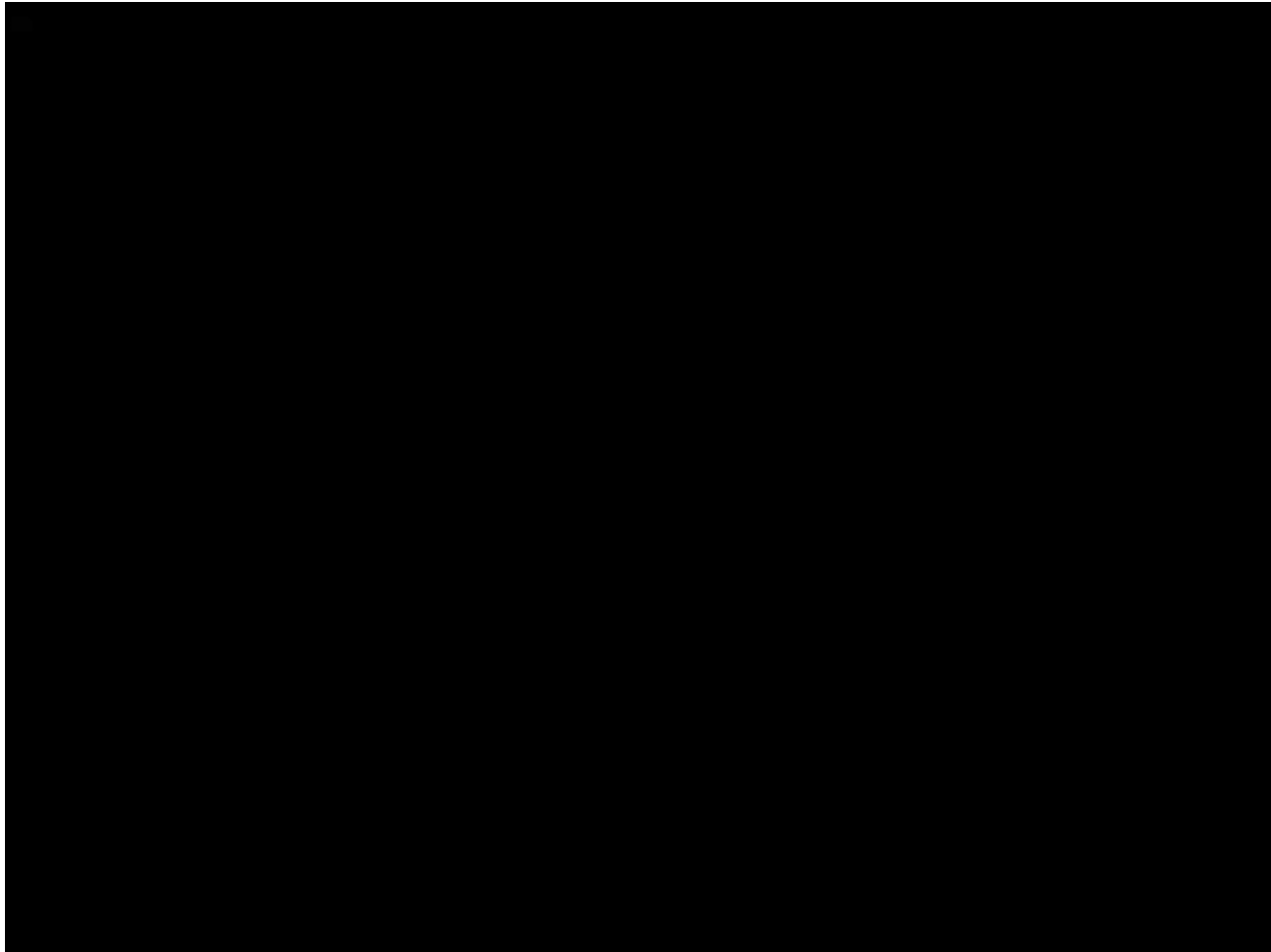


Vidro mais “duro”
Vidro mais “mole”



Vidro mais “rápido”
Vidro mais “lento”

Viscosidade



Fundentes da Sílica

Na_2O : Sódio

CaO : Cálcio

Reduzem a temperatura de fusão / conformação

Muito sódio: aumento solubilidade ($\downarrow$ resist. química)

Muito cálcio: aumenta a cristalização

Custo relativo:

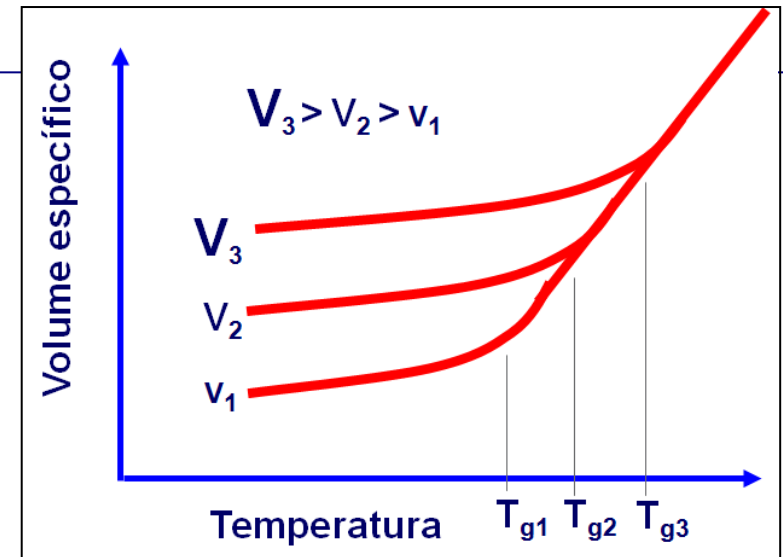
SiO_2	+	1
CaO	++	2
Na_2O	+++++	16

Estrutura do Vidro “congelada” Consequências:

Pode-se alterar composição e adaptar as características ao processo de fabricação e produto

Pode-se “dissolver” várias substâncias no vidro. Ex.: colorantes

Propriedades dependem da velocidade de esfriamento (história térmica)



Fazer vidro = cozinhar



Composição



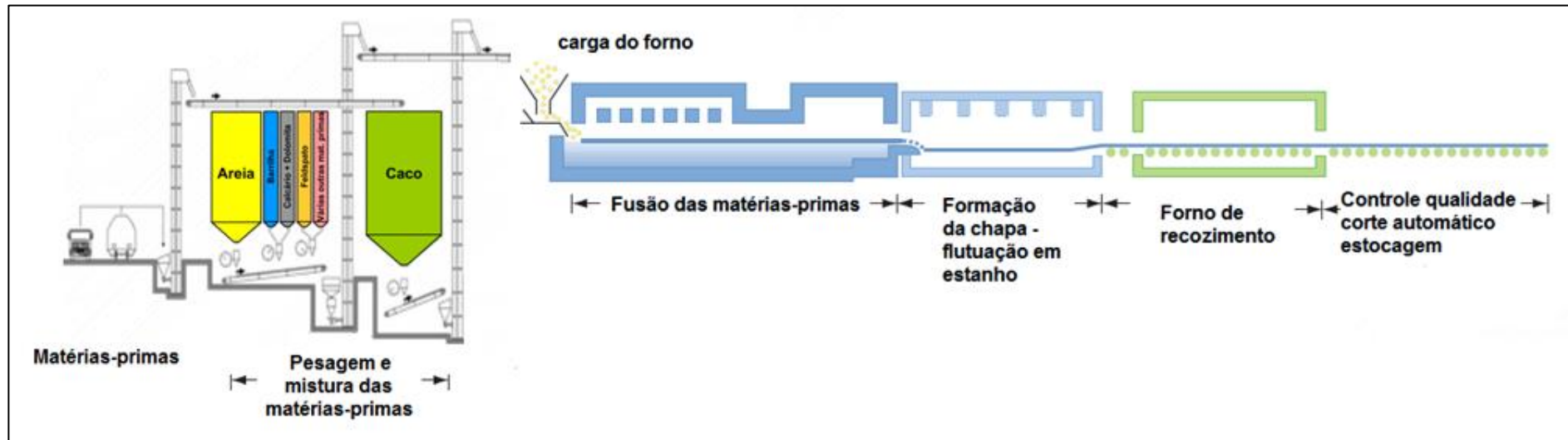
Massa → Bolo



Composição → Vidro



Fluxograma de uma vidraria



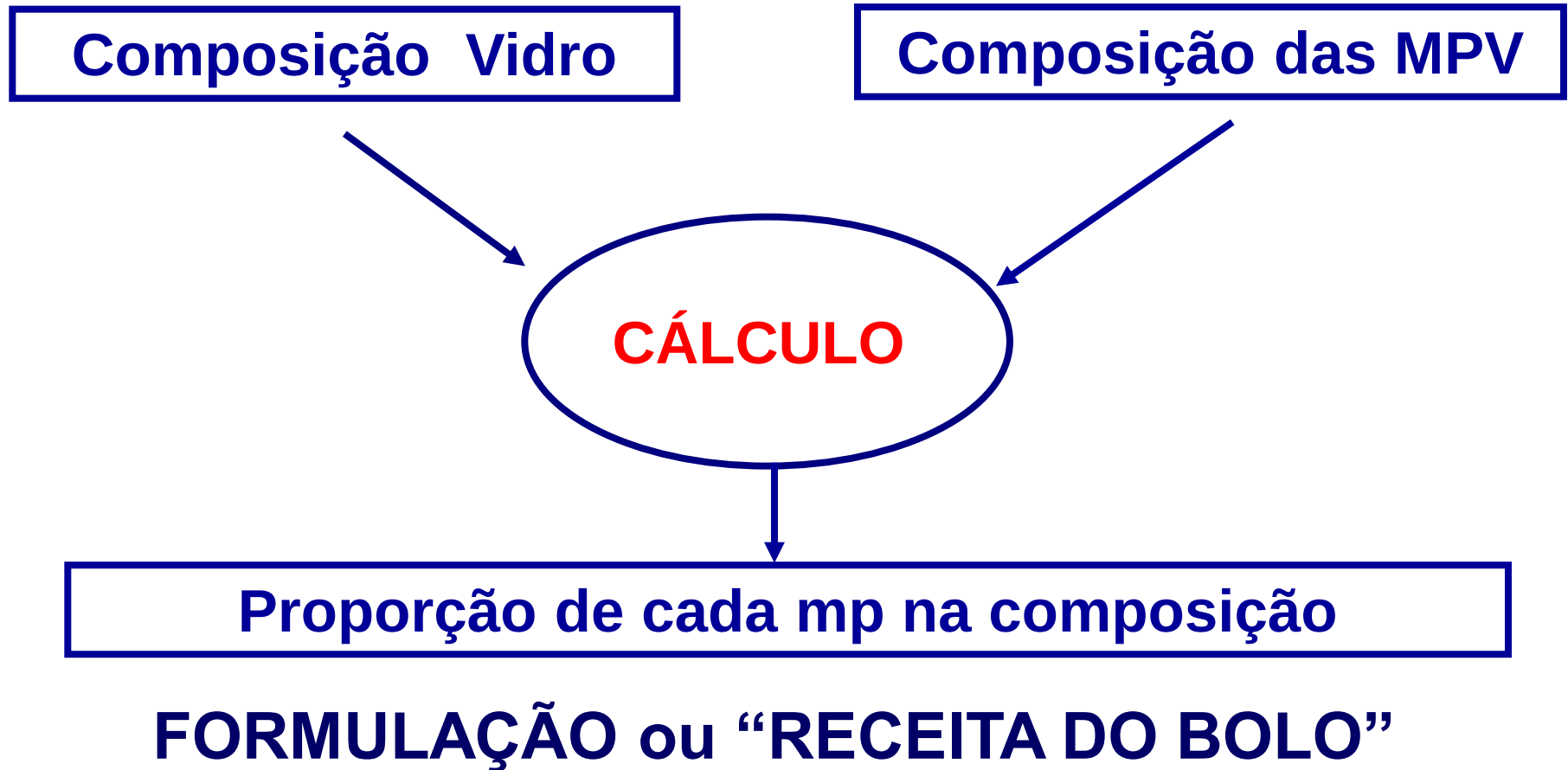
Matérias-primas Composição

Fusão

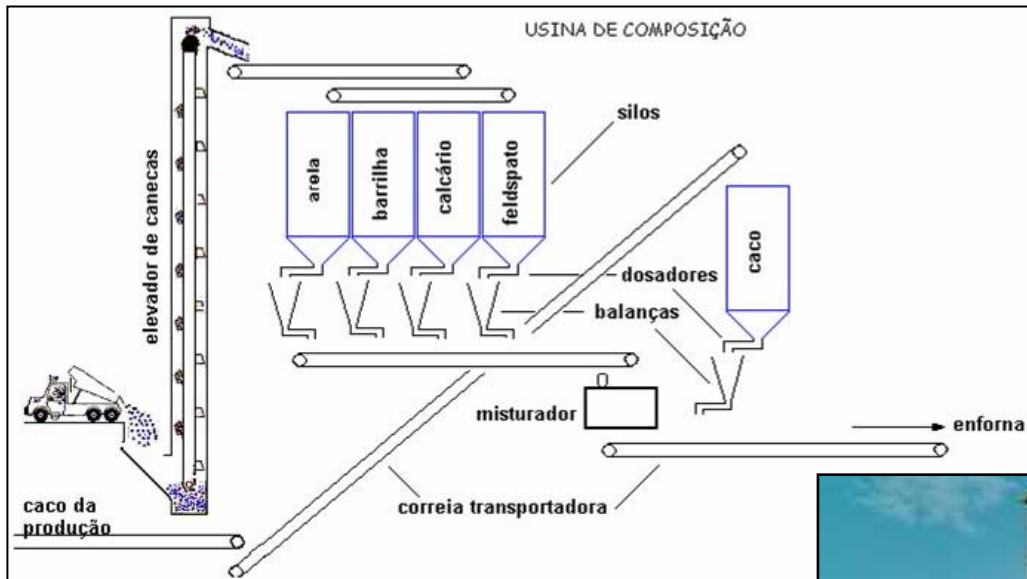
Fabricação

Recozimento

Cálculo de Composição



Usina de Composição



Projeto em função:

Tipo de vidro produzido

Ex.	Vidro ótico/fibras óticas:	0 bolhas
	Vidro fibra reforço:	0 bolhas
	Vidro plano liso:	1 bolha por tonelada
	Vidro embalagem:	>1000 bolhas por quilo

Idem homogeneidade

Extração

Fonte de energia

Teor de caco

Fornos de Fusão

Funcionamento:

Contínuos – vidrarias grandes

Diários – vidrarias manuais / artistas

Fonte de energia:

Combustão:

Tipo de combustível:

Gás natural

Óleo

Coque

Tipo de comburente:

Ar

Oxigênio

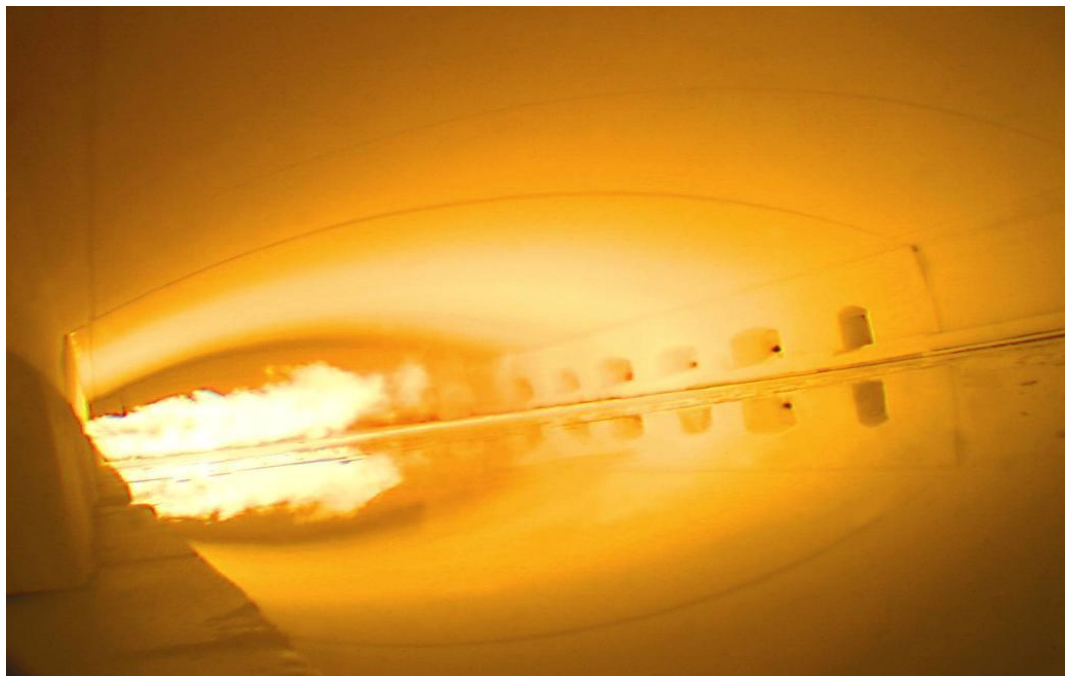
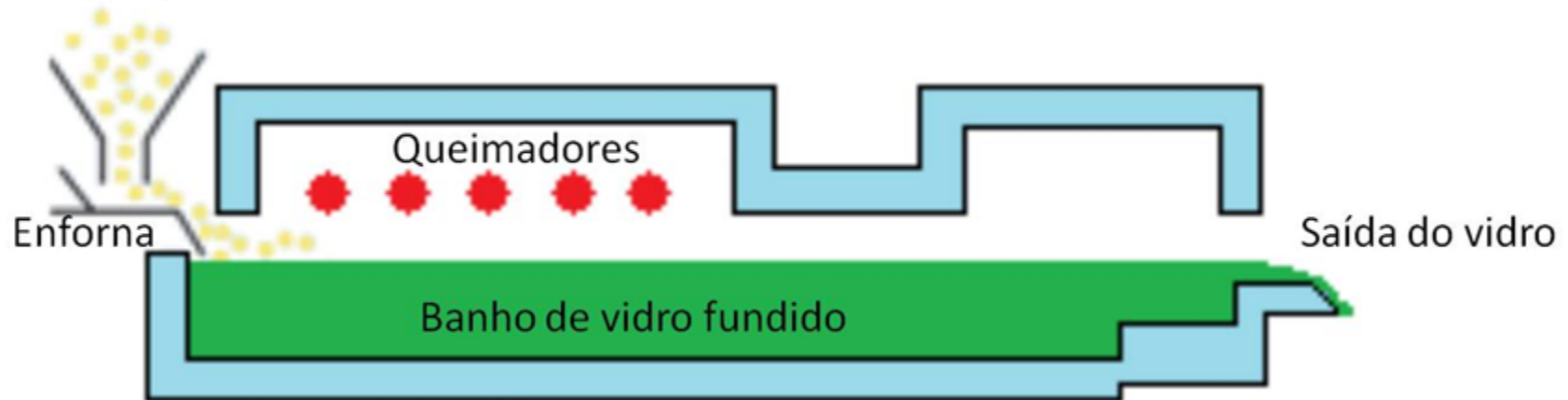
Eletricidade

