

Nº 179151

Materiais de construção sustentáveis: uma opção que deve mobilizar a cadeia da construção civil

Valdecir Angelo Quarcioni

*Palestra apresentada no SIMPÓSIO DE
INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA
CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 2024, São Paulo. 27
slides*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **REPRODUÇÃO PROIBIDA**

Materiais de construção sustentáveis:

Uma opção que deve mobilizar a cadeia da construção civil

Químico Valdecir Angelo QUARCIONI – Prof. Dr. Pesquisador do IPT



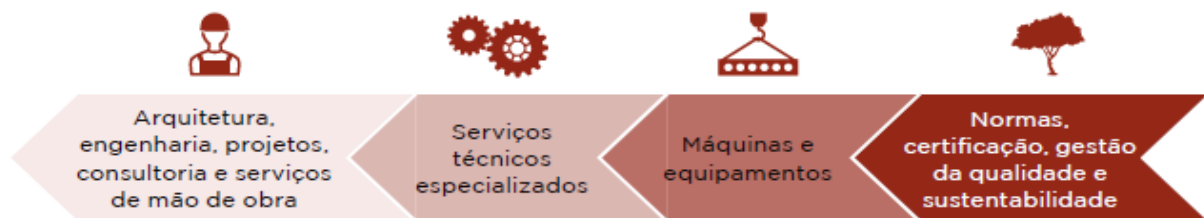
Dados da Cadeia de CC - Panorama Recente



Etapas produtivas



Áreas transversais



Fonte: Elaboração Deconic.

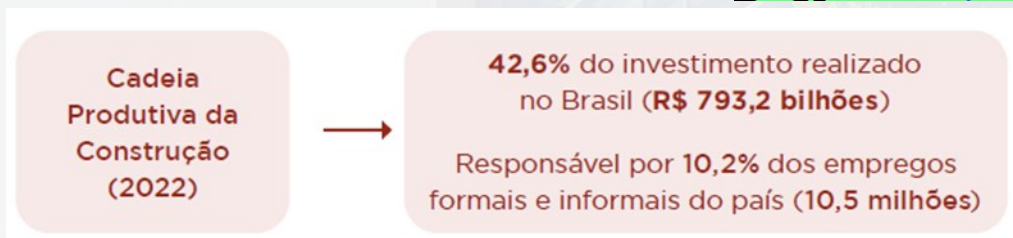
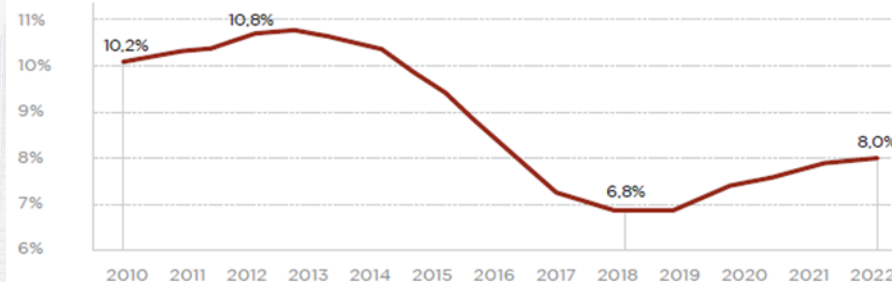
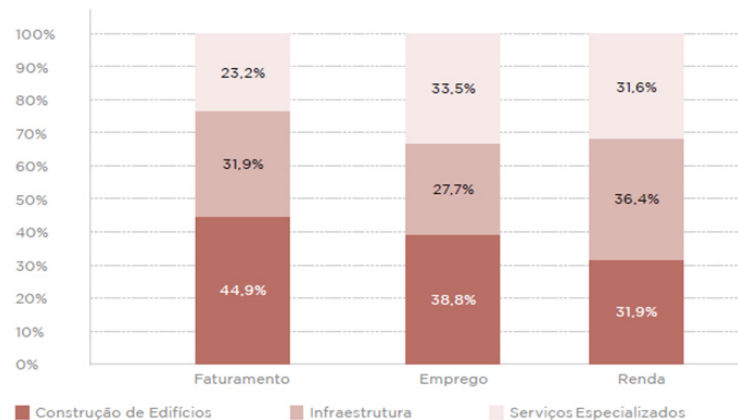


Gráfico 3 - Participação do Investimento da Construção Civil no PIB Nacional



Fonte: Contas Nacionais (IBGE). Elaboração Deconic.

Gráfico 16 - Percentual de Participação dos Segmentos da Indústria da Construção (2021)



Dados da Cadeia de CC

Déficit Habitacional de Infraestrutura

Déficit habitacional (2019)



5,87 milhões de residências
no Brasil (8,0% do total)

Em 2019, nacionalmente, 11 milhões (17,2%) dos domicílios não contavam com abastecimento de água adequado...

Contando com 5 milhões (7,9%) das casas sem acesso apropriado à rede de esgoto em 2019...

Dados da Cadeia de CC

Combater a Baixa Produtividade do Setor



“Quais são os métodos mais eficazes para não só sanar esse cenário problemático, mas também **impulsionar a competitividade** e lucratividade do setor?

