



# As formas elementares da vida eletrônica: a agência social do elemento silício (14-Si)

**Bruna Carla Gozzi Queiroz (PIBIC-EM) – E.E. Prof. Joaquim Ferreira Lima**  
**Gabriela Lima Custódio (PIBIC-EM) – E.E. Residencial São José**  
**Pedro Vinícius Carandina da Silva (PIBIC-EM) – E.E. Culto à Ciência**  
**Fabiano Galletti Faleiros – PPGS/IFCH/UNICAMP**  
**Stefano Schiavetto - PPGS/IFCH/UNICAMP**  
**Pedro Peixoto Ferreira (Orientador) – IFCH/UNICAMP**



**Resumo:** Apresentamos aqui alguns resultados alcançados nesta pesquisa coletiva sobre a agência social do elemento químico silício (14-Si). Entendemos que o silício age socialmente quando participa explicitamente, e enquanto elemento químico, de processos de associação históricos e concretos. Foram investigados os seguintes aspectos da agência social do silício: (1) na saúde ocupacional, na forma da exposição a micropartículas respiráveis de sílica, causadoras da doença silicose; (2) na moda, na forma de sílica usado em acessórios, tecidos, elásticos e enchimentos; e (3) na microeletrônica, na forma de cristais ultrapuros usados como substrato para microchips. De forma mais geral, esta pesquisa se situa no campo dos Estudos Sociais da Ciência e da Tecnologia, e buscou produzir conhecimento sobre as agências não humanas com as quais compomos nossos coletivos. Esta pesquisa foi financiada pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – Ensino Médio (PIBIC-EM), da PRP, a quem agradecemos.

**Palavras-chave:** silício, silicose, silicone.

## Introdução

Em sua obra clássica de 1912, *As formas elementares da vida religiosa*, David Émile Durkheim (1996) mostrou como a vida religiosa consiste na reiteração ritual de modos de existência: “maneiras de agir, de pensar e de sentir” que, apesar de “exteriores ao indivíduo”, o potencializam *ao mesmo tempo em que* o dominam. Naquela obra, ele também buscou mostrar: como certas formas elementares da vida religiosa permanecem necessariamente existindo, mesmo em sociedades modernas, na forma de um impulso dinamogênico à ação; e como as representações científicas poderiam assumir plenamente o lugar de representações religiosas ultrapassadas, sem alterar sua operação elementar de tornar presente, em forma simbólica, uma totalidade social.

Elementos químicos são representações científicas, e como tais agem explicitamente (*e.g.*: em rótulos de alimentos e de medicamentos, na cultura popular, em leis, no currículo escolar e em praticamente todas as esferas de nossas vidas), direcionando a maneira como agimos, pensamos e sentimos. O que significa, por exemplo, dizer que: vivemos na “Idade do Silício” (Norton 2021:2); ou mesmo, que o silício (14-Si) é o “segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre” (Krebs 2006:403)? Quais são os efeitos de se atribuir, à agência do elemento químico silício e de suas associações moleculares, aspectos tão variados de nossa vida social quanto uma doença ocupacional (silicose), uma tecnociência dos materiais (sílica) e um empreendimento comercial multimilionário (microeletrônica)? Partindo das ideias originais de Durkheim, atualizadas pela sociologia das associações de Bruno Latour (1999), esta pesquisa buscou investigar aspectos desse elemento químico como agente social, *i.e.*, como maneira de agir, de pensar e de sentir que faz-fazer coisas que não necessariamente seriam feitas sem ela.

