



## Imperfeições Cristalinas Cássio Aurélio Suski

### Objetivos

Este texto foi escrito para auxiliar você a:

- entender sobre as imperfeições cristalinas e seus conceitos.

### Iniciando o estudo

Neste material, você encontra conteúdos sobre imperfeições cristalinas e seus conceitos, assim como os tipos de defeitos e contornos por meio de seus conceitos e representações.

### 1 Imperfeições Cristalinas

Por mais controlado que seja o processo de fabricação, não existe um cristal com todos os átomos em suas posições perfeitas. Todos os cristais possuem algum tipo de defeito, estes por sua vez contribuem com as propriedades mecânicas dos materiais, como os metais. O controle desses “defeitos” proporciona propriedades diferenciadas aos materiais.

A simples adição de um elemento de liga, como o carbono (C) no ferro (Fe) para a produção do aço, gera defeitos pontuais, pois esses átomos se posicionam entre os átomos da matriz original, ou até mesmo substituindo estes em sua estrutura original.

A deformação plástica do material ocorre devido à movimentação de defeitos lineares, como as discordâncias, já a rigidez é alcançada pelo ancoramento das discordâncias em defeitos pontuais que existem na

microestrutura, tais como átomos intersticiais intencionalmente introduzidos no material, como o carbono (C) no aço.

### 1.1 Defeitos Pontuais

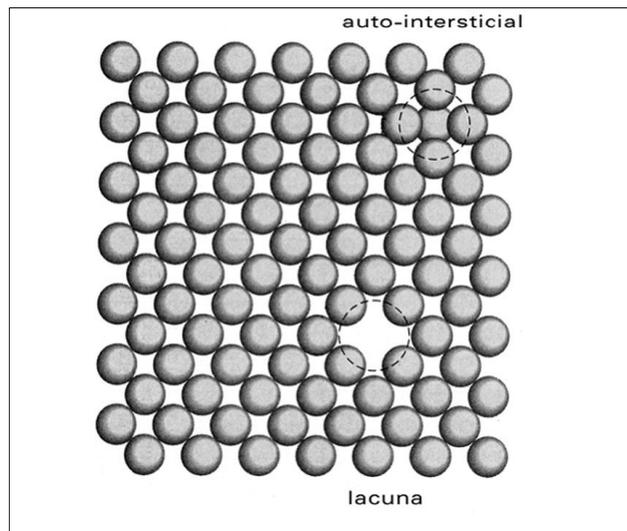
São átomos faltantes ou ocupando posições irregulares na estrutura cristalina do material (Figura 1) e incluem vacâncias, átomos ou impurezas intersticiais e substitucionais.

Vacâncias são espaços criados na estrutura cristalina pela ausência de um ou mais átomos na rede cristalina. Já defeitos intersticiais são átomos que ocupam posições entre os átomos da estrutura cristalina. Normalmente, são de tamanhos menores e afetam de forma significativa a rigidez do material, uma vez que servem como obstáculos para a movimentação dos defeitos planares.

Defeitos pontuais causados por átomos substitucionais ocorrem quando estes átomos estão ocupando posições referentes a outros átomos. São os responsáveis pela formação de ligas metálicas isomórficas e, para que isso ocorra, algumas condições devem ser atendidas.

A regra de Hume-Rothery apresenta os fatores que influenciam para a ocorrência de soluções sólidas substitucionais, que são: raios atômicos com diferenças inferiores a 15%, mesma estrutura cristalográfica, eletronegatividades próximas e mesma valência.

Figura 1 - Falta de átomo



Fonte: Unioeste ([s.d.])

## 1.2 Defeitos de Linha

Os defeitos em linha são imperfeições em uma estrutura cristalina nas quais uma linha de átomos tem uma estrutura local que difere da estrutura circunvizinha.

Os defeitos de linha são extrínsecos: sua presença não é necessária por razões termodinâmicas:

- Eles são criados devido às condições de processamento (a forma usada na fabricação do material) e por forças mecânicas que atuam sobre o material;
  - Estão quase sempre presentes nos cristais reais;
  - Em um material típico, aproximadamente 5 de cada 100 milhões de átomos (0.000005%) pertencem a um defeito de linha.

Em uma porção de material de 10 cm<sup>3</sup> (cerca do tamanho de um dado de seis lados), haverá aproximadamente 10<sup>17</sup> átomos que pertencem a defeitos de linha!

