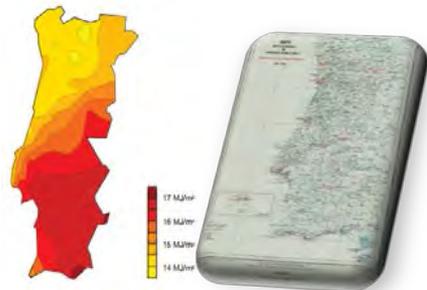


A CORROSÃO E A PROTEÇÃO DOS MATERIAIS NOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS SEM E COM CONCENTRAÇÃO



Estrutura da Apresentação

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA E A APOSTA NA **ENERGIA SOLAR**

A CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA E A ENERGIA SOLAR TÉRMICA

CORROSÃO E A PROTEÇÃO DOS MATERIAIS:

EM **SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS SEM CONCENTRAÇÃO**

Inquéritos e visitas de inspeção

Durabilidade dos *Revestimentos Absorsores Solares*



EM **SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS COM CONCENTRAÇÃO**

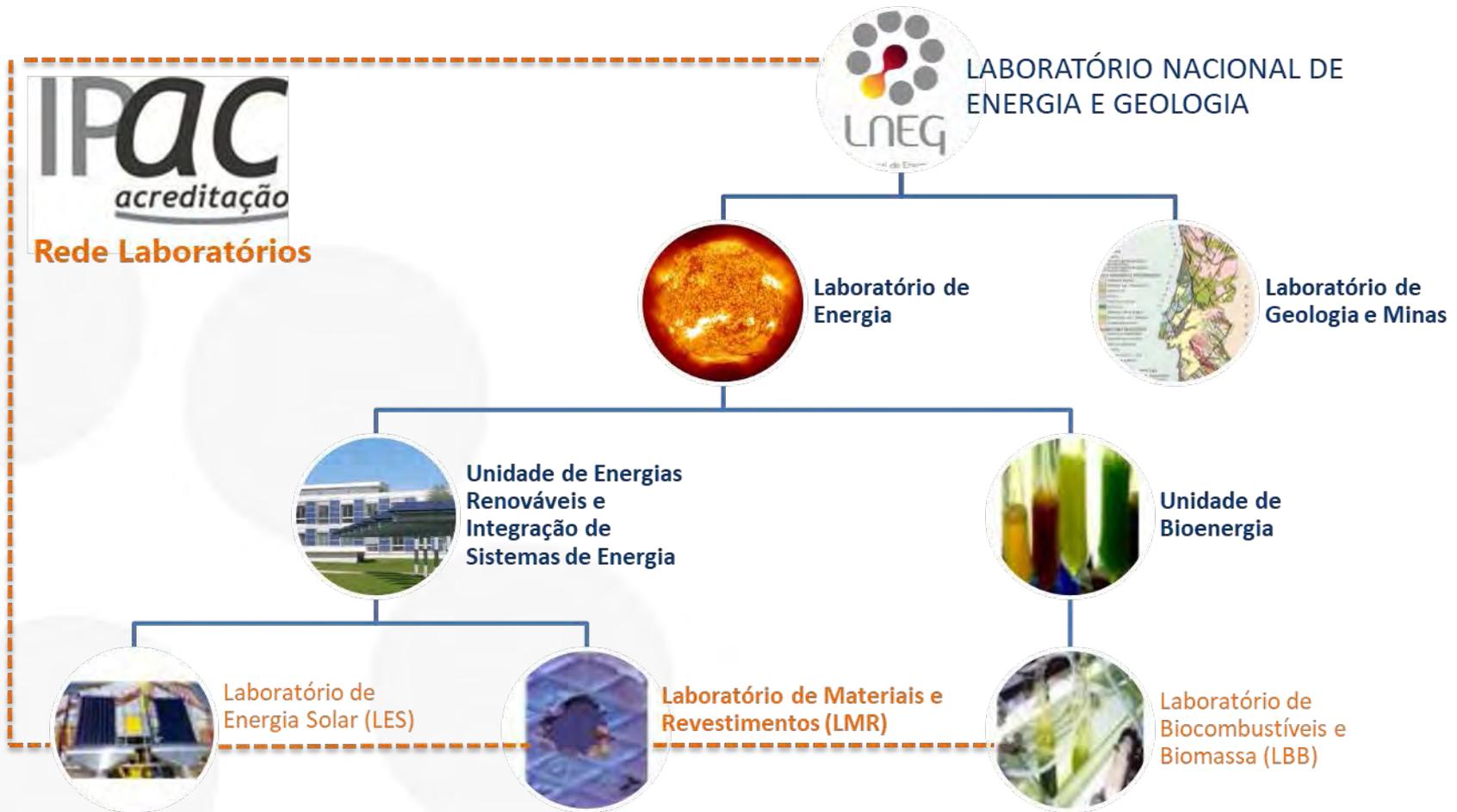
Materiais usados nos *Reflectores*

Armazenamento Térmico de Energia

(*Materiais em contacto com sais fundidos*)



LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia



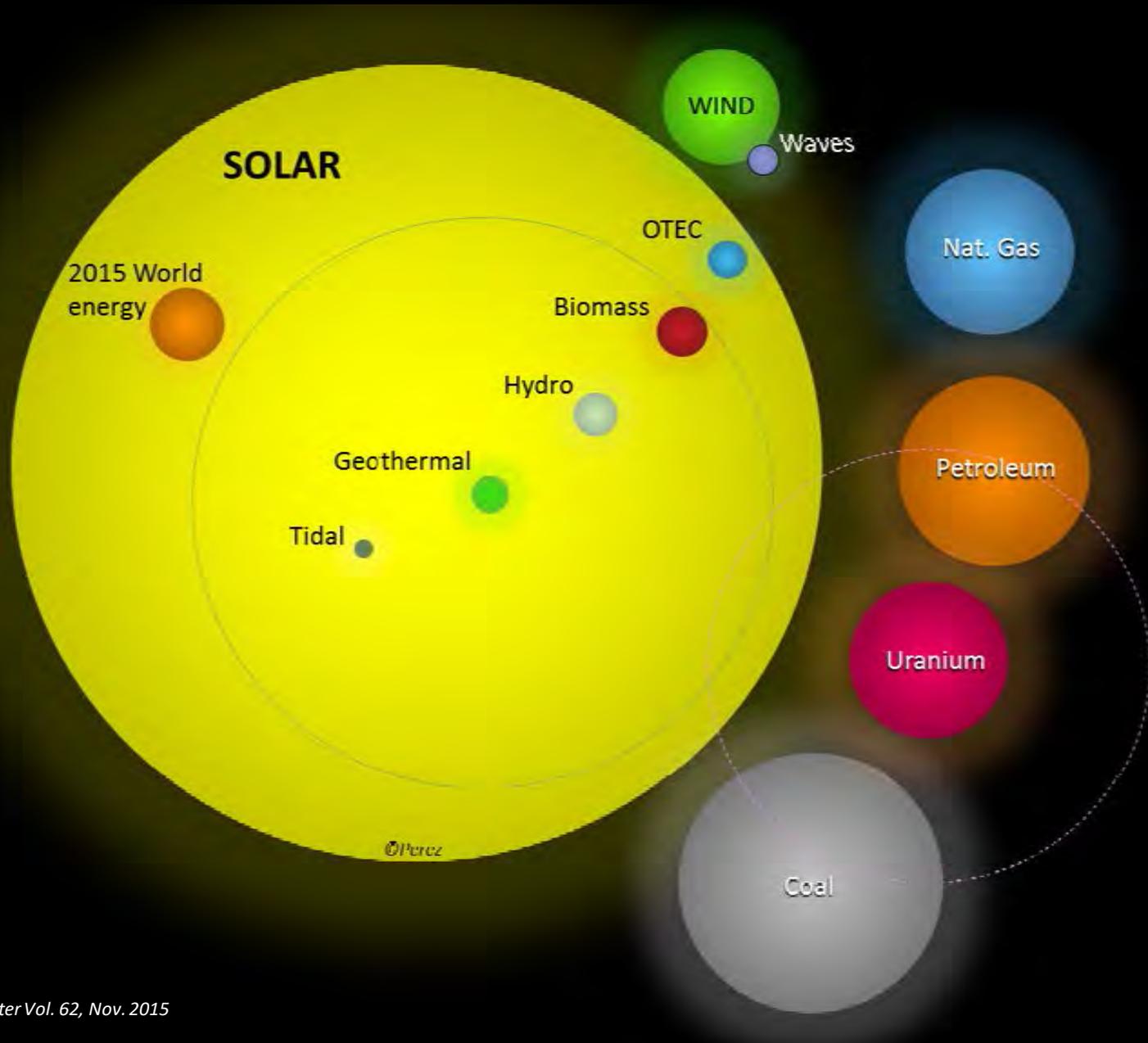
WORLD ENERGY
2015 Use ²⁶ 18.5 TWy/y

RENEWABLES

Solar ¹² 23,000 TWy/y
 Wind ³ 75-130 TWy/y
 Waves ⁴ 0.2-2 TWy/y
 OTEC ⁵ 3-11 TWy/y
 Biomass ⁶ 2-6 TWy/y
 Hydro ⁷ 3-4 TWy/y
 Geotherm. ^{8,22,23} 0.2-3++ TWy/y
 Tidal ² 0.3 TWy/y

FINITE

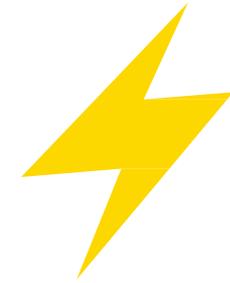
Nat. Gas ^{9,21} 220 TWy
 Petroleum ^{9,21} 335 TWy
 Uranium ^{13 to 20} 185++ TWy
 Coal ^{9,21} 830 TWy