Esta pesquisa se situa no campo dos Estudos Sociais da Ciência e da Tecnologia, e buscou produzir conhecimento sobre essa agência não humana muito singular com a qual compomos nossos coletivos contemporâneos: o elemento químico silício. Os três casos apresentados abaixo buscam demonstrar especificidades das qualidades não-humanas e naturais do elemento químico como agente social, na forma de representação científica com efeitos morais e valorativos, *i.e.*: como agente nocivo a certos grupos profissionais (e que por isso precisa ser regulado), na forma da doença silicose; como substituto artificial, na forma de sílica, de certos efeitos elásticos desejados (e por isso aprimorados industrialmente) da borracha natural; e como agente amplificador de controle operacional (e portanto de vantagens econômicas) na forma dos microchips que definiram a microeletrônica a partir da segunda metade do século XX.

## Da areia ao silício

O silício costuma ser apresentado como o segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre, depois apenas do oxigênio (8-O) (cf. Krebs 2006:403). É importante notar, porém, que o silício nunca ocorre naturalmente em forma pura, mas sempre ligado a outros átomos, principalmente a átomos de oxigênio na forma de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Nessa sua manifestação mais abundante, também chamada de “sílica”, o silício existe como um cristal, i.e., como uma estrutura sólida fixa e repetitiva: tetraedros com 4 átomos de oxigênio nos vértices e 1 átomo de silício no centro (ver Imagem 01 [A]), formando macromoléculas sólidas e cristalinas (ver Imagem 01 [C]). Essas partículas cristalinas podem ser facilmente reconhecidas na forma de grãos de areia (ver Imagem 01 [D]), cristais de quartzo e muitos outros minerais (os silicatos).

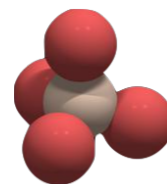
Separar os átomos de silício de seus oxigênios não foi, porém, fácil na história da química, como ilustram os casos de Sir Humphry Davy (que tentou em 1808, via sujeição da sílica à eletrólise, e também à reação com vapor de potássio) e de Joseph Louis Gay-Lussac e Louis Jacques Thénard (que chegaram a produzir silício amorfo em 1811, via reação entre tetracloreto de silício ( $\text{SiCl}_4$ ) e potássio (19-K), mas não chegaram a identificá-lo). Foi só em 1824 que Jöns Jacob Berzelius finalmente conseguir produzir uma amostra identificável de silício amorfo, a partir da redução de fluorsilicato de potássio ( $\text{K}_2[\text{SiF}_6]$ ) com potássio metálico derretido (cf.: Krebs 2006:196; Markez 2019; Weeks 1960:586-7). A produção de silício cristalino puro foi obtida 30 anos depois disso, por Henri Saint-Claire Deville em 1854 (Weeks 1960:587-8).

Desde então, técnicas laboratoriais e industriais passaram a ser desenvolvidas para a produção de silício cristalino – *e.g.*: o processo, criado por Jan Czochralski em 1916, e ainda usado hoje para a produção dos cristais ultrapuros de silício usados como substrato na fabricação de microchips (Norton 2021:183-4) –, e também de compostos e moléculas que contêm o elemento – *e.g.*: o processo direto, desenvolvido por Eugene Rochow em 1941, de produção de polidimetilsiloxanos (polímeros de silício e oxigênio, com grupos metil ligados aos silícios) chamados de silicona (Liles 2012). Porém, para obter o silício puro com o qual produzir microchips ou borrachas de silicona, primeiro é preciso conseguir separar os átomos de silício de seus oxigênios, o que é atualmente feito industrialmente pela redução de quartzo com carvão a altas temperaturas (acima de  $2200^\circ\text{C}$ ) (Krebs 2006:196). Vamos começar, portanto, com o caso mais geral dessa agência elementar na saúde de pessoas que trabalham em atividades de mineração e metalurgia, muitas vezes involuntariamente respirando poeira de sílica.