Fonte única de energia

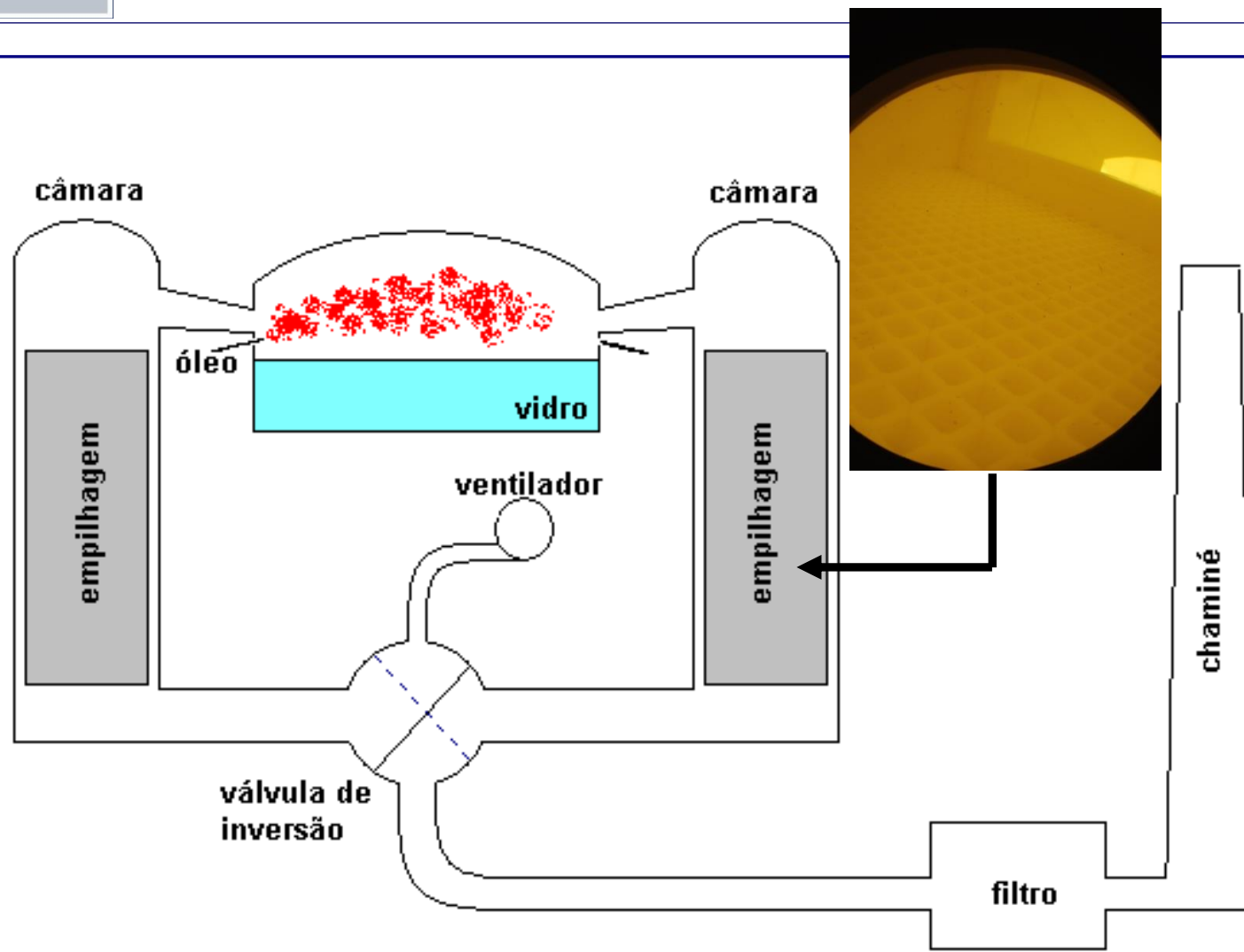
Boosting

Forno de fusão - funcionamento

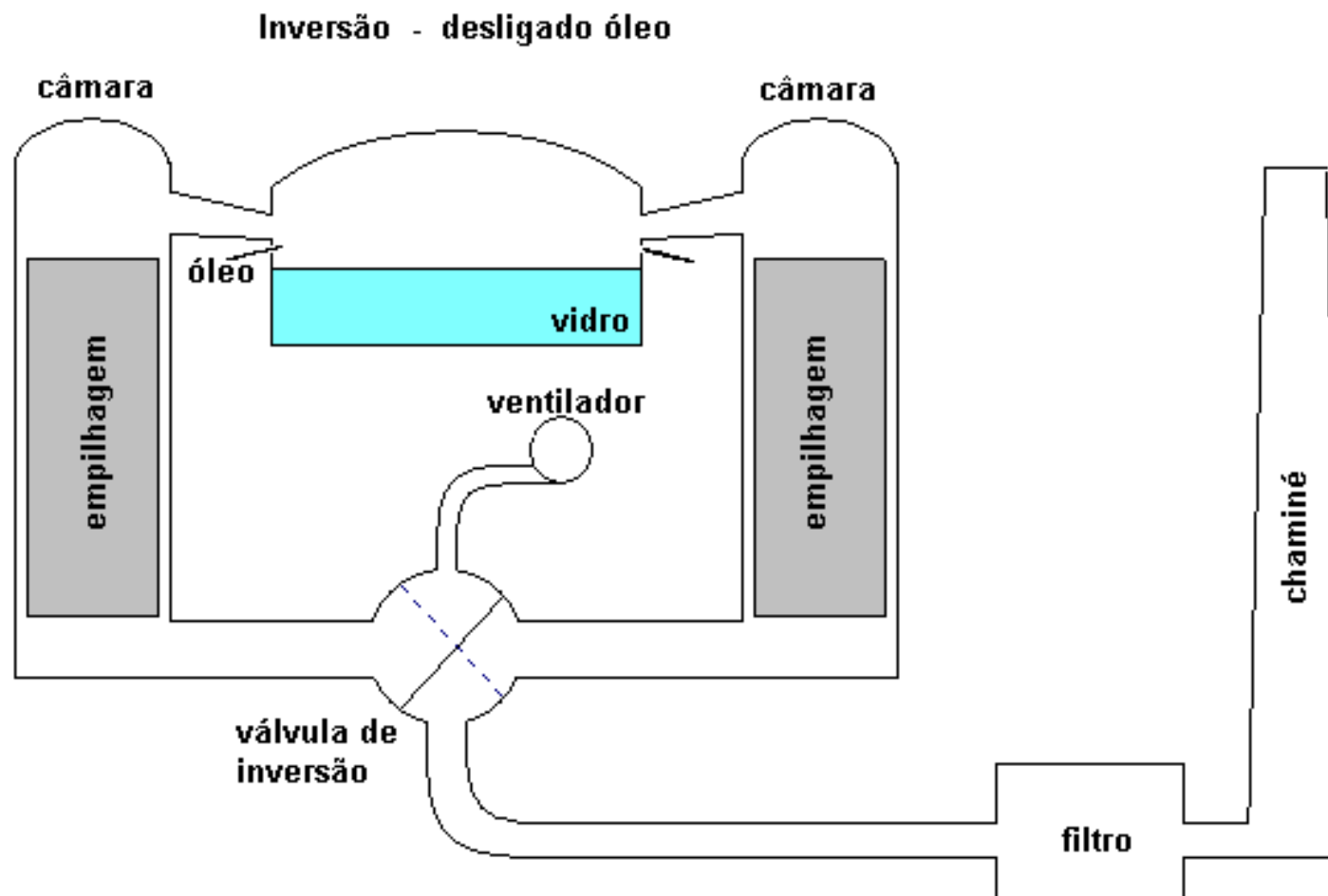
Composição



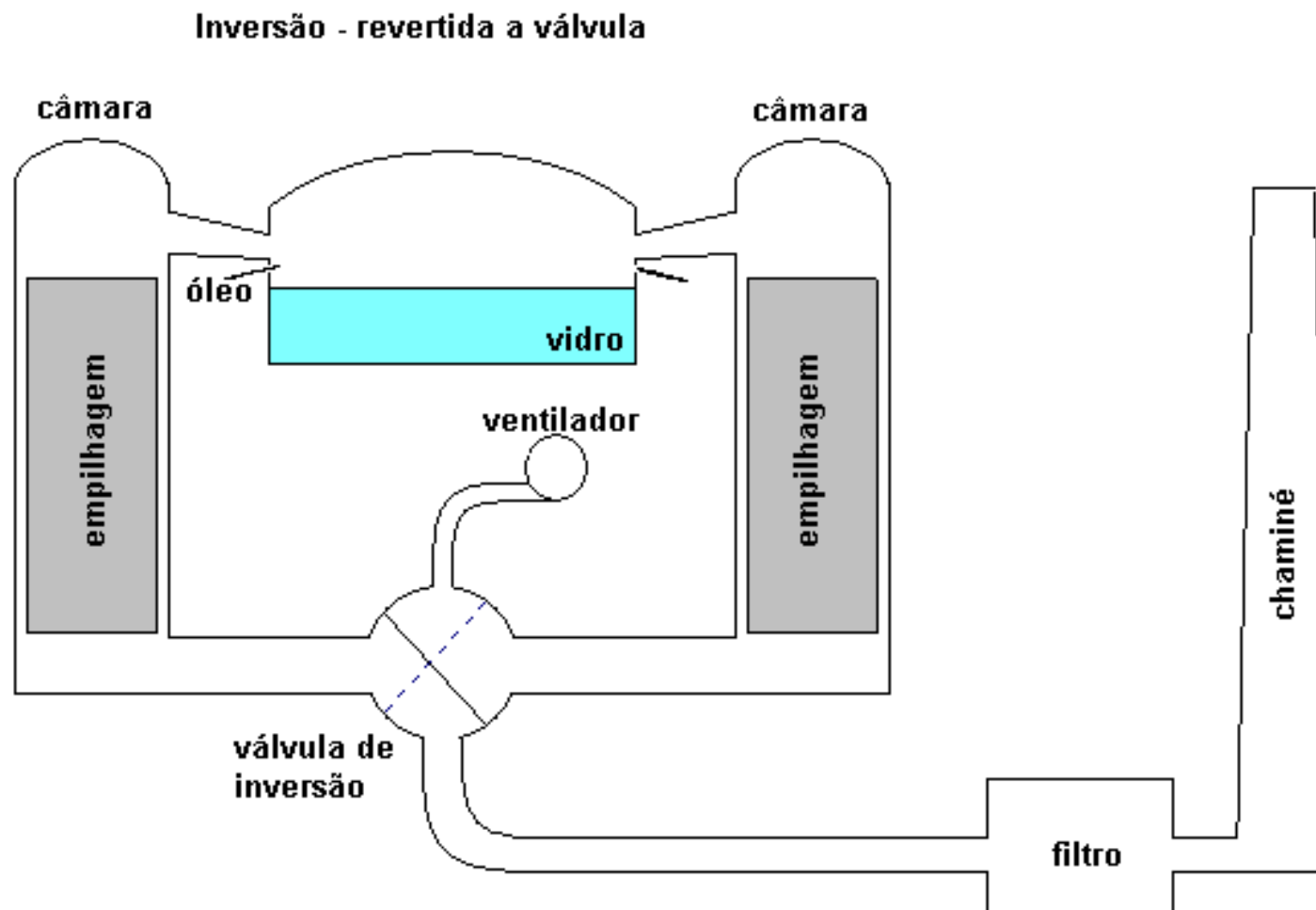
Fornos - Funcionamento



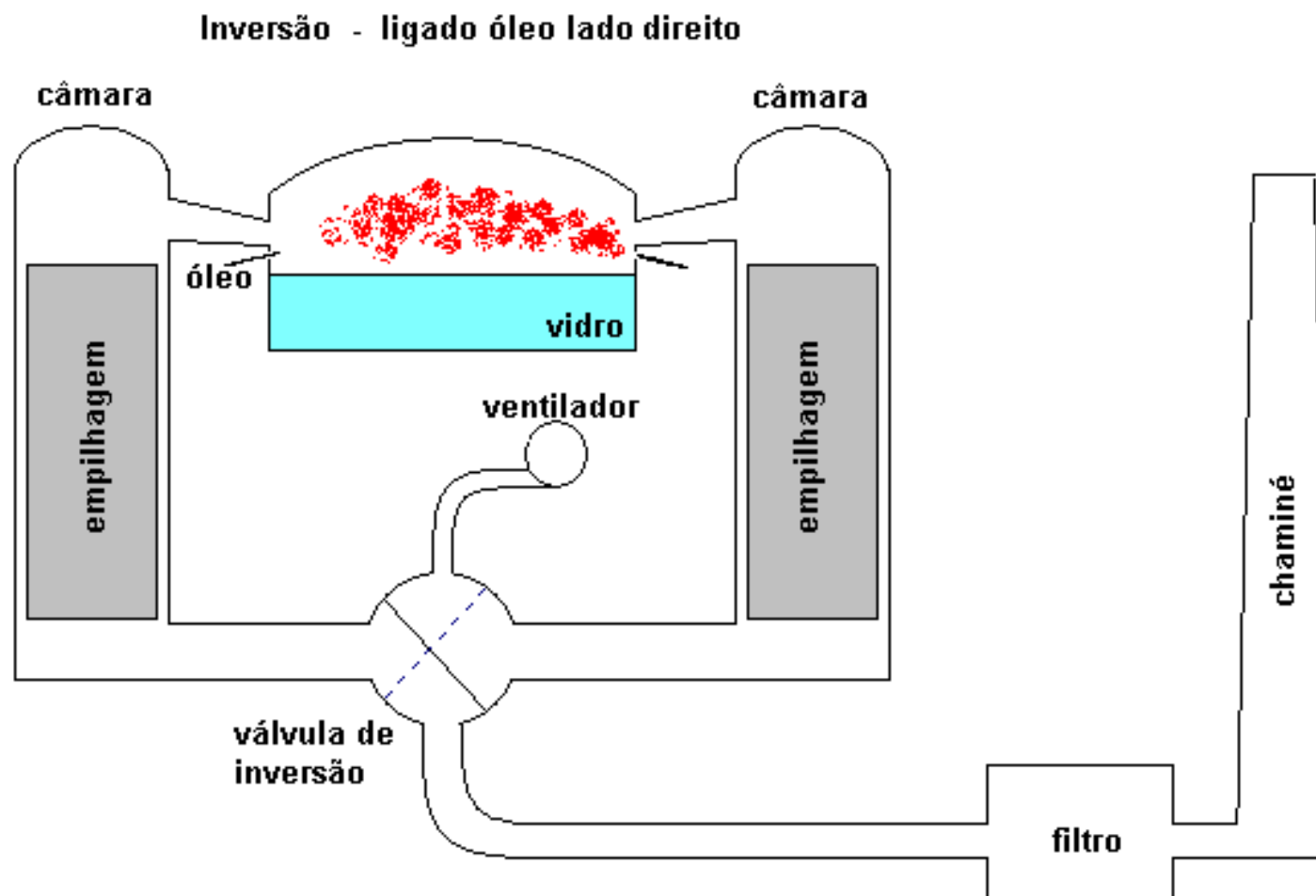
Fornos - Funcionamento



Fornos - Funcionamento

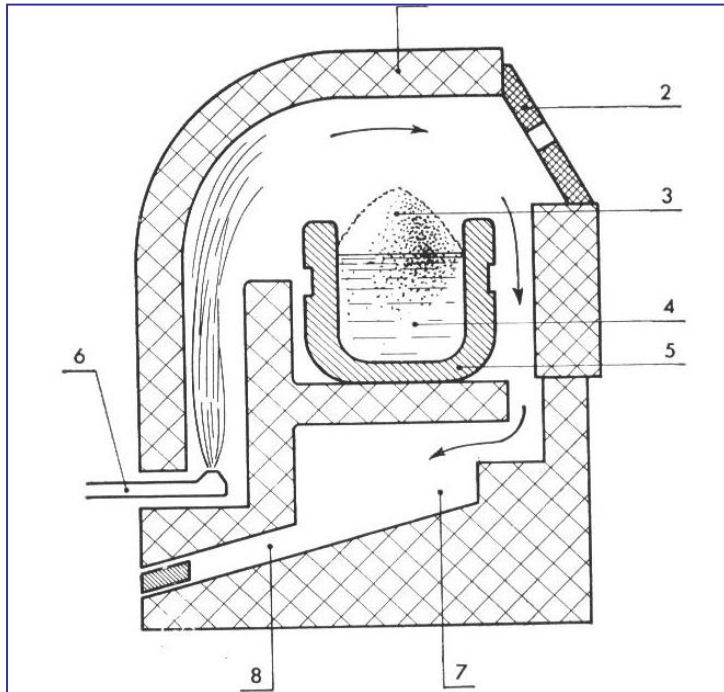


Fornos - Funcionamento



Fornos

Forno pote - artistas



<https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.pintarest.ca%2Fpin%2F565272190715065228%2F&psig=AOvVaw09JtK3b9fB3V5xOJdJQ8Jo&ust=1604334262496000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCMiigZ3h4ewCFQAAAAAdAAAAABAQ>