A resposta pode estar no uso de métodos PPMOF:

- Pré-fabricação
- Pré-montagem
- Modularização e
- Fabricação Offsite.”

Fonte: <https://www2.deloitte.com/br/pt/pages/finance/articles/produtividade-construcao-civil-projetos-lean.html>

A otimização da produção tem potencial para minimizar as perdas de materiais, portanto, redução de RCC e redução do impacto ambiental.

Contextualização

Como está o mundo ao nosso redor?

Os impactos das mudanças climáticas estão piorando velozmente as nossas condições de sobrevivência. São constatados elevação das mares e aquecimento das temperaturas do meio ambiente, como furacões e tornados mais violentos. **São exemplos de impactos recentes:**

(i) 50 milhões de hectares da Austrália em chamas temporada de 2019-20.

(ii) Cientistas dizem que o Ártico está em uma "espiral da morte" onde podemos perder todo o gelo do Mar Ártico até 2035,

(iii) Mais de 22% das zonas úmidas do Pantanal foram destruídas em recentes queimadas envolvendo regiões do Brasil, Bolívia e Paraguai.



a



b



c

Fonte (a): <https://www.benandjerry.com.br/novidades/2020/11/extreme-weather-events> (acesso em 19.05.24).

Fonte (b): https://www.terra.com.br/planeta/meio-ambiente/nao-sei-onde-vamos-parar-diz-cientista-sobre-frequencia-de-eventos-climaticos-extremos_d9c29dd94037d7fc16e790f9aee4c1fc9kqvq1g4.html (acesso em 19.05.24).

Fonte (c): https://conteudo.imguol.com.br/c/noticias/78/2024/05/14/o-aeroporto-salgado-filho-em-porto-alegre-fechado-por-tempo-indeterminado-1715719113844_v2_450x450.jpg.webp (acesso em 19.05.24).

Opção pela Construção Civil Sustentável (CCS)

Os edifícios no contexto da crise climática mundial (a)



- A nível mundial há um **exame intensivo** da **necessidade e das possibilidades de se reduzir** as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (**GEE**).
- A construção e as operações de edifícios: **36% da utilização final global de energia** e **39% das emissões de dióxido de carbono (CO₂)** relacionada ao consumo de energia.
- **As operações de construção em todo o mundo** são responsáveis por **28% das emissões de GEE** relacionadas com a energia (**inclui os materiais empregados**).
- Essas **emissões da operação do edifício** decorrem da **energia** utilizada para **aquecimento e/ou resfriamento, fornecimento de água quente, ventilação e ar condicionado, iluminação e emissões de GEE**, relevantes para o clima, relacionadas ao processo, ou seja, a liberação de agentes refrigerantes e de expansão (gases HFC e PFC).
- Mas os **edifícios têm um potencial significativo para reduzir as emissões de GEE através da melhoria da eficiência energética operacional**.
- O foco da **eficiência na operação** está em **atualização para uma perspectiva de ciclo de vida completo (ACV)**, o que está sendo implementado mundialmente.

(a) Fonte: Rock Martin et. al. Embodied GHG emissions of building – The hidden challenge for effective climate change mitigation. Applied Energy 258 (2020).

Meta 2050: Zero Emissão de Carbono

A construção civil e a estimativa na redução de GEE



AÇÕES PARA UM FUTURO CARBONO ZERO

Economia na produção de clínquer

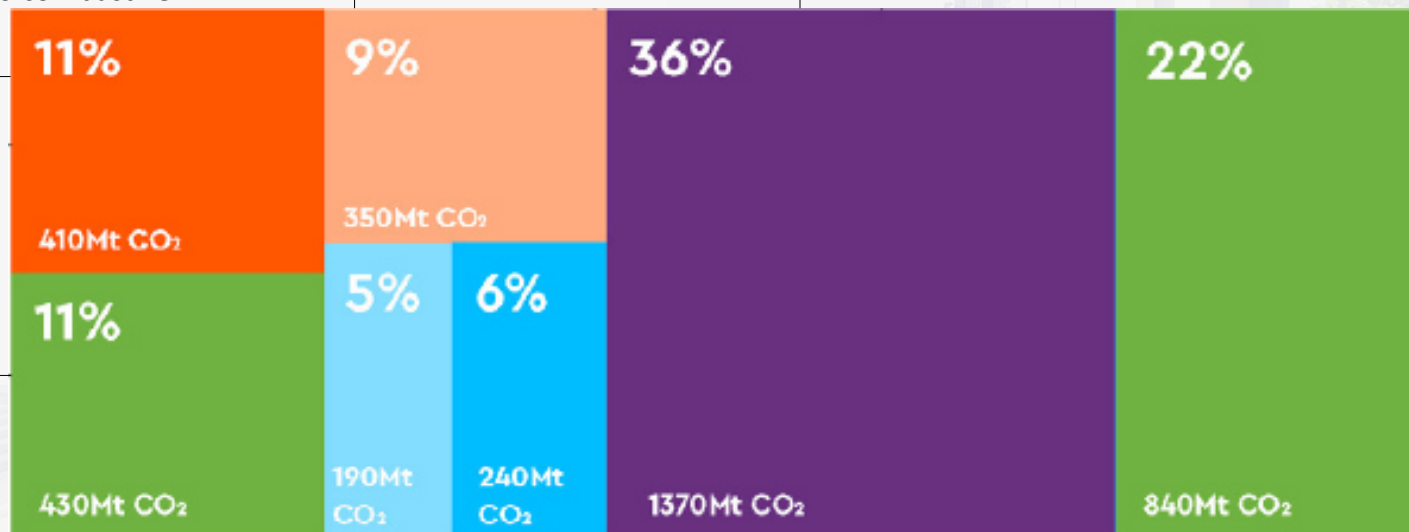
- eficiência térmica
- Economia de combustíveis residuais ("combustíveis alternativos)
- uso de matérias-primas descarbonatadas
- uso de hidrogênio como combustível