Veremos que os defeitos em linha, que são chamados discordâncias, têm

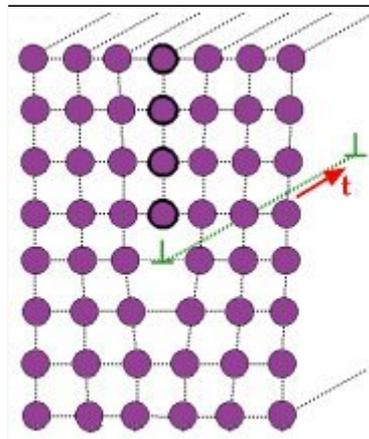
uma forte influência sobre as propriedades mecânicas dos metais e de alguns cerâmicos.

Também chamados de discordâncias são defeitos lineares ou unidimensionais em torno do qual alguns átomos estão desalinhados. As discordâncias estão associadas com a cristalização e a deformação (origem: térmica, mecânica e supersaturação de defeitos pontuais). Os defeitos lineares são associados principalmente à deformação mecânica. A presença deste defeito é a responsável pela deformação, falha e ruptura dos materiais. Existem dois tipos principais de discordâncias: Discordância em cunha (aresta) e Discordância em hélice ou espiral.

### 1.2.1 Discordância em Cunha (Aresta)

O defeito ou linha de discordância ocorre ao longo da aresta da linha extra de átomos (Figura 2). O vetor de Burger é perpendicular à direção da linha da discordância. Envolve zonas de tração e compressão.

Figura 2 - Discordâncias em cunha



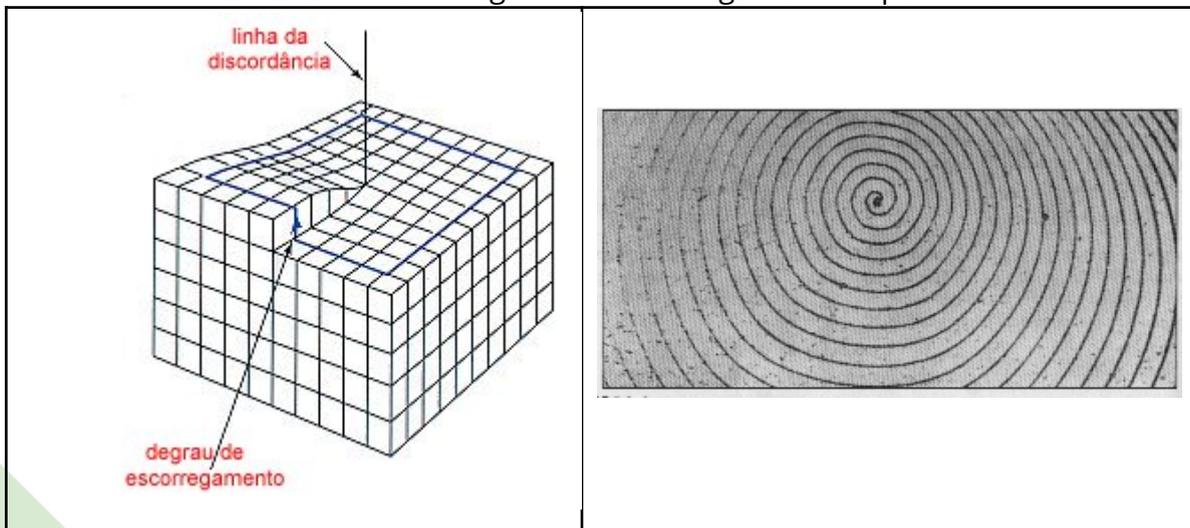
Fonte: Cimm ([s.d.])a

### 1.2.2 Discordância em hélice ou espiral

A Discordância em hélice (espiral) produz distorção na rede. O vetor de *burger* é paralelo à direção da linha de discordância.

A quantidade e o movimento das discordâncias podem ser controlados pelo grau de deformação (conformação mecânica) e/ou por tratamentos térmicos. Com o aumento da temperatura há um aumento na velocidade de deslocamento das discordâncias favorecendo o aniquilamento mútuo das mesmas e formação de discordâncias únicas. Impurezas tendem a difundir-se e concentrar-se em torno das discordâncias formando uma atmosfera de impurezas. As discordâncias geram vacâncias, influem nos processos de difusão e contribuem para a deformação plástica.