Fornos industriais

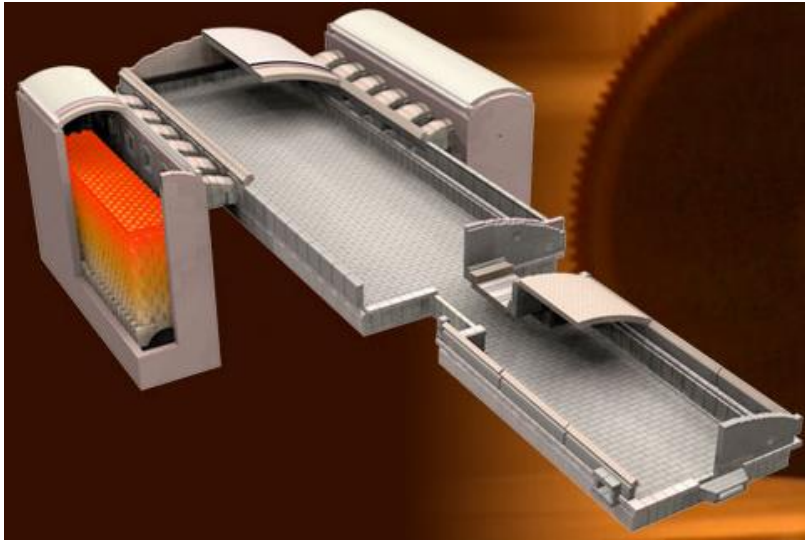


V. Oco



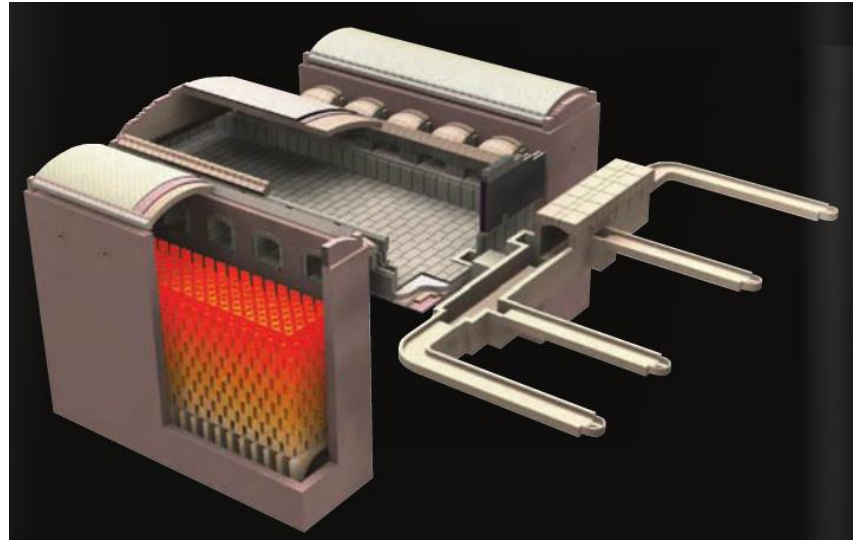
V. Plano

Fornos



v. plano

www.teco.com



v. oco

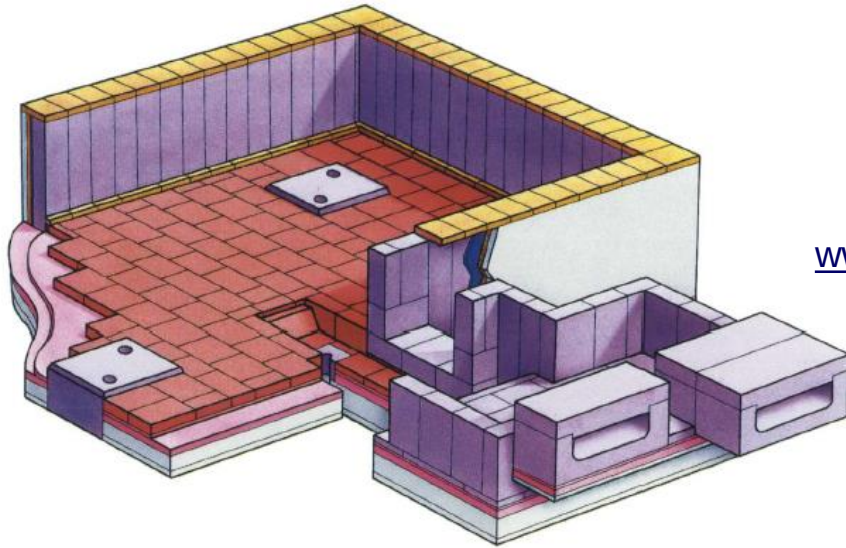


<https://www.fivesgroup.com/>

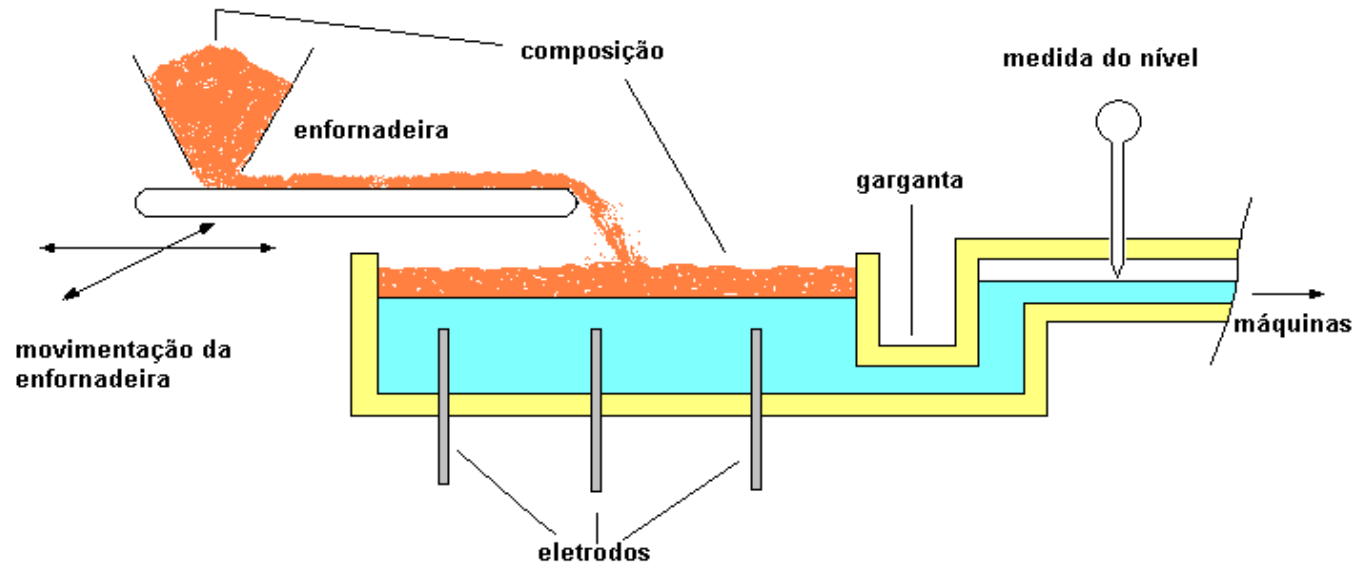


www.sefpro.com

Fornos elétricos



www.sefpro.com



Fornos de Fusão - tradições

**Sempre aceso por uma chama “antiga”
Aceso por sua madrinha**



Cerimônia acendimento forno na Wheaton – gentileza Edison Toporcov

Fusão

Termo “fusão” é impróprio. Na prática, transformamos:

**uma mistura de pós de granulometria
de 0,1 a 1 mm**

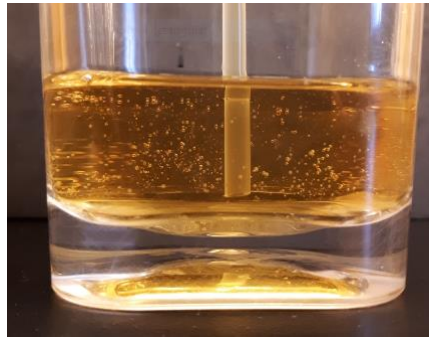


**um líquido homogêneo na escala
atômica
de 0,0000001 a 0,000001 mm**

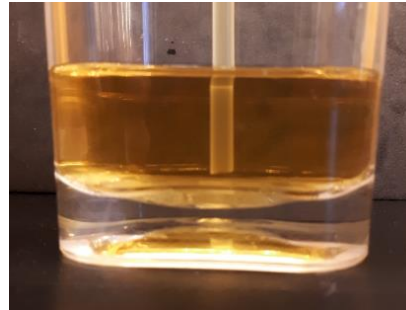
O que de fato ocorre é uma série de reações químicas

Fusão - 3 etapas

Fusão – gera massa viscosa heterogênea cheia de bolhas

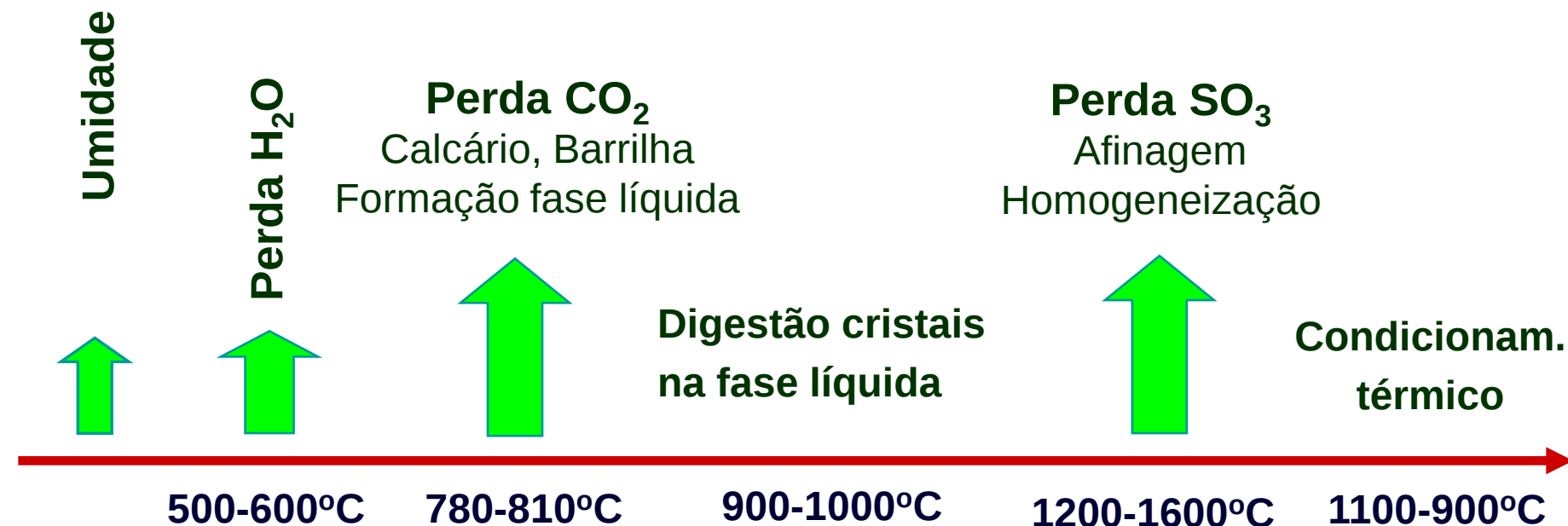


Afinagem – remove as bolhas e diminui heterogeneidade



Condicionamento – adequa a temperatura para reduzir a viscosidade possibilitar a conformação

“Fusão” da composição



T ambiente ↑

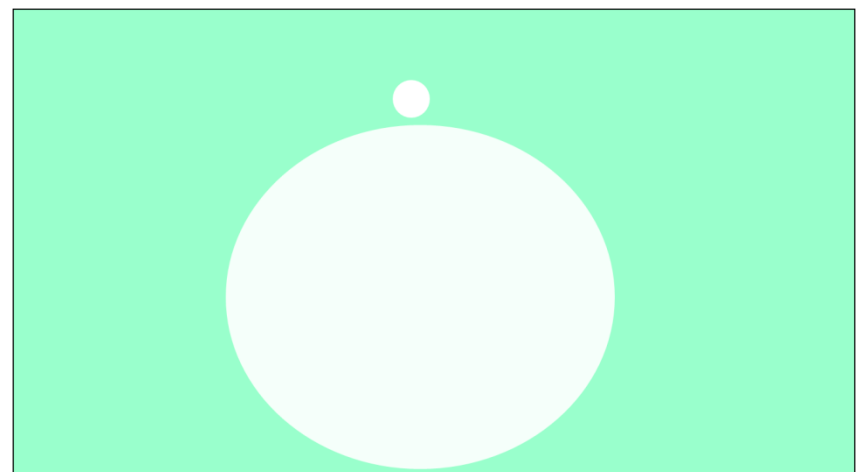
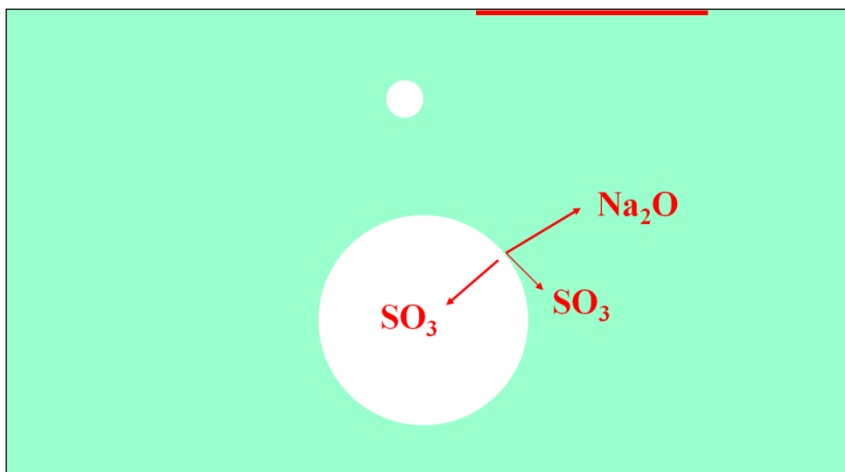
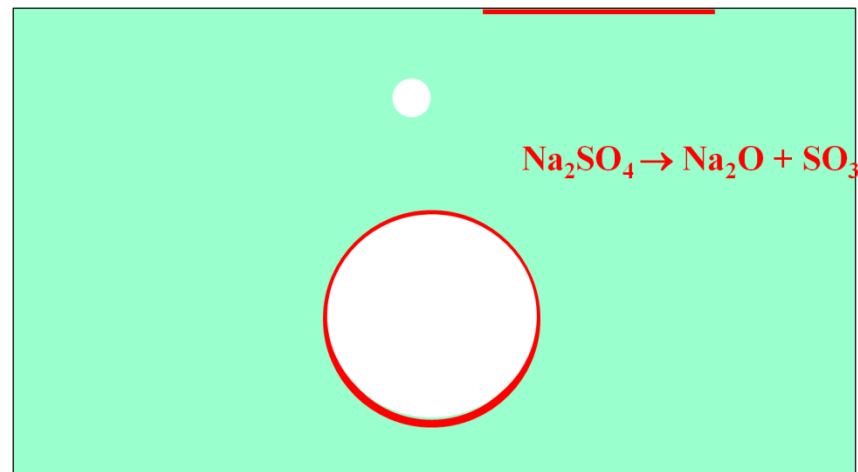
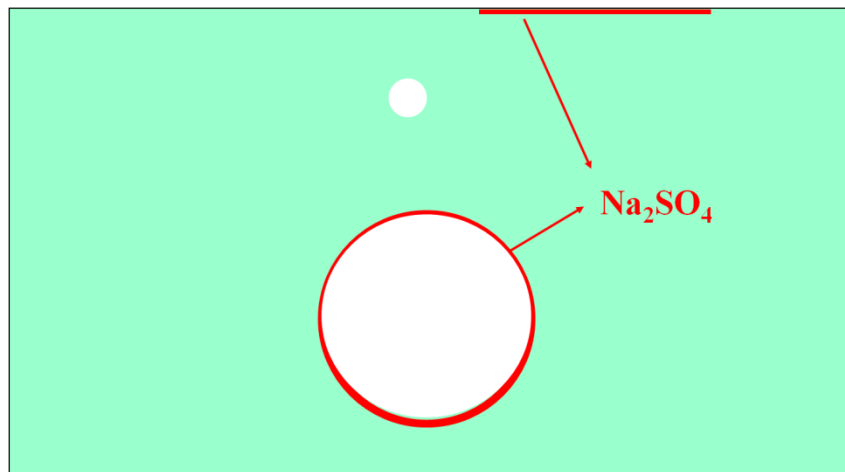


Afinagem – 2 aspectos

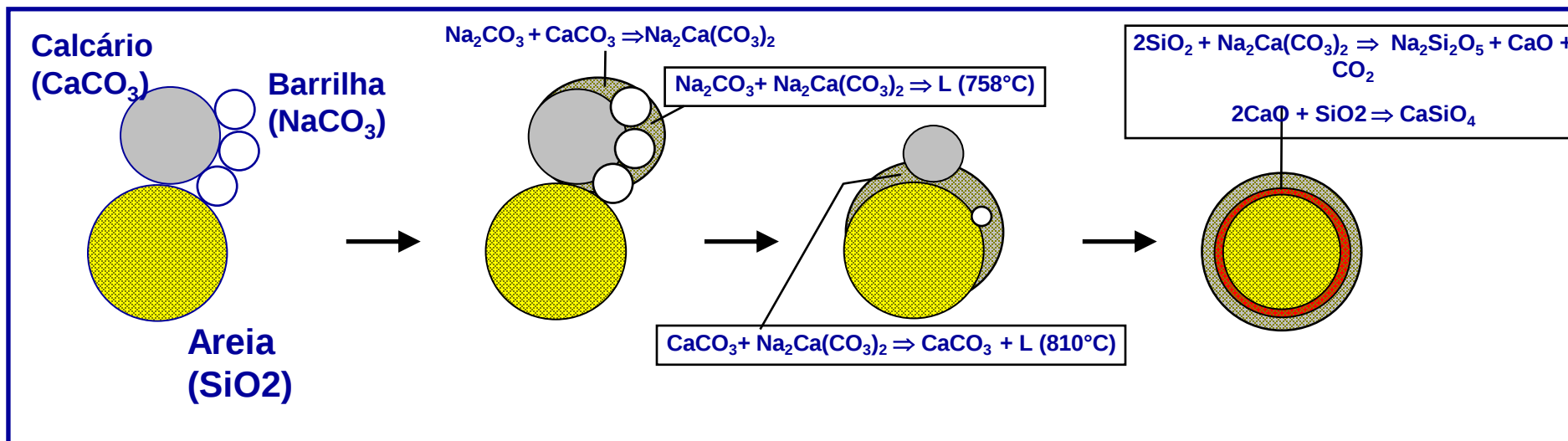
Física – aumento da temperatura → viscosidade ↓ → favorece a subida das bolhas

Química – utilização de um componente (sulfato de sódio) que gera bolhas grandes que sobem arrastando as pequenas

Efeito do Sulfato (afinagem química)



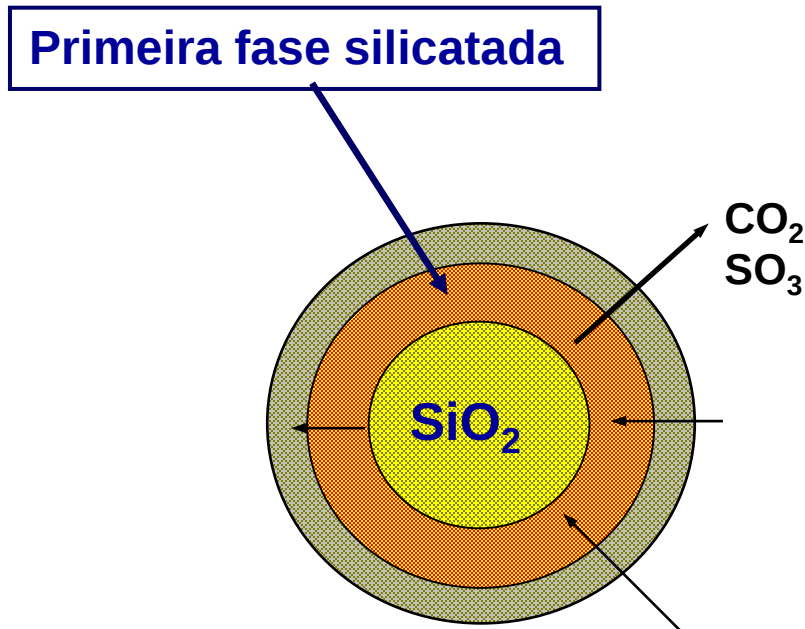
Reações na Fase Sólida



Caso a mistura não seja adequada, a reação entre cada componente até gerar a fase líquida não ocorrerá.