Economia em cimentos e ligantes

- substituição do clínquer do cimento Portland – através da proporção do ligante
- alternativas de cimentos

Captura e utilização/armazenamento de carbono

- captura de carbono em fábricas de cimento



GCCA – Global Cement and Concrete Association

Eficiência na produção de concreto

- design de mistura otimizada
- otimização dos constituintes
- continuar a industrializar a produção
- controle de qualidade

Descarbonização da eletricidade

- descarbonização da eletricidade utilizada tanto nas fábricas de cimento como na produção de concreto

Recarbonatação por sequestro de CO₂

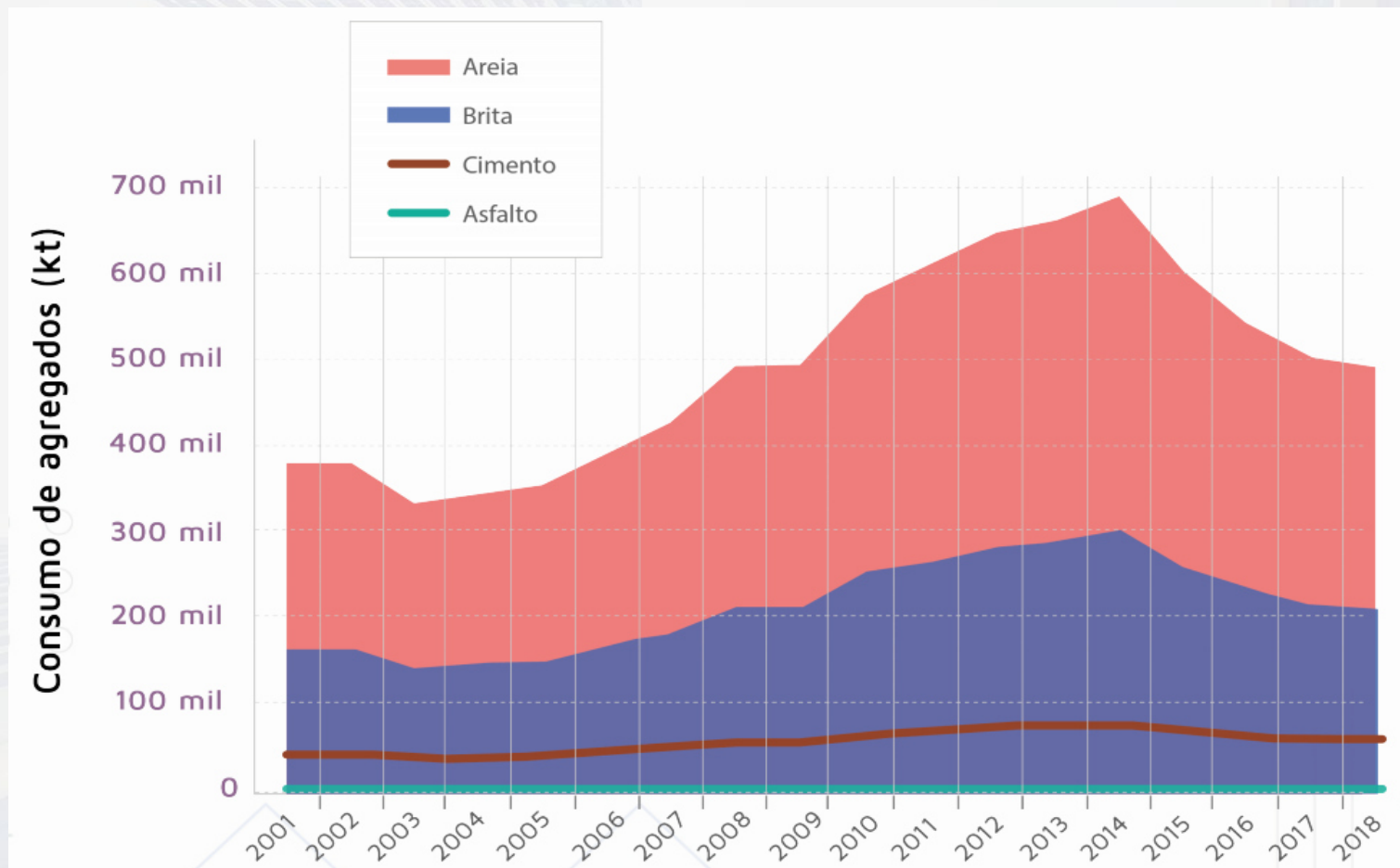
- absorção natural de CO₂ no concreto – sequestro de carbono