Figura 3 - Discordância em hélice na superfície de um monocristal de sic. as linhas escuras são degraus de escorregamento superficiais



Fonte: Cimm ([s.d.])a

### 1.3 Defeitos de Interface

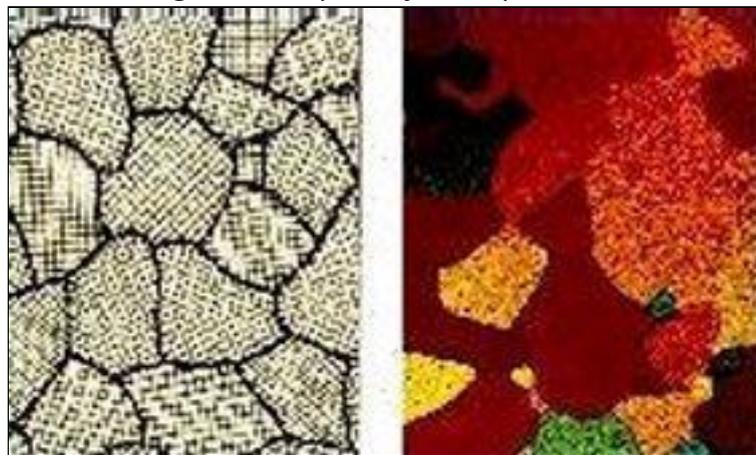
São imperfeições superficiais de natureza estrutural que decorrem de uma variação no empilhamento dos planos atômicos através de um contorno. Tal variação pode ser tanto na orientação, quanto na sequência de empilhamento dos planos.

### 1.4 Contornos de Grão

São as imperfeições superficiais que separam cristais de diferentes

orientações, num agregado policristalino. Como se ilustra na Figura 4, para um modelo bidimensional, os átomos do contorno entre dois grãos aleatoriamente orientados não podem ter um complemento perfeito de átomos vizinhos; em consequência, existe uma região de transição onde o empilhamento atômico é imperfeito. Em três dimensões, esta transição ocorre através da superfície que separa os grãos. É a natureza imperfeita dos contornos dos grãos que permite ao microscopista vê-los, pois, num material cristalino transparente, eles dispersam a luz e num material opaco, eles podem ser atacados quimicamente.

Figura 4 - Imperfeições superficiais



Fonte: Cimm ([s.d.])b

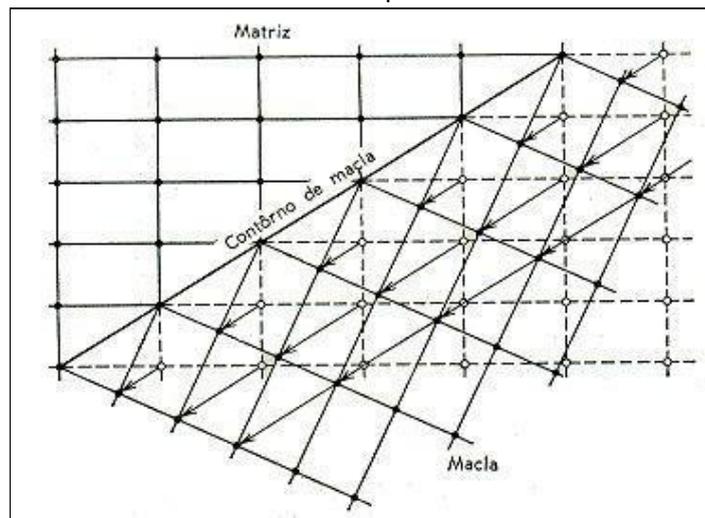
### 1.5 Contornos de Macla

Imperfeições superficiais que separam duas orientações que são imagens especulares uma da outra são chamados contornos de macla. O volume do material cuja orientação é a imagem especular da orientação da matriz é chamado macla.

As maclas podem originar-se durante o crescimento de um cristal ou durante uma deformação. Cisalhamento paralelo ao contorno da macla pode produzir a macla, como mostrado na Figura 5, particularmente se o escorregamento for difícil de se iniciar ou propagar nessa direção. O cisalhamento da rede é uniforme, isto é, o afastamento de um ponto da rede na