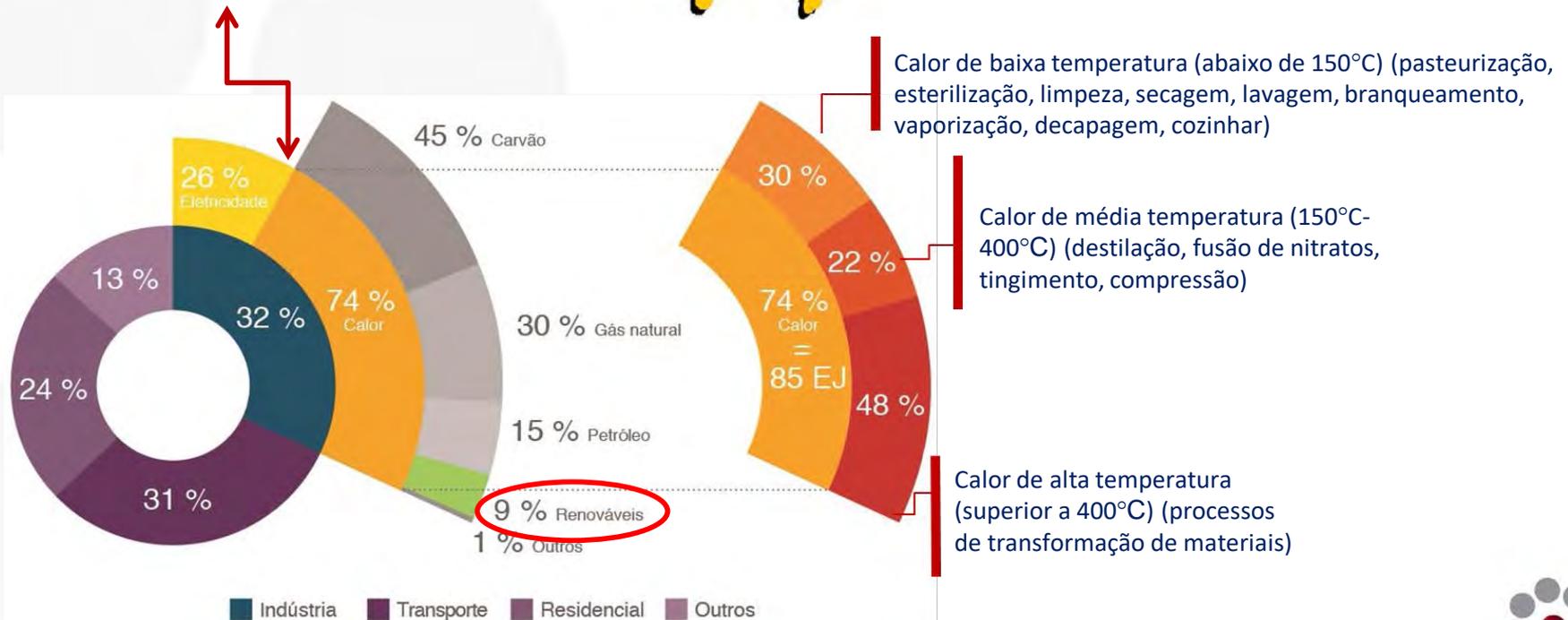
Energia Solar



Colectores solares
PRODUÇÃO DE CALOR



Módulos fotovoltaicos
PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE



100°C

200°C

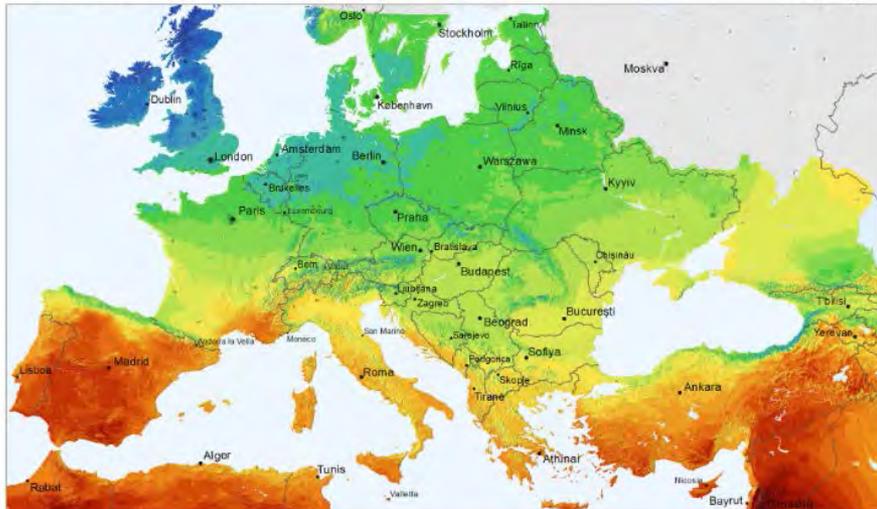
300°C

400°C



Direct Normal Irradiation (DNI)

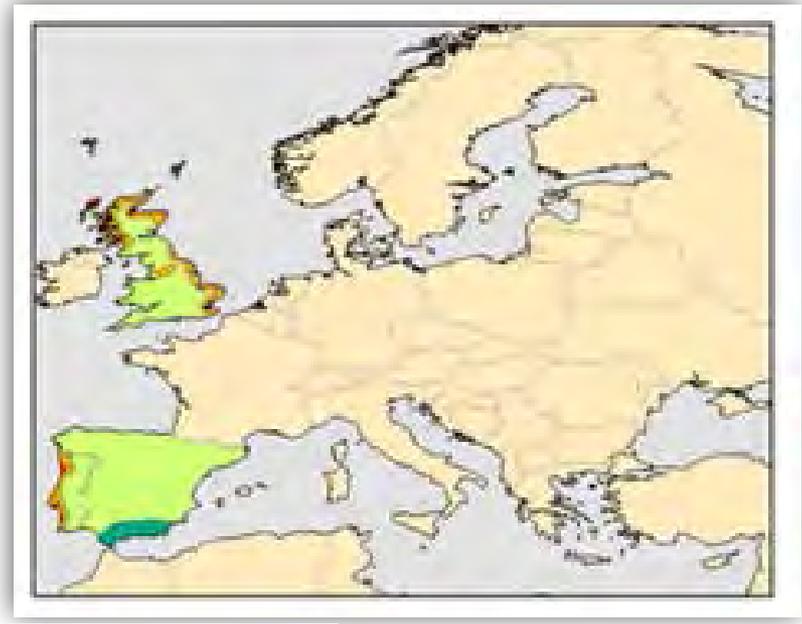
Europe



Average annual sum, period 1994-2010



DNI Solar map © 2014 GeoModel Solar



1:50.000.000

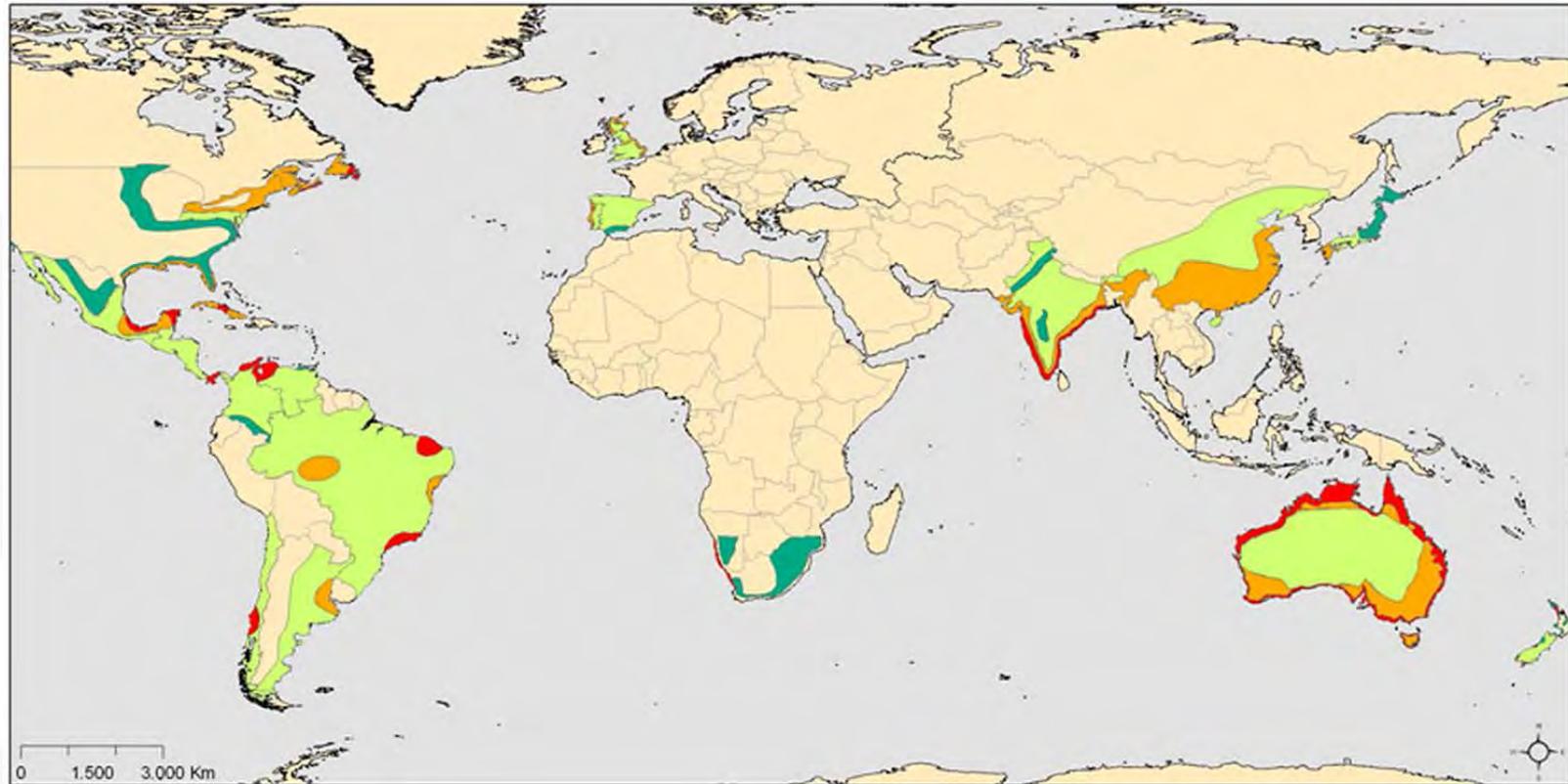
Legend

- Extremely severe
- Severe
- Moderate
- Mild
- No data
- Continent line
- National border