Como consequência, não haverá dissolução da areia

Reações na Fase Líquida

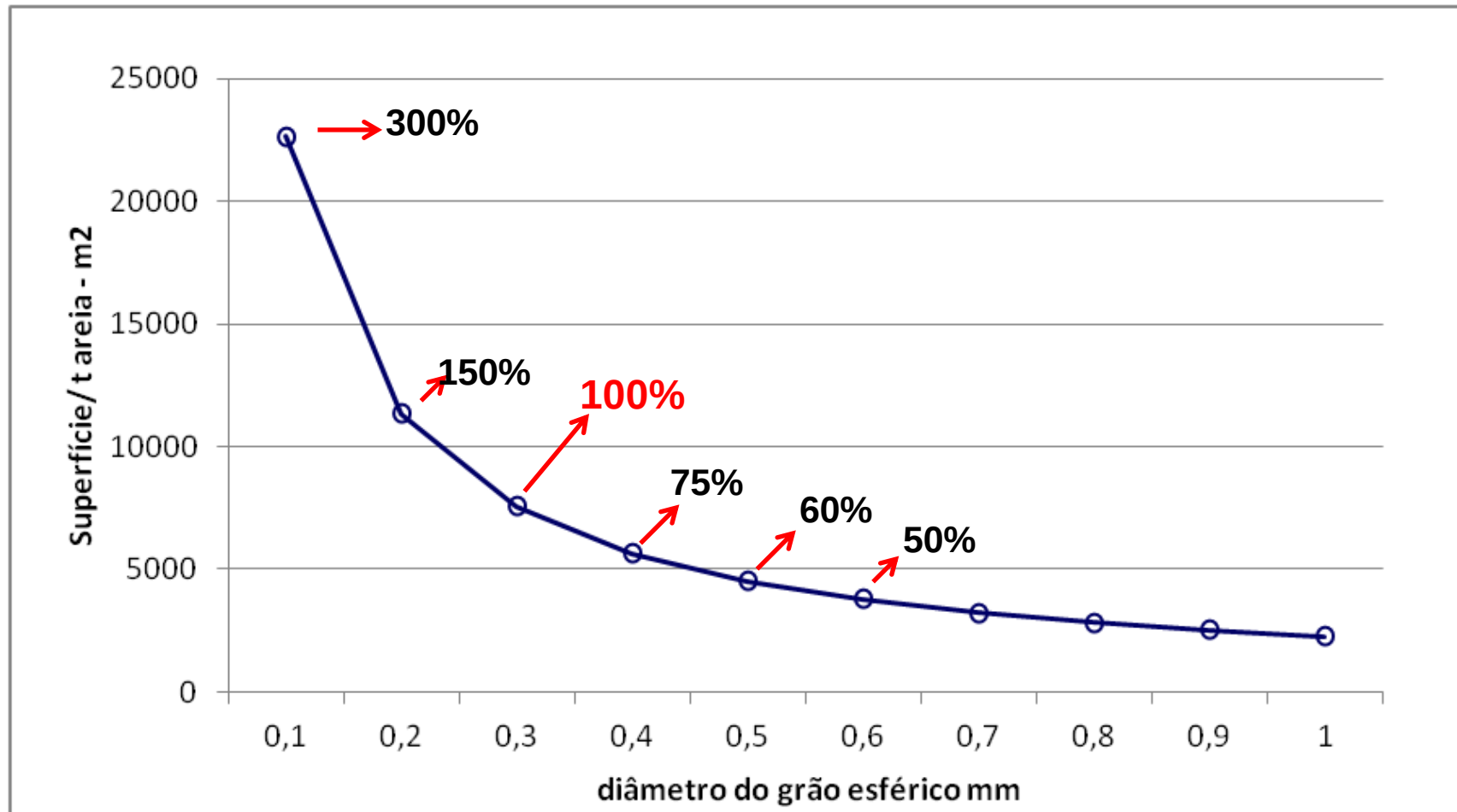


Vidro industrial naturalmente heterogêneo

Quanto mais sílica → mais leve, mais viscoso

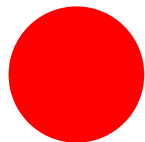
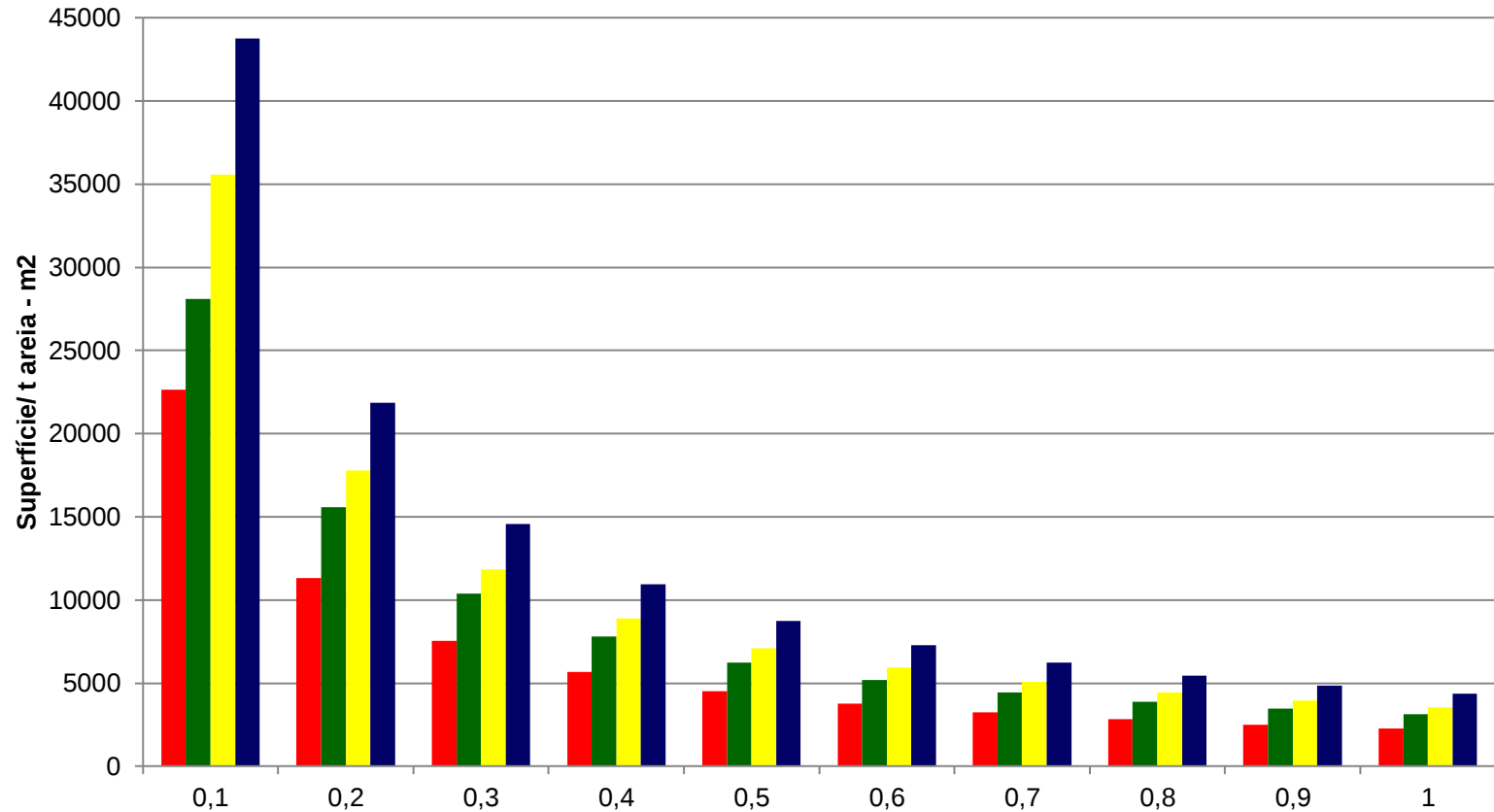
O nível de homogeneidade necessário dita a configuração dos parâmetros de fusão

Importância da granulometria da areia



Superfície total dos grãos de areia considerando grãos esféricos em função do diâmetro dos grãos

Importância do formato do grão da areia



l

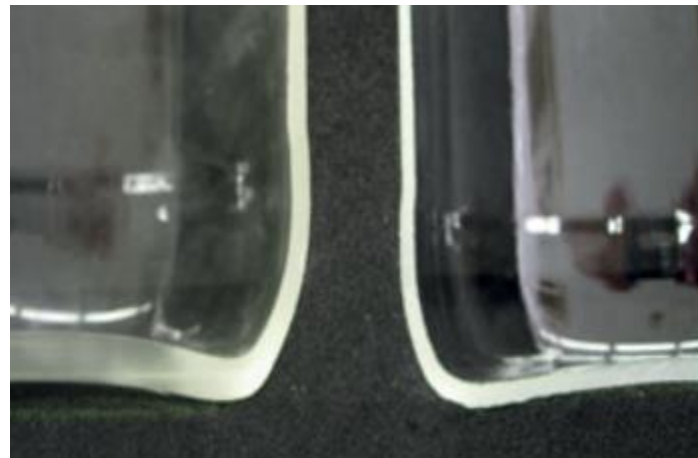
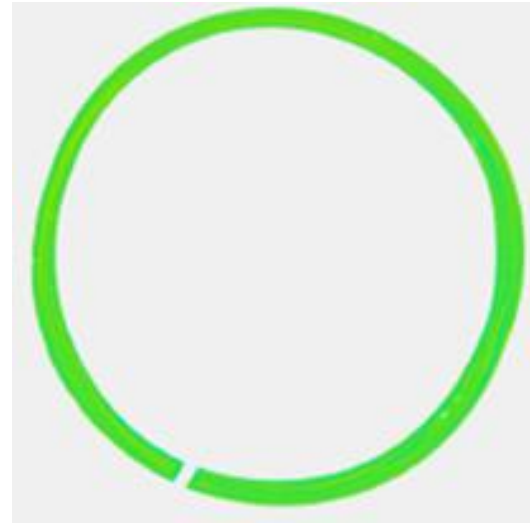
3l

5l

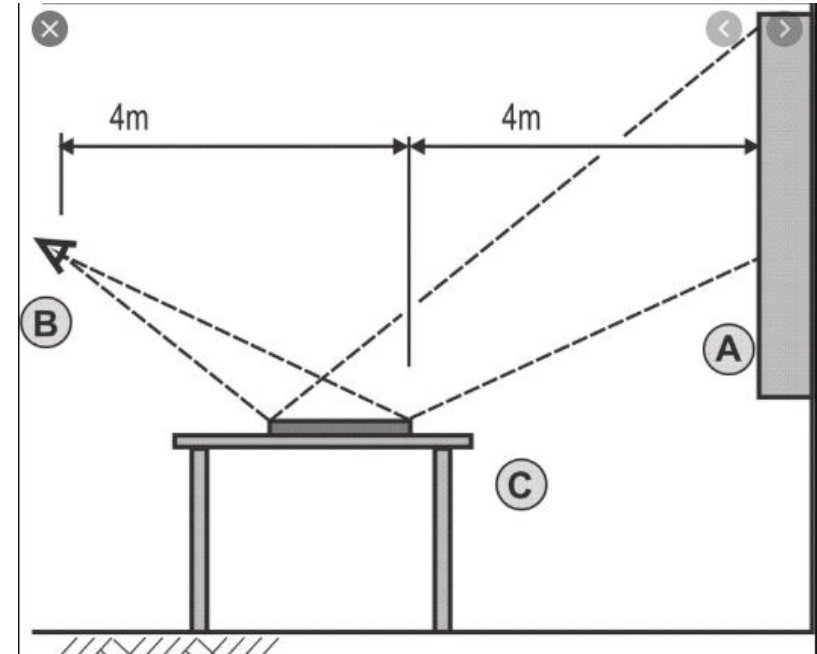
Homogeneidade

Fator fundamental para obtenção de bons resultados em qualquer tipo de processo

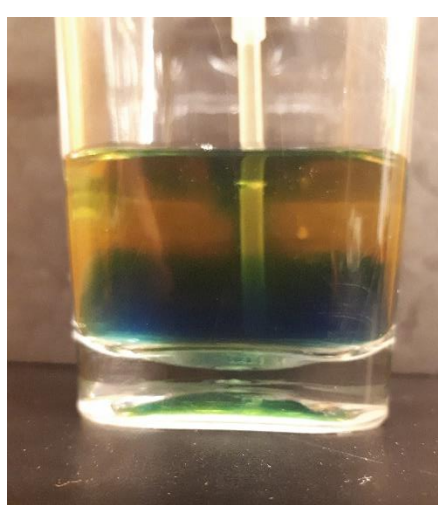
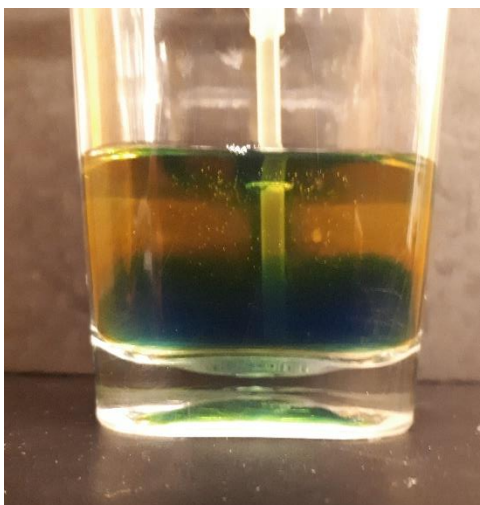
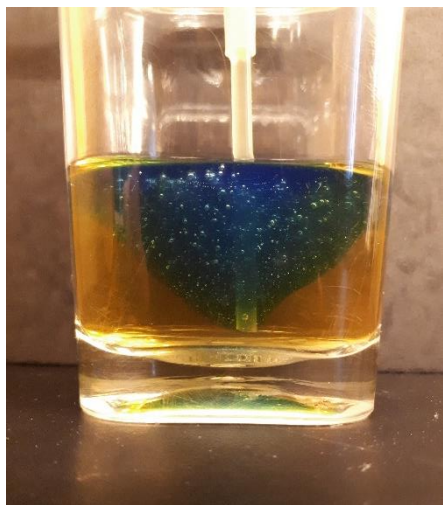
Heterogeneidade X espessura embalagem