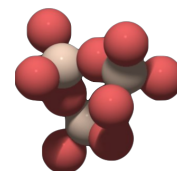
## Da pedra para pulmão

O quartzo da areia é formado por cristais de sílica, geralmente menores que 2 mm. Quando tais cristais são, porém projetados com força no jateamento de areia, eles acabam se fragmentando e dando origem a uma fina poeira, com partículas de cristais de sílica menores do que  $100\ \mu$  (microns), que permanecem suspensas no ar. Outras atividades que

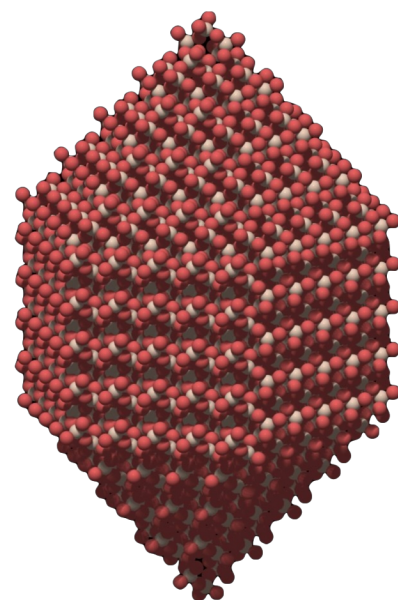
[A]



[B]



[C]



[D]



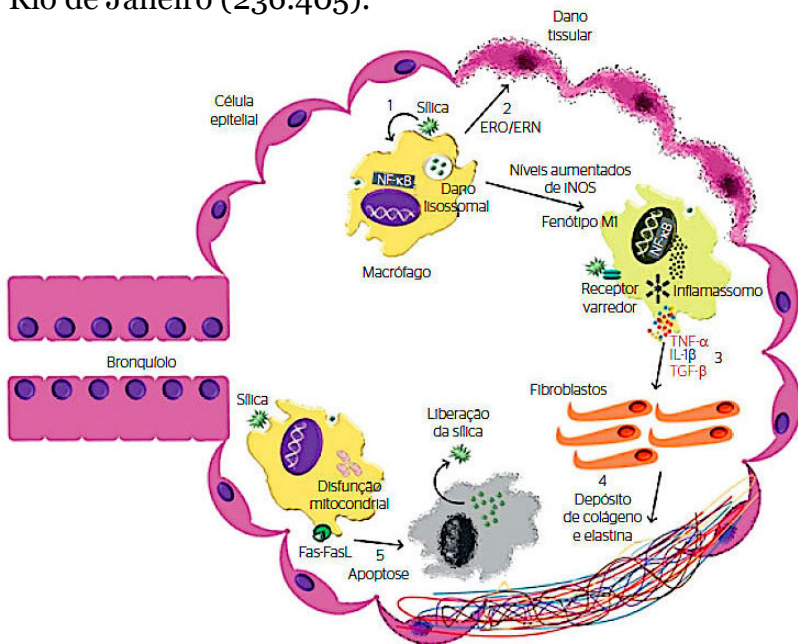
**Imagem 01 – Do tetraedro de sílica ao quartzo da areia:** Nesta imagem temos: [A] modelo de bolas de um tetraedro de sílica, com um átomo de silício (branco) ligado a 4 átomos de oxigênio (vermelhos); [B] modelo de três tetraedros de sílica formando a unidade básica do cristal de quartzo; [C] modelo de um cristal de aproximadamente 7 nm de altura; e [D] fotografia de cristais de quartzo em areia de praia. **Fontes:** [A], [B] e [C] são recortes de imagens de Akhavan (2017); e [D] é um recorte de <<https://www.needpix.com/photo/1648180/beach-sand-quartz-sand-grains-of-sand-fine-sand-pebble-sand-beach-maritime-macro>>.



produzem esse tipo de poeira de sílica são a construção civil (corte e polimento de pedras e cerâmicas, manuseio de cimento e areia) e a mineração (explosões e fragmentação de rochas em ambientes fechados) (Magalhães et al. 2020; Ribeiro 2010).