K.Slamova et al. *Photon. Energy*. 2(1), 2012
<http://dx.doi.org/10.1117/1.JPE.2.022003>



Dados de Corrosividade Atmosférica no Mundo

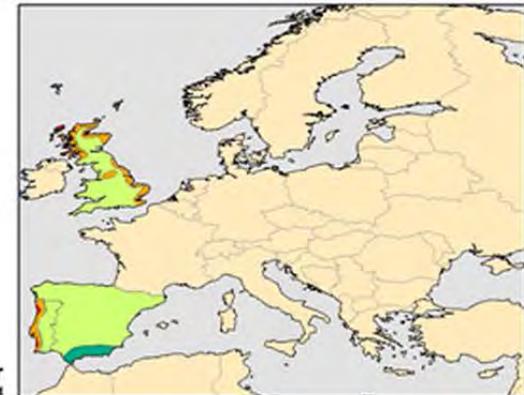


1:60.000.000

Legend



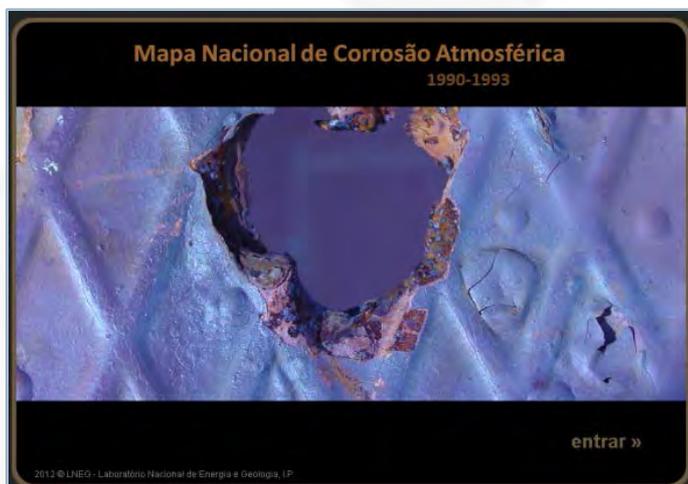
K.Slamova et al.. *Photon. Energy.* 2(1), 2012
(<http://dx.doi.org/10.1117/1.JPE.2.022003>)



Categorias de Corrosividade – Atlas de Corrosão Atmosférica

- C1 very low corrosivity
 - C2 low corrosivity
 - C3 medium corrosivity
 - C4 high corrosivity
 - C5 very high corrosivity
 - CX extreme corrosivity
- (ISO 9223: 2012)

Categoria corrosividade	Velocidades de corrosão (r_{corr}) dos metais				
	Unidades	Aço carbono	Zinco	Cobre	Alumínio
C1	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$r_{corr} \leq 10$ $r_{corr} \leq 1,3$	$r_{corr} \leq 0,7$ $r_{corr} \leq 0,1$	$r_{corr} \leq 0,9$ $r_{corr} \leq 0,1$	Desprezável -
C2	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$10 < r_{corr} \leq 200$ $1,3 < r_{corr} \leq 25$	$0,7 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$	$0,9 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,6$	$r_{corr} \leq 0,6$ -
C3	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$200 < r_{corr} \leq 400$ $25 < r_{corr} \leq 50$	$5 < r_{corr} \leq 15$ $0,7 < r_{corr} \leq 2,1$	$5 < r_{corr} \leq 12$ $0,6 < r_{corr} \leq 1,3$	$0,6 < r_{corr} \leq 2$ -
C4	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$400 < r_{corr} \leq 650$ $50 < r_{corr} \leq 80$	$15 < r_{corr} \leq 30$ $2,1 < r_{corr} \leq 4,2$	$12 < r_{corr} \leq 25$ $1,3 < r_{corr} \leq 2,8$	$2 < r_{corr} \leq 5$ -
C5	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$650 < r_{corr} \leq 1500$ $80 < r_{corr} \leq 200$	$30 < r_{corr} \leq 60$ $4,2 < r_{corr} \leq 8,4$	$25 < r_{corr} \leq 50$ $2,8 < r_{corr} \leq 5,6$	$5 < r_{corr} \leq 10$ -
CX	$g(m^2.a)$ $\mu m/a$	$1500 < r_{corr} \leq 5500$ $200 < r_{corr} \leq 700$	$60 < r_{corr} \leq 180$ $8,4 < r_{corr} \leq 25$	$50 < r_{corr} \leq 90$ $5,6 < r_{corr} \leq 10$	$r_{corr} > 10$ -



<http://geoportal.lneg.pt/>

Durabilidade dos Materiais para a Energia Solar Térmica



DESAFIOS

Aumentar a eficiência e reduzir os custos de construção, operação e de manutenção (redução do LCOE)



COLETORES SOLARES TÉRMICOS

COLETORES PLANOS

- Absorção
- Caixa do coletor
- Cobertura
- Fluido de Transferência de Calor
- Isolamento

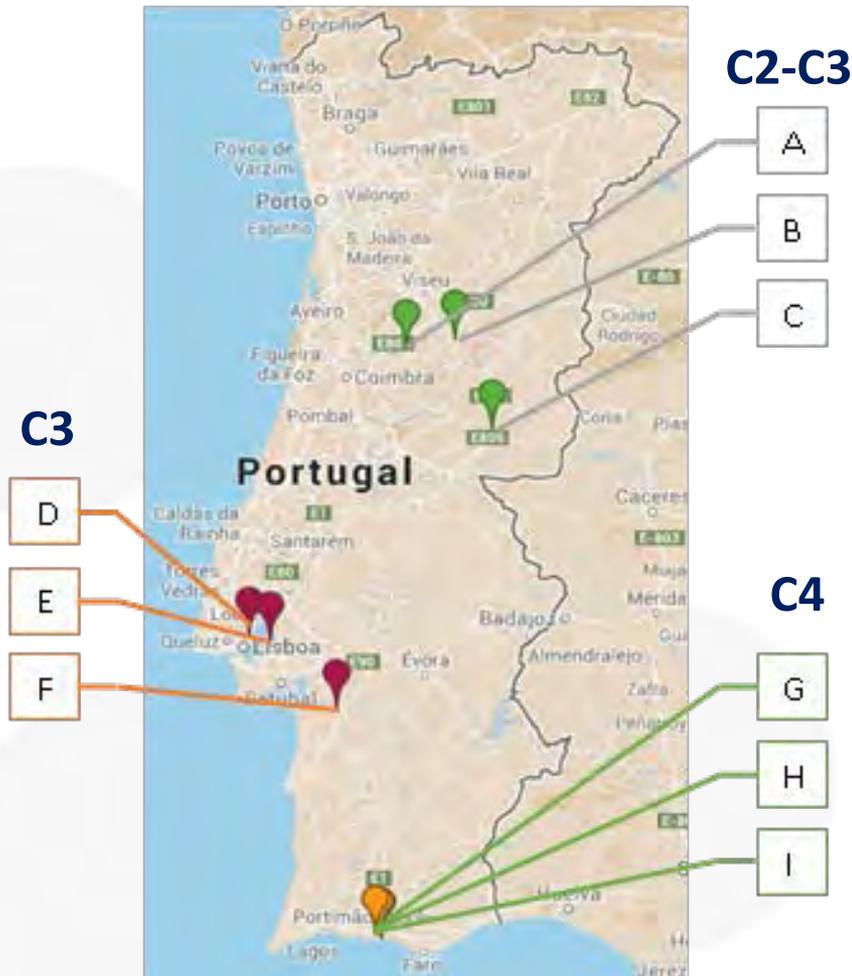


TUBOS DE VÁCUO

COLETORES CONCENTRADORES PARABÓLICOS COMPOSTOS - CPC



Inspeção e análise de falha em função da corrosividade ambiental



Inquérito e visitas de inspeção realizados às instalações existentes em Portugal de média e grande dimensão, com tempos similares de funcionamento (13-17 anos)