Heterogeneidade X deformação imagem v. plano



Dificuldade de homogeneização



Dificuldade de homogeneização



Homogeneização

Banho de vidro muito viscoso



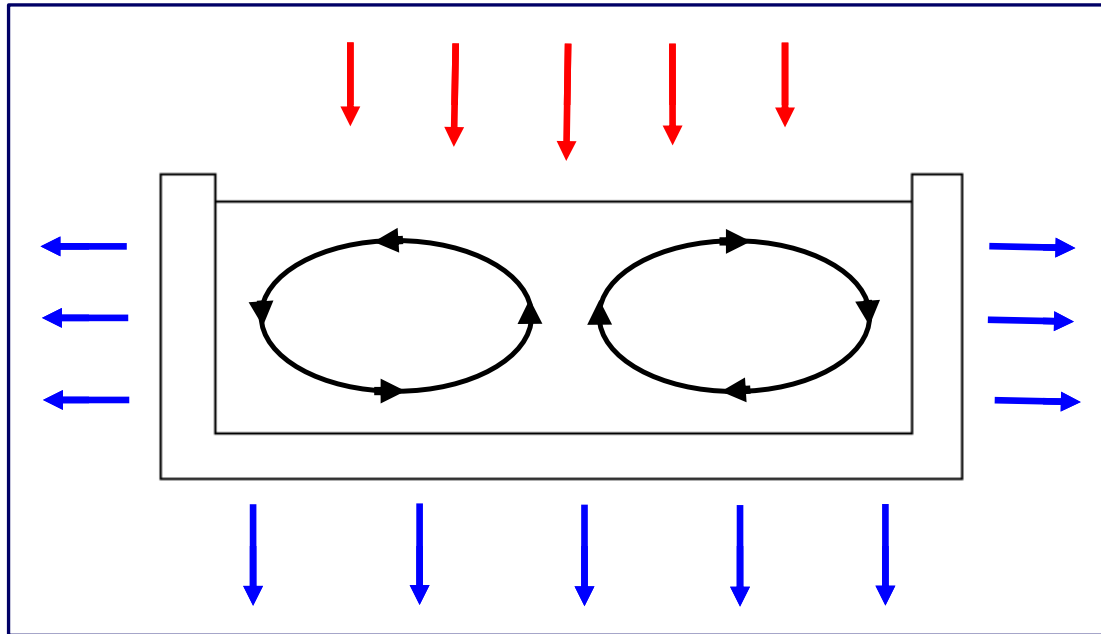
Difícil homogeneizar



Recurso: correntes de convecção

Correntes de Convecção

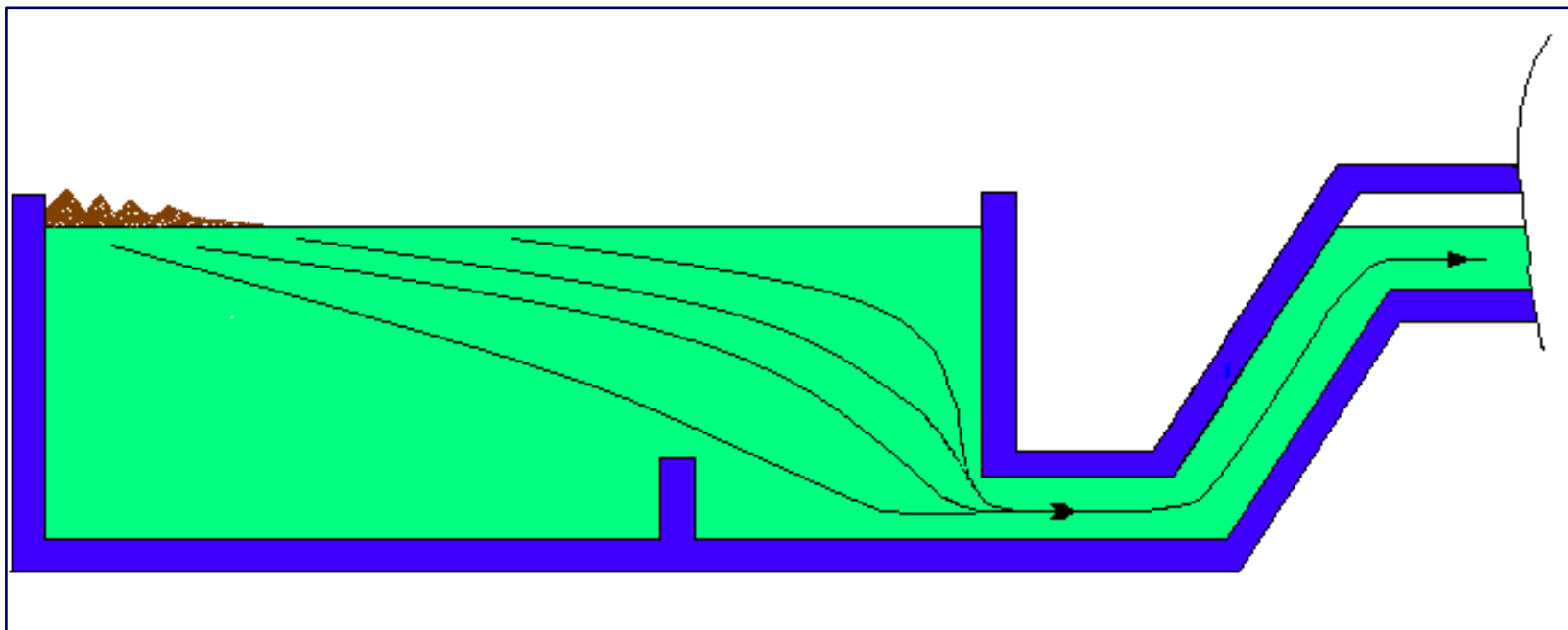
Por diferenças de temperaturas do banho



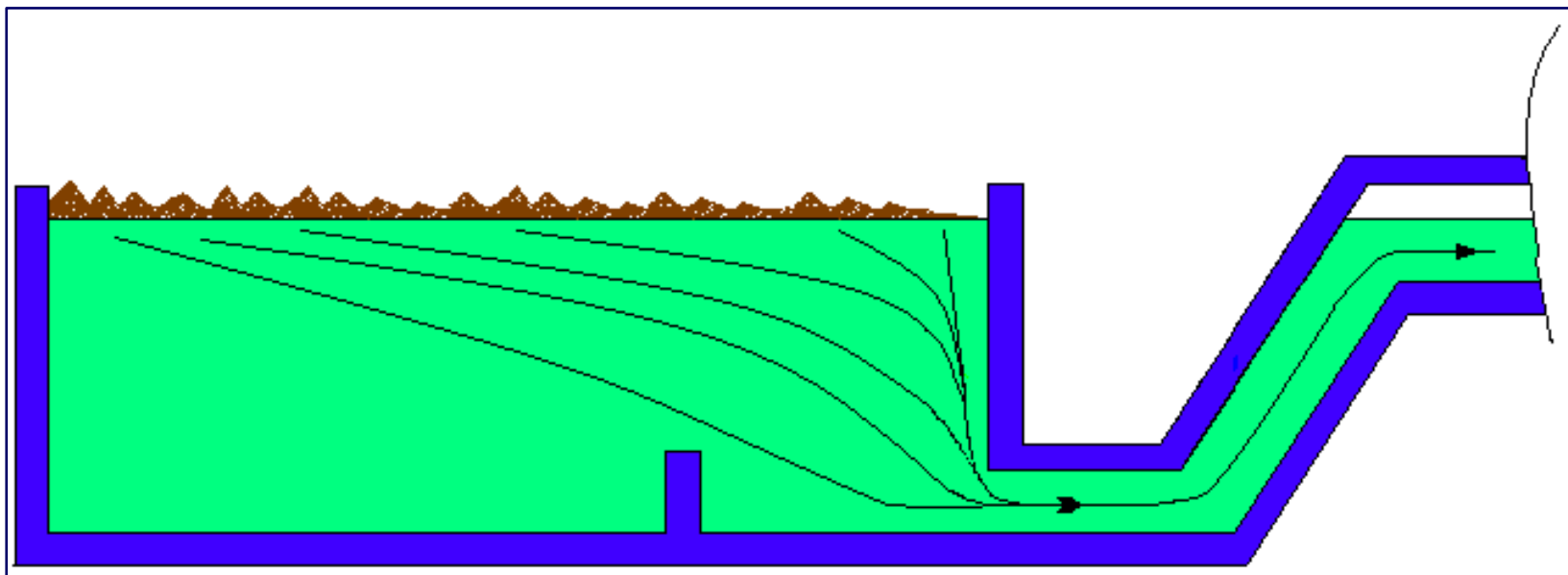
Vidro Superfície: **Quente** → **Frio**

Vidro Sola: **Frio** → **Quente**

Correntes de extração

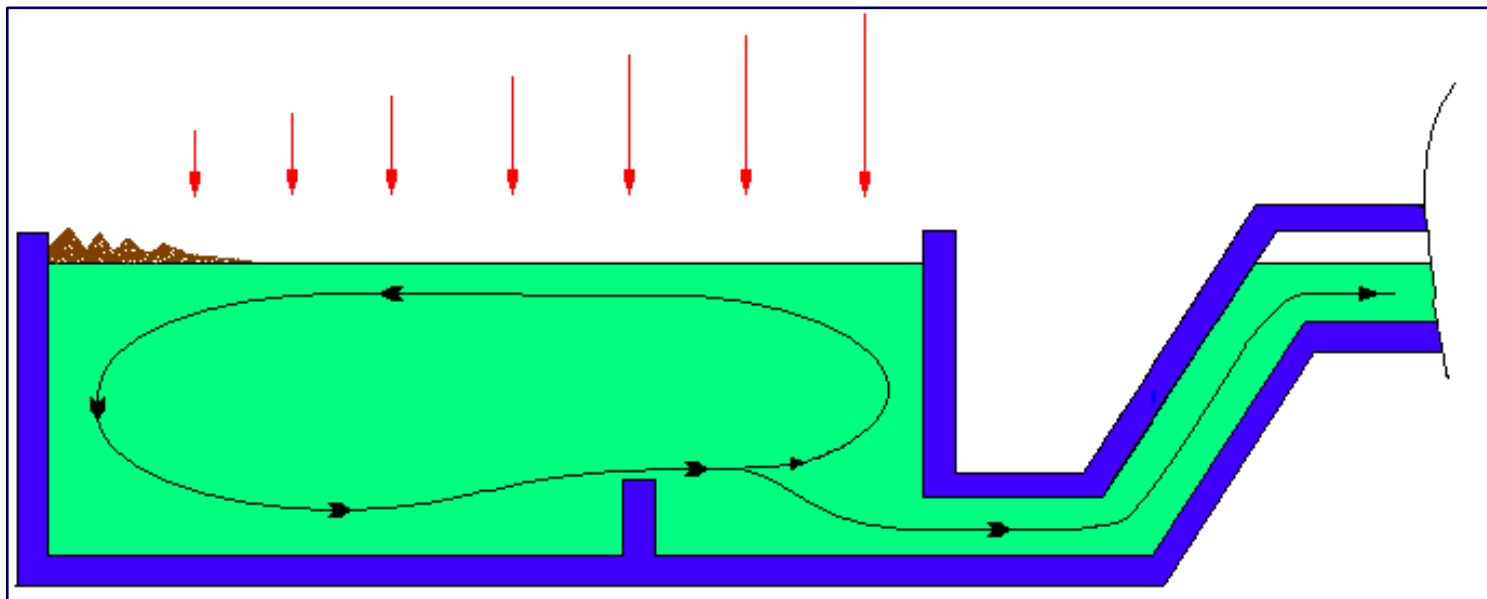


Correntes de extração



Correntes do Vidro

Correntes térmicas X de extração



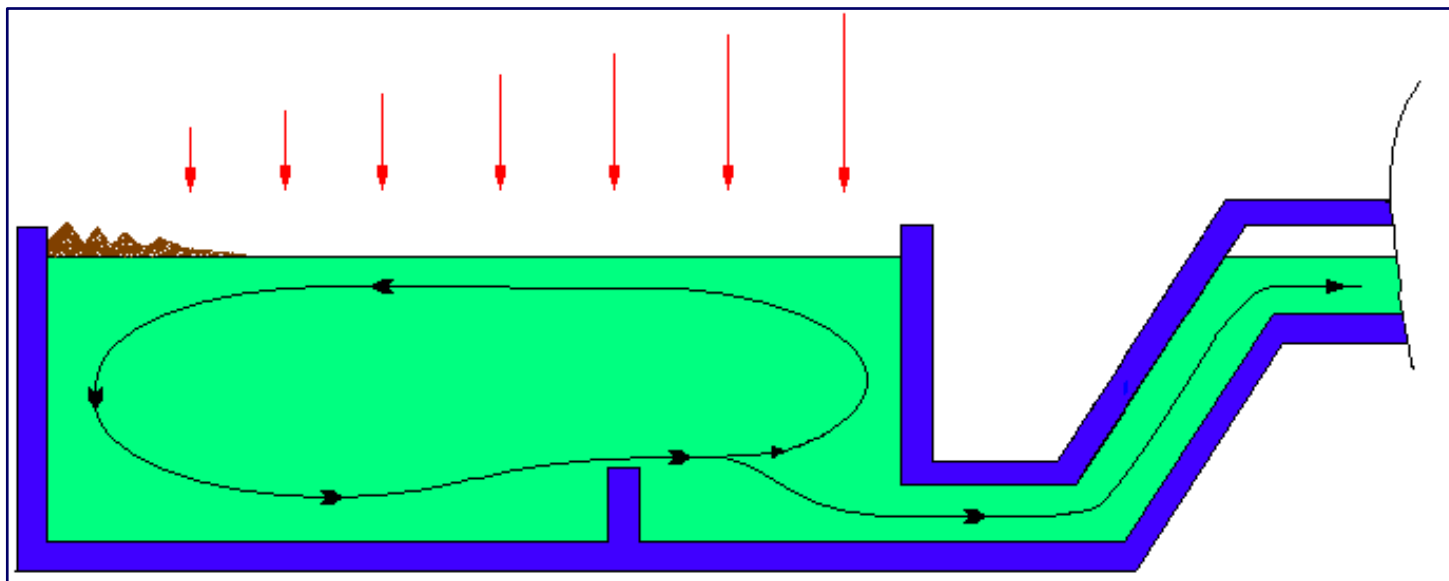
Correntes de Convecção

Geometria do forno

Geometria do forno – projetada para favorecer correntes

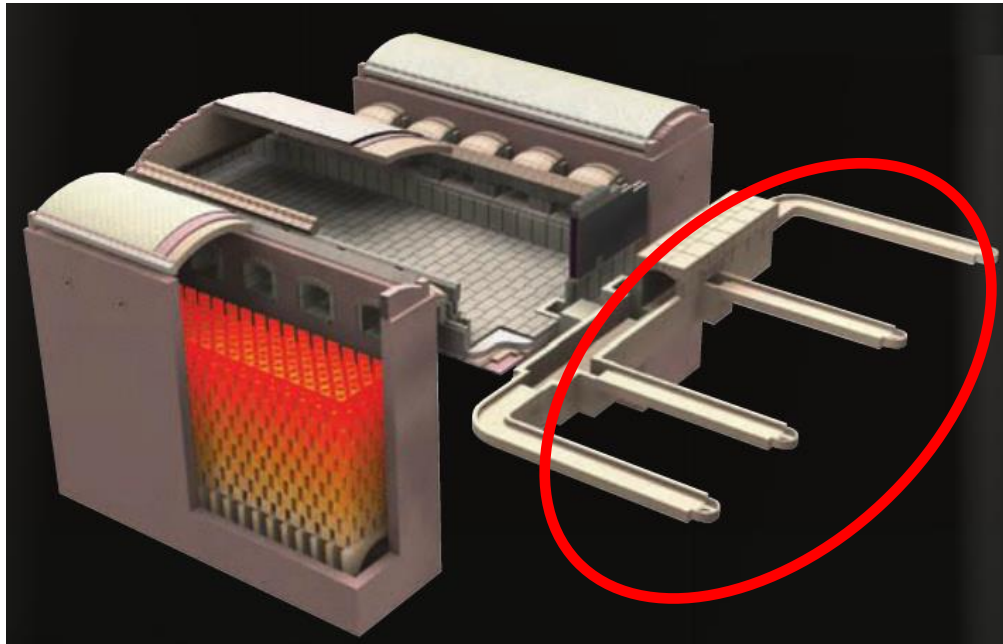
Forno com garganta: vidro oco; plano impresso e fibras

Muro Vertedor





Feeders



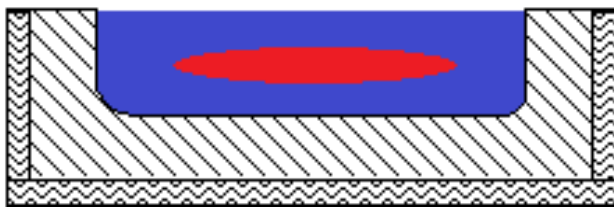
Função:

Conduzir o vidro até as máquinas
Condicionar termicamente

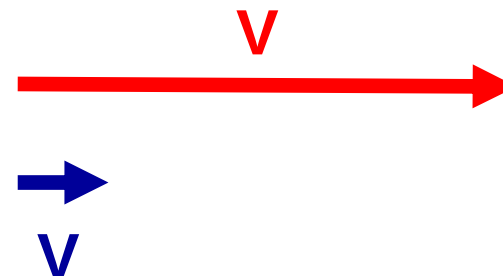
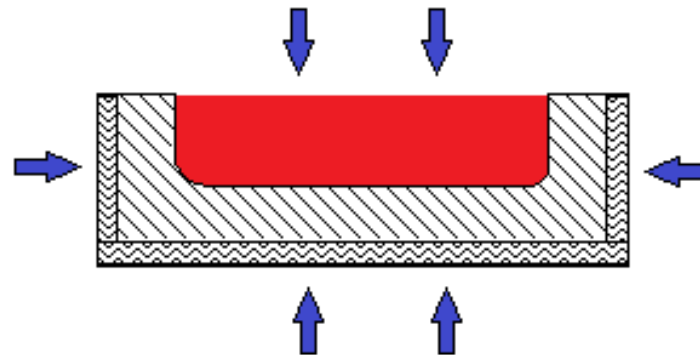
Função extra:

Coloração do vidro

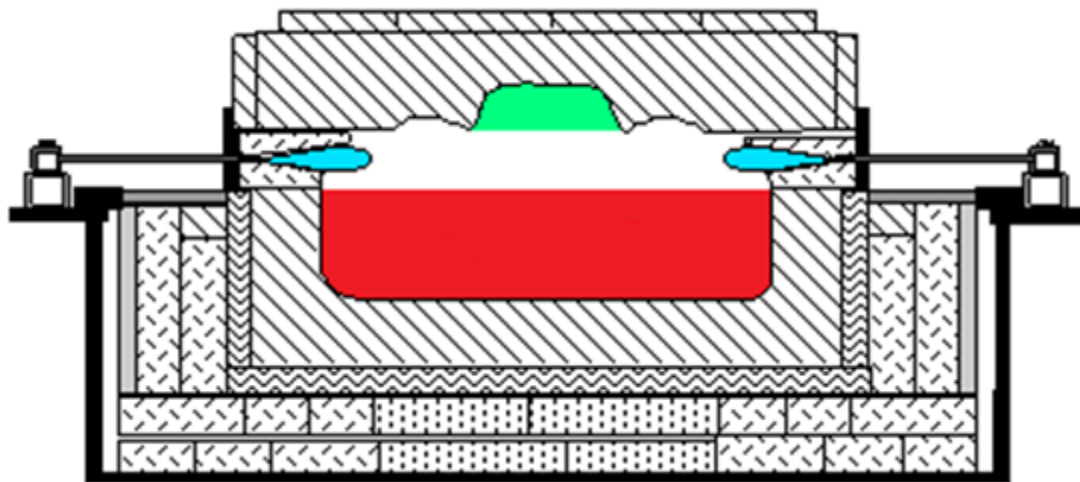
Feeders



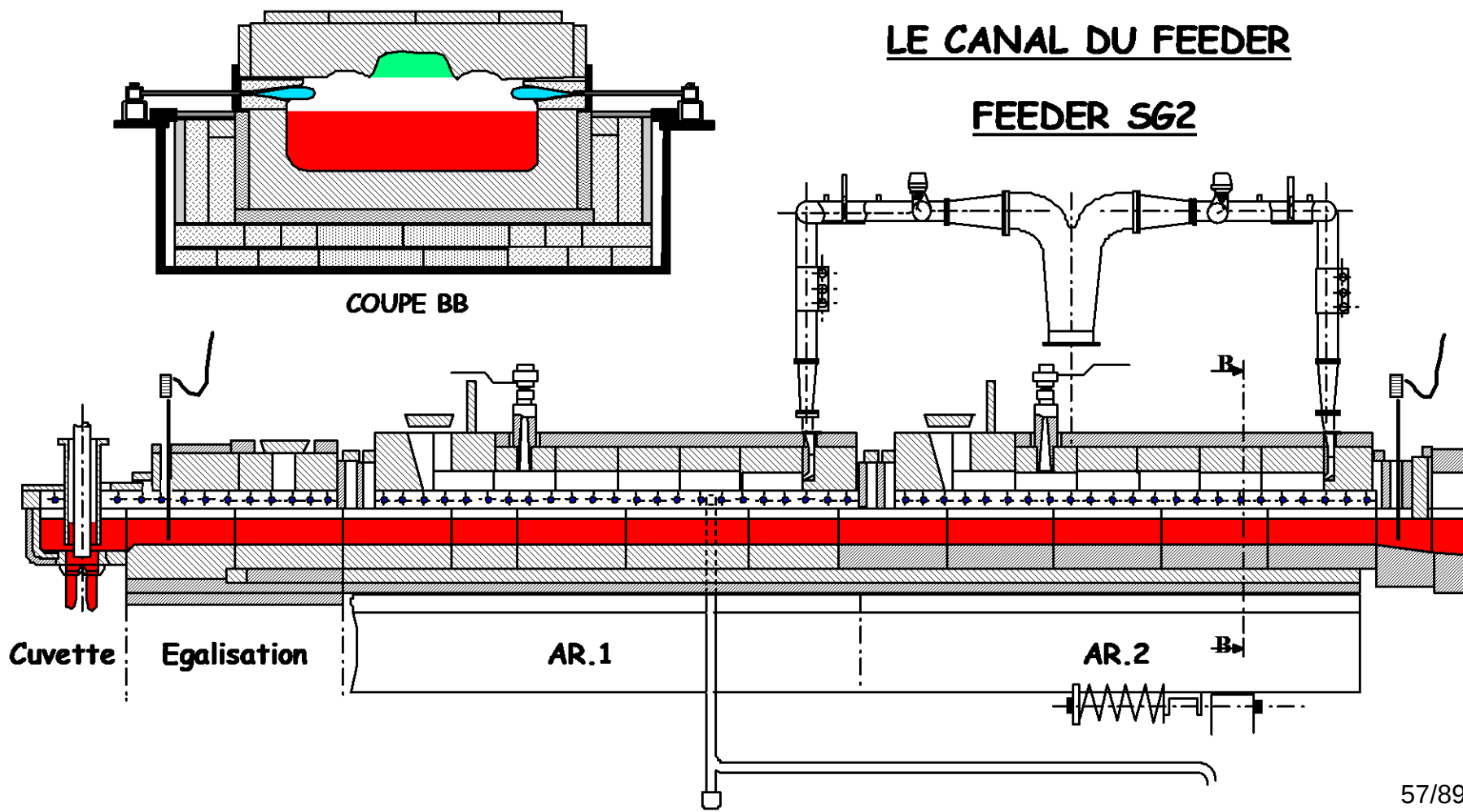
Vazão = área da seção x velocidade



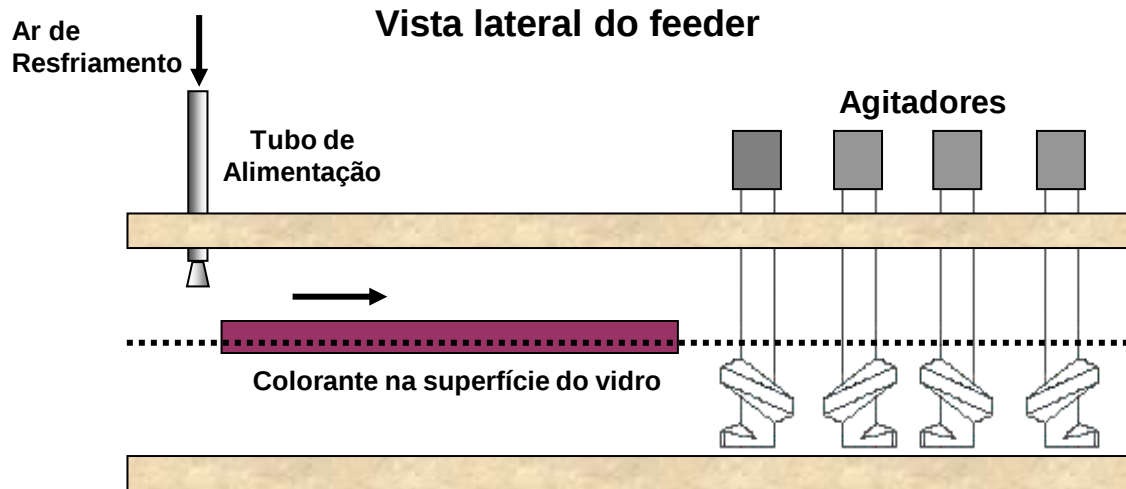
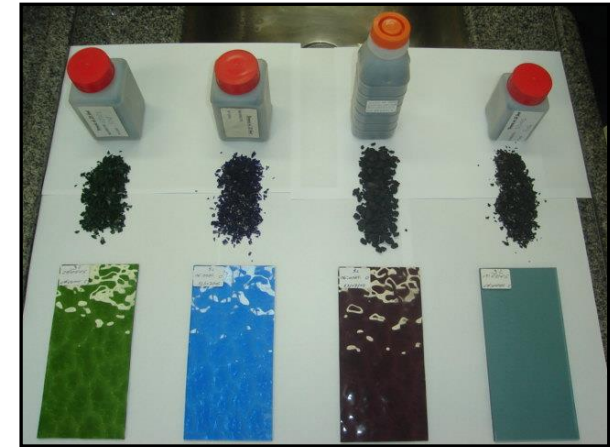
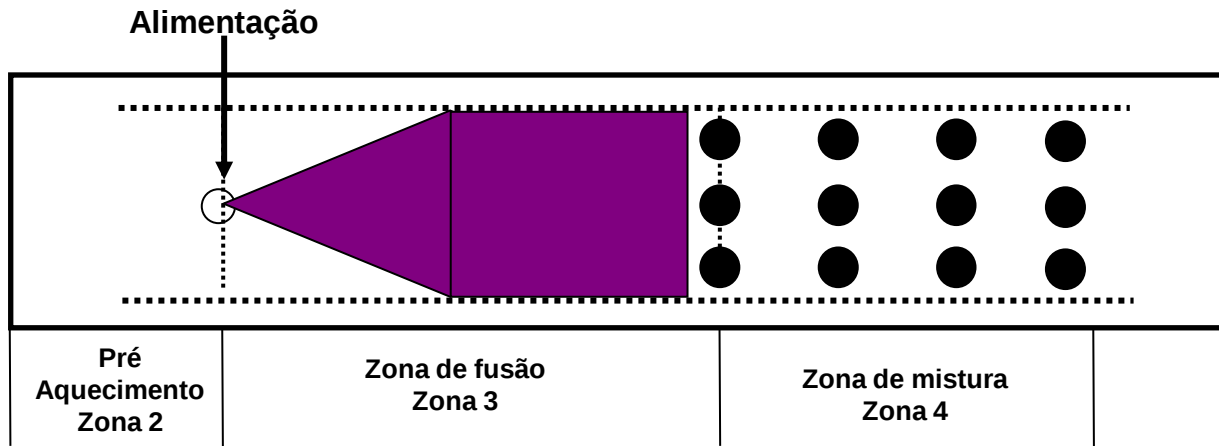
Feeders



Feeders



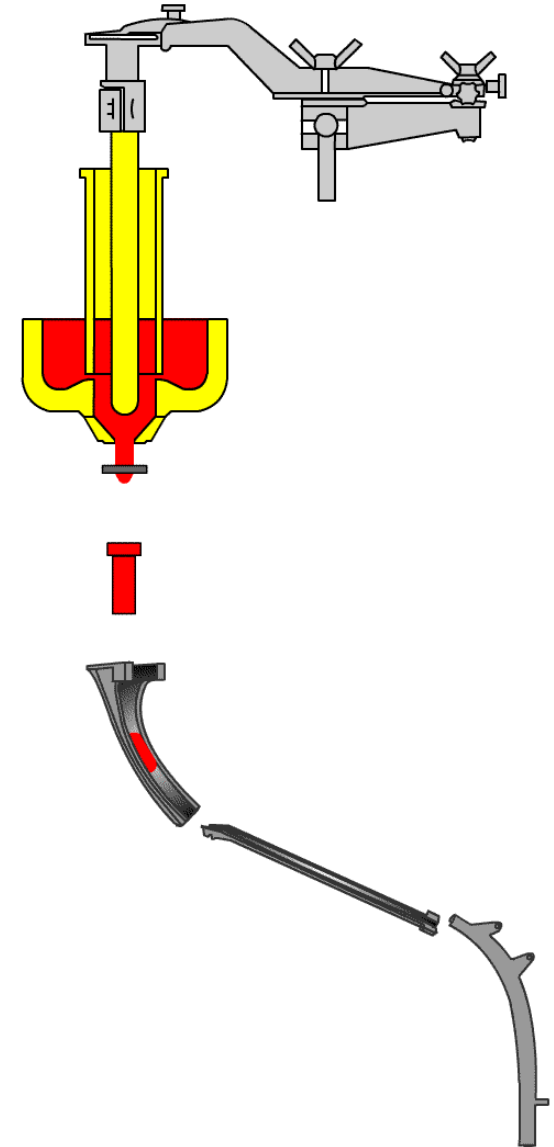
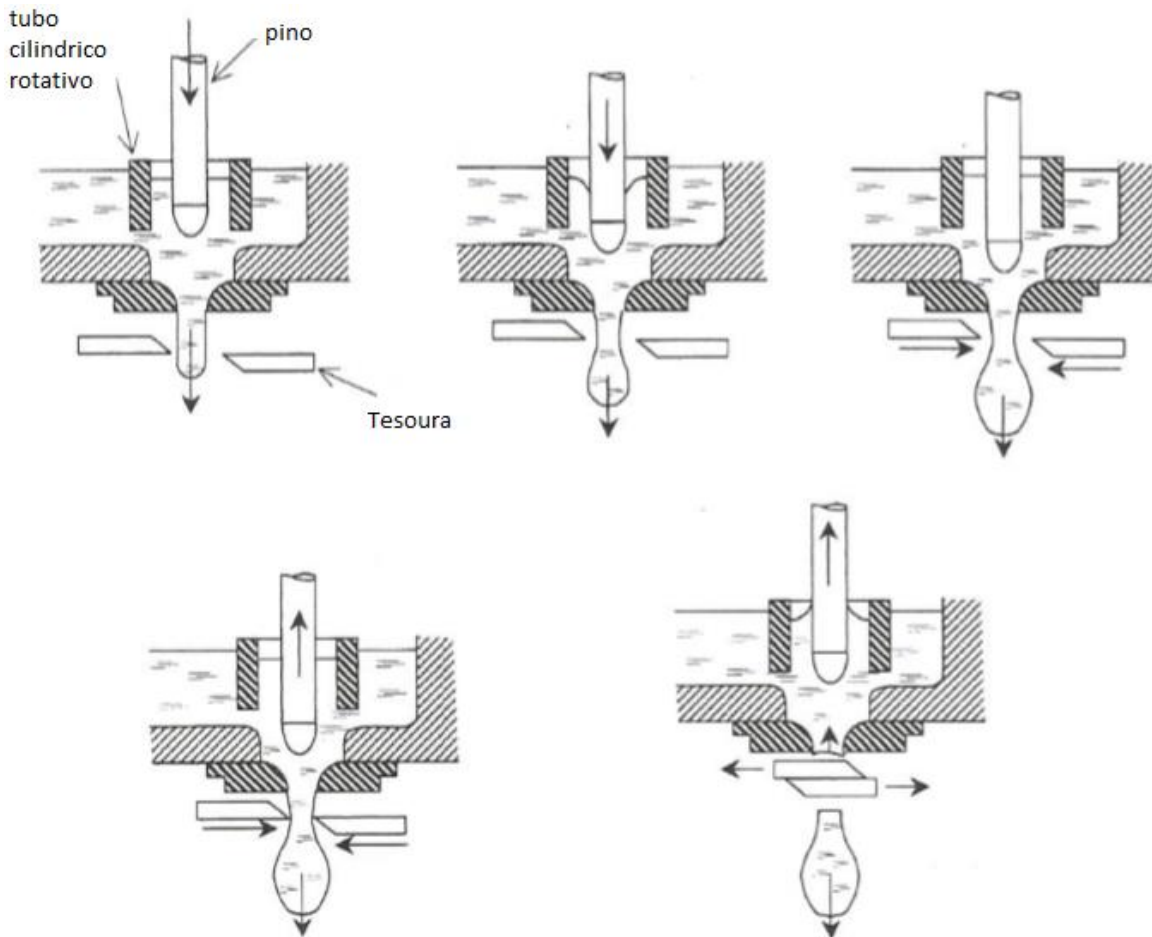
Feeders colorante



Conformação (fabricação)



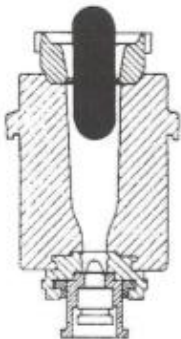
Mecanismo de formação de gotas (vidro oco)



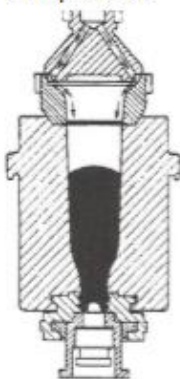
Animação gentileza Edison Toporcov

Conformação por sopro

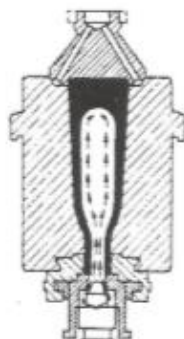
carga



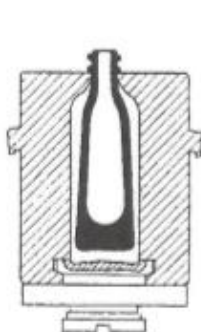
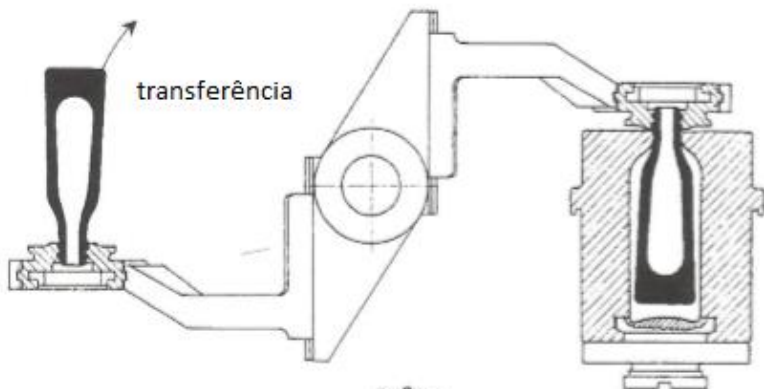
compressão



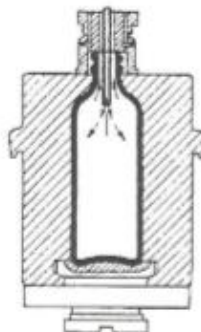
sopro do parison



transferência



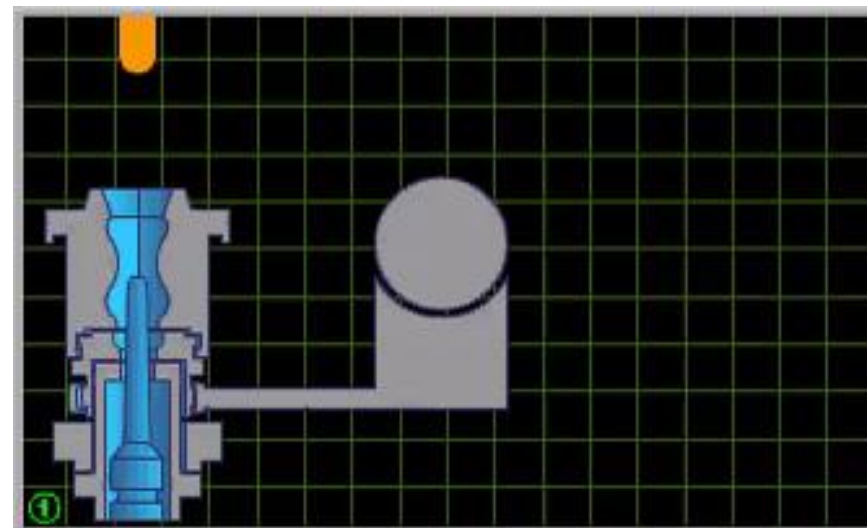
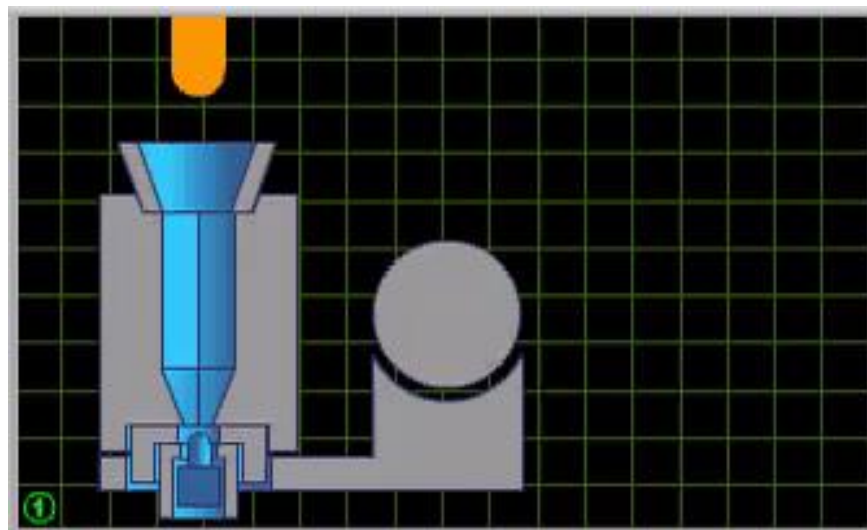
alongamento