Eficiência no projeto e na construção

- briefing (detalhamento completo) do cliente para designers visando a otimização
- otimização de projeto
- eficiência no canteiro de obras
- reutilização e extensão da vida útil

Contextualização

Consumo de agregados na CC no Brasil



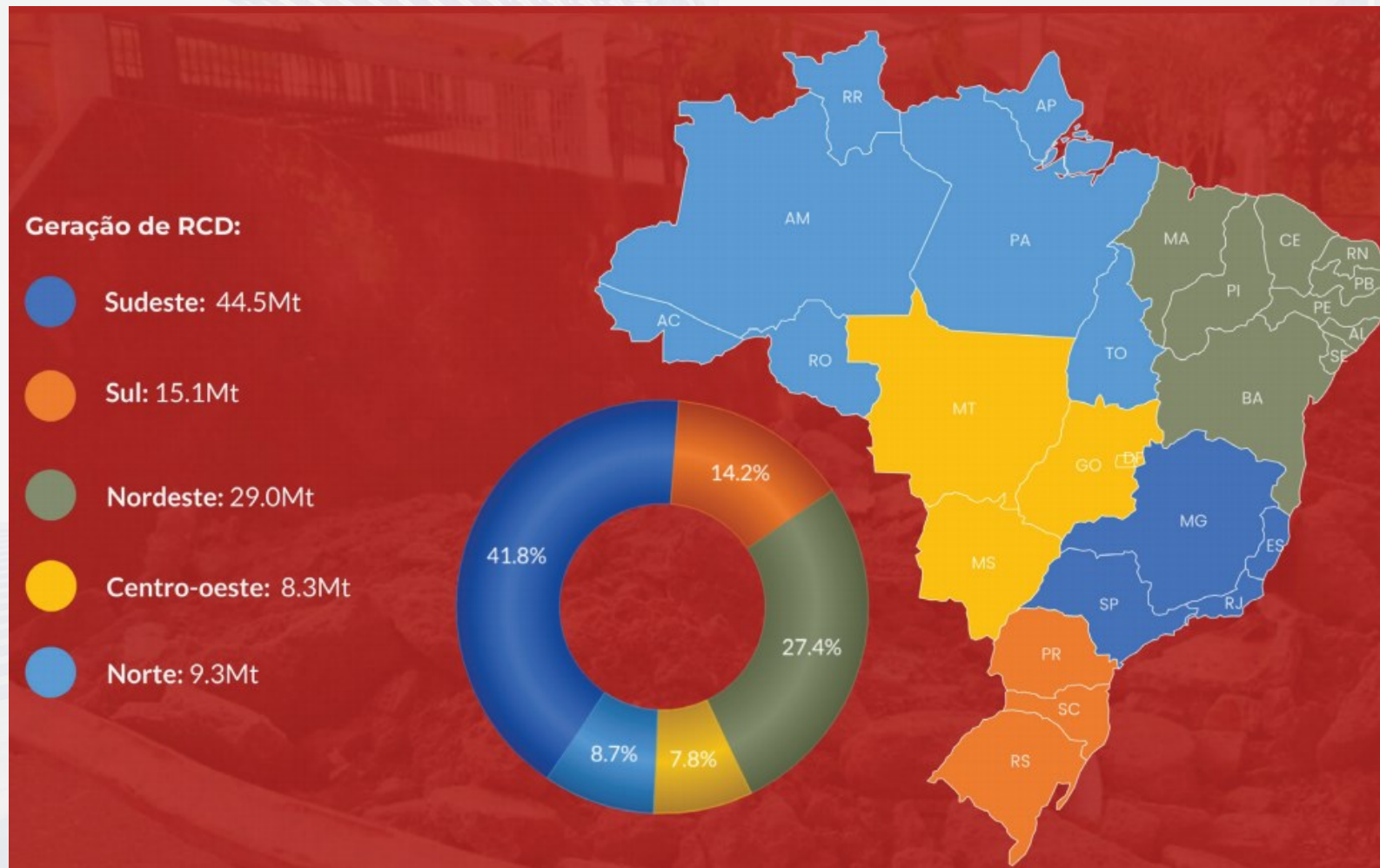
Fonte: Pesquisa Setorial ABRECON (*) (2020) - <https://abrecon.org.br/documentos-e-informa/pesquisa-setorial-abrecon-2020>

(*) Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição.