Quanto menores as partículas de sílica suspensas como poeira, mais elas penetram no sistema respiratório. Segundo Ribeiro (2010:20-1): partículas menores do que 100  $\mu$  são consideradas apenas “inaláveis”, pois não costumam passar das vias aéreas superiores (nariz e boca); partículas menores do que 25  $\mu$  são consideradas “torácicas”, pois penetram além da laringe (fração torácica); e partículas menores do que 10  $\mu$  são consideradas “respiráveis”, pois penetram além dos bronquíolos, na região de troca de gases (alvéolos). Por serem sólidas, cortantes e indecomponíveis pelos processos fisiológicos de defesa, uma vez nos alvéolos, essas partículas iniciam um processo de infecção crônica, que leva à morte celular (apoptose) e à fibrose pulmonar. A continuação desse processo vai aos poucos comprometendo a capacidade respiratória, levando à doença ou à incapacitação, ou mesmo ao desenvolvimento de outras complicações, como câncer (Garcia et al. 2018; Lopes-Pacheco et al. 2016; Magalhães et al. 2020; Ribeiro 2010).

A pneumoconiose silicose é, portanto, o resultado da inalação rotineira e contínua de partículas de sílica menores que 10  $\mu$  suspensas no ar; partículas essas que são colocadas em suspensão por processos produtivos e industriais ligados à mineração (quando pedras e rochas são detonadas ou trituradas), ao jateamento de areia (quando poeira de sílica é projetada com grande força e velocidade sobre diferentes materiais) e à construção civil (quando areia é constantemente manipulada e misturada a outros materiais, e diversas pedras e cerâmicas são repetidamente cortadas e lixadas). Trata-se, assim, de uma doença ocupacional, i.e., à qual estão mais expostos trabalhadores diretamente ligados a esses setores produtivos (Garcia et al. 2018; Ribeiro 2010). Para evitar a silicose, trabalhadores desses setores precisam usar equipamentos de proteção, não exceder os limites recomendados de exposição, e contar com uma legislação trabalhista específica. No Brasil, segundo Ribeiro (2010:76-7), os 3 Estados com o maior número de expostos à poeira de sílica (com números de trabalhadores expostos em 2007) são: São Paulo (820.298); Minas Gerais (537.693); e Rio de Janeiro (236.405).

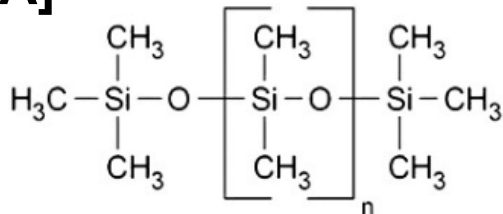


**Imagem 02 – Principais mecanismos de ação das partículas de sílica menores que 10  $\mu$  nos alvéolos pulmonares:** (1) citotoxicidade direta; (2) produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) e de nitrogênio (ERN); (3) secreção de mediadores inflamatórios e fibróticos; (4) fibrose por deposição de colágeno e elastina; e (5) morte celular por apoptose. O ciclo pode continuar mesmo após a interrupção da exposição, pois as partículas não são degradadas e permanecem gerando novas infecções. **Fontes:** Versão corrigida da tradução de Garcia et al. (2018:380) para a Figura 1 de Lopes-Pacheco et al. (2016:2).

### Do laboratório para as passarelas

No início do século XX, a demanda industrial por borracha excedia claramente a oferta, motivando a busca por substitutos sintéticos para ela (Challoner 2014:660). Um desses esforços começou nos anos 1930 quando Eugene Sullivan, então diretor de pesquisa na Corning Glass Works, imaginou que “de alguma forma combinar a química do vidro ou cerâmica e dos plásticos orgânicos levaria a substâncias que teriam propriedades muito desejáveis, nomeadamente maior estabilidade térmica do que os plásticos, e mais flexibilidade do que o vidro” (Liles 2012:59). Sullivan e seus colaboradores usaram o mesmo método empregado por Frederic S. Kipping para sintetizar polisiloxanos alguns anos antes, e assim adotaram o mesmo nome dado por Kipping para o novo material: “silicona”. O início dos anos 1940 marca definitivamente o início do mercado da silicona, com: o desenvolvimento do método de Eugene Rochow (General Electric) de produzir silicona; e a parceria da empresa de Sullivan com uma grande empresa química, formando a Dow Corning Corporation.