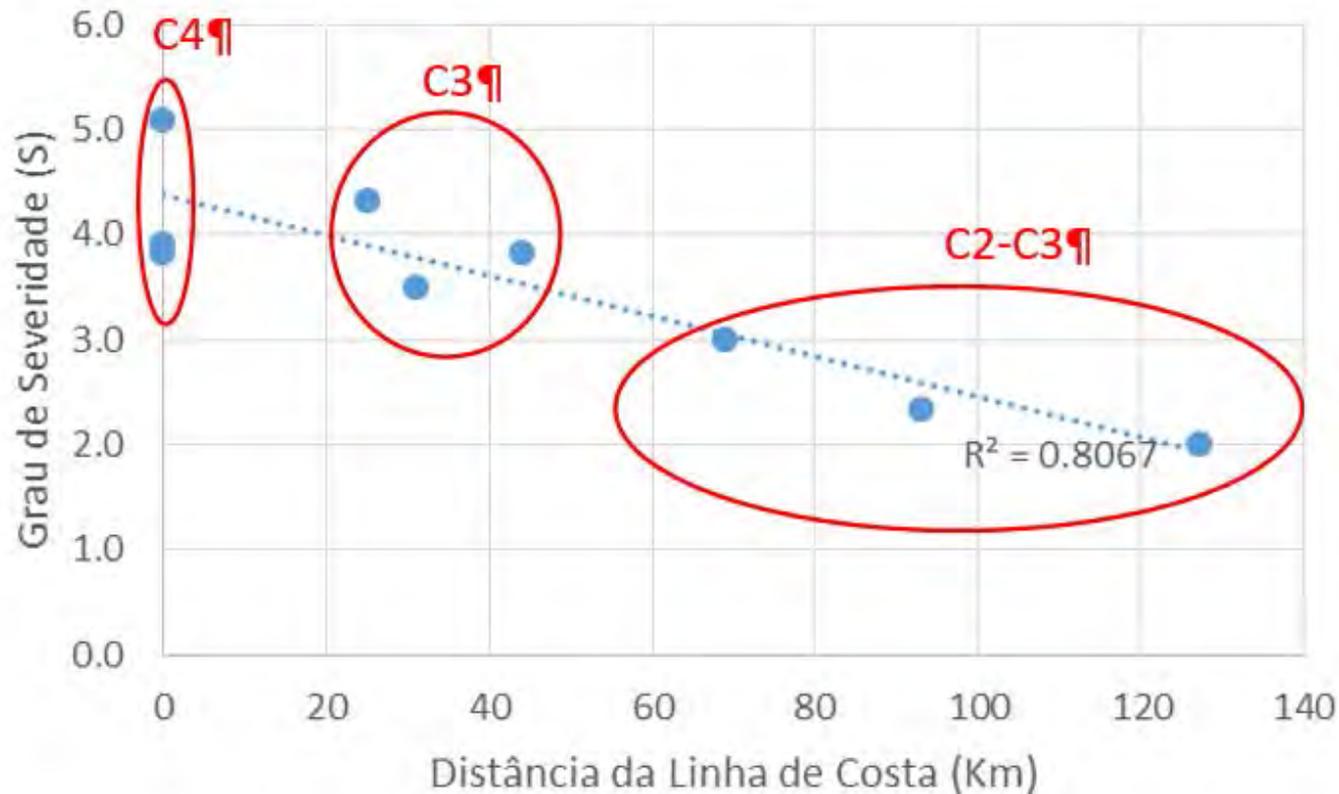
- 1) Identificar os danos existentes em coletores solares térmicos;
- 2) quais os componentes com maiores danos e
- 3) verificar se existe correlação entre o processo de degradação, a corrosividade ambiental de Portugal e a proximidade da orla marítima.

Grau de Severidade_ Instalações visitadas



Severidade (S)	Valor
Nenhum efeito no componente	1
Efeito menor no produto mas nenhum efeito no funcionamento no sistema	2-3
Risco de falha de funcionamento	4-6
Certeza de falha no funcionamento do produto	7-9
Falha que pode afetar a segurança	10

Inspeção e análise de falha em função da corrosividade ambiental

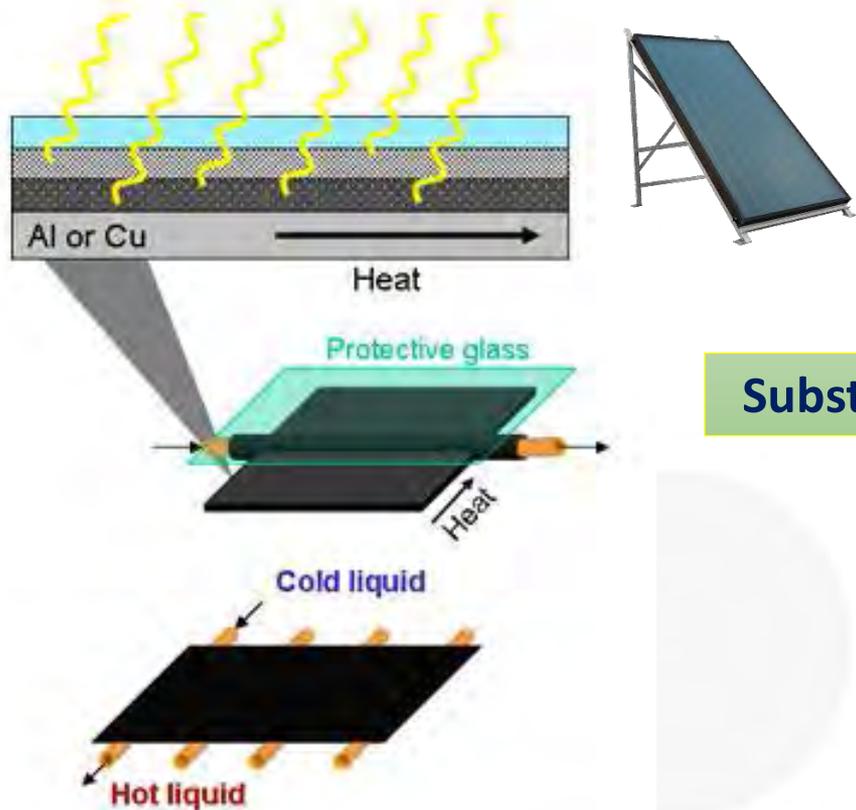


Correlação entre o grau de severidade e a distância da costa para as 9 instalações.

O desempenho dos colectores solares térmicos depende da durabilidade dos seus componentes, em particular da **superfície absorvora** e dos componentes elastoméricos, bem como do sistema de ventilação do colector.

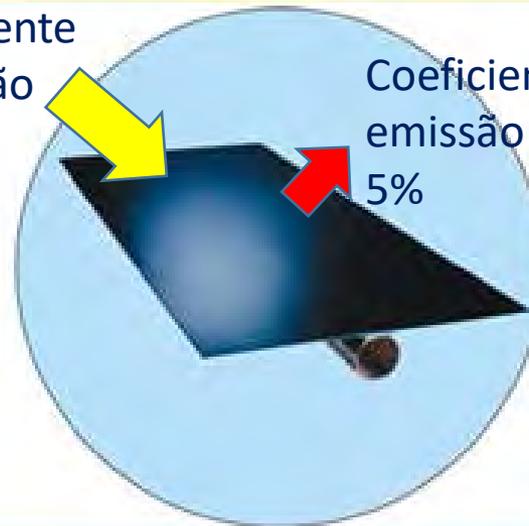
Absoror

Absorção da energia radiante, transferindo-a sob a forma de calor para o fluido de transferência



Coeficiente absorção 95%

Coeficiente emissão 5%



Substrato metálico



Revestimento

Cu
Al

Limitações dos revestimentos PVD:

Durabilidade

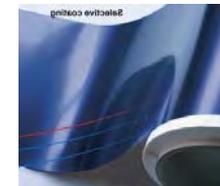
Corrosão

Resistência à humidade e condensação

Custo

Complexas técnicas de produção

Resistência à riscagem



<http://www.kemi.uu.se/research/inorganic-chemistry/research-areas/nanomaterials-from-solution/spectrally-selective-solar-heat-absorbers/>

Qualificação da Superfície Absorsora

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
22975-3

First edition
2014-07-01

Solar energy — Collector components
and materials —

Part 3:
Absorber surface durability

Energie solaire — Composants et matériaux du collecteur —
Partie 3: Durabilité de la surface de l'absorbeur



Resistência térmica

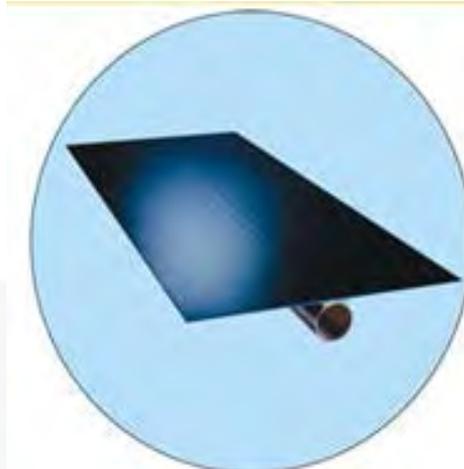


**Resistência Humidade
e Temperatura com
condensação**



**Resistência atmosferas
húmidas com dióxido de
enxofre**

ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO
Pull-off (ISO 4624:2002)
Quadrícula (ISO 2409:2007)



PROPRIEDADES ÓTICAS

$\Delta\alpha_s$ = alteração do coeficiente absorção

$\Delta\varepsilon_T$ = alteração da emissividade



Corrosão e proteção anticorrosiva dos
revestimentos

Superfície absorsora qualificada

=

Durabilidade superior a 25 anos

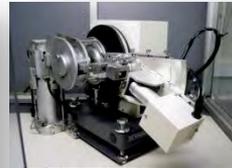
Durabilidade das Superfícies Absorptoras