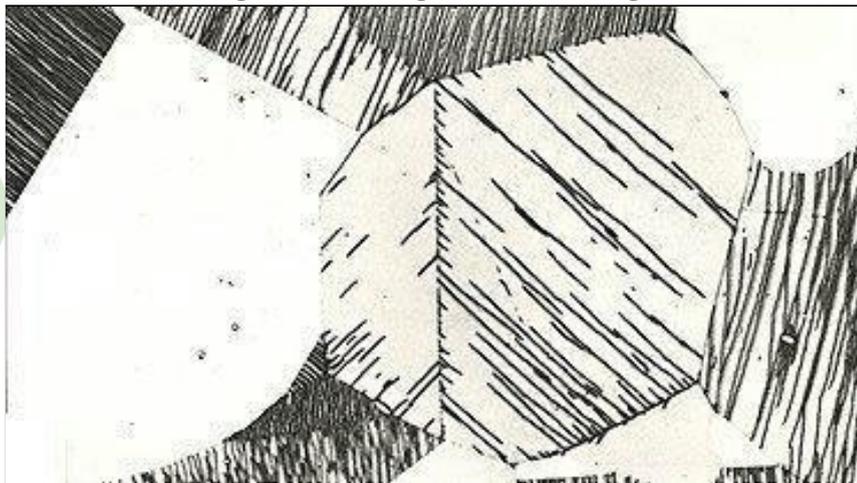
região maclada é diretamente proporcional à sua distância do contorno e é paralela ao contorno da macla. Se a cada ponto da rede está associado mais de um átomo, como nos metais hc, depois do cisalhamento de maclagem devem ocorrer pequenos reajustes atômicos para que sejam macladas tanto a rede, como a estrutura cristalina.

Figura 5 - A figura mostra um contorno de macla, conforme pode ser observado através de microscopia ótica.



Fonte: Cimm ([s.d.])b

Figura 6. Micrografia de uma liga



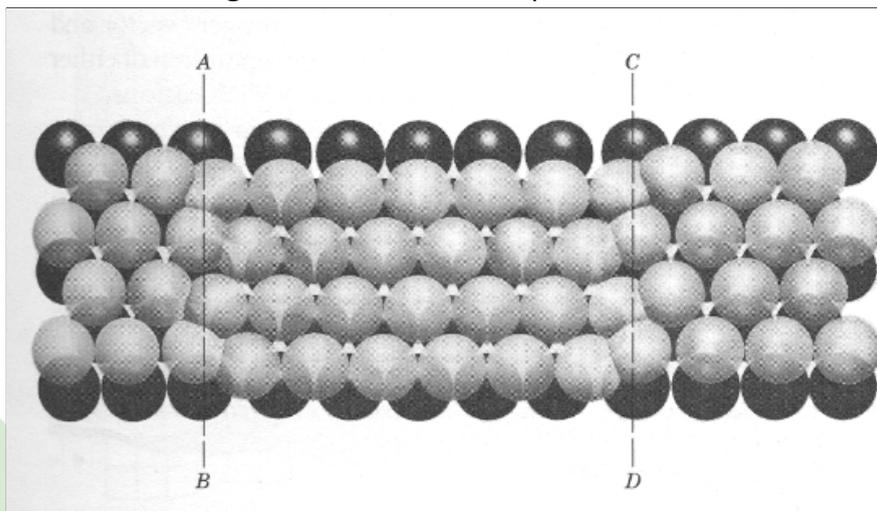
Fonte: Cimm ([s.d.])b

## 1.6 Defeito de Empilhamento

É uma imperfeição superficial que resulta do empilhamento de um plano atômico fora da sequência, enquanto que a rede é perfeita de cada lado do defeito. Por exemplo, a sequência de empilhamento num cristal ideal pode ser descrita como ABCABCABC..., mas, por um defeito de empilhamento a sequência pode mudar para ABCABABCA ...

O defeito de empilhamento (Figura 7) neste caso é devido ao plano "A" de átomos vir após o segundo "B", e pode ser descrito como uma região muito fina de empilhamento hc num cristal. Tais defeitos de empilhamento podem ocorrer durante o crescimento do cristal ou resultar da separação de duas discordâncias parciais. Em ambos os casos, o material cristalino de um lado da imperfeição tem a mesma orientação do que se acha do outro lado, mas sofreu uma translação em relação a este por uma fração do vetor da rede.