[A]

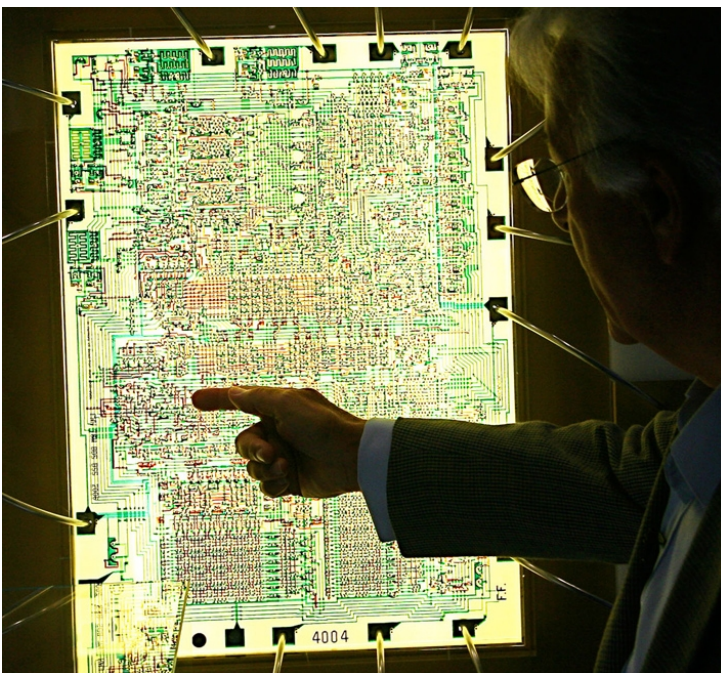


Siliconas são “uma classe de compostos que possuem pelo menos uma ligação silício-carbono, e uma unidade de siloxano” (Liles 2012:61). São polidimetilsiloxanos (polímeros de silício e oxigênio, com grupos metil ligados aos silícios; ver Imagem 03 [A]) A borracha de silicona é flexível e durável, resistente a altas tensões, temperaturas e a diversos tipos de desgaste atmosférico. Além disso, pode ser moldável em formatos, cores e especificações mecânicas praticamente ilimitadas. Desde que foram criadas, passaram a ser usadas de diversas formas e em diversos produtos com as mais variadas utilidades. Dentre tais aplicações, destaca-se o uso da silicona na produção de roupas, e também no mundo da moda e da alta costura (cf. Smelik 2018). No mercado de vestuário, a silicona é bastante usada por sua propriedade elástica e adesiva, em roupas que se moldam ao corpo (em especial nas roupas esportivas), mas também por sua propriedade selante e protetora de peles, couros e tecidos (Liles 2012). Apresentamos aqui um dos croquis produzidos durante a pesquisa, como exploração criativa (Brito 2008) do espaço de possibilidades aberto pelo uso de silicona na moda (ver Imagem 03 [B]).

[B]



**Imagem 03 – Silicona e moda:** [A] Esquema estrutural do polidimetilsiloxano, ou silicona; [B] croqui de roupa com shorts preto de tecido elástico de silicona e blusa amarela com tecido tratado com silicona. **Fontes:** [A] Markez (2019); [B] autoria de Bruna C.G. Queiroz.



**Imagem 04 – O primeiro microprocessador:** No Intel Museum (Santa Clara, Califórnia, EUA), durante as comemorações do aniversário de 50 anos do Intel 4004 em 2011, Frederico Faggin aponta para uma réplica ampliada (130 vezes maior) do chip que ele ajudou a projetar e a lançar em 1971. **Fonte:** Cass (2018).