Estações Atmosféricas



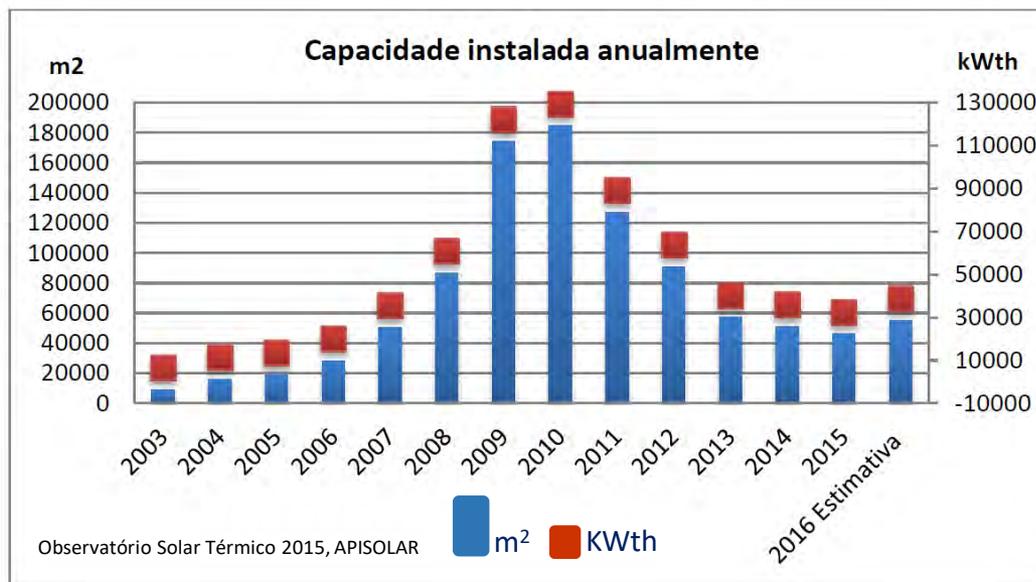
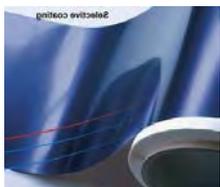
Estudos em Laboratório



Diamantino et al. Solar Energy Materials and Solar Cells,
(2017) 166, 27-38

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.004>

Durabilidade dos Materiais para a Energia Solar Térmica



DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS

NOVOS ENSAIOS E INFRAESTRUTURAS LABORATORIAIS

ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Tecnologias CSP

Energia Solar Termoelétrica (STE)

Colector cilíndrico-parabólico



Foco Linear

Reflector linear de Fresnel



Foco Linear

Torre Solar

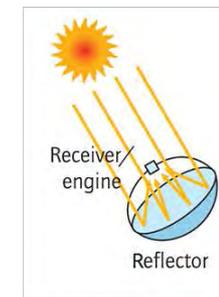
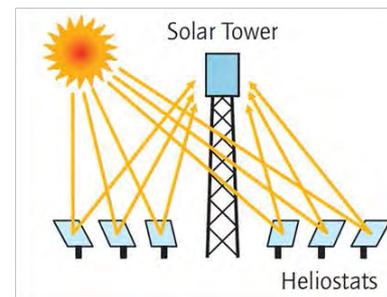
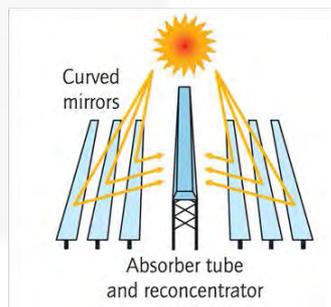
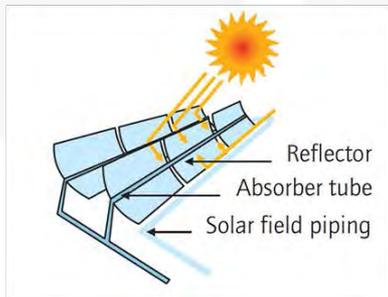


Foco Pontual

Disco parabólico



Foco Pontual



Luz Solar

↓
concentração

Calor

↓
Turbina

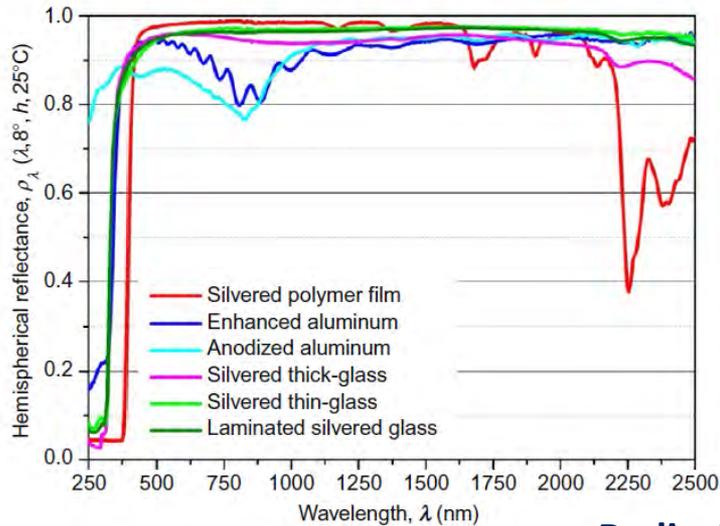
Electricidade

↔ Armazenamento
térmico de energia

REFLECTORES

MATERIAIS METÁLICOS E HTF

Refletores para CSP



Type of mirror	Solar hemispherical reflectance
Silvered thin-glass	0.94–0.96
Laminated silvered glass	0.95–0.96
Silvered thick-glass	0.94–0.95
Silvered polymer film	0.90–0.95
Aluminum	0.83–0.90

A. Fernández-García *et al.* *Mirrors in The performance of CSP systems. Analysis, measurement and assessment.* Peter Heller (Ed.) 2017

Radiação

Temperatura



Abrasão →

Tensões mecânicas →



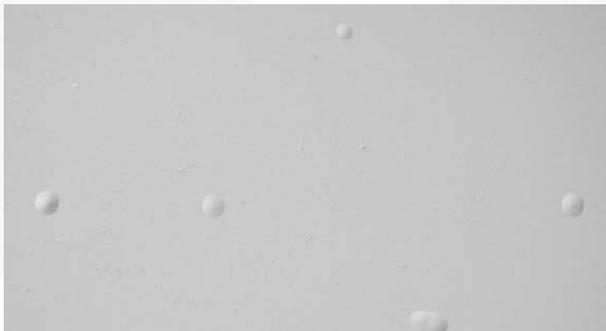
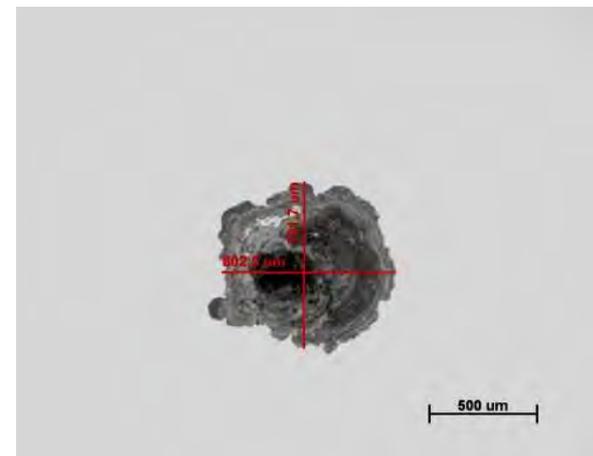
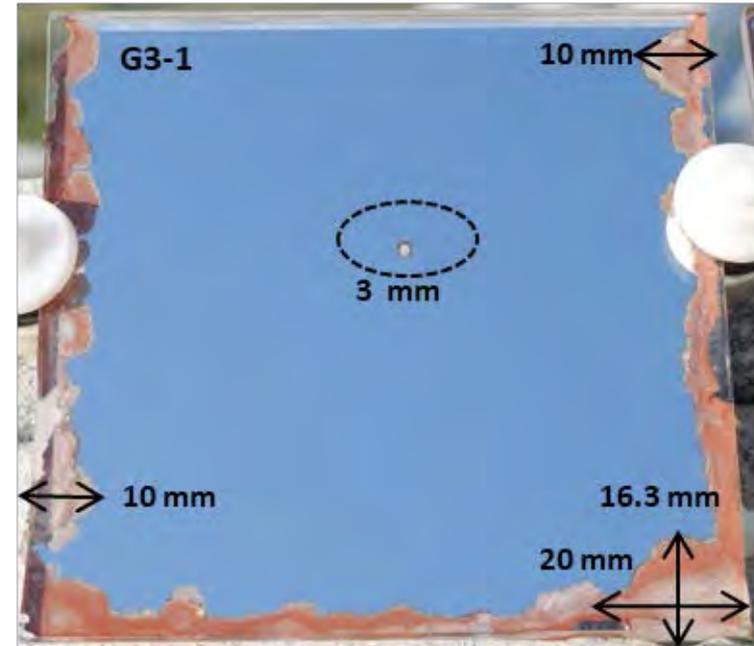
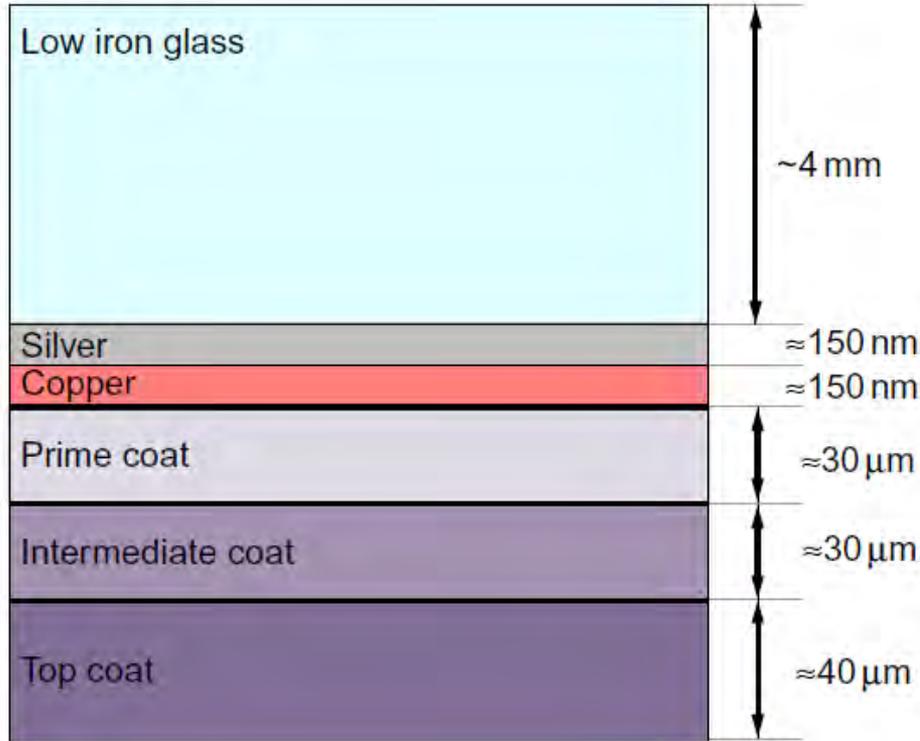
← Poluentes atmosféricos