Figura 7 - Defeito de empilhamento



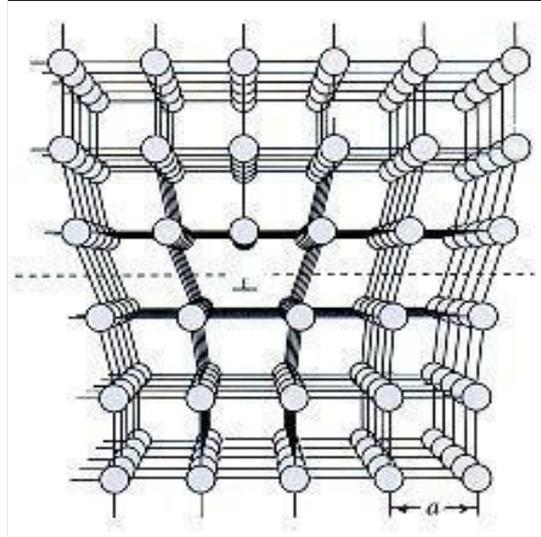
Fonte: Cimm ([s.d.])b

### 1.7 Contorno de Pequeno Ângulo

Outra imperfeição superficial é um contorno de pequeno ângulo, que é realmente um caso-limite de contorno de grão, em que o ângulo das orientações cristalinas é da ordem de poucos graus. Em geral, os contornos de pequeno ângulo podem ser descritos por arranjos convenientes de

discordâncias (Figura 8). Um contorno inclinado (tilt) de pequeno ângulo, é composto de discordâncias em aresta, umas sobre as outras no contorno.

Figura 8 - Contorno de pequeno ângulo



Fonte: Cimm ([s.d.])b

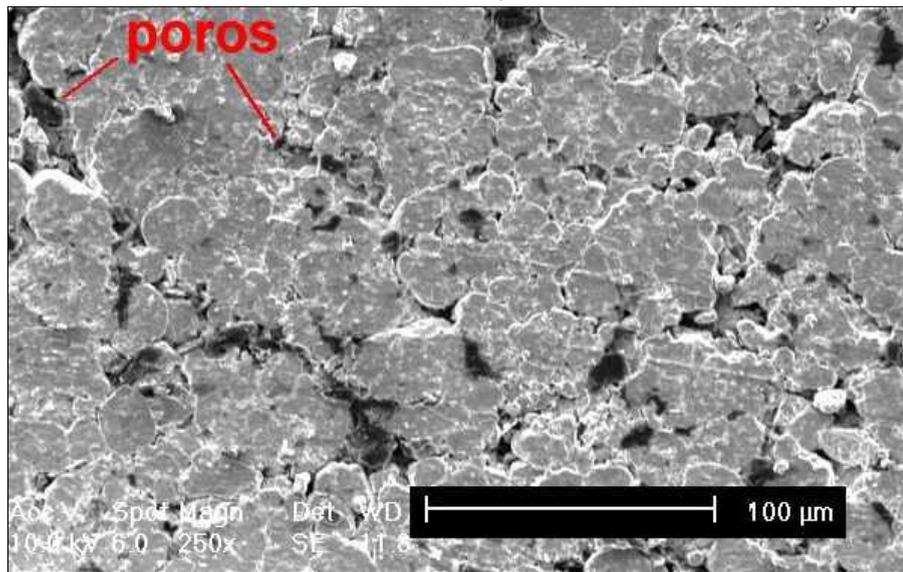
## 1.8 Defeitos Volumétricos

Os defeitos tridimensionais são os poros e os precipitados.

Os poros (que podem ser vistos como um aglomerado de vazios!!!), ocorrem com frequência nos componentes fundidos e são “parte” dos materiais e/ou componentes obtidos pela metalurgia do pó.

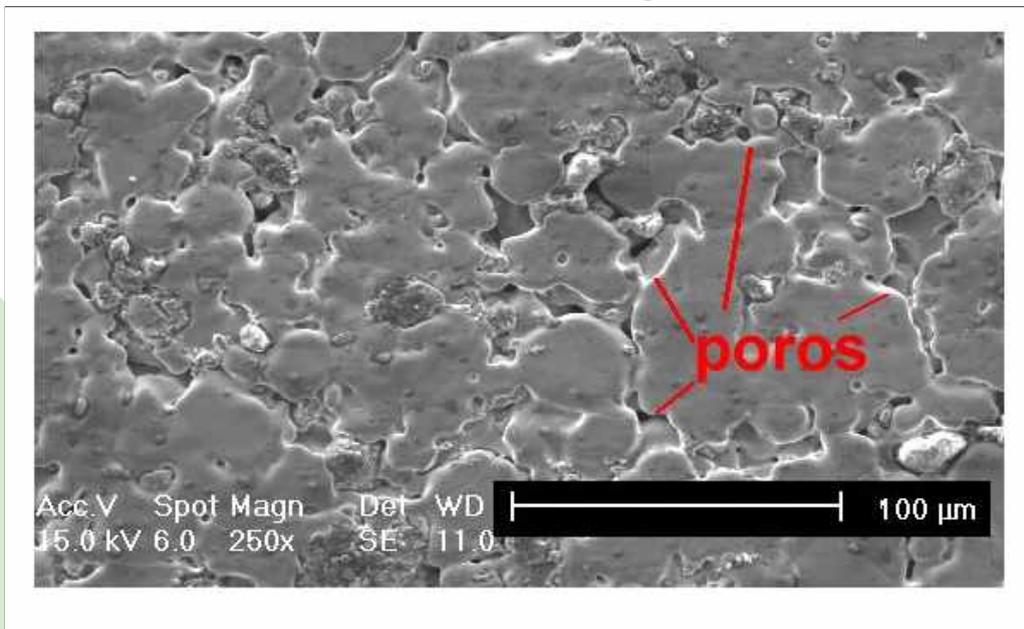
As Figuras 9 e 10 apresentam a superfície de ferro puro durante o seu processamento por metalurgia do pó. Note-se que, embora a sinterização tenha diminuído a quantidade de poros bem como melhorado sua forma (os poros estão mais arredondados), ainda permanece uma porosidade residual.