sopro final

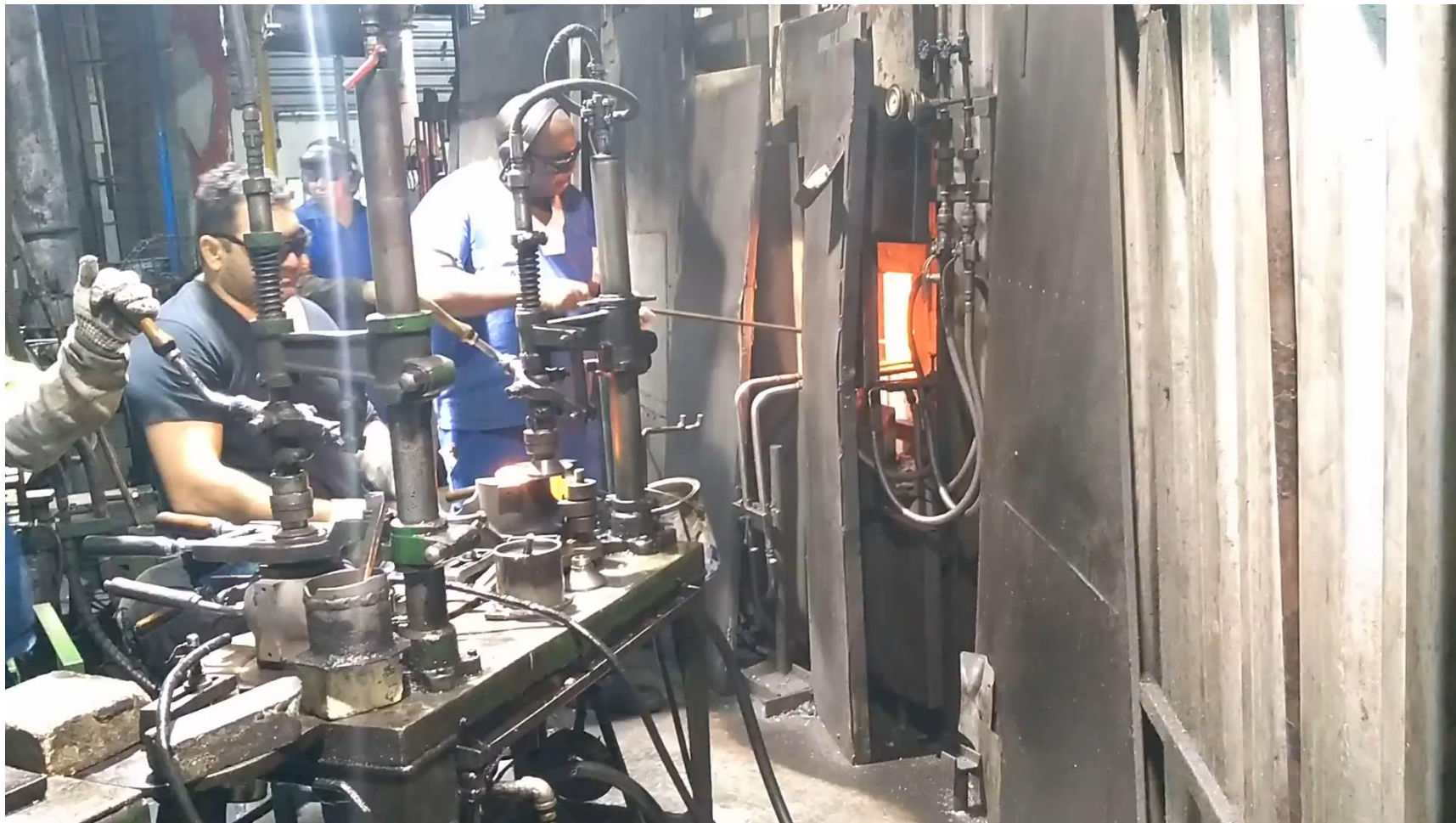


extração



Conformação por sopro

Conformação manual por sopro



Gentileza Benedita Marques De Oliveira - Multiglass

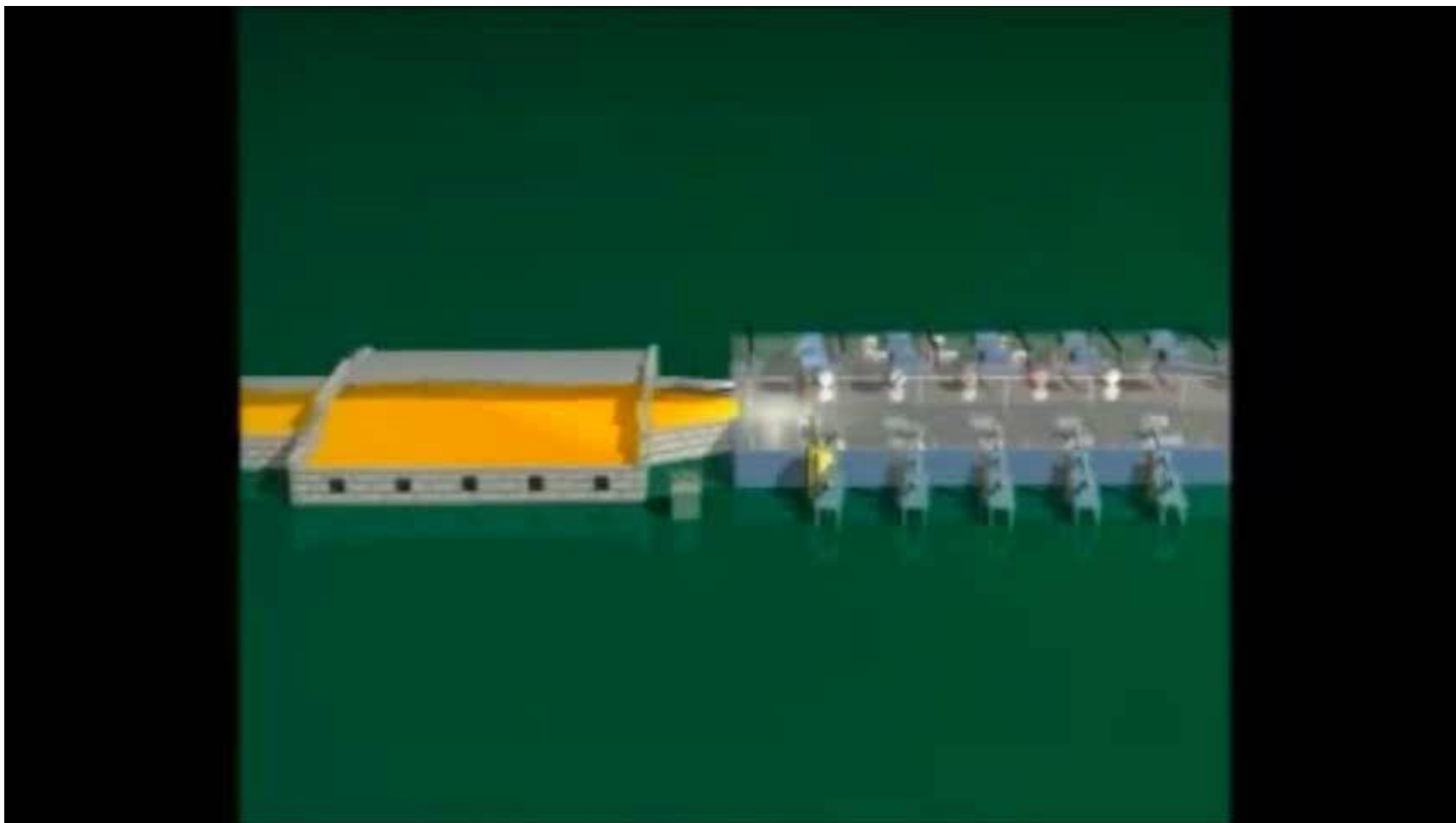
Conformação por prensagem



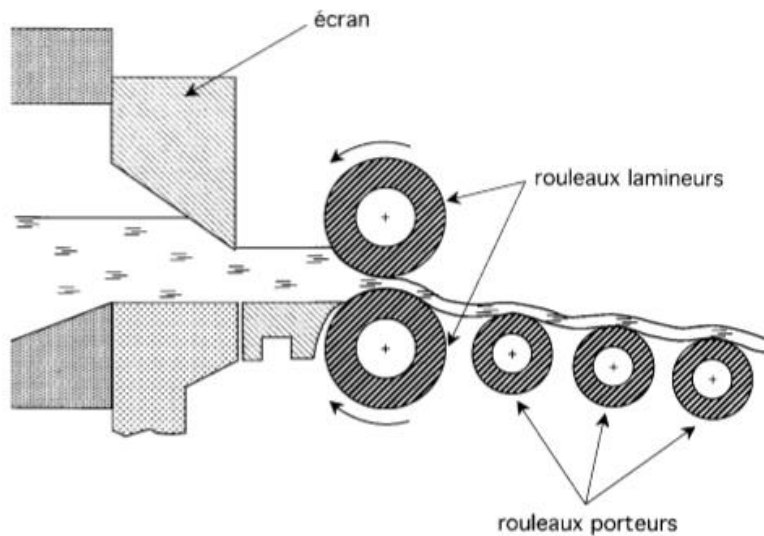
Conformação centrifugação



Conformação por flotação



Conformação por laminação



Conformação por estiragem

Corning – Gorilla Glass



Conformação por fibragem – fibra de reforço

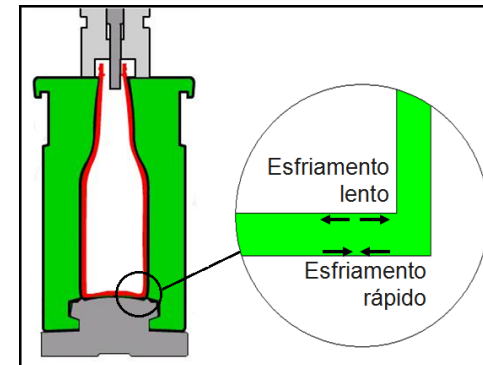
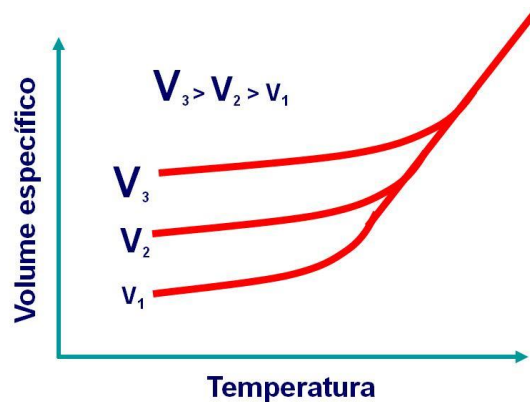
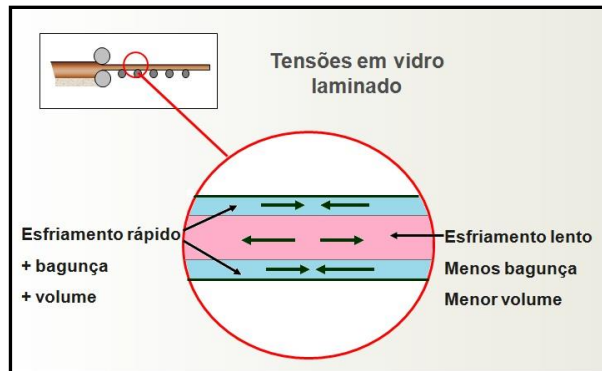


Conformação por fibragem – lâã de vidro

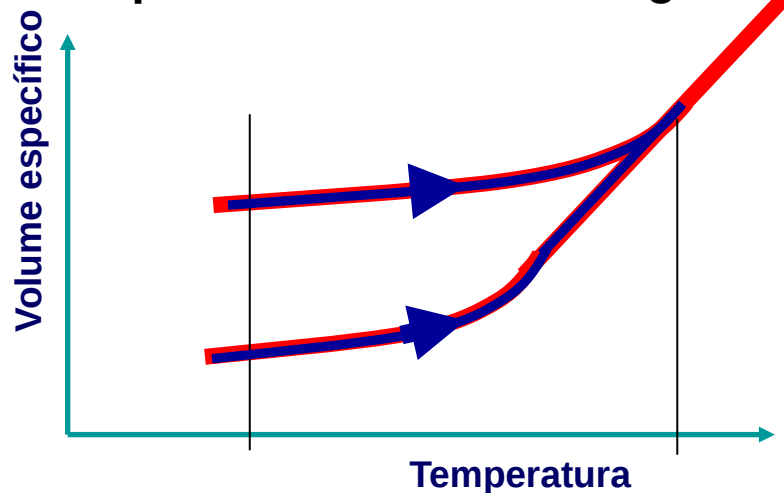


Recozimento

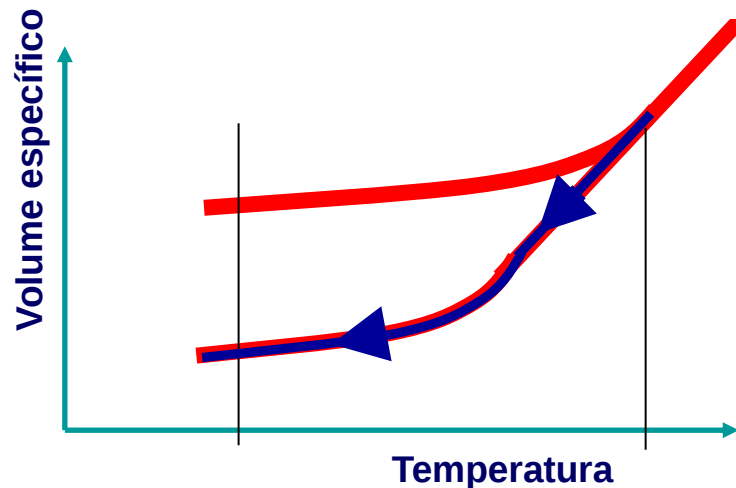
Elimina tensões geradas durante a conformação
(Causadas pelo resfriamento diferenciado)



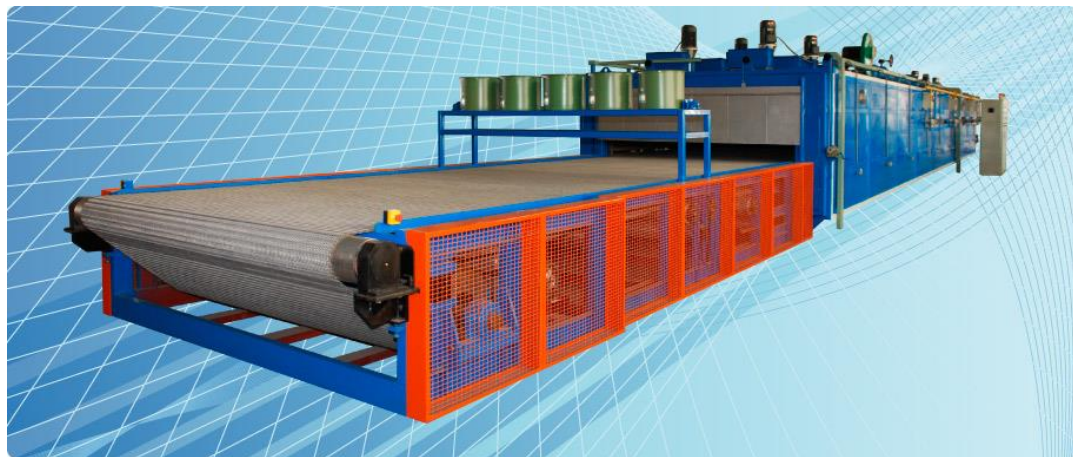
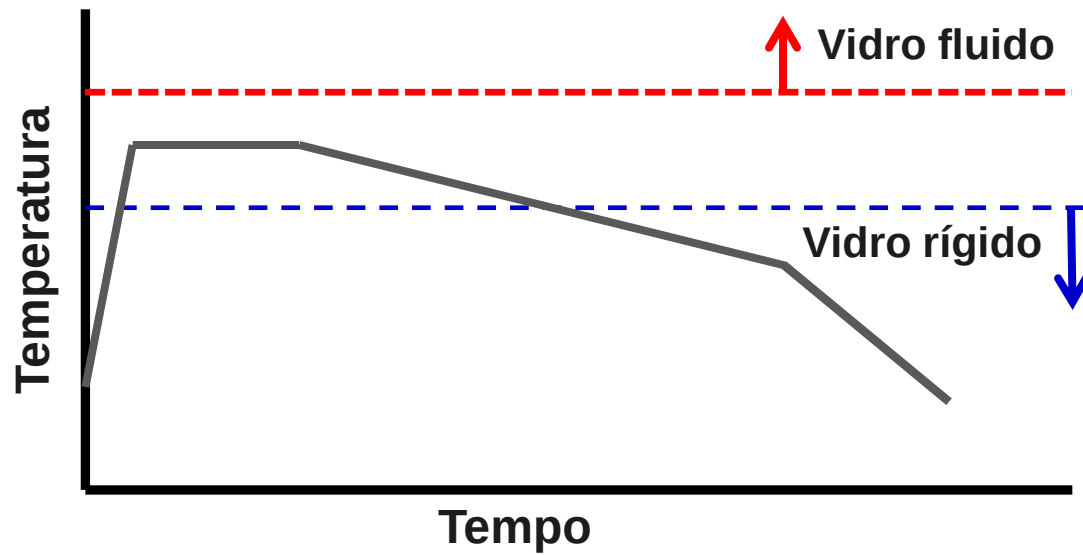
Aquecimento acima de Tg



Esfriamento lento até abaixo de Tg



Recozimento



Tratamentos diversos posteriores

Pintura

Foscação

Decoração

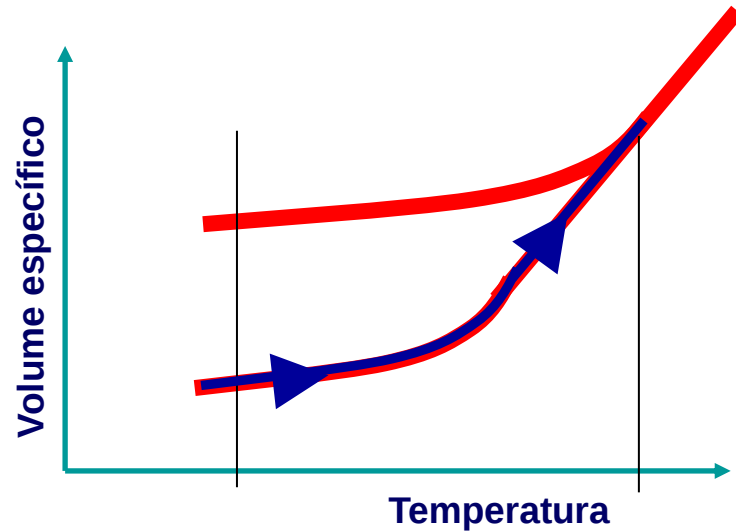
Espelhação

Camadas superficiais

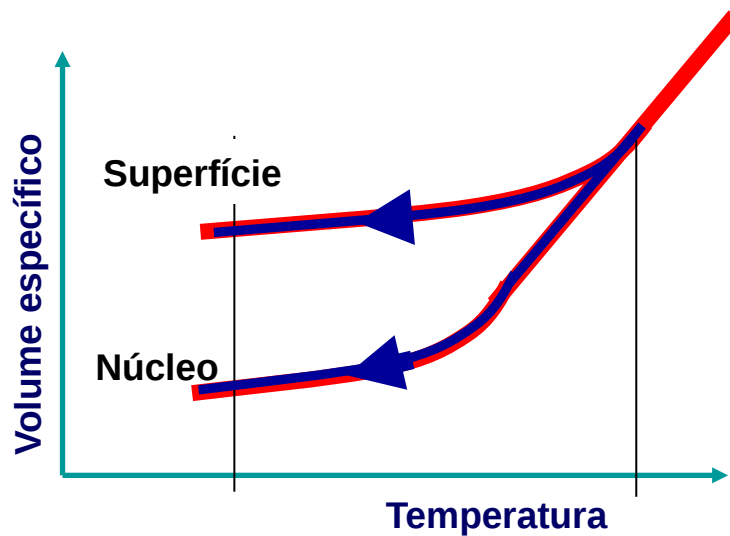
Têmpera

Etc.