← Poeiras atmosféricas

← Humidade relativa

Reflectores para CSP

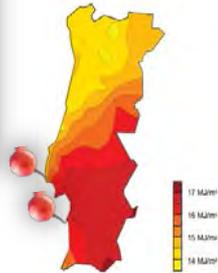
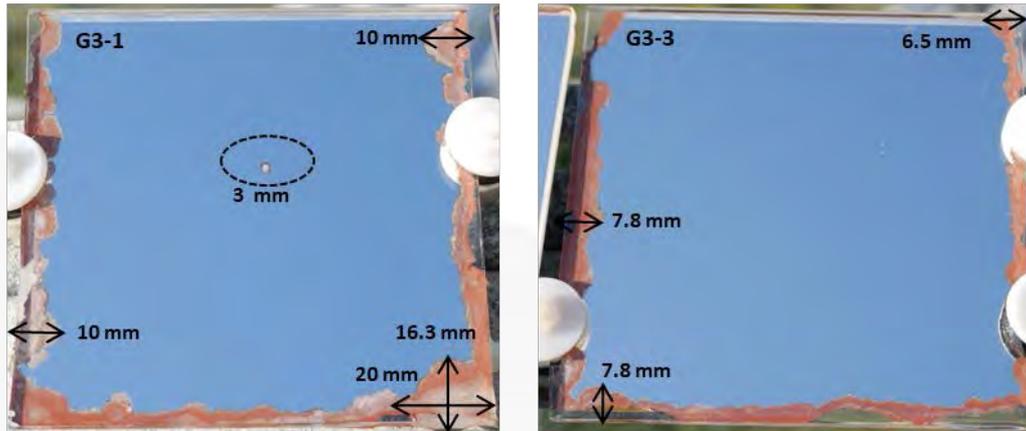
Reflectores de Vidro



Refletores para CSP

Refletores vidro

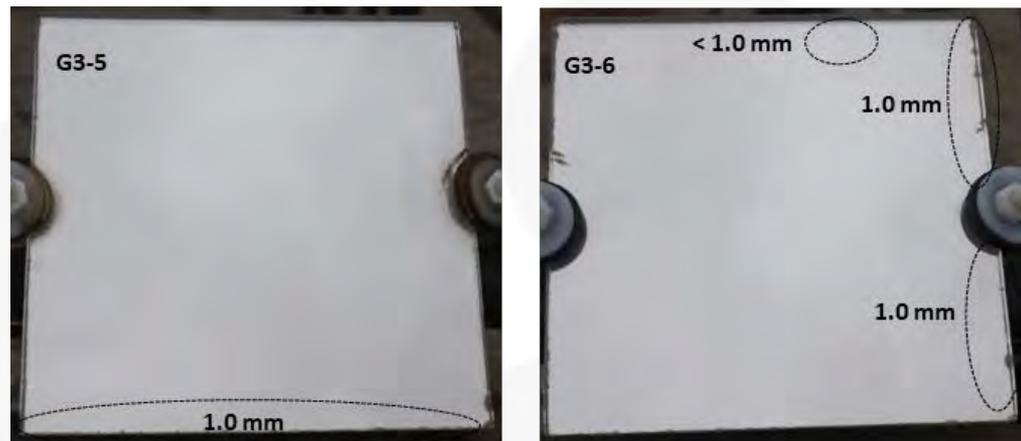
(Sines – atmosfera corrosividade muito alta - extrema)



Máxima progressão da corrosão a partir das arestas **20 mm**;
Corrosão fora das arestas (\varnothing 3mm);
Descamação do revestimento orgânico a partir das arestas.

Refletores vidro

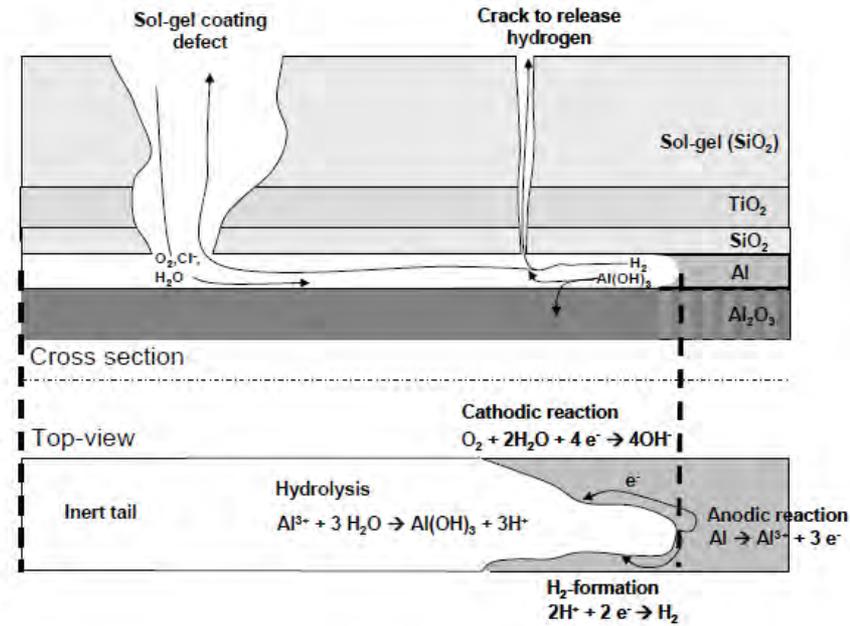
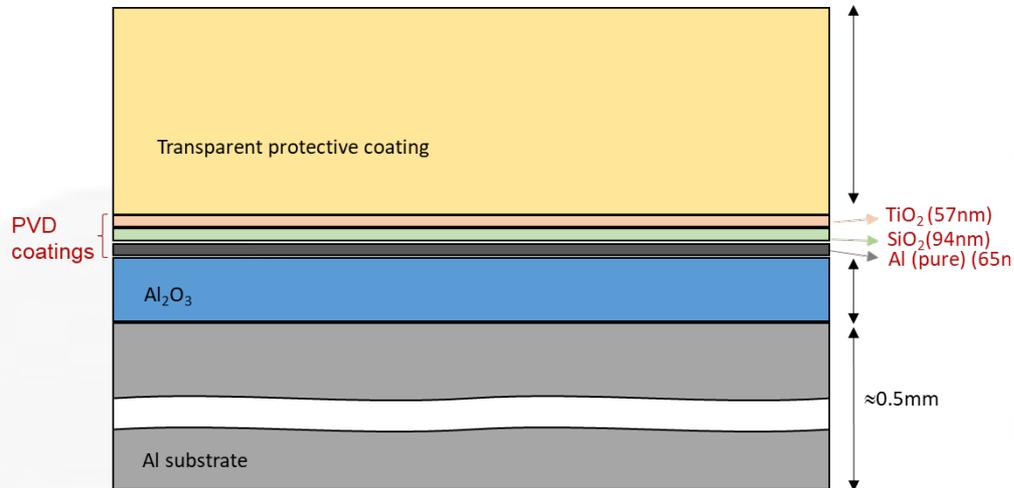
(Lumiar Lisboa – atmosfera corrosividade baixa - média)



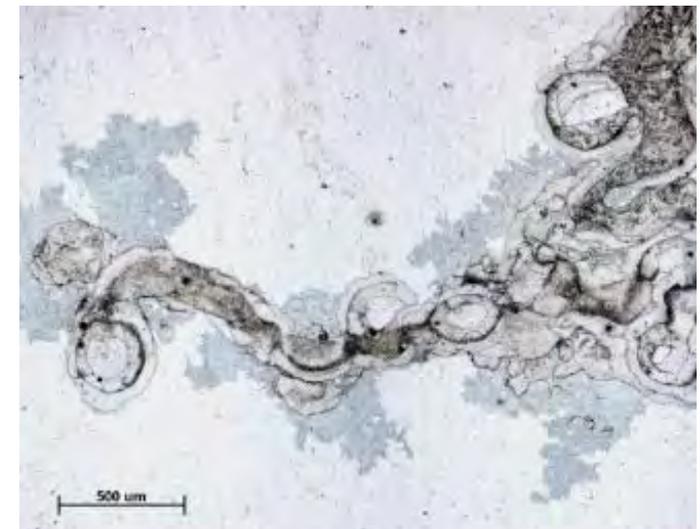
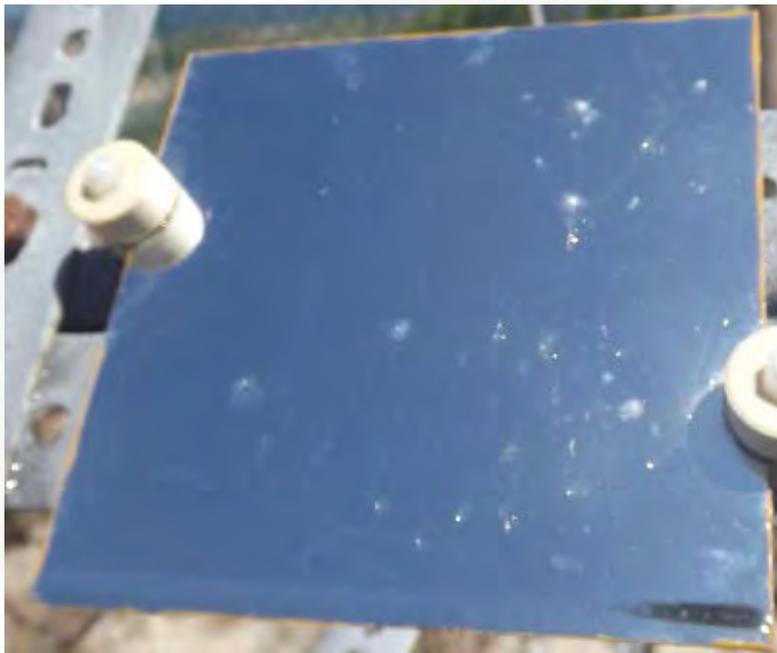
Máxima progressão da corrosão a partir das arestas **1 mm**;
Corrosão fora das arestas (<1 mm);
Descamação do revestimento orgânico a partir das arestas apenas na aresta superior