### Do cristal para o microchip

Durante a Segunda Guerra Mundial, foram realizados esforços de pesquisa e desenvolvimento de materiais supercondutores para o desenvolvimento de aparelhos de rádio e de radar. O principal objetivo era a substituição das válvulas e dos relés mecânicos por componentes de estado sólido, mas resistentes, previsíveis e duráveis (Mehl s.d.; Tanenbaum e Austin 2013). Um importante passo nesse sentido foi dado em 1939, quando Russel S. Ohl descobriu a “junção P-N” num cristal de silício (Mehl s.d.). Mas foi a invenção do transistor em 1947 por John Bardeen, Walter H. Brattain e William B. Shockley na Bell Labs que definitivamente deu início à microeletrônica. Desde então, cristais ultrapuros de silício se tornaram a base da microeletrônica, por apresentarem propriedades mecânicas, térmicas e elétricas ideais, além de ter como matéria prima um dos materiais mais abundantes da crosta terrestre (Mehl s.d.; Tanenbaum e Austin 2013).



Com a intenção de explorar economicamente a invenção, em 1955 Shockley saiu da Bell e fundou a empresa Shockley Semiconductors em San José (Califórnia), para a qual contratou pesquisadores altamente qualificados. Com uma mentalidade empreendedora ainda mais aguçada que a de Shockley, um grupo de 8 de seus funcionários logo abandonou a empresa para fundar, na mesma cidade e em 1957, a Fairchild Semiconductors, que rapidamente se tornou maior que a empresa de Shockley. Alguns anos depois, em 1968, dois deles – Robert Noyce e Gordon Moore – abandonaram a nova empresa e fundaram, ainda na mesma cidade, a Intel, certamente a empresa economicamente mais bem sucedida de todas elas (Mehl s.d.). Foi também em 1971 que a região de San José passou a ser chamada de “Vale do Silício” (Laws 2015).

Da Bell até a Intel, o que se observou foi não apenas o crescimento econômico das empresas de tecnologia eletrônica, mas também a miniaturização constante dos componentes eletrônicos por elas produzidos. Hoje, interagimos com computadores todo dia, e a Internet das Coisas abre perspectivas para que microchips de silício possam ser encontrados em cada vez mais objetos e lugares. Sejam médicos diagnosticando e tratando silicose, sejam estilistas elaborando croquis e looks com produtos de silicose, todos eles atualmente trabalham com computadores e *smartphones*, objetos que têm como centro de funcionamento microchips de silício.

## Conclusão

Aspectos da agência social do silício puderam ser investigados durante esta pesquisa, e alguns deles foram apresentados neste resumo. Vimos que, como elemento químico, o silício surge no início do século XIX, mas sua relevância social já era imensa desde a antiguidade (na forma de pedras, vidros, cerâmicas e cimento), e só cresceu desde então. Aos processos de associação que ele media, o silício empresta sua estabilidade e simetria como cristal (na forma de sílica e na forma pura), e sua flexibilidade e resistência como borracha (na forma de silicose). Sua estabilidade e simetria, favorável na miniaturização eletrônica, se torna nociva na forma de partículas suspensas menores que 10  $\mu$ . Sua flexibilidade e resistência, favorável na modelagem de roupas ao corpo, se torna nociva quando impede a ventilação na pele (Jung et al. 2018) ou polui o meio ambiente. Favorável ou nociva, o fato é que agência é atribuída coletivamente ao elemento químico silício e a seus compostos, revelando sua vida social.

**Agradecimento:** Esta pesquisa foi financiada pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – Ensino Médio (PIBIC-EM), da Pró Reitoria de Pesquisa (PRP) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a quem agradecemos.