Contextualização

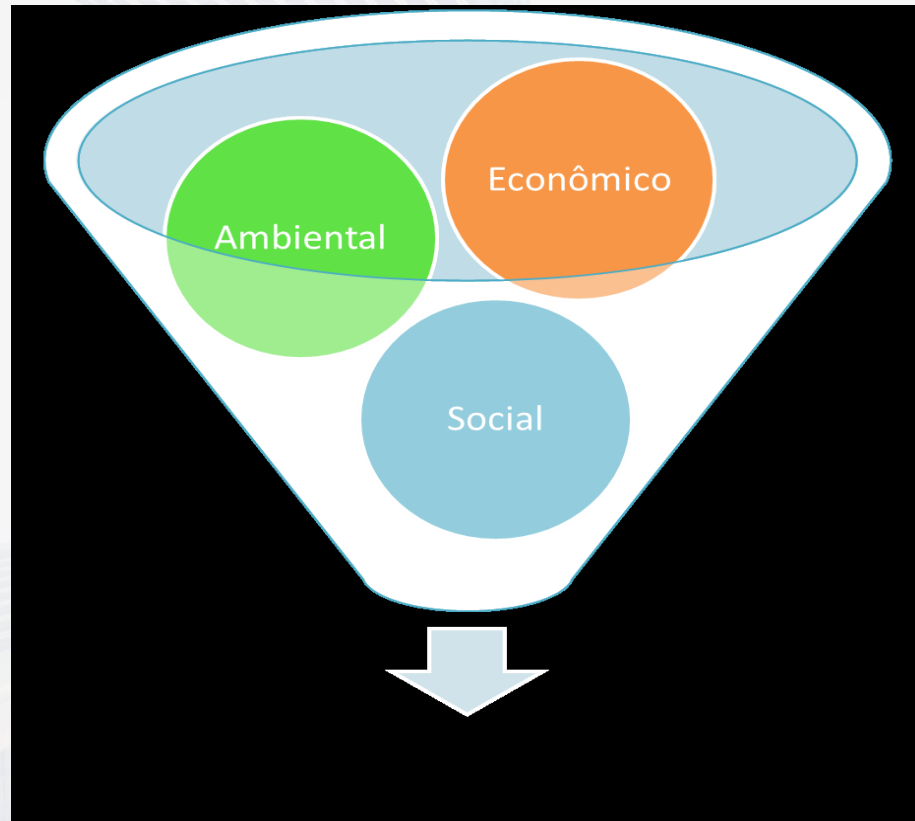
RCD x Meio Ambiente

Geração de
RCD das
regiões do
País
(2022)



Fonte: Pesquisa Setorial ABRECON (2022) – no prelo

O nosso desafio premente: atingir uma efetiva sustentabilidade na CC ou CCS



Uso racional de recursos naturais para satisfazer as necessidades atuais, sem que esse recurso comprometa as futuras gerações.

Tipos e composição do CP nacional

Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno ^b	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico ^c	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	25, 32 ou 40	CPB	75 – 100	—	—	0 – 25
	Não estrutural			—	—	—	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

^b O teor máximo da somatória de adições (escória granulada de alto -forno e material carbonático) deve ser de 75%.

^c O teor máximo da somatória de adições (material pozolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

O CP é o ligante predominante para concretos e argamassas. O CP tem elevado impacto ambiental pela emissão de GEE na

(a) descarbonatação do calcário e

(b) no aquecimento do forno com combustível fóssil

Opção por materiais sustentáveis

O desafio do cimento Portland e o seu impacto ambiental



- Atualmente, a produção de uma tonelada de cimento Portland comum (CPC) libera quantidades consideráveis de CO₂ na atmosfera.
- Os dois principais contribuintes de CO₂ neste processo são a combustão de combustíveis fósseis para aquecimento do forno rotativo e a reação química associada ao processo de calcinação, na produção do clínquer, principal componente do CPC.
- A história do cimento teve um grande impacto no progresso da nossa civilização durante o último século. Assim, o concreto é o material artificial mais utilizado no mundo, pois não é apenas extremamente resiliente e durável, mas também pode suportar pesadas cargas de compressão e resistir a condições ambientais severas.
- Devido à alta demanda por concreto, estimou-se que 4,3 Gigatoneladas (bilhões de toneladas) de cimento seriam produzidas globalmente durante o ano de 2020.

Fonte: Antunes, M. et. al. **Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review.** Materials **2022**, 15, 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>

Opção por materiais sustentáveis

O desafio do cimento Portland e o seu impacto ambiental



- A produção de uma tonelada de clínquer libera cerca de 0,83 toneladas de CO_2 e a produção de uma tonelada de CPC libera cerca de 0,54 toneladas de CO_2 , tornando a indústria de cimento responsável por 5% a 8% do total de gases antropogênicos com efeito de estufa (GEE).
- A descarbonatação do calcário em CaO e CO_2 a temperaturas superiores a 550°C , corresponde a cerca de 60 a 65% do total das emissões de CO_2 e a queima de combustíveis fósseis para aquecimento do forno de cimento, é responsável pelos restantes 35 a 40% das emissões.
- No âmbito da agenda 2030 das Nações Unidas (ONU) e também impulsionado pelas taxas de emissão de CO_2 cada vez mais elevadas, tornou-se uma meta e um desafio para a indústria cimenteira desenvolver novos ligantes com menor pegada ecológica, que pode ser produzido em larga escala, de modo que possa ser utilizado como commodity, sem comprometer as qualidades técnicas, econômicas e de trabalhabilidade características do CPC.