Reflectores para CSP

Reflectores de Aluminio



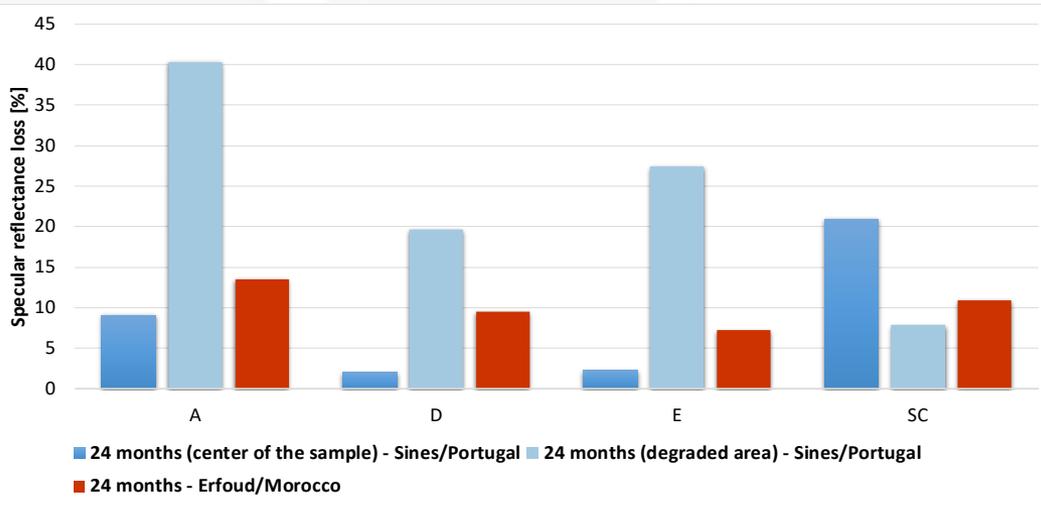
Sutter, F. and Wette, J. and Lopez-Martin, R. (2012) SolarPACES 2012



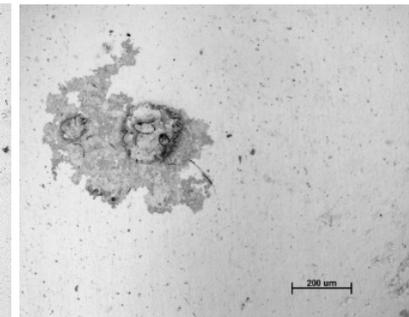
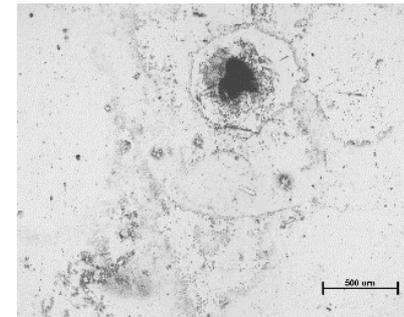
Reflectores para CSP