Têmpera

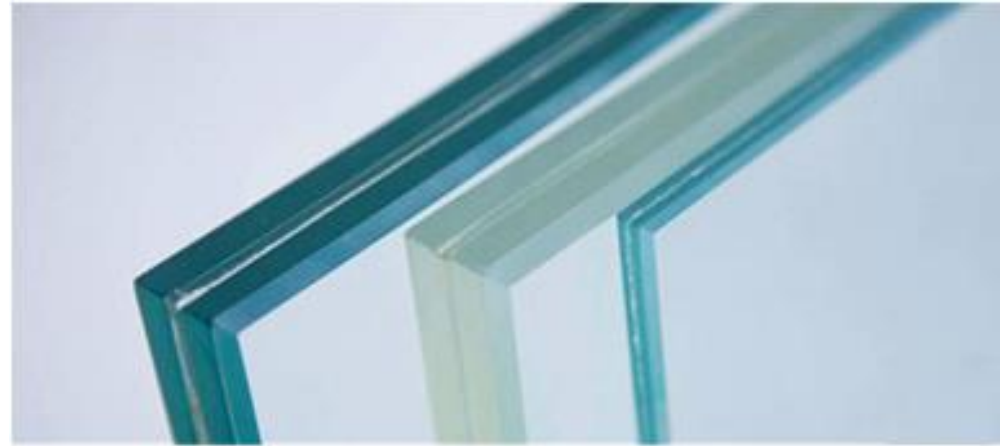
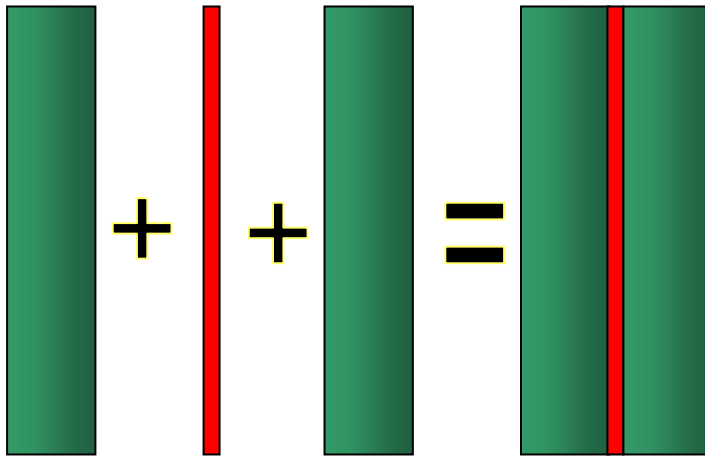


Vidro é aquecido acima de T_g



Vidro é resfriado rapidamente por igual em toda superfície

Vidro laminado: vidro + pvb



Quebra diferentes vidros



Quebra vidro temperado x laminado



Quebra vidro temperado x laminado



Laminados estruturais



Willis Tower Chicago - Skydeck
- 443m



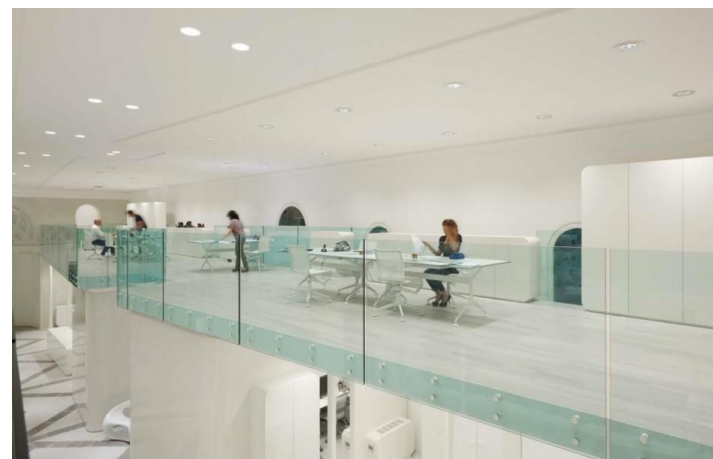
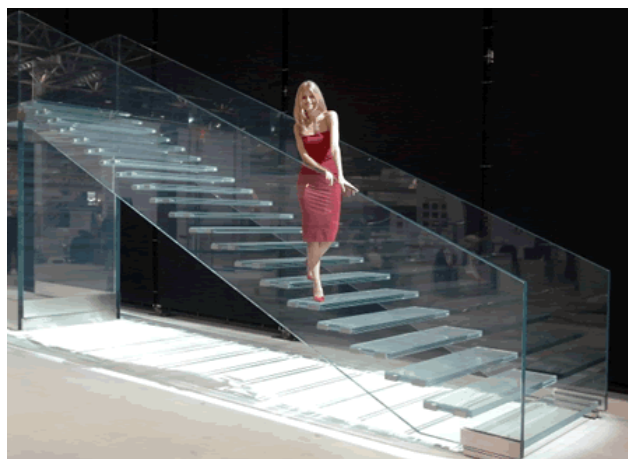
Laminados estruturais



Apple Store NY 2006



Apple Store NY 2011



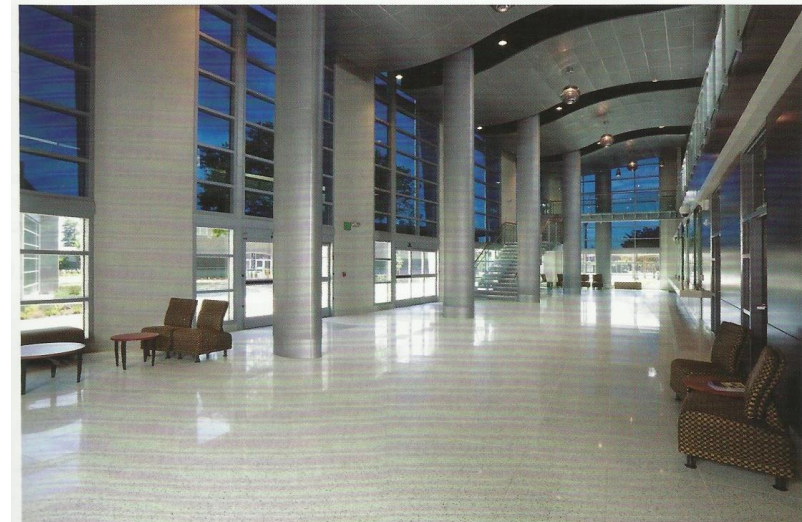
Vidro laminado estrutural



Laminados: cores e outras funções

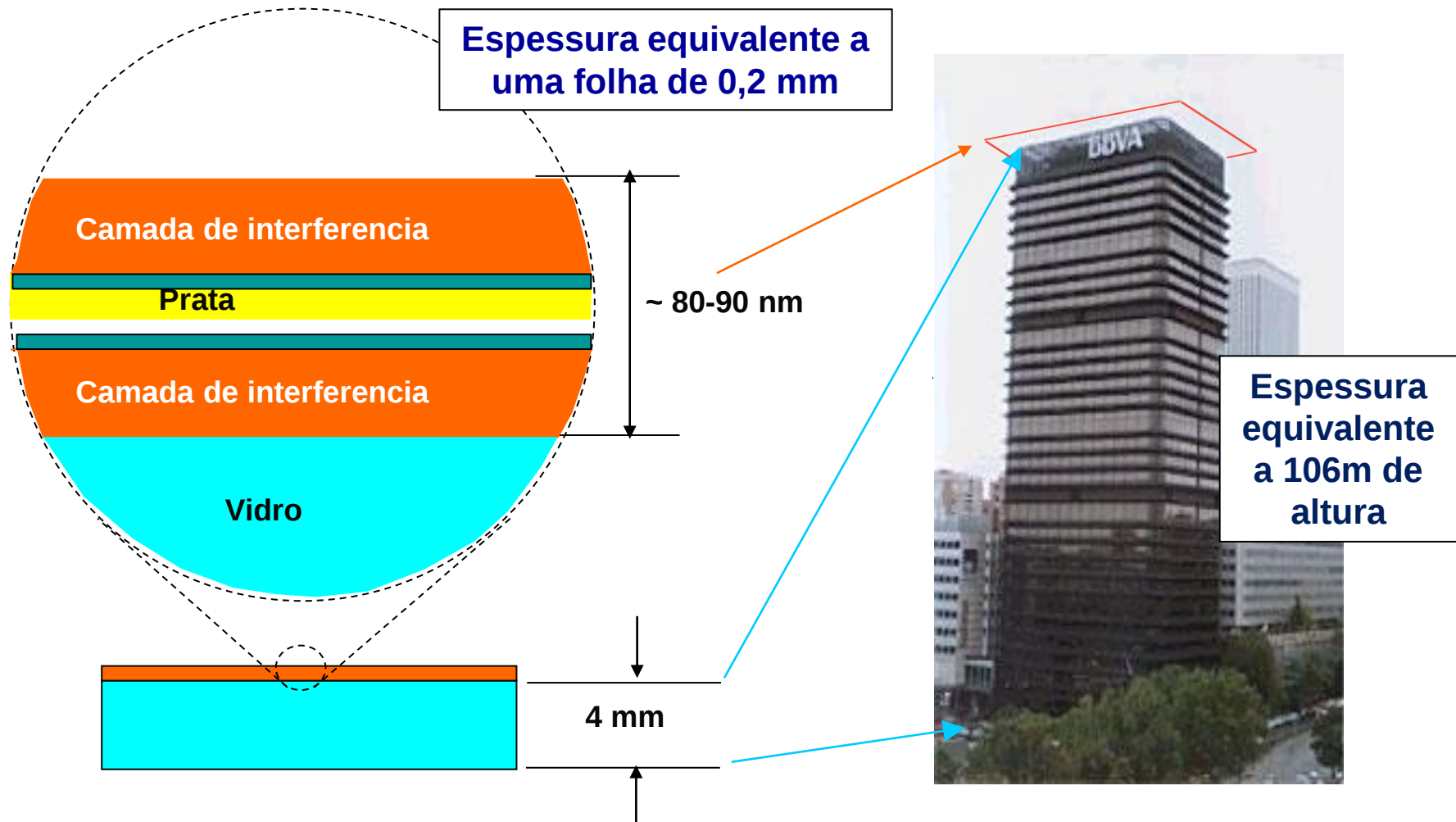


The Student Services Center at Chabot College, California features SageGlass, shown (above) in the clear state and (below) fully tinted.

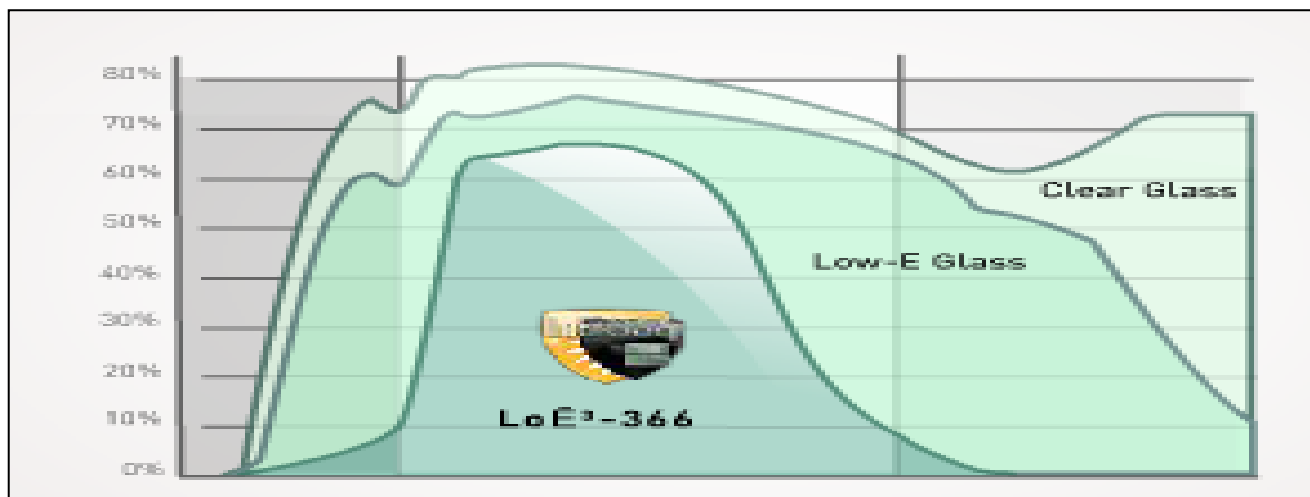
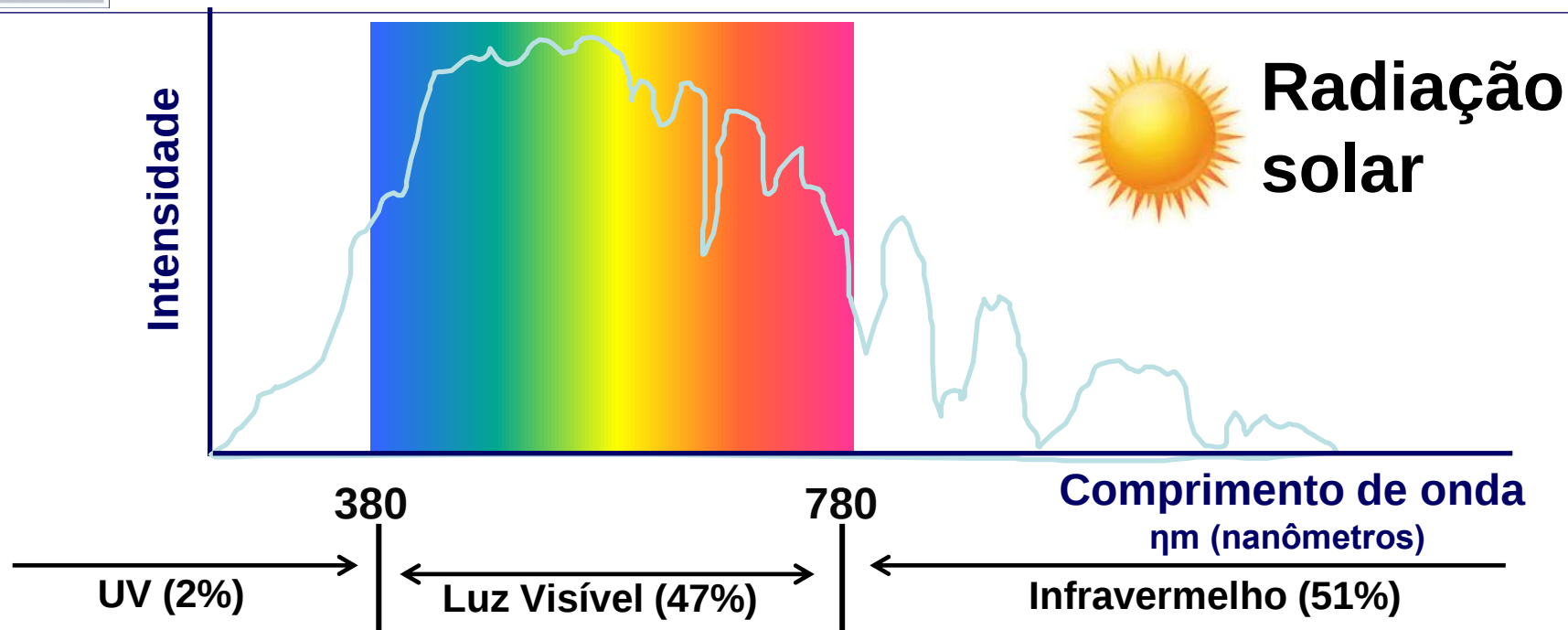


Revestimentos superficiais (coatings)

Agregam características importantes. São muito finos



Vidros de controle solar

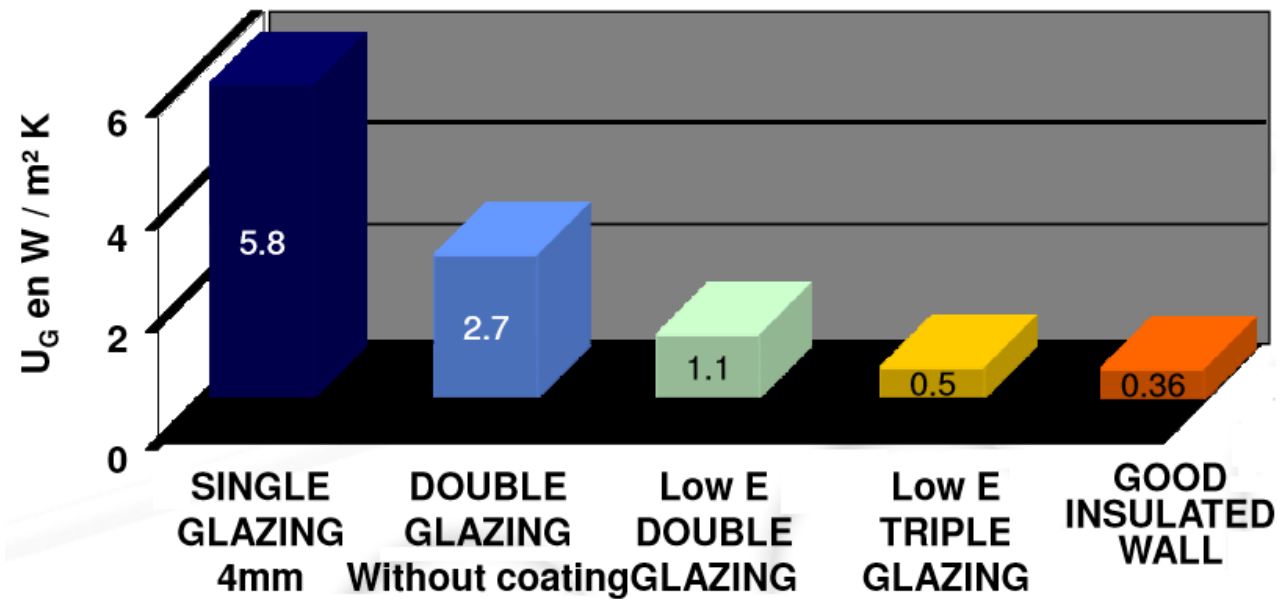
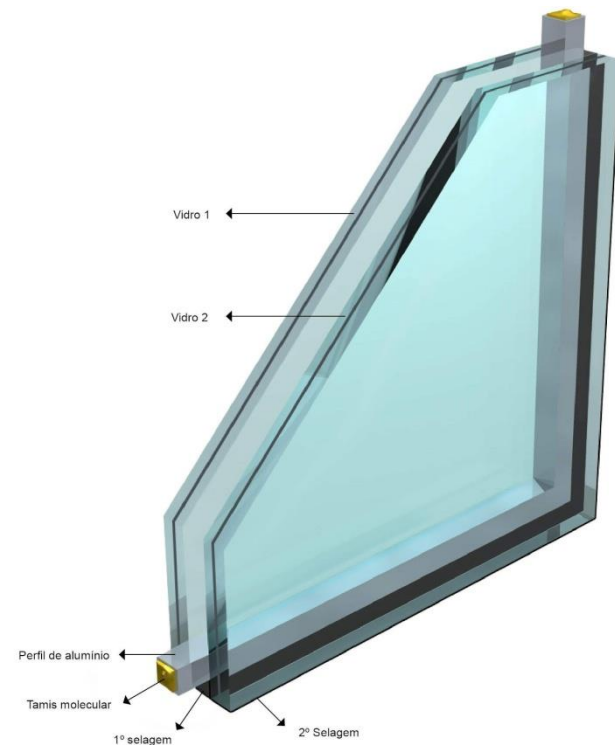


Vidros de controle solar

Permitem entrar a radiação luminosa (luz)
Não deixam entrar radiação térmica (calor)
Não deixam entrar o ultravioleta (desbota tecidos)



Vidros duplos



Functional Glasses: Properties And Applications for Energy

Driss Lamine

Saint Gobain Winter 1-7-2013

Outros exemplos de funcionalidades de revestimentos superficiais (coatings)



Autolimpante



Antibacteriano

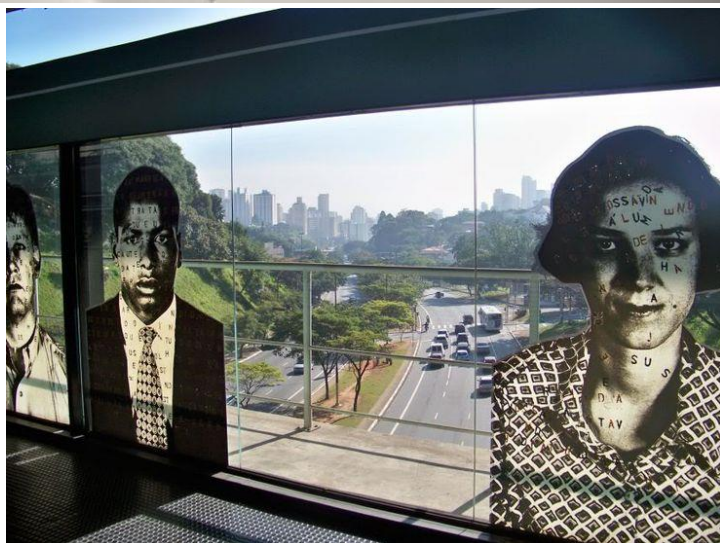


Antirreflexivo



Hidrorrepelente

Impressão jato de tinta



Estação Metro Sumaré – São Paulo
Alex Flemming 1998 – Silk screen



Biblioteca Mario de Andrade – São Paulo
Alex Flemming 2016 – Impressão digital

Obrigado

Mauro Akerman
mauro.akerman@gmail.com
Novembro 2020