Fonte: Antunes, M. et. al. **Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review**. Materials **2022**, 15, 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>

Opção por materiais sustentáveis

O desafio do cimento Portland e o seu impacto ambiental

Até presente os métodos que foram estudados para mitigar as emissões de CO₂ no cimento na sua produção seguem cinco abordagens principais:

1. **Redução da relação cimento/clínquer**, através da substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS's).
2. **A utilização de combustíveis alternativos** na produção de clínquer aliada ao aumento da eficiência energética do processo de forno.
3. **Desenvolvimento de tecnologias alternativas de clínquer (ACTs)**, que conduzam a menores emissões de CO₂.
4. **Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS)**, ou seja, o sequestro e utilização do CO₂ emitido para aplicações específicas.
5. **Eletrificação do processo de produção de clínquer**, especialmente se for utilizada eletricidade renovável produzida a partir de fontes de energia não fósseis.

Fonte: Antunes, M. et. al. **Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review.**

Materials **2022**, 15, 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>

Opção por materiais sustentáveis

Cimentos com menor pegada de carbono

Adições Minerais (MCS's) mais utilizadas no CP nacional



- **CINZA VOLANTE:** material sílico-aluminoso finamente particulado, proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. No CP IV aplica-se de 15% a 50%, em massa, e no CP II Z de 6% a 14%, em massa. Superfície específica (SE) típica entre 13.000 m²/kg e 30.000 m²/kg (superior a do cimento - 350 m²/kg e 600 m²/kg).
- **METACAULIM:** material aluminossilicoso finamente particulado obtido da calcinação de argilas cauliníticas, na sua maioria. No CP IV aplica-se de 15% a 50%, em massa, e no CP II Z de 6% a 14%, em massa. SE típica maior que 30.000 m²/kg.
- **ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO:** resíduo não metálico proveniente da produção do ferro-gusa, composto à base de cálcio, silício, alumínio de magnésio. No CP III aplica-se 35% a 70%, em massa, e no CP II E de 6% a 34%, em massa. SE entre 400 m²/kg e 500 m²/kg (semelhante ao cimento).
- **MATERIAL CARBONÁTICO (OU FÍLER):** material finamente dividido “sem” atividade química: sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. A ABNT NBR 16.697/2018 apresenta aumentos desta adição para todos os tipos de CP, sendo o CP II F de 11% a 25%, em massa.

As adições minerais contribuem para a redução do fator clínquer do CP com decorrente redução do impacto ambiental com a menor pegada de carbono.

Opção por materiais mais sustentáveis: Cimentos alternativos



- A literatura aponta diversas **alternativas para os “ligantes”**, em geral. Assim temos os **“cimentos químicos”** com produção muito limitadas em comparação com o CP, com **aplicações específicas** e/ou com limitação de matérias-primas disponíveis. São exemplos:
- **Cimento Sorel** (descoberto em 1867) também conhecido como magnésia ou **cimento de oxiclureto de magnésio (MOC)**, é um cimento não-hidráulico formado a partir da combinação do óxido de magnésio (MgO) em pó com uma solução concentrada de cloreto de magnésio ($MgCl_2$). Uma forte razão para o cimento SOREL não ter se popularizado na indústria da construção civil é que as fases desse cimento não são estáveis em contatos prolongados com a água, resultando na lixiviação do cloreto de magnésio, embora há medidas mitigadoras do fenômeno. **Este cimento tem apelo ambiental e tem-se aumentado cada vez mais o interesse de pesquisas sobre o MOC, pois a produção de MgO envolve temperaturas inferiores às utilizadas na clínquerização do cimento Portland, portanto, uma alternativa atraente para a redução da emissão de CO_2 (SCHOLLBACK & PÖLLMANN, 2011). Aplicações: pisos industriais, camada de proteção contra incêndios, painéis leves de vedação e partição vertical e painéis decorativos.**
- **Cimento de oxissulfato de magnésio (MOS)** formado pela combinação do óxido de magnésio (MgO) com uma solução de sulfato de magnésio ($MgSO_4$).

Opção por materiais mais sustentáveis: Cimentos alternativos



- **Cimento de fosfato de magnésio (MAP)**, formado pela reação entre o óxido de magnésio (MgO) e um fosfato solúvel, tal como o fosfato de amônio monobásico ($NH_4H_2PO_4$) (SHAND, 2007).
- Outros exemplos de classes de “cimentos químicos”: **Cimento de Oxidoreto de alumínio; Cimento sílico-fosfato; Cimento de fosfato de magnésio; Cimento de fosfato de amônio e magnésio e Cimento à base de boratos.**
- Cimentos tipo Portland: **Cimentos belíticos (à base de silicato bicálcico – C_2S e mistura de CP)** e outros cimentos especiais.
- A literatura discute, em geral, vantagens e desvantagens desses produtos para aplicações especiais. Considera-se que **os cimentos especiais terão mercados ampliados em função do desenvolvimento de desempenho como agentes cimentícios para usos particulares.** O contexto mundial atual requer também rigor na abordagem ambiental desses cimentos “alternativos” ao cimento Portland.