## Bibliografia

- AKHAVAN, Amir C. 2017. Quartz structure. *The Quartz Page*.  
Acessível em:  
<[http://www.quartzpage.de/gen\\_struct.html](http://www.quartzpage.de/gen_struct.html)>.
- BRITO, Daniela de Oliveira. 2008. “Projeto croqui”: o espelho do traço. Juiz de Fora: UFJF – Programa de Pós-Graduação em Moda, Cultura de Moda e Arte.
- CASS, Stephen. 2018. Chip Hall of Fame: Intel 4004 Microprocessor. *IEEE Spectrum*. Acessível em:  
<<https://spectrum.ieee.org/chip-hall-of-fame-intel-4004-microprocessor>>.
- CHALLONER, Jack. 2014. *1001 Invenções que mudaram o mundo*. (Trad.: Carolina Alfaro; Pedro Jorgensen; Paulo Polzonoff Junior) Rio de Janeiro: Sextante. [2009]
- DURKHEIM, Émile. 1996. *As formas elementares da vida religiosa*. (Trad. Paulo Neves) São Paulo: Martins Fontes. [1912]
- GARCIA, Diemen D.; SULTAN, Nayab M.; YERBA, Oscar R. 2018. Sílica e tabagismo: associação na produção de dano pulmonar. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho* 16(3):378-86.
- JUNG, Sora; SCHLEUSENER, Johannes; KNORR, Fanny; KRAFT, Marc; THIEDE, Gisela; RICHTER, Heike; DARVIN, Maxim E.; SCHANZER, Sabine; GALLINGER, Simon; WEGENER, Ulrich; LADERMANN, Jürgen. 2018. Influence of polyester spacer fabric, cotton, chloroprene rubber, and silicone on microclimatic and morphologic physiologic skin parameters in vivo. *Skin Research & Technology* 25(3):389-98.
- KREBS, Robert E. 2006. *The history and use of our Earth's chemical elements: a reference guide*. Westport: Greenwood Press.
- LATOURE, Bruno. 1999. 999. Fractures/fractures: from the concept of network to the concept of attachment. (trad. Monique G. Stark) *Res* 36:20-31.
- LAWS, David. 2015. Who named Silicon Valley? *Computer History Museum*. Acessível em:  
<<https://computerhistory.org/blog/who-named-silicon-valley/?key=who-named-silicon-valley>>.
- LILES, Donald T. 2012. The fascinating world of silicones. *CoatingsTech*, April:58-66.
- LOPES-PACHECO, Miquéias; BANDEIRA, Elga; MORALES, Marcelo M. 2016. Cell-based therapy for silicosis. *Stem Cells International*, ID: 5091838.
- MAGALHÃES, Fernanda M.; NOGUEIRA, Victor M.G.; VIEIRA, Natália A.S.; CISNE, Francisca I.M.; OLIVEIRA, Maria Auxiliadora S. 2020. Silicose: uma revisão sistemática. *Revista Ciência e Estudos Acadêmicos de Medicina* 12:22-47.
- MARKEZ, Karem S.G. 2019. Silício: um elemento de grande importância desde a idade da pedra até a era da informática. *Química Viva*, Comissão Técnica de Divulgação do Conselho Regional de Química – IV Região (SP). Acessível em:  
<[https://www.crq4.org.br/artigo\\_silicio](https://www.crq4.org.br/artigo_silicio)>.
- MEHL, Edwaldo L. M. s.d. Do transistor ao microprocessador. Acessível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/>>.
- NORTON, M. Grant. 2021. *Ten materials that shaped our world*. Cham: Springer.
- RIBEIRO, Fátima S.N. 2010. *O mapa da exposição à Silica no Brasil*. Rio de Janeiro: UERJ; Ministério da Saúde.
- SMELIK, Anneke. 2018. New materialism: a theoretical framework for fashion in the age of technological innovation. *International Journal of Fashion Studies* 5(1):33-54.
- TANENBAUM, Andrew S. AUSTIN, Todd. 2013. *Organização estruturada de computadores*. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- WEEKS, Mary E. 1960. Silicon. In: *Discovery of the elements*. Pennsylvania: Mack Printing Company, pp.586-8.