Figura 9 - Compactado de pó de ferro, compactação uniaxial em matriz de duplo efeito, a 550 mpa



Fonte: Cimm ([s.d.])c

Figura 10 - Compactado de pó de ferro após sinterização a 1150°C, por 120min em atmosfera de hidrogênio



Fonte: Cimm ([s.d.])c

Os precipitados são divididos em dois tipos: partículas de segunda fase e inclusões. Quando dois componentes são misturados, podem acontecer basicamente três situações:

(1) solubilização total de um componente no outro - como é o caso da mistura de água com álcool - a solução resultante é uma mistura homogênea onde não se consegue mais distinguir os componentes que lhe deram origem (água ou álcool);

(2) solubilização parcial de um componente no outro - como é o caso da mistura de água com açúcar - a solução resultante depende das proporções relativas de cada um dos componentes - se adicionarmos uma colher de açúcar a um copo de água teremos uma solução homogênea (uma água adoçada), solução esta que também não permite distinguir os componentes que lhe deram origem;

Contudo, se adicionarmos cinco colheres de açúcar a um copo de água veremos que parte do açúcar se dissolve na água, mas parte dele (ou pelo menos pensamos que seja!), ficará sedimentado no fundo do copo.

Em casos como este dizemos que há solubilidade parcial entre os componentes da mistura.

(3) solubilização nula de um componente no outro - como é o caso da mistura de água com óleo - não há solução, e sim uma mistura de dois componentes, o de maior densidade ficando no fundo do copo...

Tanto no caso (2) como no caso (3) temos misturas heterogêneas, formadas por duas fases distintas:

Caso (2) - a primeira fase (fase a) é a solução água adoçada e a segunda fase (fase b) é a sedimentação do fundo do copo;

Caso (3) - a primeira fase (fase a) é a água e a segunda fase (fase b) é o óleo.

A ocorrência de uma segunda fase deve-se ao grau de solubilidade entre os componentes da mistura.

Estes são exemplos de precipitados chamados de partículas de segunda fase.

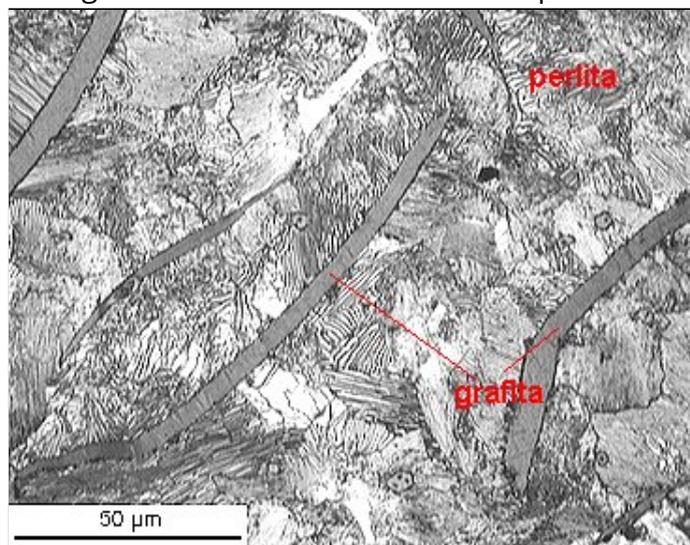
A mistura de água com açúcar foi feita de propósito. Como a solubilidade do açúcar na água é limitada, pode haver o aparecimento de uma segunda fase se adicionarmos açúcar em quantidade exagerada.