Opção por materiais sustentáveis

Cimentos alternativos - Cimentos para concretos geopoliméricos

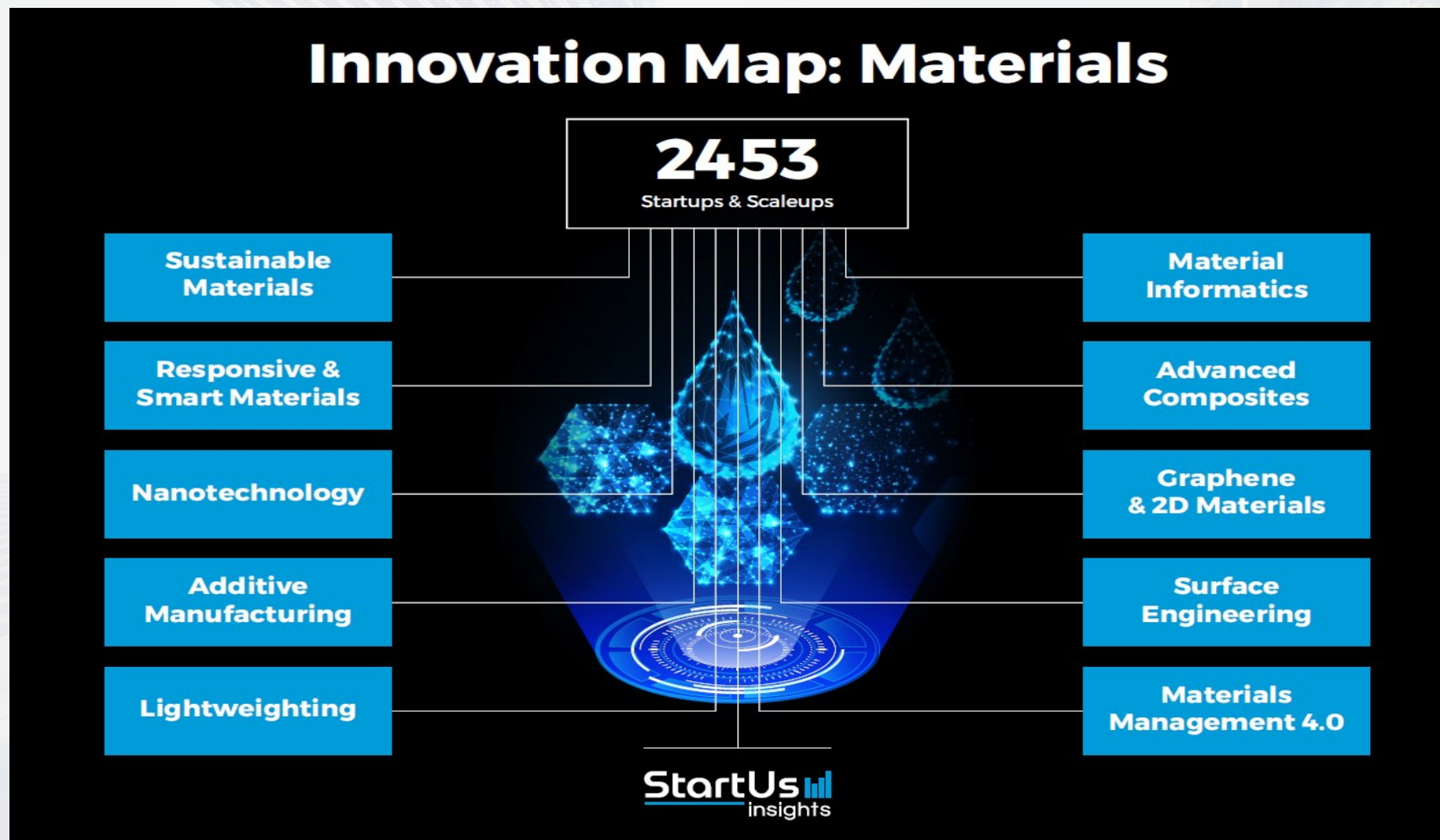


- Ligante desenvolvido a partir da álcali ativação química de **materiais** que são **fontes principais de silício e de alumínio**.
- Como **fonte de álcali**, podem ser empregados hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio (NaSiO₄) e hidróxido de potássio (KOH), que são **ativadores químicos**.
- Com geopolímeros tem-se a **valorização dos resíduos** industriais, agroindustriais e de minérios, na **produção de concretos geopoliméricos com baixa pegada de CO₂**.
- **Os materiais potenciais candidatos:** metacaulim, resíduo de mineração (como lama vermelha, resíduo da obtenção de Al), escórias, cinza de casca a arroz e sílica ativa.



A produção e aplicação de concretos geopoliméricos requerem habilidades e conhecimentos específicos.