Erfoud_Marrococ

Sines_Portugal

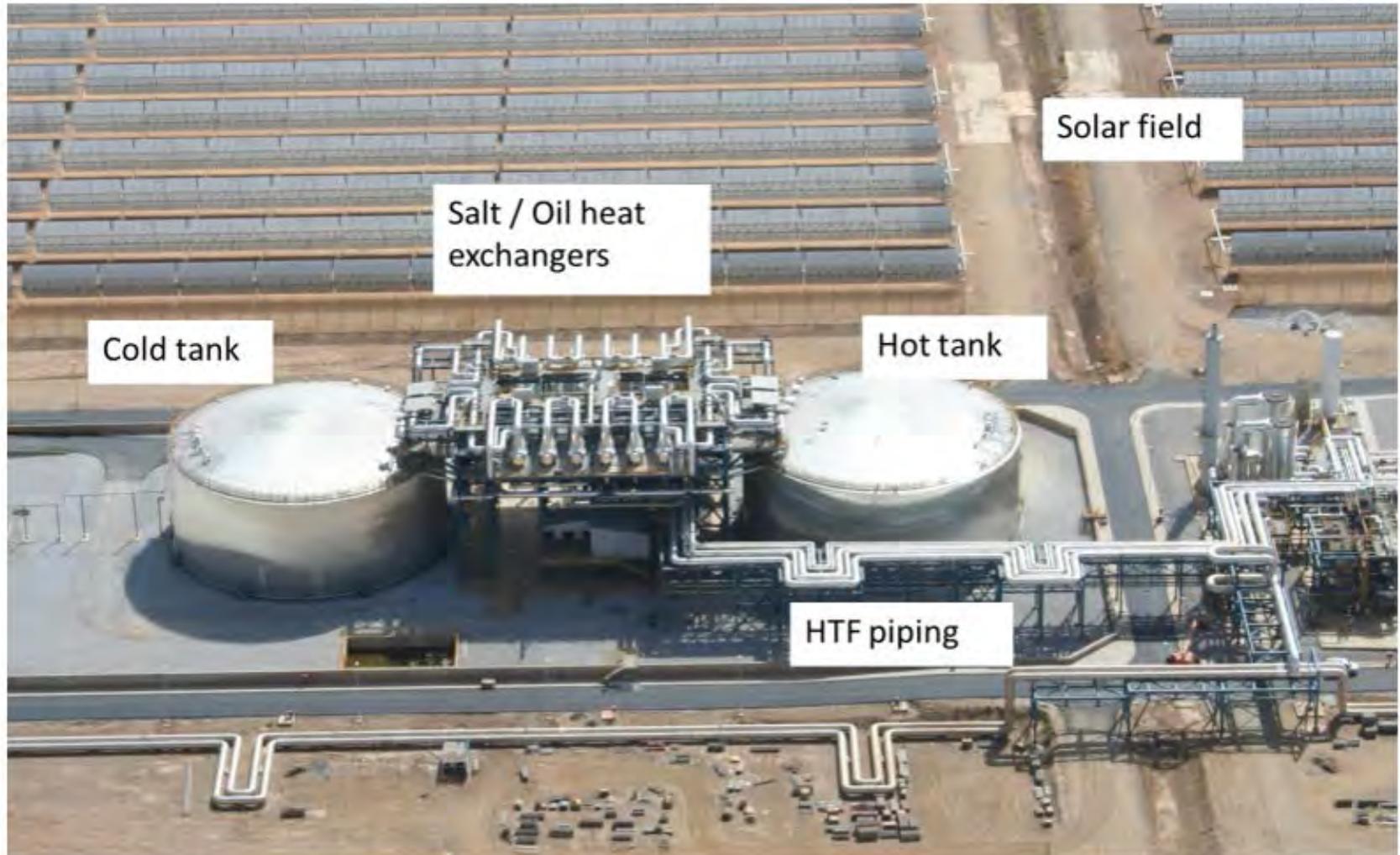


Diamantino et al. Eurocorr 2017



Micropicadas
Corrosão revestimento PVD
Corrosão por picadas

Armazenamento Térmico de energia – Sais fundidos



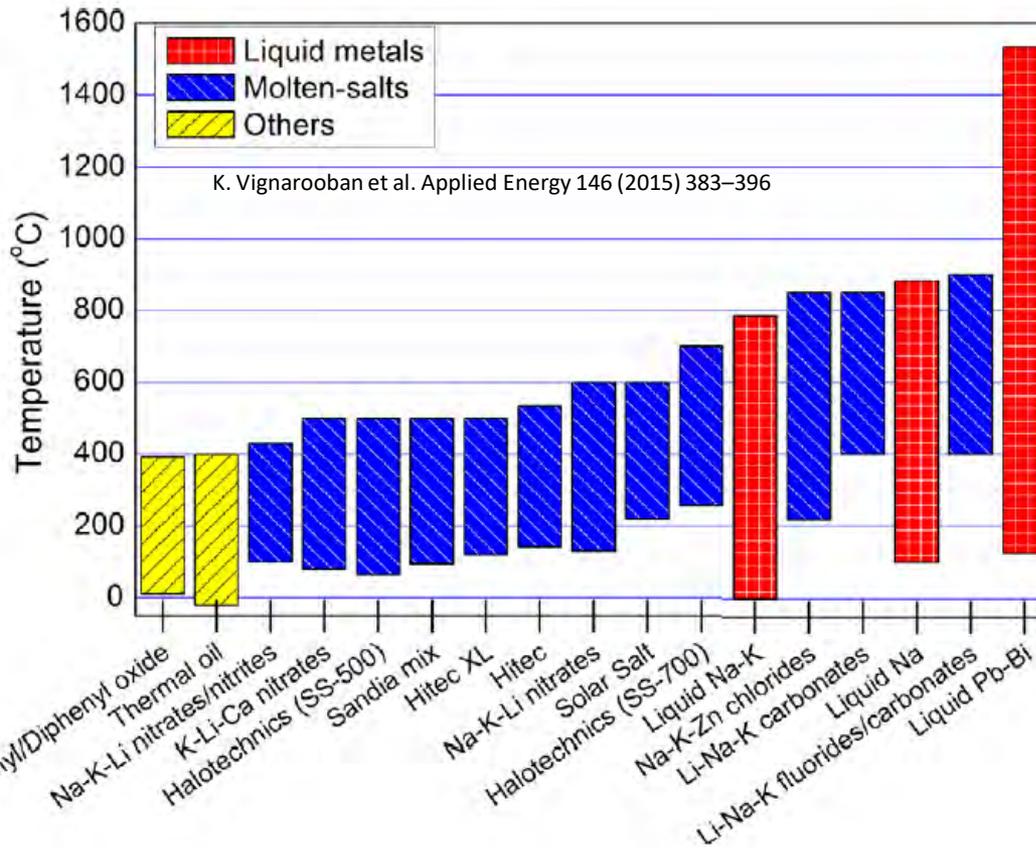
<https://bigdishesolar.com/>

Armazenamento térmico de energia – Sais fundidos



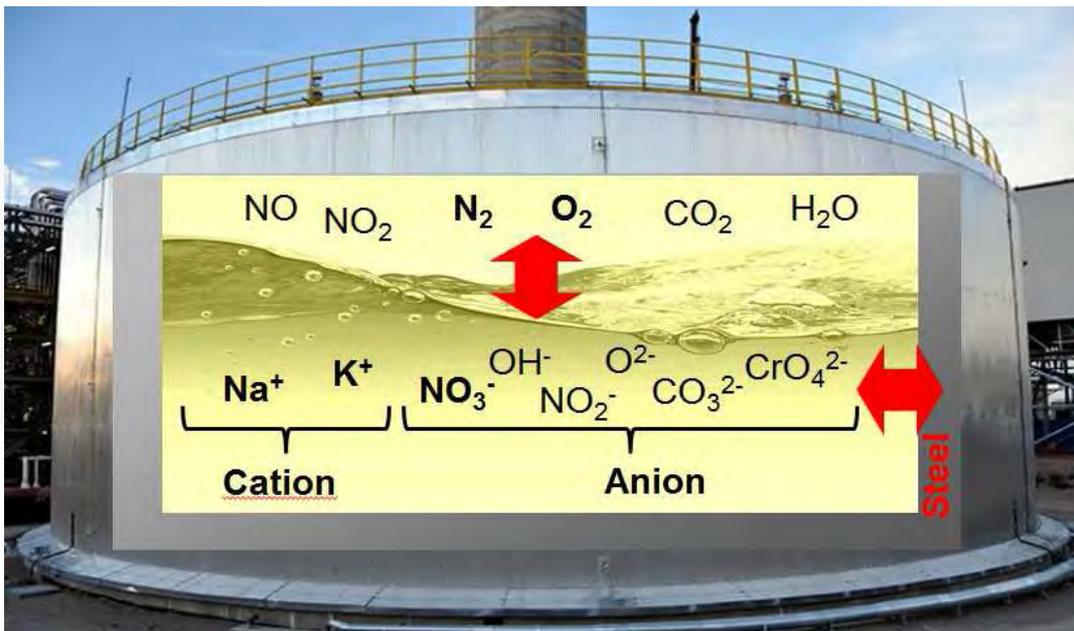
Elevadas temperaturas são necessárias para aumentar a eficiência do Sistema CSP. Os sais fundidos continuam a ser os candidatos mais promissores para atingir temperaturas até aos 800°C.

Gamas de temperatura de fusão / funcionamento dos fluidos de transferência de calor (HTF)

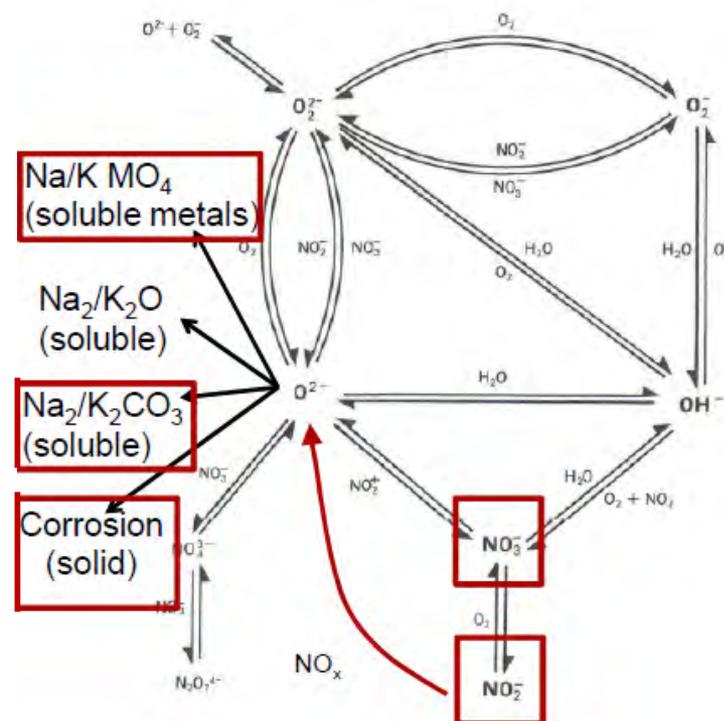


- Ponto de fusão
- Calor específico
- Condutividade térmica
- Decomposição
- Degradação química
- Densidade/viscosidade
- Estabilidade ao longo do tempo
- Corrosão

Armazenamento de energia – Sais fundidos



Estabilidade dos materiais metálicos em contacto com os HTF é um parâmetro crucial para a longevidade dos sistemas CSP.



Que materiais metálicos e quais os tempos de vida

Lovering, D.G. 1982



Sais fundidos e a Corrosão

SAIS FUNDIDOS

Sal solar (60% NaNO_3 + 40% KNO_3)

Sais ternários (Na, K, Ca)

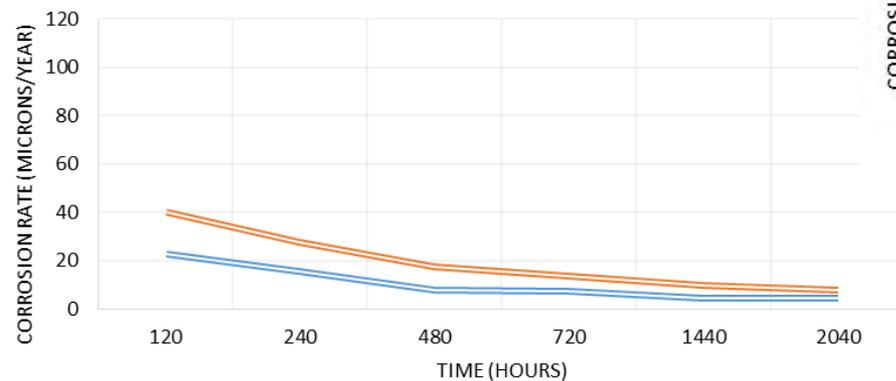
Aços inoxidáveis austeníticos

Aços inoxidáveis ferríticos



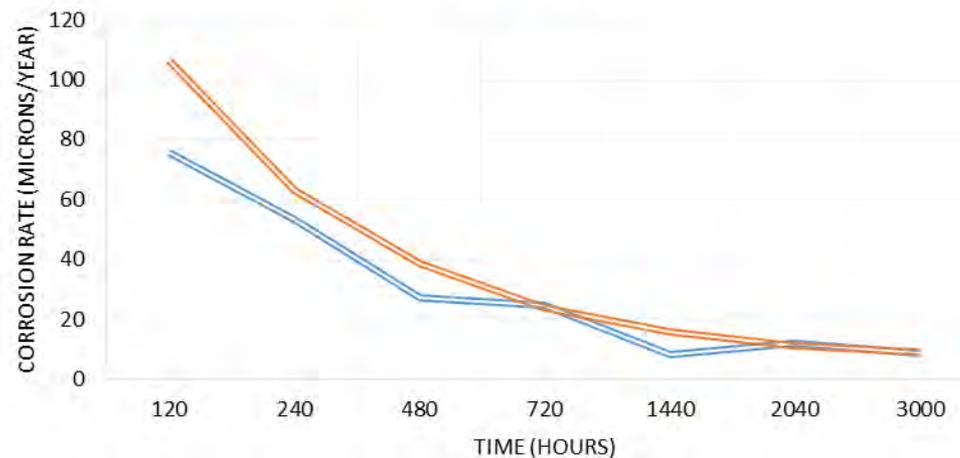
Ternary salt (NaNO_3 (15%); KNO_3 (43%); $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (42%) 500°C

— 321H SS — 316L SS



Solar Salt Temp 550°C

— 316L SS — 321H SS



A. Gomes et al 2016
doi:10.18086/eurosun.2016.03.12 Available at
<http://proceedings.ises.org>

MUITO OBRIGADA PELA ATENÇÃO



www.lneg.pt

Este trabalho teve o Apoio financeiro da FCT através dos projetos DURASOL (FCOMP-01-0124-FEDER-027507 (Ref. FCT RECI/EMS-ENE/0170/2012)) e LIFESOLAR POCI-01-0145-FEDER-016709 FCT (PTDC/EMS-ENE/0578/2014)



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Project STAGE-STE - Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European excellence in Concentrating Solar Thermal energy (7FP) (2014-2018) GA 609837



New Storage Latent and Sensible Concept for High Efficient CSP Plants.
H2020 project, GA No. 720985



Funded by the
European Union