Mas, se adicionarmos açúcar em quantidade exagerada pode aparecer também uma abelha e cair dentro do copo. E, até que dava para tomar água adocicada, mas com abelha.

Bem, a abelha é o que a gente chama de inclusão. Aparece lá sem que a gente tenha propositadamente adicionado. É o caso dos óxidos e de outras partículas como sulfetos e fosfatos, por exemplo. Elas são decorrentes de reações de oxirredução entre o oxigênio do ar com os metais componentes da mistura, ou advém de reações entre componentes da matéria-prima utilizada (por exemplo, o enxofre que está presente no coque que por sua vez é utilizado na fabricação do aço) com os componentes da mistura.

### 1.9 Exemplo de Partículas de segunda fase

Figura 11 -. Ferro fundido cinzento perlítico

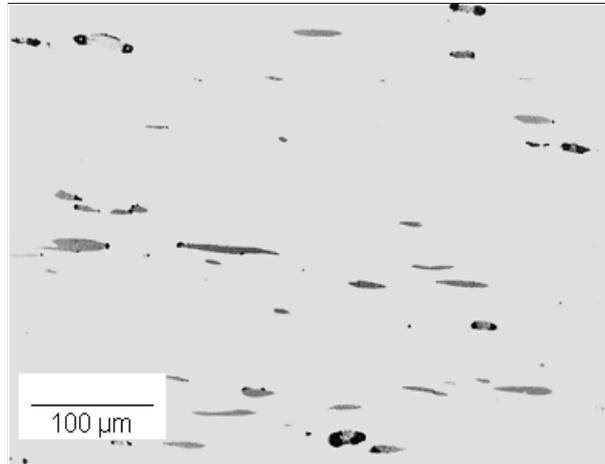


Fonte: Cimm ([s.d.])c

A Microestrutura é composta por veios de grafita sobre uma matriz perlítica. Cada grão de perlita, por sua vez, é constituído por lamelas alternadas de suas fases: Ferrita (ou Ferro-A) e cementita (ou Carboneto de Ferro).

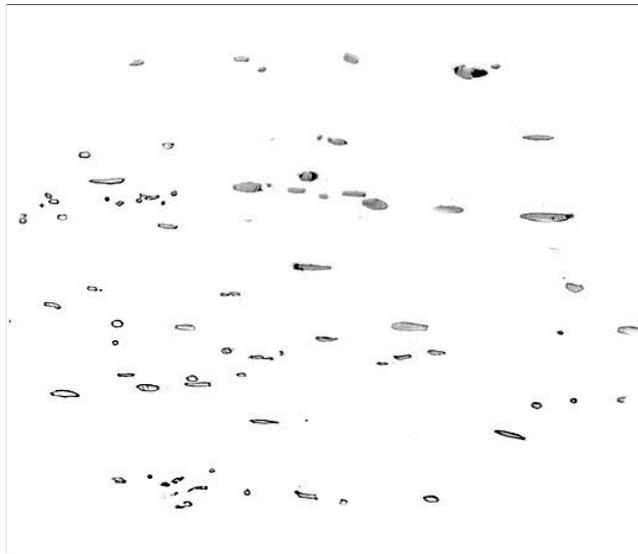
### 1.10 Exemplo de Inclusões

Figura 12 - Inclusões de óxido de cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) em cobre de alta pureza (99,26%) laminado a frio e recozido a  $800^\circ\text{C}$ .



Fonte: Cimm ([s.d.])c

Figura 13 - Sulfetos de Manganês ( $\text{MnS}$ ) em aço rápido



Fonte: Cimm ([s.d.])c

### Referências

BECKER, Daniela. **Tratamento Térmico**. Joinville: Udesc, 2009. Disponível em: [http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula\\_9\\_\\_tratamento\\_termico.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula_9__tratamento_termico.pdf). Acesso em 16 de fevereiro de 2017.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2007.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 1 v.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 2 v.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 3 v.

CIMM. **Defeitos em Linha nos Materiais Cristalinos**. ([s.d.])a. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6421-defeitos-em-linha-nos-materiais-cristalinos](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6421-defeitos-em-linha-nos-materiais-cristalinos). Acesso em 18 nov. 2021.

CIMM. **Defeitos Planares**. ([s.d.])b Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6422-defeitos-planares](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6422-defeitos-planares). Acesso em 18 nov. 2021.