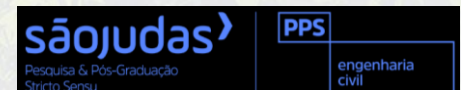
Inovação inteligente relacionada a materiais de engenharia: destaques do cenário mundial



Opção por materiais sustentáveis

Materiais que podem potencializar a redução da pegada de carbono na CC

- Ligantes geopoliméricos (estamos implementando esta linha de atuação - investimento próprio do IPT)
- Uso de grafeno (em estudando a aplicação em concreto - projeto EMBRAPII)
- Materiais para impressão 3D (implementamos a infraestrutura no laboratório com projeto FAPESP)
- Materiais impermeabilizantes (estamos implementando esta linha de atuação - investimento próprio do IPT)
- Materiais de mudança de fase
- Materiais autocicatizantes
- Materiais de superfícies ativas
- Tintas especiais



O futuro e a nossa atuação responsável

CASE 1 – Uso de finos de RCD como ligante para aplicações de baixa demanda mecânica



Objetivo do Projeto de P&D:
Produção de cimento a partir da britagem e tratamento térmico dos finos de RCD



RCO



RCV



RCI



RM

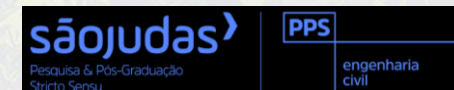


SU



INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

RCO: Resíduo de Construção e Demolição; RCV: Resíduo de Cerâmica Vermelha; RCI: Resíduo Cimentício; RM: Resíduo Misto; SU: Solo Urbano



O futuro e a nossa atuação responsável

CASE 1 – Uso de finos de RCD como ligante para aplicações de baixa demanda mecânica



Aplicação de Cimento de RCD na camada de base do trecho piloto com 200m de pavimentação na Rua Miguel Biondi em Guarulhos/SP em 2018.

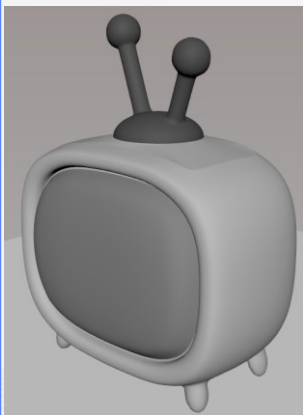


O futuro e a nossa atuação responsável

CASE 2 – Suporte para uma comunidade mais sustentável



Produção de peças decorativas em matrizes cimentícias com uso de RCD



PROJETO MATERIALIZA



Treinamento com foco em tecnologia de aproveitamento de resíduos de construção e demolição (**agregados miúdos de RCD**);

Foco do projeto: contribuir para gerar fonte de renda para jovens em situação de vulnerabilidade social e econômica;

Parceria com o **Atelier O'Reilly** e **Atelier Mavignier** e **Instituto Favela da Paz – Jd. Nakamura / Jd. Angela**.

O futuro e a nossa atuação responsável

CASE 2 – Suporte para uma comunidade mais sustentável

Implantação de infraestrutura na comunidade



**PROJETO
MATERIALIZA**

Ações mitigadoras em vista da redução do impacto ambiental na CC



- Otimização do processo construtivo para minimizar as perdas de materiais, portanto, redução de RCC no canteiro de obra.
- Atuação em entidades específicas técnico-científicas de fabricante e/ou produtores, Programas Setoriais da Qualidade vinculado ao Ministério da Cidades (PSQ) - PBQP-H e no âmbito da ABNT – órgão de normalização técnica, como forma de contribuir para aumentar o conformidade de produtos. São ferramentas constituídas que podem definir ações/medidas em prol da qualidade dos produtos e processos construtivos com decorrente redução do impacto ambiental do setor. Ações que envolvem a sociedade civil.
- Desenvolver projetos de P&D&I envolvendo os materiais de construção civil no âmbito de entidades técnico-científicas - preferencialmente com atuação em redes, como as instituições de pesquisa, universidades e centros de pesquisas de empresas e associações de classe.

Pensando nos futuros engenheiros e mestres da USJT: creio que todos nós podemos “cuidar” do nosso planeta partindo de ações como estas, e não deixando de ser protagonistas para promover a vida sustentável do nosso planeta em prol das novas gerações, mas começando por cada um de nós!

Algumas Referências com dados atuais relevantes e/ou didáticos



- Marcos da sustentabilidade mundial (dados da ONU):

<https://www.unep.org/pt-br/news-and-stories/story/environmental-moments-un75-timeline>

- 2022 Global Status Report for Buildings and Construction

[2022 Global Status Report for Buildings and Construction | UNEP - UN Environment Programme](#)

- Rock et al. 2020. Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- What is Building Decarbonization: <https://www.youtube.com/watch?v=xas8R7dVJrs>
- O que são as mudanças climáticas? <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-sao-mudancas-climaticas> (Consulta em 12.05.2024)

AGRADECIMENTOS



Aos professores da USJT Dr. Renan Picolo Salvador e Dr. Mostafa Galal pelo gentil convite para esta apresentação neste I SISCOS.

Contato: Químico Valdecir Angelo QUARCIONI – Prof. Dr. Pesquisador do IPT

quarciva@ipt.br