CIMM. **Defeitos Volumétricos**. ([s.d.])c. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6423-defeitos-volumetricos](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6423-defeitos-volumetricos). Acesso em 18 nov. 2021.

COSTA, E M. **Classificação dos Aços**. DEM - Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RS. Disponível em: <<http://www.em.pucrs.br/eleani/Protegidos/classificacaoacos.ppt>> Acesso em 09 de dezembro de 2010.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Tipos de polímeros**. Disponível em: <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/tipos-polimeros.html>. Acesso em 20 de fevereiro de 2017.

**Influência dos elementos químicos no aço, Trabalhos de Engenharia Metalúrgica**. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfUe4AF/influencia-dos-elementos-quimicos-no-aco>. Acesso em 11 de abril de 2017.

NÚCLEO INOX. **Coletânea de Informações Técnicas – Aço Inoxidável**. Disponível em: <[http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel\\_No%E7%F5es%20b%E1sicas.pdf](http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel_No%E7%F5es%20b%E1sicas.pdf)> . Acesso em 09 de dezembro de 2010.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Processo de Fundição**. Joinville: IFSC, 2010. Disponível em: [http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Processos\\_de\\_Fabricacao/aula\\_2\\_Processo\\_de\\_Fundicao.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Processos_de_Fabricacao/aula_2_Processo_de_Fundicao.pdf) . Acesso em 10 de fevereiro de 2017.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Tecnologia de Fabricação**: Deformação dos Materiais. Joinville: IFSC, 2011. Disponível em: [http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia\\_de\\_Fabricacao/Aula%203\\_Estrutura%20cristalina.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia_de_Fabricacao/Aula%203_Estrutura%20cristalina.pdf) . Acesso em 14 de fevereiro de 2017.

PASSOS, Luciano. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Limeira: Faculdades Integradas Einstein de Limeira, 2007. Disponível em: <http://drb-assessoria.com.br/3cetdm.pdf>. Acesso em 17 de fevereiro de 2017.

RIO INOX. **Tipos de Aços Inoxidáveis**. Disponível em: <http://www.rioinox.com/TiposdeAçosInoxidáveis.pdf>. Acesso em: 09 de dezembro de 2010.

ROCHA, Otávio Fernandes Lima da. **Conformação Mecânica**. Belém: Ifpa, 2012. Disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/conformacao\\_mecanica.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/conformacao_mecanica.pdf) . Acesso em 14 de fevereiro de 2017.

SCHEID, Adriano. **Curso Básico de Aços**. Curitiba: UFPR, 2010. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM049/A%C3%87OS.pdf> . Acesso em 8 de fevereiro de 2017.

SCHEID, Adriano. **Siderurgia: A Elaboração do Aço**. 2012. Disponível em: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM049/Aula 1.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM049/Aula%201.pdf) . Acesso em 15 de fevereiro de 2017.

SENATORE, M et al.. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L**. Rev. Esc. Minas v.60 n.1 Ouro Preto jan./mar. 2007, Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672007000100027&lng=&nrm=iso&tIng](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000100027&lng=&nrm=iso&tIng) Acesso em 09 de dezembro de 2010.

SILVA, Antonio Carlos da; AVANZI, Caio. **Habilitação Técnica em Mecânica: Tecnologia dos Materiais e Industrial**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011. (Vol. II).

SILVA, Décio Cardoso da. **Materiais para Construção Mecânica**. São Paulo: Centro Paulo Souza, 2010. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAA4SYAB/apostila-teoria-materiais-1#> Acesso em 2 de março de 2017.

SOUZA, Líria Alves de. "**Polímeros termoplásticos e termofixos**"; *Brasil Escola*. Disponível em <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/polimeros-termoplasticos-termofixos.htm>. Acesso em 20 de março de 2017.

TEBECHERANI. C. de T. P. **Aços Inoxidáveis**. Disponível em: <http://>

[www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/body\\_aco\\_inox.html#influenci](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html#influenci)>. Acesso em 09 de dezembro de 2010.

UNIOESTE. Defeitos cristalinos. Disponível em:  
<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap7.pdf>. Acesso em 18 nov. 2021.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.  
<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4598-o-que-e-o-aco-eletrico/> . Acesso em 13 de março de 2017.

VOTORANTIM. **Notícia: Votorantim Metais na Feinox 2006**. Data: 30 de outubro de 2006. Disponível em:  
<<http://www.votorantim.com.br/pt-br/Noticias/listaNoticias/Paginas/061030VotorantimMetaisna.aspx>.> Acesso em 09 de dezembro de 2010.